

目 錄

第一章	連接器總述	2
第二章	接觸介面及接觸過程	20
第三章	接觸鍍層	32
第四章	接觸彈片材料	62
第五章	連接器用工程熱塑性材料	85
第六章	可分離式電連接器	102
第七章	永久性連接概述	121
第八章	電線與線纜	125
第九章	電線與線纜的機械式永久連接	138
第十章	印刷電路板	157
第十一章	至電路板的永久性連接	173
第十二章	連接器的應用	187
第十三章	連接器的類型	213
第十四章	連接器／插座測試	234

第一章 連接器總述

這一章包括連接器技術的總述，在後面的章節之中將會提供各獨立主題的詳細背景資料。

定義一個連接器至少有兩種方法：從功能上和從結構上。

第一種描述連接器的方法是就其應該達到和必須達到的要求而言的。這樣的定義集中在連接器所應用的功能性和操作的環境。第二種描述連接器的方法集中在連接器本身，及它的設計方法和製造材料。由於連接器的應用、操作環境及功能性要求直接影響連接器的設計，本文就從連接器的功能性定義開始。

1.1 連接器功能

連接器的應用範圍十分廣泛，本手冊的重點將會放在電連接器上，其主要應用於 3C 產品。從這個重點可以提出電連接器的功能性定義是：

電連接器是一種電機系統，其可提供可分離的界面用以連接兩個次電子系統，並且對於系統的運作不會產生不可接受的作用。

定義中關鍵詞是”電機系統”，”可分離的”和”不可接受的作用”。

連接器是一種電機系統是因為，它是通過機械方法產生的電性連接。如將要討論到的，機械式彈簧的偏向會在配合的兩部分間產生一個力量，這就使得接口配合面之間產生金屬性接觸。應用連接器在首要地方的原因是配合接口具有可分離性。可分離性的需要性具有很多的原因。它可以使得獨立地製造部份或子系統而最後裝配可在一個主要的地方進行。可分離性也可以使得零件或子系統的維護或升級不必修改整體個系統。可分離性得以應用的另一個原因是可攜帶性和支持外圍設備的擴展。

另一方面，定義中的可分離性引入了一個額外的子系統間的界面，此界面不能引入任何”不可接受的作用”，尤其是在系統的特性上不能受電訊的影響，這些影響包括如不可接受的扭曲變形和系統間的信號退化，或者是通過連接器的電源損失，以毫伏損失計算的電源損失，將會成為功能性的主要設計標準，因此主機板的電力需求也將增加。

可分離性的需求和”不可接受性”的限度要由連接器的應用而定。可分離

性包括配合周期的數目，配合周期是指連接器在不影響其性能必須提供的，以及與另一連接器相配合所必需的作用力。典型的配合周期需求其範圍從內部連接器的幾十個周期到外圍設備的幾千個周期，比如 PCMCIA 型連接器。由於電路或功能的數量以及連接器互相連接的增加，配合力量的需求變得更加的重要。爲了提供更多的功能性，連接器上端子的位置也必須要增加，這樣就導致了更高的連接器配合力量。由連接器的使用和功能而定，其端子數從幾十到上千不等。可分離性和配合力量需求將會詳細地在 1.5.1 部分中論述，同時歸類連接器的互相連接的技術水準也將加以描述。

現在我們將要考慮的轉向第二種定義連接器的方法-結構性的或者說設計/材料上的定義。

1.2 連接器結構

一個基本的連接器包括四個部分：

- 接觸界面
- 接觸塗層
- 接觸彈性元件
- 連接器塑膠本體

上述元件已列在圖表 1.1 中。

本手冊將會在后面的章節中詳細介紹上述元件中的每一件，既要從材料上又要從設計上介紹。從這個意義上，一個概要的各個元件介紹將能提供足夠后述討論的上下文背景。

圖 1.1 爲簡要的連接器相交剖視圖，插圖(A)爲接觸塗層示意圖，插圖(B)爲接觸界面微觀結構圖。

1.2.1 接觸界面

事實上必須考慮到有兩種不同的接觸界面：可分離界面和固定(永久性)界面。可分離界面(圖 1.1， 插圖 A)由於在首要的地方使用連接器而已經被明確的提到。固定(永久性)界面是當兩個子系統相連接時在連接器功能性定義中

被提到。這些界面被稱為固定(永久性)界面是因為，一般說來它們只製造一次而固定使用。固定連接的例子包括位於圖 1.1 左邊的卷曲型連接和位於圖 1.1 右邊的壓力型。在可分離性界面和固定連接之間存在很多的不同的點，包括結構上和需求上的，它們在基本元件上具有共同之處。在兩種情況下，產生和維護金屬接觸界面需要達到我們所期望的電力要求。此外，在兩種情況下，金屬性界面的產生是通過機械方法。

可分離界面是在每次連接器配合時建立的。界面的結構主要是由接觸端的幾何形狀、端子之間的作用力以及接觸塗層而定。如圖 1.1 中插圖 B 所示，可分離界面包括有微小的連接部，位於微觀下的粗糙表面在常力的接觸之下。可分離界面形態學將會在第二章中加以詳細描述。從這個意義上講，足以陳述接觸界面的形態學將決定三個重要的連接器功能性參數：接觸阻力，連接器配合力以及連接器耐用性(例如：配合周期將仍然支持其性能而不會退化)。

很多固定式連接分屬於兩種基本類別：冶金式和機械式。冶金式如焊接，它要由連接器和子系統之間接觸界面的結構而定。低溫焊接是主要的冶金式連接，高溫焊接同樣也被應用，並且在較小的線纜中應用得越來越多。低溫焊接連接在製造印刷線路板裝配上尤其重要。而許多零組件要被焊接在印刷線路板，連接器就是其中最大的零組件之一。兩種主要的焊接技術：穿孔焊接和表面焊接將會在 1.4.2 部分和第 11 章中介紹。

機械式的固定連接有卷曲型，insulation displacement，壓力型，遮蔽型。機械式的固定連接的圖解如圖 1.2 所示。卷曲型和 insulation displacement 型連接主要用在線纜上，壓力型連接主要用於通孔鍍金的印刷線路板上，遮蔽型連接是用在插入式印刷線路板。每一種都將會在后面的章節中詳細介紹。

1.2.2 接觸塗層

接觸塗層如圖 1.1 中插圖 A 所示，顯示了兩個重要的功能：

- 避免接觸彈簧基部金屬腐蝕
- 優化接觸界面的結構

第一個功能非常簡單僅僅需要接觸彈簧組件一般為銅合金，完全被塗層覆蓋，並且塗層自身能防腐蝕和能像薄膜一樣覆蓋在表面。而第二個功能就

要複雜得多。

優化接觸界面的方法，其實質就是對出現在接觸界面上的薄膜的規劃管理。如前所述，一個穩定且較小的接觸阻力由一不含薄膜的金屬界面產生。兩種主要的接觸塗層，貴重金屬(金，鈀以及由它們組成的合金)和非貴重金屬(如錫)，它們的不同主要是指在接觸界面上的薄膜類型。對貴重金屬(尤其是金)來說，接觸塗層是惰性的，維護接觸界面的完整性需要保護防止外部塗層的薄膜形成，主要是防止銅的接觸彈簧。對錫這種最常用的非貴重金屬來說，存在其表面的氧化問題是主要被考慮的。這些不同的腐蝕過程將被反映到連接器的設計標準和性能上。接觸塗層的性質和選擇的標準將會在第 3 章中加以討論。我們曾經考慮過可分離式和固定式接觸界面。事實上一些不同的塗層被用於可分離式和固定式連接接觸末端。此類接觸與雙向電鍍相關。最普通的雙向接觸電鍍包括一個金-鎳合金可分離式界面和鍍錫固定式界面。

貴金屬鍍層·貴重金屬鍍層實際上是一個復合層，它是指在前面第 1.1 圖 A 中所述的接觸彈片基材上覆蓋一層鎳，然后在鎳的表面上再覆蓋一層貴金屬。常見的貴金屬表面鍍層是純金，但現在也有用鈀或者鈀合金代替純金的，而且這種做法還在呈上升趨勢。在許多情況下，鈀或鈀合金層與純金層接合使用以防止來于比純金抗腐蝕能力差的鍍層被腐蝕的影響。典型的貴金屬層是在 1 至 2.5 微米厚的鎳層上覆蓋 0.4 至 0.8 微米厚的貴金屬層。在鈀或鈀合金表面的純金層只有 0.1 微米厚。下面兩種鈀合金最常用：80%的鈀與 20%的鎳和 60%的鈀與 40%的銀。

鎳底層在幾個方面提高了接觸性能。這幾點將在第三章進行詳細說明，下面僅列出來供參考。

- 減少孔隙腐蝕
- 提供轉移腐蝕對象的覆蓋層
- 限制基材成分的分布
- 提高鍍層的耐久性

普通金屬鍍層·錫是最常用的普通金屬鍍層，錫鍍層的厚度介于 2.5 到 5 微米之間。現在越來越多地用錫作鍍層，因為，即使錫被氧化，在插拔過程中，錫氧化物也會很輕易地脫落，從而不影響導電性能。然而，表面層再氧化會以磨損的方式降低錫接合面的機械性能。磨損來源于幾微米到幾十微米

的微小滑移。由于在磨損過程中，部分鎳被再次氧化，從而使得鍍層的電阻增加。對於用錫作為鍍層的連接器來說，預防磨損是最重要的工作。較大的接觸壓力和使用合適的潤滑劑是兩種能有效地降低磨損的途徑。這一點將在第三章詳述。其它的普通金屬鍍層，包括鎳和銀，也將在第三章詳述。

總之，對貴金屬鍍層來說，保護貴金屬層是首要目的；對錫鍍層來說，防止磨損是首要目的。這些考慮方向的不同將直接影響連接器的設計參數。例如，正常壓力大小、接觸處幾何形狀、絕緣本體設計以及諸如插拔力和耐久性等結構特性等都將受到影響。這些都將在第三章敘述。

1.2.3 接觸彈片

接觸彈片在連接器上具有以下 3 個作用：

- 在組件之間提供一條導通電訊的路徑
- 產生形成並維持接觸彈片接觸面的壓力
- 形成穩固的接觸

第一個作用，只要使用常用的銅或者銅合金材料就可輕易達到令人滿意的效果。銅合金的導電率雖然不是很低，只有銅導電率的 10%到 30%，但是，對大多數連接器來說，這個導電率已經足夠了。然而材料的導電率在用作高電流或能量分配的連接器中的確起著越來越重要的作用，因為，在這種連接器中，由爾熱和微電壓降引起的規定溫升要求更低的阻抗。

其它兩個作用就要複雜的多，并且涉及到材料特性和設計參數之間的相互作用。接觸彈片包括兩種基本類型：插座彈片，通常是彈性的；插頭彈片，通常是剛性的，它使插座彈片產生彈性變形，從而產生固持力。圖 1.3 顯示了插頭彈片的外形圖，圖 1.4 顯示了插座彈片的外形圖。圖 1.3 顯示了帶有插入插座彈片的金手指的打印電路板和導柱/端子插頭的幾何外形。導柱與端子的外形不一樣，導柱是方的，而端子是圓的。圖 1.4 顯示了幾種連接器的設計，所有這些都要與接觸彈片對接。事實上，所有的這些設計都顯示了尤其與一種稱為 25 方的接觸彈片對接，該接觸彈片呈正方形，邊長為 0.025 英寸。

我們必須綜合考慮材料的各種性能，並力求達到均衡。對於可分離式接觸界面，接觸彈片彈性的主要功用是提供介于兩插接面的對接力。材料特性指楊氏模數和屈服極限。這些性質嚴重地影響著彈性偏移性能和彈性偏移

量。屈服極限也很重要，因為它可降低插拔力。然而彈性強度必須與制造和卷曲性能對應。例如，用于提供在對接面產生彈性對接力的機械強度(用屈服極限來衡量)是與成型性能和鍛造性能相互對立的。以下各章將陸續對此進行討論。

1.2.4 連接器本體部分

連接器本體部分具有如下作用：

- 使各接觸彈片相互隔離，不能電性導通
- 固定各接觸彈片
- 對各接觸彈片進行機械保護
- 對各接觸彈片進行工作環境遮蔽保護

最後一個作用—環境遮蔽，與連接器本體的設計有關，尤其與連接器本體的封閉程度有關。這種遮蔽效果在惡劣的環境中顯得尤其重要。圖 1.5 顯示了一個有關環境遮蔽的直觀例子。該圖顯示的試件是鍍銀的，並且是在被暴露于模擬工業環境的情況下插到圖示的連接器的卡邊。環境中的硫腐蝕了金屬外表。然而，當試樣插入本體后，腐蝕便停止了。雖然卡邊還有一條卡邊緣槽，但是，遮蔽效果還是相當理想的。更為重要的是，這種影響可以從暴露于這種環境的連接器的接觸彈片阻值變化看出來。

圖 1.6 顯示了模擬工業環境和暴露時間對接觸彈片阻值的影響。實驗環境中包括硫氫化物、氮氧化物和氧化物，濃度為十億分之幾十到幾百就足夠了。數據對插接的和未插接的連接器都適用。樣品也獲得了一些抵抗環境的性能。在暴露了數十小時后，沒有本體的接觸彈片，其接觸阻值明顯地增加了，有本體的接觸彈片，其接觸阻值卻很少變化，這樣的接觸彈片在工業環境中可以使用 10 年。這些數據說明了絕緣本體的遮蔽效果。

上述列舉的其它一些連接器本體作用與連接器本體的材料特性有關。電子特性包括電阻系數和擊穿電壓。這些特性影響接觸彈片在連接器本體的絕緣性能。重要的機械性能包括彎曲強度和蠕變強度，因為這些性能影響接觸彈片在本體上的牢固程度。與溫度有關的特性包括連續使用和加熱使聚合體變形的溫度值。使用溫度和設計溫度是相互關聯的。在許多情況下，尤其在表面組接中，溫度起著非常重要的作用。

考慮化學和溫度對絕緣本體尺寸穩定的影響也是很重要的。維持連接器中心線的間距、直線度、平滑度以及曲度對連接器的裝配性能和插接性能都是很關鍵的。這些特性，除了與聚合體的基本特性有關外，還與成型過程有關。接觸彈片具有材料單一而設計式樣千變萬化的特點，而絕緣本體卻具有與之相反的特點。絕緣本體的設計一般都具有許多相同的特征和要求，但其材料卻不盡相同。絕緣本體的材料是由各種需要決定的。絕緣本體的材料不但要適應使用環境，而且還要和裝配相對應。在許多情況下，正是裝配過程決定了使用何種材料。連接器的材料和設計內容將在第五章進行討論。

1.2.5 連接器結構的歸納

本節將對連接器結構進行簡單的回顧，其目的是提供一些以后將討論的有關連接器材料和設計標準等的內容。前面已提及的一些參數，例如：插拔力、孔數以及絕緣性能等，將在後續章節進行討論。然而，在結束本節之前，還要談談連接器的又一個重要性能。

1.3 電連接器阻抗

圖 1.7 除了側重點不一樣外基本相似，圖 1.7 突出裝入系統內連接器元件的電阻。包括三種：

- 可分離可分離接觸面電阻
- 接觸彈片電阻
- 固定連接電阻

如果測出圖 1.7 中電連接器 A，B 兩端所有的電阻，其阻值大概為 10—20 微歐級，可根據下面等式確定：

$$R_0 = R_{pc} + R_b + R_i \quad (1.1)$$

其中，

R_0 ：總電阻

R_{pc} ：固定連接電阻

R_b ：接觸彈片電阻

R_i ：可分離可分離接觸面電阻

對典型信號端子而言，接觸彈片電阻占總電阻的絕大部分。與此相反，固定連接電阻可從幾十到幾百微歐。可分離接觸面電阻，在 100 克力作用下，

為微歐級。故該電阻只占總電阻的很小部分。但是後二者的重要性在於，它們的電阻是可變的。當電連接器電阻變化時，可能是因為一個或二個可分離接觸面電阻的增加。這就是電連接器設計／原料的標準圍繞為確保這些接觸穩定而變化的原因。

1.4 固定連接介質

前面已經指出固定連接是與被連接電路直接連接，有兩種主要通過這些電連接器連接起來的媒體：(a) 導線或線纜與 (b) 印制電路板 (PWBS)。

1.4.1 線與線纜

本節將對導線和線纜作簡要概述，而在第八章作詳細討論。導線由一個導體或，如果有的話，若干導體及其絕緣體組成。

絕緣體有兩個功能：它使電導體絕緣並保護其不受機械損傷。哪種功能更為重要一些，依靠導線所用何處，根據導線的運用（尤其是導線上將要承受的溫度和電壓）和運用環境的機械強度來決定。聚氯乙烯 (PVC)，聚乙烯，以及聚丙烯是其中為通常運用目的而采用的最普通的絕緣材料，矽樹脂橡膠和其它的抗磨性聚合體在有機械環境要求時常用作被覆材料。

銅是最普通的導電材料，不管其是否鍍錫或鍍銀。選擇電鍍是基於它的運用，錫是通常運用的電鍍金屬而在高頻率運用中則要求鍍銀。導線通常可分為兩種：實心與多芯。實心導線由單一導體構成，而多芯導線由若干導體構成。多芯導線在芯線數及其位置或纏繞方式上有所不同，實心導線在導電能力上較有利，但多芯導線對振蕩有重要的適應性及抵抗性。

線纜存在於各種各樣的構造中，以滿足一定運用範圍的需要，其與單純導線倍加在一有被覆的導線不同，可提供機械保護，同時可減少為確保在高頻傳輸中隔離防護處理的必要性電阻。

導線/線纜結構對機械固定股式連接最重要的影響是：單股/多電連接器的不同及導線/線纜結束制程去除或處理屏蔽層或絕緣體的必要性。

1.4.2 印制電路板

PWB 技術已經從 5 0 層單面板發展到帶接地平面的複合式的神經網絡

板與可控阻抗網絡板。PWB 制造工藝及運用要求將在第十章討論。本節僅討論有關固定連接本身。

運用在 PWB 上比較成熟的機械連接技術為壓印，及更優的適應性壓印連接。在該技術中與壓印相關的端子腳插入 PWB 中的通孔。其連接的穩定性依賴於插入時形成的相應完全接觸面殘餘的彈性力。PWB 通孔電鍍材料採用銅或錫/銅合金。

在 PWB 應用程序中比較流行的冶金技術是焊接。有兩種焊接方式常被運用，穿孔技術（THT）與表面粘貼技術（SMT）。穿孔技術（THT）利用穿孔及波峰焊程序。而表面粘接技術（SMT）更依賴於表面襯墊，或平台，及不同的焊接過程。與通過波峰焊的 THT 技術相對的是，表面粘接技術（SMT）是一個回流過程，在該程序前必須先通過大量技術處理貼好焊劑。SMT 程序包括波峰，汽洗，紅外加熱，對流，及這些程序的組合。SMT 因為零部件的高密度與 PWB 所含功能其應用迅速提高。SMT 允許減小平台間隔以提高零部件密度，同時通過消滅穿孔數目提高板的配線路徑。

與可分連接的兩個例子一樣，圖 1.9 提供了幾種 PWB 固定連接的圖示說明：卡邊緣式電連接器及兩件式電連接器。二者的具體運用將在第十三章討論。

1.4.3 小結

關於電連接器的材料/設計及連接媒體的討論已經涉及到許多電連接器具體特性的要求，因此，接下來本文將對電連接器作簡要的說明。

1.5 電連接器應用

電連接器的運用可以從兩方面來考慮：電連接器用在何處，例如它裝在設備上的位置，以及如何運用，例如電連接器的功能是信號傳輸還是配電，其中電連接器用在何處應優先考慮。

1.5.1 相互連接的層次

通常描述電連接器用在何處的方法是根據電連接器的連接層次（LOI）。許多描述採用這種方式，而本手冊通常採用 Granitz 所述方法。LOI 是指兩個連接的電路板，而非指相互連接的程序及其種類。大量連接程序與連接/連接器種類可用在給定層次的連接上。圖 1・10 說明了與電子底板連接的連接層次。

第 1 級・第 1 級連接是芯片外部的熱壓焊襯墊與其外殼或所安裝主電路板間的連接。導線粘接及各種不同的焊接技術基本上屬於第 1 級連接，這些連接方式大多傾向於固定連接。

第 2 級・第 2 級連接是外殼與印制電路板（PWB）的連接。DIP 與 PGA 插座是第 2 級連接的兩個基本例子。然多晶片模塊（MCMS）使該定義有點複雜，但，通常，爲了本論題討論（MCM）可被看作一外殼，第 2 級連接爲典型的固定連接，但爲了修復與升級的目的，插座是由可插入的若干零部件組成。

第 3 級・第 3 級連接是 PWB 之間的連接。插座（第 2 級）已經包含了電連接器的基本元件，正是在第 3 級將會出現更多電連接器的慣用概念。有兩種基本的 PWB 電連接器：卡邊緣式電連接器與兩件式電連接器。正如其名稱所暗示的，卡邊緣式電連接器的一半（即插頭或插座）爲 PWB 的邊緣。而兩件式電連接器，其插頭及插座構成金屬接觸。隨 PWB 尺寸及安裝接腳需求的增加，爲縮小容許公差量及減少幾何形狀的限制，兩件式電連接器的運用比邊緣式電連接器占有優勢。

第 4 級・第 4 級連接是系統組件間的連接。系統組件可能是單個的 PWB 或分離的單元例如硬盤驅動器或電源。典型的第 4 級連接根據連接組件的種類，可包括兩件式電連接器與線纜裝配。

第 5 級・第 5 級連接是系統組件與系統輸入/輸出間的連接。系統組件與系統輸入/輸出間的連接可以是直接安裝在板上的電連接器或通過一線纜。

第 6 級・第 6 級連接是系統與周邊設備或系統間的連接。這些連接典型的是線纜裝配。

附：上述幾節對電連接器電阻的構成、導線及線纜的區別、電連接器與 PWB 的兩種連結技術及電連接器的連接層次作了簡要的介紹。電連接器的總電阻由固定連接電阻、接觸彈片電阻、可分離接觸面電阻三部分組成，其中

接觸彈片電阻占總電阻的絕大部分。線纜與導線除了結構有所不同外，更主要是在其應用及抗幹擾功能上的不同。電連接器與 PWB 有穿孔技術及 SMT 技術，穿孔技術穿孔技術（THT）利用在 PWB 上穿孔及波峰焊程序，SMT 已有介紹。電連接器的連接可基本分為六級層次，即：芯片與外殼或主電路板，外殼與 PWB，PWB 之間，系統組件間，系統組件與輸入/輸出，系統間或系統與其外設間。關於級別六，是有關系統與外圍設備或者系統與系統之間的相互連接，最典型的便是用相連裝配方式來連接。

在與連接器的設計、選用方面，目前所用的連接器其相互連接的級別是從以下幾點考慮：

- 1.可分離性及耐久性的需要（可提供方便的插拔效果）
- 2.標準性（具有通用的標準，可互換）

可分離性及耐久性：

早期規定，級別 1 和級別 2 所定的相互接合專指持久性。級別 3 是最先將相互連接的可分離性作為考慮因素而提出的，尤其是對於那些插拔次數較多的連接器，對其持久性的考慮將不是擺在最重要的位置，而對插拔力大小的考慮，隨著端子數的增多而顯出越來越重要的地位。低插入力和零插入力連接器是目前人們致力開發的對象。當然，隨著芯片和 MCMs 上的端子數的增多，該等低插入力連接器或者零插入力連接器在設計時也會注重其端子耐久性的考慮以滿足連接級別 2 的要求。級別 4 和級別 5 著重強調連接器要滿足其不斷增加的插拔次數的需要。按這樣的標準製出的連接器其端子插拔力較為適當，實際上，該等連接器即使其端子數為几十乃至几百，其插拔力仍會小於級別 3 連接器的插拔力。級別 6 所提供的連接器在保持原有插拔力不變的基礎上，使端子有效插拔次數大幅度提高。某些與外圍設備相連的諸如電子卡連接器的端子連接，其要求插拔次數不低於數千次，這就需要在可分離之界面嚴格地控制其設計及選材等各種因素，尤其要提高小型化連接器之結構緊密度。

標準性：

標準性是指各種不同的連接方式之間具有通用的標準，級別 1 和級別 2 所指的連接器其包裝和插裝的標準是很重要的。其生產和組裝過程會涉及到一部分該標準性以滿足第 3、第 4 級別之要求，而第 5、第 6 級別的連接器其

相干性及兼容性則顯得更加重要。

這一觀點主要是針對各種級別的連接步驟作出簡要說明，指出各級別連接方式之間具有相互交疊性，而且同一連接器或連接器類型可用在不同的連接級別當中。了解該等相互交疊性質，將會有助於了解以後所介紹的各類連接器的功能，以作為對各種連接級別的補充說明。

1.5.2 連接器分類

這一章里，連接器將被特殊地看作是固定連接介質而不當作是連接系統來分類。按這種分類方案連接器將有三類最基本的類型即線對線、線對板及板對板。圖 1.11 所示為三種類型連接器的結構。我們再次強調，這三種類型的連接方式並非截然不同。以下兩個原因可說明這樣的類型交疊狀況。首先，同一種連接器的設計方案只需經過在連接方式上稍作改變後再重新定義，即變成可適用於另一種類型連接方式的新的設計方案；其次，一條線纜在裝配時可於其一端裝上線對線連接器而於另一端裝上線對板連接器，例如：I/O 連接器 5 級產品的外形便是其中最常見的例子。若避開這種連接形式的類別模糊性而不談，該等連接形式正好提供了連接器分類的有效依據。

· 線對線連接 ·

線對線連接同樣也包括了線對線纜或者線纜對線纜的形式，其定義特征是兩根單線個體或者是兩條線纜中的對應導線相互永久性連接。該等永久性連接更多地常見於固定連接中線對線連接以及 IDC 連接。捲曲連接常見於不連續的線連接器中，IDC 因其在與導線相關及線束末端處理上具有優越性而常用於支配線纜連接器，線對線連接器具有各種各樣幾何形狀的塑膠支撐件如直角和圓形聚合形體的塑膠件，還有許多不同形體之組合形狀的塑膠件及金屬屏蔽殼體，主要在軍事上得以應用。

· 板對板連接 ·

前面已提到過兩種類型的板對板連接器，如插圖 1.12 所示，一種是單片連接器或成為卡緣，另一種是雙片連接器。第一種板對板連接器設置於電路板邊緣故稱卡緣，其發展至最終將會變成雙片連接器，因為印刷電路板技術性能及其尺寸在不斷增長，當板的尺寸增加，其結果將導致連接器的容量增大，從而端子數增多，連接器插拔力增大，電路板印刷電路的容量增大將導

致線路密度過大，單片連接器很難滿足其要求，所以，其最終將發展成雙片連接器。

· 線或線纜對板連接 ·

在線對板連接中，有一半連接器是與線或線纜相連，也有與印刷電路板相連，與前述線連接一樣，板連接亦是如此，只不過需要壓入或焊接兩片連接器，許多卡緣式的連接器依然在應用，其端子配合界面適合可分離的連接性，線對線連接器也是大同小異，它們均是出自同一家製造廠。線對板連接器還具有很多其他的用途，其發展方向是線纜對板連接器，或是利用前述 IDC 的優越性進行線纜裝配。

· 總結 ·

這種形式當然不是給連接器分類的唯一方法，但這種方法確實能很好地實現比較各種連接器的目的。每一類型的連接器將在第 13 章里作細緻地討論，在這一章里還將討論一些附加類型的連接器如：同軸連接器、遮蔽連接器、過濾連接器及可控阻抗連接器等。

1.5.3 連接器的功能應用

隨著連接器應用範圍的不斷擴展，它們可根據其兩大基本功能而分成：信號傳輸及電傳輸兩類。在電子應用領域這兩類連接器的顯著特點在於其端子上一定帶有電流，在其他的應用當中，端子所提供的電壓將同樣作為很重要的考慮對象，雖然同一種端子的設計可同時作為信號和電量傳輸兩種功用，但在多種相類似的接觸方式的應用上來看，許多電傳輸連接器在端子設計時僅僅把電量傳輸的需要作為唯一目的。

· 信號傳送 ·

信號傳送可分為兩類：模擬信號傳送及數字信號傳送。這種分類是基於很多共同特征來描述的，在這部分的介紹當中我們對其並不作詳盡的討論，數據信號以及與其相關的連接器將在第 12 章中討論。

不論模擬或數字信號連接器，其所需功能主要應能保護所傳送的電壓脈衝信號的完整性，該完整性應包括脈衝信號的波形以及其振幅。數據信號在

脈衝頻率上與模擬信號有所區別，其脈衝傳遞速度決定了所保護的脈衝的最大頻率，數據脈衝的傳遞速度比一些典型的模擬信號要快得多，有的脈衝在連接器中的傳遞速度已接近千億分之一秒的範圍，在當今微電子技術領域中，通常把連接器當作一導線看待，因為與增長如此之快的頻率相關的波長能比得上連接器的尺寸。

當連接器或是一互相連絡系統諸如一線纜裝配被運用於高速數據信號傳輸中，相應的對連接器性能的描述也就改變了。代替了電阻的特征阻抗以及互相連絡系統中的串音變得尤為重要。控制連接器的特征阻抗成為一大意識潮流，在線纜中便是對串音進行控制。特征阻抗在連接器中之所以具有如此重要的地位，是因為電阻的幾何外形很難做到完全統一，加之連接器尺寸又很小，必須將串音的可能性最小化。在線纜中，幾何形狀的控制較易實現，其特征阻抗也易控制，但是線纜的長度將有可能引起潛在的串音。

在連接器中控制特徵阻抗是圍繞這個理由而進行的，在典型的開放式端子區域，連接器阻抗(和串音)是通過控制端子以合理的分佈方式而達到的。於此類信號而言，接地比率是這種分布的一種反映，接地比率減少了。當然，這樣的結果就會減少可用于傳送信號的端子數目。與信號端子相關的理由位置是很重要的考慮因素。為了避免接地端子的減少，具有整體的接地平面的連接器系統已經得到了中發展。前文中已經介紹過了微條和條線的幾何形狀。整體的接地平面允許用於傳遞信號端子的使用，且能提高連接器所有傳遞信號的密度。圖 1.13 展示了一個開放端子區域和接地平面連接器的結構。

· 電力應用 ·

如前所述，在上下文提到的電連接器是必須傳遞電力的。通常其電壓很低。通常用到的是如下兩種電力傳遞方法：(1)專用於高水準的當前電力接觸傳遞(2)和並行多籜信號接觸。它們每一種方法都有優有劣。

電力傳輸與信號傳輸相比有兩點不同之處。第一點，也是最明顯的，是用於傳遞較高電流。信號傳遞的電流通常不超過 1 安培，最多也不會超過幾安培，而電力傳輸的電流可達到几十乃至几百安培。第二點是由於電流導致的焦耳熱而產生的溫度升高。信號接觸過程產生的焦耳熱與周圍的溫度相差不多。相反地，電力傳輸的比率又是基於溫度的升高，溫度的升高，又產生相應的比率電流。一次 30 度的溫度的升高通常作為一個電流比率的標準。

因此，為滿足電流額定值及性能的穩定性要求，控制焦耳熱是很有必要的，這就需要在設計當中考慮信號傳遞的同時也要考慮電量的傳輸。尤其對電阻大的端子，焦耳熱是一重要因素，必須將其減小到最低程度，而且，接觸面的電阻也必須減小到最低程度，使其產生的熱量最小化。從選材的角度來說，當然是選擇高導電率或是橫截面積較大的端子以減小電阻，另外，增高傳輸電壓或增加接觸面積亦可減小接觸部分的電阻。

圖 1.13 關於開放端子領域(a 圖)和接地平面連接器(b 圖)的例子。(AMP 公司許可)

更高的交叉部分、多余的接觸端子，都暗示提高接觸壓力下連接器的尺寸。也就是說，實際上，有一個限制在貢獻電接觸上，包括接觸媒體和接觸的尺寸。在使用貢獻電接觸上，電力線纜的路徑，線纜大電力接觸的終點及電接觸的尺寸會成為限制因素。

隨著在連接器設計上提倡附加的限制，並行多訊號接觸允許更多傳統的連接器被用來分配電能。這些限制首先直接針對保證通過接觸的電流的分配，同時，它們的熱環境盡可能一致。其中以下三個因素是主要的：

- 1· 電路應是平行的電子流；也就是說，如果可能的話，經過所有的接觸電壓降應該是相同的。如果不同的電壓降對用途來說是根本性的，則這些電路將被區別對待。

- 2· 如果可能的話，接觸時的熱效應會被減至最低，尤其指一大束的電流接觸將被避免。

- 3· 接觸的阻抗或是在全部訊號分配裡一起計算的任意偏差必須相同。例如，依靠在接觸時存在的排列方式，在適當角度連接器獨立接觸的巨大阻抗會有差異。在設計分配的接觸時，這些差異應當被考慮。

認識到所有考慮的結果是一個明確的關於接觸的電流的影響能力的討論。降低到 50%可能會被意識到。換句話說，為分配 100A 的訊號到 PWB，如以 1A 的電流接觸速率，那麼合適的接觸應當是接近 200A 而不是 100A，這表明，大量接觸是相當依賴於單位接觸電流速率。

· 概述 ·

大體上，由於受終點、路線和尺寸考慮的限制，電流分配經由貢獻高電

流能力是明顯的。考慮到大範圍接觸和連接器的用途，多數電流分配的訊號接觸的用途需要更多的詳細分析，這些分析關於連接器要求和它們在本體中位置的接觸分配。

1.6 連接器測試

討論到這個程度，也就牽涉到自身在連接器設計及材料、用途的考慮。現在把注意力轉向如何測試性能；也就是說，連接器測試可從兩個方面來評估：即做什麼和如何做，為什麼測試。

1.6.1 連接器測試的類型

首先考慮做什麼測試和如何做測試。在本書中的一些敘述中，一項連接器測試包括露天條件和設定條件的操作，由此也將定義這類操作，接下來是測試手段。例如，暴露在腐蝕性環境下的接觸阻抗測試一般被認為是一種環境測試。以上這些牽涉到做什麼和如何做，這表明選擇和如何定義這些條件，測試哪些性能和如何做測試。至少有三類測試和測試手段：環境測試、機械性能測試、電氣性能測試。實例見表 1.1。

通過介紹測試術語，接下來考慮測試原因。

1.6.2 連接器測試的原因

連接器測試的基本原因是鑒定連接器性能。除設計鑒定測試外，原型或試驗型產品做測試可使連接器設計有充分依據，大部分連接器測試被引入每一個特定或合格測試程序用來鑒定產品性能。對於本次討論目標，特定的或合格測試不同於那種特殊的由連接器生產廠商定義的作為每一個檢測項目的測試。就條件測試而言，它是由消費者、產業界、國家的、國際標準來共同定義每一測試程序。在每個例子裡，測試程序將包括大量測試項目：環境測試、機械性能測試、電氣性能測試。測試項目和測試手段及認可的判斷標準都與連接器設計必須滿足的使用或市場要求有關。通常，這種露天條件和測試手段判斷標準是有一些一般代表性，在種意義上覆蓋了一個市場或一個使用範圍而不是針對某一個特殊使用。

當一項特別使用成為測試程序項目時，測試可能被指定為性能鑒定測

試。在這樣的一個例子裡，暴露條件常常是更特別的。根據環境和暴露時間

表 1.1 連接器測試類型

類型	暴露條件	測試手段
環境測試	混合的流動性氣體	滲水性
	溫度／濕度	溫度升高
	熱老化性	潮氣吸收
機械性能 測試	熱振動	抗拉強度
	振動	摩擦系數
	耐久周期	適配力
電氣性能 測試	過載電流	接觸阻抗
	電流循環	轉換阻抗

長度可更適當地反映對條件及特殊使用的需求。這同樣是一個真實的測試手段及認可的判斷標準。這樣的測試是一個介於條件與性能測試的中間環節。

可靠性測試伴隨著一個相似於用在別的合格或性能測試上的測試表。然而有兩個主要區別。首先，可靠性測試要求在暴露測試和操作環境間存在一個比合格測試更嚴格的已知的聯系，換句話說，測試可靠性必須在測試與使用上有一個加速因素是已知的。這也就是說，暴露在測試 A 中 X 天要等同於在使用 B 中 Y 年。這種要求通常無法滿足，並限制了做可靠性測試的。第二點不同在重要程度和統計處理上的認可判斷標準。條件測試認可判斷標準，例如暴露條件中阻抗的最大變化是一般性的，所以它們的價值在於，通過廣泛使用，提供可接受的性能。考慮到使用，可靠性認可判斷標準將反映特殊要求，這將在很多案例中明顯超過合格價值。但可靠性認可判斷標準還將被運用去滿足更嚴格的統計要求——在特定的相同尺寸和數據分析——超過那些用在合格測試程序中的要求。

1.7 結論

本節敘述的目的是介紹術語，並對於每個將在以下章節所提到的更詳盡的主題討論提供一個上下文背景。

第二章 接觸界面及接觸過程

在第一章已說過，接觸界面的微觀結構決定了電連接器的電子性能和機械性能。例如，可分離接觸界面和永久性接觸界面的電阻值和插接力以及耐久性都依賴于接觸界面的微觀結構。因此，有關接觸界面的的基本結構和接觸界面形成的過程的知識對了解接觸界面對連接器的一些重要性能特征的影響是很必要的。這些知識，反過來，又會幫助理解界面的設計和制造界面的材料對創造和維護確實可靠的連接器特性的影響。下面的討論將主要針對可分離接觸界面，但是，這些相似的討論也與永久性機械接觸界面有關。

2.1 接觸界面的形狀

如前所述，當把插頭插入插座孔時，接觸界面就產生了。威廉先生提供了一份說明界面產生過程的詳細資料。

有時候，根據連接器和地球外表的相似點，使連接器接觸點(a-spots)具體化是很有益的。事實上，鄉村確實提供了一種非常有用的典型連接器接觸界面的拓樸模型。山丘高度與山丘間距離的比例和連接器接觸表面的微觀拓樸模型是相當相似的。兩者之差異大約在 1%至 10%之間。根據輪廓測定法(profilometric)和語義學(SEM)原理繪出的詳細的連接器表面圖與普通的地球輪廓圖是相當相似的，而且把兩個導體壓在一起，就象把美國的佛蒙特州翻過來蓋在英國的漢普夏郡，比例是 1：3，000，000。

這個類比例子闡述了關於接觸界面構形的凸凹面的重要性，并且介紹了微觀接觸界面的形狀，圖 2.1 描繪了這種微觀接觸界面的形狀。實際上，只有接觸界面的高點，即微觀凸面，能夠相互接觸。這些微觀凸面被稱為接觸點。雖然它還受其它因素的影響，但是接觸點的數量取決於接觸面的粗糙度，這一點以後將詳述。由于尺寸太小(微米數量級)；即使在“板對板”階段，在一克力的作用下，這些接觸點也會因發生塑性變形而被破壞。這個破壞要持續到一個足夠承受施加負荷的接觸表面形成時。威廉和格林針對這一問題作了詳細的討論。

從應用的角度看，上述討論暗指實際接觸界面的大小僅取決於施加的負荷。對於一個連接器來說，該負荷對應於接觸正壓力。對於典型的連接器，

接觸界面僅有一小部分(1% 左右)是接觸的。

接觸正壓力決定接觸面積，但如何分配這些接觸區域則取決於接觸界面的幾何形狀。如圖 2 所示，球面接觸將形成無數個圓形接觸點。

因此，接觸界面的構形依賴於接觸界面的粗糙度，該接觸界面的粗糙度又影響接觸點的數量、施加的負荷(該負荷影響接觸面積)和接觸界面的幾何形狀(該幾何形狀又影響接觸點的分布)。

接觸點的數量與接觸界面的依賴關係是合理的，下面將作進一步說明。按照威廉和格林的觀點，初始表面粗糙度決定接觸點的數量，但是有多少接觸點能接觸卻依賴於施加的負荷。連接器表面開始接觸時，只有最高的接觸點能接觸導通。這些一開始就接觸的接觸點的變形使得接觸界面越來越相互靠近，這樣，其它比一開始就接觸的接觸點稍低的接觸點也逐漸實現接觸導通。隨著負荷的增加，這樣的接觸點將依次變形。當足夠數量的接觸點變形到某一程度，即，當所有接觸點面積之和足夠支承施加的負荷時，這種變形便停止了。如果引用一個硬度的概念，那麼，對這個過程就可進行直觀的描述了。材料的硬度是用力和單位面積比來定義的，例如克力每平方厘米。也就是說，如果某材料的硬度是 10 克力每平方厘米，那麼一個 10 克力的負荷或力將產生 1 平方厘米的接觸面積。那麼，接觸點的數量就依賴於表面接觸點和施加的負荷。

接觸界面的宏觀幾何外形(例如球面與平面平面接觸)決定了機械接觸面積在整個接觸面積中的分配方式。圖 2.3 描述了影響的過程，該圖用實例說明了當外載荷增加時，接觸點的尺寸和數量也相應地變化。

摘自 Green Wood 的圖 2.4 提供了一個上述觀點的實驗依據，該實驗顯示，當一個鋼球分別用兩種不同的載荷，如 20 克力和 80 克力去擠壓一平面時，兩者的接觸界面就產生了。該實驗表明，在載荷作用下，接觸點的數量、單個接觸點的尺寸，以及由無數接觸點組成的宏觀接觸區域面積都將相應地增加，這一結果與上面的論述完全相符。

接觸界面的粗糙度或接觸點模型可以描述如下：

接觸界面是由分布於宏觀接觸區域上的接觸點組成的。宏觀接觸區域的大小取決於接觸界面的幾何外形。接觸點的數量和大小處決於表面粗糙度和負荷。負荷也決定了接觸界面的光潔度。

這種模型描述了接觸界面上的機械構形，但是它僅僅從微觀上描述了接觸界面的外形。然而，考慮精煉爐的細微表面，甚至其表面的原子或分子結構都是非常重要的。所有的金屬表面都覆蓋著一層原子數量級的薄膜。圖 2.5 簡要地表達了幾種可能覆蓋於金屬表面的薄膜。在金屬表面的最外層可能是大量的化合物薄膜。氧化物是最常見的一種，其它物質(如：硫化物、氯化物以及復合膜)也可能存在，這是由金屬材料和金屬暴露環境條件決定的。不同金屬的熱力學性能和運動學性能差異很大，熱力學性能決定生成何種薄膜，運動學性能則影響薄膜的生成快慢。

如果考慮接觸界面鍍層的話(這一點將在第三章論述)，那么上述薄膜對連接器性能的影響就顯得相當明顯了。事實上，如第一章所述，接觸界面的鍍層可以分為貴重元素(不易發生化學反應的元素，如，金)和非貴重元素(如，錫，該元素表面通常有一層薄薄的氧化物層)。因此，可以認為：生成化學膜的類型以及生成速度都依賴於基材金屬和環境中的化學物質。除了化學物質以外，環境溫度和濕度也在薄膜生成時扮演了重要的角色。

除了上述化學膜以外，其它復合膜(特別是含水量、組織以及各種各樣的其它污染物和微粒)也可能存在於金屬外表。這些復合膜也可能對連接器的機械和導電性能產生很大的影響，這一點將在以後闡述。

2.2 接觸界面和機械性質

本部分主要討論點接觸模式決定的接觸界面的機械特性，尤其是對摩擦和磨損的影響。從連接器性能的角度來看，摩擦的重要性在於它對於連接器配合力的和接觸界面的機械穩定性的作用。在連接器性能顯然退化之前，磨損過程將影響連接器能經歷的配合周期次數。點接觸模式對摩擦和磨損的作用可以由圖 2.6 中得到解釋。在圖例中展示了兩種點接觸方式，其中 a 區接觸時間比 b 區接觸時間更長且經歷的變形量更大。如 2.2.2 部分中所述，在這些條件下 a 區的接觸面積將大於 b 區，也就是說 a 區的連接將會更比 b 區穩固。此時 a 區的剪切力(或剪切強度)也比 b 區大。這種變化將會影響點接觸的摩擦和磨損。

為預測將會遇到的問題，摩擦和磨損是兩種不同的方法，來描述點接觸界面在受到壓力之下的分離。接下來的討論僅僅涉及到單一點接觸模型。當

然接觸界面的性能將會影響多個的點接觸結構以及由各個獨立的點接觸性能總和表現出來。此時將首先考慮摩擦作用的影響。

2.2.1 摩擦

摩擦表現為一個力量，其作用是阻止兩個接觸表面之間在受到剪切力的作用下沿相對的方向移動。摩擦力可以由公式 2.1 來確定：

$$F_f = \mu F_n \quad (2.1)$$

其中， F_f ==摩擦力

μ ==摩擦係數

F_n ==維持兩表面接觸的力---對連接器而言是接觸正壓力

由 Rabinowitz 的理論，摩擦力可看作是分離兩表面間連接的必需力量。摩擦力可以從下面公式中，由接觸界面強度而進行簡單的估計：

$$F_f = \tau_s A_c \quad (2.2)$$

其中， τ_s ==剪切強度係數

A_c ==點接觸面積

接觸區域與硬度， H (接觸高度)，以及由等式(2.1)中的力 F_n 有關：

$$A_c = \kappa H / F_n \quad (2.3)$$

比例常數 κ 由很多參數而定，例如表面鍍層的作用，潤滑的狀況，表面粗糙度，接觸正壓力以及變形的種類(彈性/塑性變形)，由此，我們將公式(2.1)與公式(2.3)合並後可得到：

$$\mu = \kappa \tau_s / H \quad (2.4)$$

如 Rabinowitz 所提出的，剪切強度和硬度同樣要由材料的性質來決定，因此公式(2.4)中的係數可以被看作為 1 的常數。

在實踐中，摩擦係數是從 0.05 到 >1 不等，與理論上的偏差僅僅反映的了假設的簡化模式的限制，尤其是接觸總面積是金屬以及表面的分離產生在原来的接觸界面上。

低的摩擦係數值表明接觸表面是由鍍層覆蓋的，其中有化學聯接層(如氧化物)，吸收層(如水或有機物)，以及趨向於應用的潤滑劑層。這些塗層對於減少這兩種機械接觸表面的剪切強度都是非常重要。

位於接觸端的氧化層可減少金屬接觸面積。氧化層能支持但並不能促進

機械式的金屬接觸。減少金屬接觸面積將導致剪切力的降低，其最終的結果是摩擦係數的減少。

有機塗層尤其是潤滑劑，提供了在兩表面間具有更低的剪切力的接觸表面和 inhibit 金屬接觸層，尤其是兩表面之間具有相對運動。

高的摩擦係數表明，點接觸的塑性變形作用和金屬性連接的產生，將會導致比基礎金屬材料更高的剪切強度。應用到接觸界面上的剪切力將會導致在接觸界面上一定距離內接觸碎片的產生，此時將會導致更大的碎片接觸表面積同時也將導致更的摩擦係數。使連接的碎片從原來接觸表面中分離出來的可能性提供一種磨損過程的模式。

2.2.2 磨損過程

正如 Bowden 以及 Tabor 所提到的，摩擦和磨損過程要由接觸表面的分布位置而定。如前現所提到的，點接觸塑性變形將會由於加工時的變硬而導致接觸強度的增加。除了加工變硬之外另外一機理同樣很重要：也就是冷焊。冷焊與經過接觸界面聯接的產生有關，而此接觸界面是出現在兩金屬表面將成為 intimate 接觸時。在此條件下，相同的聯接機理將對金屬的粘著力量起到作用。事實上冷焊界面的強度高於基礎金屬，這是因為變形時產生加工硬化。這種可能性對在受到剪切力作用下的接觸將會產生很大的影響，也同樣要對磨損機理產生影響。現在回到圖 2.6 中的 a-區域，考慮一下當給定冷焊接觸界面的模式時接觸界面的分離怎樣出現。在剪切力的作用下假定 a-區經過了冷焊，將會從原來的接觸表面中分離出去，導致磨損碎片的和金屬轉移，此時情況如圖 2.6 中的下部所示。b -區部分具有較低的變形，因此也具有較低的冷焊時的加工硬化，也將會在原來接觸表面的附近產生微小的分離，也就是說基本上沒有磨損和金屬轉移。

前述提到的磨損過程中，a 區為粘著磨損而 b 區為光滑磨損。粘著磨損的特性是高的摩擦係數和在兩界面間出現金屬轉移，而光滑磨損過程是低的摩擦係數和極少的金屬轉移。應當注意到磨損是一個動態的作用過程，它只是當兩接觸表面間有相對的運動時才會產生。在此運動過程中，連接增長和 prow 成形將會隨著大量的接觸界面的形成和分離而出現，此時的結果將是磨損過程分布在其滑動的軌跡上。粘著磨損和光滑磨損軌跡上表面分別是粗糙和光

滑的，此時可從相對的金屬轉移量而定。

同樣應當注意的是，如果 a-區分離產生的轉移磨損部分，將會在接觸界面上產生如研磨一樣的作用，這是由於它將產生的加工硬化，這裡也就提到了第三個磨損機理：研磨磨損，如 Antler 所提到的，研磨磨損將會導致接觸界面的磨損率的增加。

2.2.3 表面薄膜的摩擦和磨損

表面膜對摩擦力及磨損的影響可通過分析圖 7 加於討論，圖 7 大致顯示了摩擦力係數的變化， μ ，作為隨負載變化的函數。負載變化開始及其存在的範圍依賴於表面膜，構造或化學接合和表面潤滑狀況。摩擦系統數隨負載的變化能從小於 0.1 到大於 1.0。據等式 (2.5) 顯示，磨損係數 κ ，有相同的變化趨勢，但因為磨損機理的變化其變化階數很大，例如，接合處增大與凸頭的形成。

首先考慮摩擦。低負載狀況下，氧化物的破損與脫落是不完全的，只有一小部分金屬接觸面產生及粘附，導致低摩擦係數。隨負載的增加，表面變形增加，從而使表面氧化物破裂十分容易。隨金屬接觸面的增大，摩擦係數亦跟著增加。最終，金屬接觸面變得很大，摩擦係數穩定下來。

相似的情況在磨損係數變化中也可以見到。磨損係數可由一簡單的破損等式確定：

$$v = \kappa F_n L / H \quad (2.5)$$

此處 v ==通過單程長度 L 的容量

H ==硬度

F_n ==負載

κ ==磨損係數

在該狀況下，如前面所述，磨損係數集中於破裂的連接處。低負載情況下，小接觸面積及極小的冷焊導致小連接處增大及凸頭形成，並伴隨小的磨損在原始接觸面附近發生分裂。負載超過一定範圍，磨損係數依賴於兩種材料特性與接觸形狀，通過接觸增大與凸頭形成，表面薄膜破裂的增加促進了冷焊的形成和導致粘附性磨損的增強。隨這種磨損機理轉化的產生，磨損係數便顯著發生變化。變化負載也依賴於接觸面的潤滑狀況，是因為在滑動期

間潤滑對接觸形成動力的影響。有效的潤滑可減少與摩擦係數及磨損係數二者有關的金屬接觸面。Antler 建議，對硬金屬接觸面而言，由光滑磨損向粘著摩擦變化所需的負載，無潤滑接觸面大約需要 10 克力，而有潤滑的接觸面則超過 500 克力。通常金鍍層電連接器的正壓力範圍從 50 克力到 200 克力，暗示了使用潤滑可延遲粘著磨損的發生。但是，該情況並非必定出現，因為在前述期間全部接觸表面形成了污染膜。這些污染物能提供表面潤滑，雖然也是以污染的方式。Antler 指出這些偶然被污染的接觸面可承受的負載範圍大致為從 25 克力到 250 克力。為確保一致的低磨損狀況，有計劃的潤滑是有益的。接觸潤滑將在第三章討論。

2.2.4 機械特性小結

接觸面的機械性能，尤其是摩擦及磨損，強烈依賴於接觸面粗糙微結構，因為這些粗糙微結構很小，它們在較小的負載下發生彈性形變而導致微結構接觸面的工件硬化及冷焊的發生。接觸點，接觸點的破碎決定了接觸面的摩擦係數及磨損係數。摩擦係數影響接觸面的配合力和電连接器接觸面的耐磨損持久性。

2.3 接觸面形態及電氣特性

影響摩擦及磨損的相同結構及薄膜決定了接觸面的電氣特性。簡單而言，本討論從金屬接觸面開始，薄膜的影響將在後面考慮。

兩個金屬面接觸產生一電阻，術語稱之為接觸面壓縮電阻，壓縮電阻產生的根源，如 Holm 所描述，是一個基本的結果並可通過圖 2.8 加於說明，接觸面接觸點微結構使電流被壓縮為僅從接觸點通過，因而會產生“壓縮電阻”這一術語。根據 Holm 所述，對單一接觸點來說，壓縮電阻由下式確定：

$$R_c = \rho_1 / 2\alpha + \rho_2 / 2\alpha \quad (2.6)$$

此處 ρ_1 與 ρ_2 == 接觸材料的電阻係數

α == 接觸接觸點的直徑

如果兩種材料相同，(2.6) 式可簡化為：

$$R_c = \rho / \alpha \quad (2.7)$$

應該注意的是壓縮電阻是一種幾何形狀上的效果。這就是說，如果如 2.8

圖所描述的幾何形狀是因為在實心原料上加工一細小凹槽而形成接觸點，盡管沒有接觸面存在仍有壓縮阻抗產生。流過變小了的通過面的電流的壓縮是因為接觸面結構的相互獨立。這種接觸面構造能夠導致阻抗的增加超出根據式（2.7）所得出的結果，例如薄膜，但是減少壓縮電阻的唯一方法是增大接觸面積。

為了本討論的目的，多個接觸點及它們接觸電阻的分配對總接觸電阻的影響可由圖 2.9 說明。插入的等式表明分布在同一接觸面的單一接觸點和多個接觸點的壓縮電阻依賴於其接觸面的幾何形狀。而多點接觸等式與通常接觸表面更為相關：

$$R_c = \rho / n \alpha + \rho / D \quad (2.8)$$

此處 n == 接觸點的個數

D == 接觸所分布平面的直徑

該等式表示一係列宏觀壓縮電阻的合成決定於各個接觸點的微電阻以及這些接觸點所分布的接觸面積。圖 2.10 說明了這兩種作用。第一條件明確了並行排列的多個接觸點的阻抗。對金屬導體而言，這種情況的電流壓縮與接觸面非常接近。第二個條件則表明了電流壓縮通過分布接觸面的結果。等式（2.8），可清楚表明，當接觸點的接觸數目非常大（數以十計）時，第二個條件尤其依賴於接觸點的分布。在這些條件下，圖 2.9 提出了一種近似的壓縮電阻的第三等式。對顯示的這種情況，其假定了接觸點的圓形分布，分布面積（因而其直徑）能夠從接觸材料硬度及其提供的壓力中得到，結果如式（2.9）。

$$R_c = \kappa \rho \sqrt{H / F_n} \quad (2.9)$$

此處 κ == 與表面粗糙程度，接觸形狀及彈性形變有關的係數

H == 硬度

F_n == 接觸正壓力

2.3.1 金屬界面的壓縮阻抗

對以上這樣簡單的等式的論證在插圖 2.11 中會有所提示，從具體角度來講，它所涉及的就是針對接觸表面為銅、鎳、黃銅及錫這四種金屬其各自的接合力以及相對應的壓縮阻抗之間的對比關係。從圖中可得知該接合力非常

大，雖能保證一個較大的接觸面積，但是接觸表面的鍍層金屬容易被破壞，該兩者之間的相互關係可用等式(2.9)來表示。圖 2.11 中的表格所列的是關於三種金屬的硬度及電阻係數。爲了減小對壓縮電阻的影響，必須控制接觸面的粗糙度，對銅、黃銅、鎳三種金屬均應如此。對於錫，由於其极易遭磨損破壞而通常不用於直接受力部位，因此對其粗糙度不作討論。首先來討論關於銅的一些數據。圖中虛線表示計算值，實線表示實驗測試值。可以看出虛線與實線重合的非常好。對於錫和鎳，圖中僅僅顯示了其測量值，因此對其只進行相關的討論。注意到鎳具有比銅更高的電阻係數及硬度。由於電阻係數及硬度與壓縮電阻的關係分別爲線性及平方根關係，因此鎳的壓縮電阻值會是銅的八倍。比較其測量值可看出接觸壓力爲一千克力左右時，其重合度較好。對於錫，其電阻係數增加了十倍而硬度卻降低了五倍，因此其壓縮電總體上增加了，但這並不是說光考慮電阻係數的大小就能判斷壓縮電阻，因爲其接觸面的面積會增大。這些數據表明根據點接觸模式導出的 2.9 式是正確的。

然而，在連接器塗層部分，上述簡單的等式運用起來受到干擾而變得複雜。因爲在塗層部分需考慮到各層之間的相互作用使係數 K 很難決定，導致很難決定適當的硬度及電阻係數。在具有錫塗層的黃銅接觸面，其利用錫的硬度和黃銅的電阻係數，如圖 2.12 所顯而易見。

通常錫塗層的厚度會大於 2.5 微米，錫是一種十分軟的金屬，接觸面磨損通常發生在錫塗層里。另一方面，有兩個原因導致電流的壓縮主要產生在接觸彈片即黃銅塗層上。首先，黃銅的傳導率略等於錫的傳導率的 2.5 倍，因此在尚未接近有壓縮變形的接觸表面時，電流在黃銅中的分配會保持恆定。接觸部分的面積與接觸彈片橫截面積的比越小則這種效果就越明顯。

由圖 2.13 所示可顯而易見這種選擇的正確性。壓縮電阻是通過等式(2.9)對錫的硬度及黃銅的電阻係數進行換算而得出，其可變的接合力是被指定在虛線所包括的範圍。覆蓋在黃銅表面厚度爲 2.5 微米的錫塗層的測量電阻，作爲接合力的一個特性而繪製成一條實線。該實線與虛線具有良好的重合性，而錫塗層的厚度若爲 12.5 微米，則其測量電阻值實線與計算值虛線產生了較大的偏移，其原因可由圖 2.14 的例子說明。厚的錫塗層對壓縮電阻導入了較大的電阻（主要是因爲錫的電阻係數較大的緣故）。

顯然，等式(2.9)的運用具有一定的限制條件，最起碼要先了解設計及選材對壓縮電阻的影響，尤其要知道一般接合力及接觸面的分佈是決定接觸電阻的主要因素。接觸面的分佈主要依賴於接觸面的宏觀幾何形狀，亦即插座端子與插頭端子各自接觸表面的幾何形狀。

2.3.2 表面氧化物的接觸電阻

也許在這裡還有必要重提等式(2.9)所介紹的金屬接觸，不論是何種金屬塗層，其上均會附著一層諸如氧化物之類的化學物質，則前面所提及的接觸面變形實際上就是指這些氧化物的變形。至於表面氧化膜，不管是開頭所提到的還是在連接器的運用中出現的，均是影響接觸界面的不利因素。選擇合適的接觸面鍍層將對生成的氧化膜起著決定性作用，不僅可決定氧化膜的種類還可決定其受到破壞的容易程度。這類話題將在第三章中作詳細討論。

如果表面氧化膜並沒有消除或只是部分被消除，其結果將導致給壓縮電阻額外加上一個電阻。氧化膜電阻可有兩種存在形式，如圖 2.15 示。如果氧化膜沒被消除，伴隨壓縮電阻的產生將會產生氧化膜電阻（如 2.15 圖左側示意）。如果氧化膜被部分消除，則該氧化膜電阻會成為有效電阻與金屬壓縮電阻並聯（如 2.15 圖右側示意）。這種高阻抗的氧化膜電阻由於金屬接觸導通而相當於被有效地減小了其厚度。但是，從整體上來講，電阻值還是升高了，原因是氧化膜的存在減小了金屬接觸面的面積。

表面氧化物引起的電訊衰弱，氧化物的電阻係數可以為很高，相當於半導體到絕緣體的電阻係數範圍，並具有高度可變性。氧化物的可變性可發生在以下三個化合物性質方面：

- 成份
- 結構
- 厚度

這三個性質，均與氧化膜形成的條件有關。特別是環境的成份，溫度，溼度對氧化膜的結構、性能起著決定性作用。由於氧化膜的易變化性，所以對氧化膜進行機械性的破壞是處理氧化膜的首選方法。

然而，氧化膜的結構卻有利於與電相關的方面，Wagar 和 Holm 均對此作過詳盡描述，現簡要地概括如下。一個電場穿過一絕緣體或者一高阻抗薄膜

將會導致產生新的機構，如電橋、可提供 fritting 的機構，用一臨界電場導致電壓穿過氧化膜是實現這一目的的必要條件。可是，更多的情況下臨界電場（甚至是臨界電壓）也是依賴於更前面所提及的可變因素：表面氧化膜的厚度、組成及結構。另外，當電橋產生以後，電橋的電阻也要依賴於電流的大小。該等電阻的可變化性加上電壓需求的可變化性會導致表面氧化物的電子故障並給一般的電子應用帶來麻煩。

表面氧化物的機械破裂，因為制造一金屬接觸界面的需要，表面氧化物的機械破裂在連接器上尤其重要。馬口鐵（鍍錫鐵皮）以錫作為接觸鍍層來源于這樣一個事實，即馬口鐵表面上原有的氧化物薄膜在連接器對接時很容易破裂和轉移。氧化物轉移的机理如圖 2.16 所示。在馬口鐵表面覆蓋有一層又薄（幾十分之一公厘）又硬又易破裂的氧化物薄膜，薄膜下的馬口鐵則又軟又具延展性。當于此馬口鐵施加一接觸壓力時，很薄的氧化物層不能承受該載荷，又因為它很易破裂，在這樣的條件下，載荷被傳導進又軟又具延展性的馬口鐵內部，其在載荷下開始流動，且隨著馬口鐵的流動，氧化物薄膜擴大裂縫而馬口鐵通過裂縫被擠出。此外，馬口鐵表面開始形成可電性導通的區域。威廉姆斯在鋁而不是在馬口鐵上証實了這種机理，如圖 2.17 所示。圖 2.17 之左圖表示當一球載荷施加在鋁平面上時，鋁表面上的氧化物所發生的破裂；右圖表示在鋁的表面氧化物被去除此之后，原來發生破裂的區域。在鋁的氧化物界面上，鋁被明顯從裂縫中擠出，而比鋁更軟的馬口鐵則更易受這一机理的影響。圖 2.18 的數據可証實上面的假設。圖 2.18 表明對於一個鋁與鋁相互接觸的系統，接觸阻抗對應于接觸壓力的關係。

接觸幾何形狀的研究包括半球面而不只是平面，加載與卸載的數據都表明：甚至在很小的接觸壓力下，當加載時，馬口鐵的表面氧化物很容易地轉移是接觸阻抗急劇下降的一個象征，這暗示一個金屬接觸界面的創建。進一步的金屬接觸的証據能夠從以下事實被推証，即隨載荷的移動，低阻抗值被保持。這種特性被解釋成為在接觸界面發生了冷焊。隨載荷的降低，冷焊維持完整的界面。更進一步的冷焊的証據是事實上，在許多情況下，對於卸載時的分離接觸，一個確定的壓力是必要的。泰姆塞特在研究鋁的接觸時証明了同樣的特性。

在圖 2.18 的載荷條件下，從軟和硬的物質上薄膜轉移的不同可以得到圖

2.18 与圖 2.19 的數據比較，在這個例子里，對於半球面和平面，接觸金屬都是銅合金 C72500(89%銅 9%鎳 2%錫)。空氣中熱老化性導致了表面氧化物的形成。C72500 明顯比馬口鐵硬所以在載荷條件下的破裂會更低。因為正是破裂驅使裂縫和表面氧化物分離的產生，而在 C72500 比在馬口鐵上更難轉移氧化物。此外，C72500 通過裂縫擠壓而出的部分將更少。這些不同如圖 2.19 所示。隨載荷的施加，對於分裂表面氧化物，更高的接觸壓力是必要的。直到 100 克力被施加，否則不會發生接觸阻抗的明顯下降。由於 C72500 比馬口鐵更硬，所以它上面的接觸點會更小。此外，變形的減少將導致更少的氧化物的分離與擠出。因為金屬接觸區域的減少，這些機理影響下的組合會導致更高的接觸阻抗。C72500 的卸載特性也不同。它比馬口鐵具有更好的彈性，也經歷更多的彈性變形，並隨載荷的移動發生彈性回復。這會產生分離表面及打破接觸點的趨勢。正象所指出的那樣，在低於 60 克力時接觸阻抗的增加。以上數據表明，至少在微觀上，當缺少殘余應力去提供接觸界面的機械穩定性時，單純依靠冷焊不可能足以維持接觸幾何形狀界面。這個事實會在以后被重提，並將在討論卷曲連接時表現出其它的意義。

2.3.3 總論

在電子與機械方面，接觸界面的粗糙模式都提供了解釋。簡單說來，接觸界面形態論依靠(depend on)表面粗糙度、接觸界面上的壓力和接觸表面的幾何形狀。表面粗糙度強烈地影響粗糙接觸點創建的數目。接觸界面壓力，決定全部的接觸區域，而接觸彈性幾何形狀決定遍及(over) 粗糙分配的區域。這解釋了為什麼接觸壓力和接觸幾何形狀是主要的設計對數的原因，並且這兩個因素都將在 6.2 節中詳細討論。

第三章 接觸鍍層

大多數電連接器使用接觸鍍層的原因有兩個。首先保護接觸彈片的基材金屬不受腐蝕，其次是優化接觸界面的性質，尤其是連接器的機械和電氣性能。

首先應考慮腐蝕防護。大多數電連接器接觸彈片是由銅合金製成，而銅合金在典型的電連接器工作環境中容易受到腐蝕，如氧化和硫化。實際上，接觸鍍層是用來封閉接觸彈片與工作環境隔開以防止銅的腐蝕。當然，鍍層材料在其工作環境里必須不被損害（至少在有害的範圍內）。作為腐蝕防護重要功能的同時，優化界面是選擇合適的接觸鍍層材料的考慮因素。

與機械性能有關的參數主要是影響鍍層的耐久性、或磨損，以及配合力的因素。正如第二章所提到的，事實上這些要考慮的因素，是在相同基本效果下的兩種不同的看法，即多點接觸界面在相對運動過程中冷焊連接的分離。最重要的機械性能包括硬度，延展性和鍍層材料的摩擦系數。所有這些性質要依鍍層材料的內在性質及其所運用的工作過程而定。

電氣性能的優化可從如下方面考慮，即對已經存在和即將形成的位於接觸鍍層表面薄膜的控制。如第一章討論的，電連接器電氣性能的一個主要需求是建立和維持穩定的連接器阻抗。為達到這個目的，需要一個金屬接觸界面以提供這樣的固有穩定性。建立這樣的接觸界面需要表面薄膜能在接觸配合的時候避開或分裂。這兩種不同的選擇明確了貴金屬或稀有金屬和普通金屬之間的區別。

在不同程度上，貴金屬鍍層(如金，鈀以及它們的合金)其本質對表面薄膜來說是游離的。對這些鍍層來說產生界面的金屬接觸相對較簡單，因為它僅僅需要接觸表面的伴隨物在配合時的移動。通常這很容易實現。為維持接觸界面阻抗的穩定性，連接器設計要求應注意保持接觸表面貴金屬性以防止外在因素如污染物、基材金屬的擴散以及接觸磨損的影響。以上每個因素都將加以詳細討論。

普通金屬鍍層—特別是錫或錫合金—其表面都自然覆蓋有一層氧化薄膜。錫接觸鍍層的利用，是因為這層氧化物容易在配合時候被破壞，這樣金屬接觸就容易被建立起來。電連接器設計的需求是能保證氧化膜在連接器配

合時破裂，而在電連接器的有效期內確保接觸界面不再被氧化。再氧化腐蝕，在磨損腐蝕中，是錫接觸鍍層最主要的性能退化機理。銀接觸鍍層最好被當作是普通金屬鍍層，因為該鍍層容易受到硫化物和氯化物的腐蝕。由於氧化物的形成通常也把鎳鍍層當作是普通金屬。

本章將討論接觸鍍層材料和電連接器的選擇標準。在討論材料之前先按次序討論一下採用接觸鍍層的主要方法。

3.1 鍍層方法

有幾種方法在接觸鍍層中得以運用。主要有三種技術：

- 電鍍 (electrodeposition)
- 噴鍍 (cladding)
- 熱浸 (hot dipping)

3.1.1 電鍍

電鍍是在連接器制造中，在接觸彈片上加以鍍層有最為廣泛的使用方法。這裡僅對其基本過程作一簡要描述。更為詳細的討論可見於 Durney 和 Reid 以及 Goldie 的論述中。

典型的電鍍單元如圖 3.1 所描述。電鍍是電鍍液中的金屬離子沉積到陰極(本圖中是接觸彈片)，其中金屬離子可來自電鍍液中的可溶性陽極，以補充沉積到陰極上的金屬離子。在這個簡單的單元中，沉積電鍍過程主要是由溶液的化學作用和陰極表面的電流分布來控制。

原則上電鍍過程的現象描述是非常簡單的。鍍層材料如金，沉積在底層基本金屬不同的點上並且在電鍍過程中在鍍層的表面漸漸加厚。達到一定厚度時，鍍層“完全地”覆蓋在底層金屬的表面上。圍繞“完全”這個詞的引証都是為了揭示這樣一個事實，即鍍層覆蓋的程度由基材金屬的表面特性和清潔程度以及電鍍過程而定。電鍍過程中最普通的缺點是在鍍層上有很多孔隙 (pores)。這種多孔性 (porosity) 和它對接觸性能的影響將在後面的章節中討論。

大多數電連接器接觸鍍層是在不斷循環往復 (reel-to-reel) 的過程進行以充分利用這個過程的成本效用。在本世紀七十年代和八十年代初期，大量的

努力都是爲了減少電連接器鍍層中金的使用量，因爲當時其價格高達 800 美元。減少金鍍層的厚度（如後面章節中將討論的，利用鎳底層是可能達到的）和控制金的數量及其在接觸處的位置取得了極大成功。

接觸鍍層電鍍通常有三種類型：完全電鍍（overall），局部電鍍（selective），雙重電鍍（duplex）。上述例子可見圖 3.2 所示。正如所預料的，完全電鍍（overall）是鍍層完全覆蓋在接觸表面上。錫接觸通常是完全鍍層。對貴金屬接觸而言，出於對成本的考慮一般采用局部電鍍（selective）或雙重電鍍（duplex）。在這兩種情況下，貴金屬是有選擇性的運用於可分離性接觸的末端，而此運用不同於在永久性連接或其末端中鍍層的運用。選擇性接觸鍍層有用在永久性連接上的金鍍層，但鍍層厚度在每一末端可能不同。雙重電鍍（Duplex）通常都是鍍在永久性連接末端的錫或錫合金。

應當注意到電鍍材料的性能，尤其是貴金屬，它與相同的鍛造性材料（wrought form）有很大的不同。一般來說，電鍍材料更硬而延展性較差，且比鍛造性材料的密度小。其變動範圍與材料本身和電鍍過程均有關係。

3.1.2 噴鍍

噴鍍是指在高壓作用下以機械結合的方法將兩金屬接觸面結合到一起。通常有三種方式：完全噴鍍（overlays），選擇噴鍍（toplays）和鑲嵌噴鍍（inlays）。其中完全噴鍍（overlays）完全覆蓋底層金屬。選擇噴鍍（Toplays）僅僅有選擇的覆蓋底層金屬表面的一部分。鑲嵌噴鍍（Inlays）是包覆金屬的一種特殊情況，其接觸鍍層材料是有選擇性的噴鍍在開有溝槽的底層金屬上。所開鑲嵌噴鍍溝槽可提供清潔的接觸表面以促進結合的可靠性。連續不斷的減少是爲了得到條狀金屬以達到最終需要的厚度從而增強金屬結合的壓力。此外結合增強因爲相互擴散過程而發生在熱處理過程中。更多關於噴鍍（cladding）方面的資料可見於 Harlan。

鑲嵌噴鍍（inlay）和電鍍接觸鍍層之間有兩個主要的不同點。第一：鑲嵌噴鍍使用鍛造材料，這樣使得其接觸鍍層的材料性能與電鍍材料的性能不一樣。第二，與電鍍相比其可用的材料範圍更廣。特別是貴金屬合金如 WE1（其中金 69 % -銀 25%-鈹 6%）以及鈹 60%-銀 40%合金作爲鑲嵌噴鍍（inlay）材料是不能用在電鍍過程中的。

錫和噴鍍層或鑲嵌層同樣用在電連接器中，但並不總是用作接觸界面。這些覆蓋材料通常是在接觸末端提供可焊接的表面。

3.1.3 熱浸

在電連接器運用中，熱浸僅用於錫和錫合金。在下面的討論中錫包括錫合金—在大多數情況下，指錫 60%-鉛 40%或 易熔的錫-鉛合金。熱浸包括將條形金屬通過熔融的錫溶液使其表面鍍上一層錫。其厚度控制是由不同的過程包括空氣刀（air knives）及空氣刷（air wipers）。典型的厚度，和厚度控制因此也由加工過程而定。

從一接觸界面的透視圖可以看出，熱浸和鑲嵌噴鍍或電鍍錫鍍層之間最大的區別是在熱浸過程中形成金屬間化合物。甚至在室溫下，銅-錫金屬間化合物形成的同時，如果不小心熱浸能產生大量金屬間化合物。過多的金屬間化合物不能提供可接受的接觸性能且對接觸的可焊接性能產生負面影響。在熱浸的時候將會產生金屬間的厚度，為確保接觸表面是事實上是錫而非金屬間化合物，必須小心控制熱浸過程中金屬間化合物產生的厚度。

3.1.4 總結

採用三種方法將會在接觸鍍層的性能上產生不同的特性。電鍍鍍層通常比噴鍍鍍層更硬而延展性更差，很接近鍛造材料的性能。熱浸鍍層僅限用於錫和錫合金。

3.2 接觸鍍層材料

接觸鍍層將分兩類進行討論，貴金屬鍍層和普通金屬鍍層。貴金屬鍍層包括金和鈀及其合金材料。普通金屬鍍層包括錫和錫合金，銀和鎳。本節的討論從貴金屬鍍層開始。

3.2.1 貴重接觸鍍層

貴金屬接觸鍍層是一種系統，其中每個組件執行複雜的功能。為了理解對接觸鍍層的需求，必須理解組件間的相互作用。

貴金屬接觸鍍層包括塗在底層，通常是鎳表面的貴金屬表層。貴金屬表

層厚度一般在 0.4 至 1.0 微米之間而其鍍底層厚度一般在 0.8 至 2.5 微米之間。現在也開始使用厚度小於 0.1 微米的金鍍層。如上所述，貴金屬表層的作用是提供一(film free)金屬接觸界面以確保所需要的金屬接觸界面。鍍底層是用於防止貴金屬表層大量的潛在性結構退化（potential degradation mechanisms），有些退化機理是源於接觸彈片的基材金屬，同時其它退化機理則是因為工作環境的影響。鍍底層的這些保護功能將在後節詳細討論。如前所述，最常用的貴金屬接觸鍍層材料是金、鈀或其合金。

金·金是一種理想的接觸鍍層材料，它不但具有相當優良的導電性能和導熱性能，而且幾乎在任何環境中，都有良好的抗腐蝕性。因為這些特性，金在要求高可靠性電連接器的使用中經常採用。但是金非常昂貴，因為該原因要考慮可替換的材料。關於金的替換性材料將在以後討論。

金合金·金合金保持了純金的許多特性同時其價格卻比純金低的多。金合金的運用已得到了各種各樣的成功。成功的程度依賴於其熔合劑（alloying agent）的特性及電連接器預期的工作條件。合金處理將提高金的電阻系數及硬度和降低金的導熱性及抗腐蝕力。其總的效果（net effect）是電阻有微小的升高但在環境穩定性方面卻有潛在的重要降低。金硬度的提高使接觸鍍層的耐久性有了提高，但是，金合金的性能在一定範圍的運用上可以接受的，所以它們不斷地被利用。Western Electric 發明的金合金 WE1，是一種 69%金—25%銀—6%鉑的鑲嵌噴鍍鍍層。

鈀·鈀也是一種貴金屬但是，除了硬度以外，其與上面所述的金的許多重要特性都不相同。與金相比，鈀有較高的電阻率，較低的導熱率，以及較差的抗腐蝕能力。除了活潑性，鈀還是聚合體形成的催化劑（catalyst），在有機水汽存在時，濃縮的有機水汽（organic vapors）通過摩擦運動集合在鈀表面。這樣的摩擦聚合體或棕色粉末（brown powder）會導致接觸阻抗增加。鈀的硬度比金要高，因此提高了鈀接觸鍍層的耐久性。鈀還有價格上的優勢所以已大量用於電連接器，尤其是柱狀端子（post）。但是大多數情況，鈀的表面還要鍍一層厚度大約為 0.1 微米的金（a gold flash）。Whitley，Wei 和 Krumbein 對用金鈀鍍層代替金鍍層進行了討論。

鈀合金·有兩種鈀合金運用在電連接器上。第一，80%鈀—20%鎳的鈀鎳合金，一種可電鍍合金，通常其表面也要鍍一層薄金。第二，60%鈀—40%銀

的鈀銀合金，它既用作接觸鍍層金屬也用作底層金屬，其表面通常也鍍一層薄純金，鈀銀合金是一種鑲嵌噴鍍材料。

合金處理對接觸阻抗的影響·合金通過兩種方式影響接觸阻抗。首先，它改變了接觸阻抗的初始值。其次更重要的是，它改變了環境中的穩定性（environmental stability）。下面的數據說明了這一點。軟金，硬金（金—鈷 0.1），鈀，80%金—20%鈀金鈀合金及 80%鈀—20%鎳的鈀鎳合金等接觸鍍層金屬在“可接受條件（as-received）”下其接觸阻抗隨接觸壓力的變化數據（如圖 3.3 所示）以及加熱到 250 度在空氣中保持 16 小時後的變化數據（如圖 3.4 所示）。

首先分析可接受條件下圖 3.3 中的數據。所有上述材料在接觸壓力作用下具有近似的接觸阻抗。該條件下這些材料的硬度、導電率及耐腐蝕性等方面差異都不明顯。在 100 克力作用下（典型的電連接器接觸壓力值），接觸阻抗大約在 0.6 至 2.0 毫歐之間變化。儘管這些變化是很明顯的，但所有這些數值對大多數電信連接器的運用而言都是可接受的。加熱後的數據（圖 3.4 所示）則顯然不同。

軟金、金鈀合金及鈀幾乎不受溫度影響。這些材料幾乎不形成氧化物或者沒有形成氧化物的傾向。實際上，在溫度輻射降低硬度(H)和電阻系數(ρ)過程中由於退火（annealing），阻抗值只有輕微的下降。硬度和電阻系數的下降對接觸阻抗的影響可以從公式 2.9 得知，將其重新整理為公式(3.1)：

$$R_c = k \rho (H/F_n)^{1/2} \quad (3.1)$$

但鈀鎳合金及硬金卻表現出與之不同的特性，接觸阻抗顯著增加。在這兩種情況下，接觸阻抗的增加是因為表面氧化膜的形成。鈀鎳合金生成氧化物是因為合金中 20%的鎳。硬金中氧化物的生成則是由于鈷硬化劑。鈷很容易生成氧化物，甚至鈷的含量很低(大約 0.1%)，加熱到 250 度很快會生成氧化物。氧化物快速生成的機理是鈷元素在金中的擴散。由于鈷原子隨機分布在金原子矩陣中，無論何時鈷原子到達表面，它很快就被氧化並附著在合金表面。最終表面鈷的濃度遠遠高於其內部 0.1%的名義含量值，鈷氧化膜即導致接觸阻抗的顯著升高。因為該原因，鈀合金很少用在溫度高於 125 度的環境中。

這個簡單的實驗清楚表明了貴金屬合金一個潛在的危險。金鈀合金沒有出現大的影響，如將要說明的，因為鈀也是或相對而言也是一種貴金屬。但

金鎳合金，因為鎳強烈的氧化傾向，是一種非常不同的情況。合金的成份——特別是基材金屬成份——在反應性環境（reactive environments）中對接觸阻抗性能有很大的影響。

合成貴金屬接觸鍍層·合成貴金屬接觸鍍層包括一厚度為 0.1 微米（on the order of $0.1\ \mu\text{m}$ in thickness）薄金層，及覆蓋的以降低在腐蝕性環境中合金表面活性的反應性表面。在電連接器上，通常在鈰或鈰合金表面覆蓋一層薄金。金表面保持了金的貴金屬特性的優點。鈰或鈰合金作為一種貴金屬底層材料，其提供了大部分鍍層的指定厚度。這些利用 80%鈰—20%鎳的鈰鎳合金及 60%鈰—40%銀的鈰銀合金的金屬底層，由於與金相比鈰或鈰合金的價格低廉，其在電連接器上運用正在上升。

· 小結 ·

總的來說，對貴金屬接觸鍍層而言，有必要保持鍍層金屬的貴金屬特性以防止外來因素對鍍層的腐蝕。如孔隙腐蝕，暴露基材金屬邊緣或磨痕的腐蝕，以及腐蝕的蔓延等。鎳底層對減少這些腐蝕的可能性是很重要的。另外，鎳底層提高了貴金屬接觸鍍層的耐久性。注意到兩件式電連接器的接觸鍍層，尤其是印制電路板上用於配合卡邊緣電連接器的襯墊，應具有相當的性能。

3.2.2 普通金屬鍍層

普通金屬鍍層與貴金屬鍍層的區別在於它們的表面通常存在表面膜。既然建立並保持金屬接觸界面是電連接器設計的一個目標，必須要考慮這些膜的存在。對普通金屬鍍層設計要求是保證配合時膜的移動和阻止以後膜的形成，主要通過它們確保接觸界面的穩定性。接觸正壓力與接觸幾何形狀，同電連接器配合時的插拔一樣，對含有膜的接觸表面也非常重要。

將討論三種普通金屬接觸鍍層：錫，銀和鎳。錫是最常用的普通金屬鍍層。銀鍍層有利於高電流接觸。鎳所知道的是限於作為高溫接觸鍍層。如前面所討論的，鎳作為貴金屬鍍層的底層非常重要。

錫及錫鉛合金鍍層·本章中，詞‘錫’的運用打算包括廣泛運用在可分離接觸界面的 93%錫—7%鉛合金。第二種合金，60%錫—40%鉛，主要用於

焊接連接，本節將不作討論。

如第二章所討論的，錫作為可分離接觸界面的運用源於錫表面大量氧化膜在電連接器配合時可能會移動（displaced）。這種移動是因為錫與錫氧化物的硬度相差很大。

但是，連接器的運用過程中錫表面的再氧化是錫鍍層的主要退化機理。該機理，後面將要討論的，通常稱作磨損腐蝕。

銀接觸鍍層·銀因為跟硫和氯反應產生表面膜而被作為普通金屬。硫化膜如果不破裂能在銀接觸時產生二極管的功能效果。電話機收發過程中的繼電器運用（relay applications in telephony）會受到這種影響而致使銀作為接觸鍍層的名聲很壞。但是應該注意到，這些運用都是低插拔或者無插拔（low-or non-wiping），從而使接觸界面對氧化膜非常敏感。電連接器配合時的插拔可減小這種敏感性。

銀的另一個特性限制了它的使用。它能夠移到接觸表面致使接觸間或印制電路板的襯墊產間發生短路（shorts）。Krumbein 對移動過程提出了總的看法。

盡管銀的兩個性質，硫化物及移動，限制了銀作為接觸鍍層的運用，但是如上所述，這種問題只是產生在繼電器（尤其是無插拔繼電器）而不是電連接器的運用上。

典型的銀鍍層厚度從 $3\mu\text{m}$ 到 $8\mu\text{m}$ 。通常，與相同厚度的金相比，銀相對軟一些（knoop 100），這也與它作為接觸鍍層的耐久性相對應。銀表面的硫化膜也非常軟且容易破裂。注意到因為硫化物的形成銀不會經受磨損腐蝕是很重要的。氯化物與普通化合物不同其移動更加困難，因為氯化膜更硬且更粘附。包括硫化物與氯化物的腐蝕物的混合型膜可在有些環境里形成，這些膜非常堅固。但是在大多數條件下，銀表面膜通過配合時的摩擦容易破裂。

銀具有優良的導電性與導熱性及高電流時的抗冷焊力。這些特性使得銀成為優良的高電流接觸的可選材料，在這些運用中應該考慮銀接觸鍍層。

鎳接觸鍍層·鎳鍍層因其表面緊貼的堅硬的氧化物而屬於普通金屬。鎳表面氧化物可以被破壞，但是需要很大壓力，因為鎳氧化物的厚度具有自我限制特性（大約為 100 納米），施加不到 1 伏的電壓即能電解。利用鎳的這種性能其可作為電極（battery contact material）。同錫相似，鎳也非常易受磨損腐

蝕。

3.3 選擇可分離接觸界面的接觸鍍層的考慮

基於鍍層材料性能總的簡要看法，本討論選擇性考慮電連接器上的貴金屬鍍層與普通金屬鍍層。膜處理，配合時表面膜的破壞以及避免以後膜的形成，對兩種不同鍍層的要求是不同的。對貴金屬而言，保持其貴金屬性以防止裸露的基材金屬受到腐蝕正是我們所需要的。從這個目的上來說作為底層的鎳的作用十分重要。而對錫鍍層而言，防止磨損腐蝕則是首要的。

3.3.1 貴金屬接觸鍍層系統的設計考慮

接觸表面被覆貴金屬的存在，本身並不能保證 a film-free 表面。為防止能夠達到接觸表面的接觸彈片基材金屬的蔓延，金屬鍍層必須連續並且有足夠的厚度。貴金屬鍍層的中斷能導致基材金屬裸露部位的腐蝕。鍍層中斷可因整個制造和鍍層過程的不同原因而產生。多孔性（porosity）已經提到，接觸鍍層磨損是基材金屬裸露的另一原因。當然，多孔性與磨損非常不同，多孔性是制造問題而磨損則涉及到運用。無論是多孔性還是磨損原因，基材金屬的裸露是令人擔憂的（of concern），因為裸露的基材金屬在典型電連接器的工作環境中可能受到腐蝕。接觸彈片材料的基材金屬成份蔓延到金接觸表面能產生表面膜。正如將討論到的，減少基材金屬腐蝕的可能性是鎳底層的功能之一。

進一步詳細考慮多孔性。在電鍍過程的討論中，多孔性被描述為產生於電鍍金屬的運動（kinetics）。對金鍍層而言，典型的多孔性對鍍層厚度的曲線如圖 3.5 所示。當然，這些曲線的形狀及厚度同電鍍金屬特性及運用一樣依賴於端子加工過程。圖 3.5 說明了為什麼電鍍貴金屬接觸鍍層厚度一般從 0.4 到 1.0 微米的一個原因，鍍層厚度小於 0.4 微米，孔數增加很快。而鍍層厚度大於 1 微米，孔數很少，從運用觀點來看，其降低比率是微不足道的。不必擔心孔隙的存在，因為孔隙的位置不會實質性影響金屬對金屬接觸面的產生。擔心的是如果孔隙暴露了基材金屬可能在孔的位置產生腐蝕。圖 3.6 對該腐蝕機理作了闡明。腐蝕物可充滿整個孔隙而且，更重要的是，如圖示的那樣，腐蝕物可從孔隙的位置移到鍍層的表面。隨著腐蝕物延伸到鍍層表

面，如果端子接近另一端子，例如相互摩擦，很可能干擾接觸界面的形成或減少既定接觸界面的接觸面積。

多孔性對電連接器性能的影響是有爭論的。根據剛才所述的機理，孔隙腐蝕可導致接觸阻抗的升高，但多孔標準及其工作環境的相互作用決定該性能的退化速度和退化程度。鎳底層對減少孔隙腐蝕可能性的作用將在後節討論。正如所預料的那樣，對處於混合流動氣體環境中小體系電連接器的重要研究顯示了電連接器性能隨多孔性的退化趨勢。但是並沒有一個臨界孔數標準。有許多高多孔性產品在預測最容易退化的環境里表現出良好的性能。後面將研究的電連接器中孔隙位置及其基座的屏蔽效果可以解釋這種現象。

接觸鍍層的磨損，如所提到的，也可能導致基材金屬的裸露。接觸鍍層的抵抗力，或耐久性決定於許多因素。包括：

- 接觸正壓力
- 配合間距
- 接觸幾何形狀
- 磨損機理
- 接觸鍍層

爲了本討論，我們僅考慮接觸鍍層的影響。其它因素對電連接器耐久性的影響將在第六章討論。

影響接觸磨損或耐久性的三個鍍層特性是：

- (1) 鍍層材料的硬度；
- (2) 鍍層材料的摩擦系數；
- (3) 鍍層厚度。

隨硬度的增大和摩擦系數的減少，在其它所列因素的聯合作用下鍍層的耐久性將會提高。耐久性也會因鍍層厚度的增加而提高。同厚度對多孔性的影響一樣，爲既定的運用選擇適當的鍍層厚度也會影響接觸磨損或耐久性。至於材料的特性，須首先考慮硬度的影響。

電鍍的接觸金鍍層通常是硬金（hard gold），即金鍍層包含有硬化劑（hardening agent）。從根據 Antler 改編的圖 3.7，可以看出與軟金（soft gold）或純金相比，硬金耐久性有了提高。但是，通過使用鎳底層，電連接器的耐久性有了更大提高。

鈷是最普通的硬化劑，但鎳也是很有效的。正如前面所討論的，硬化劑的可能負面影響包括提高了腐蝕敏感性，降低了導電性與導熱性及鍍層的延展性。

因硬化劑導致的延展性的降低也能影響電連接器耐久性能。兩種影響應同時加以考慮。延展性的降低能減少在既定壓力下接觸面積的增加，從而減少了粘附性磨損。但延展性降低能通過提高鍍層破碎及促進研磨性磨損而增加磨損。

鍍層的缺點，無論是多孔性還是磨損，因為它們位於可能發生腐蝕的裸露基材金屬上，是令人擔憂（of concern）的。如所提到的，鎳底層對減少這些腐蝕非常重要，下面將要討論到。

貴金屬鍍層中鎳底層的功能 • 貴金屬接觸鍍層系統中鎳具有以下幾方面優點：

- 減少孔隙及缺陷位置的腐蝕（pore and defect sites）
- 阻止腐蝕的移動
- 減少基材金屬成份的蔓延
- 增加延展性

我們將分別討論每個優點。

多孔性 • 圖 3.8 基本表明了鎳在減少孔及缺陷位置發生腐蝕的可能性與效果。該圖也包括圖 3.6 圖示的沒有鎳底層的孔隙腐蝕說明。兩者間最重要的區別在於在孔位置處的裸露的鎳將形成可有效密封腐蝕孔隙的氧化膜。鎳氧化膜的厚度是有限制的，典型為的 100 納米，沒有填滿孔隙，更重要的是沒有移動。類似的效果在缺陷位置包括磨痕也會產生。這種孔密封機理的效果在高濃度氯的環境中因為降低了氯對鎳氧化物的影響就已經提出。但是，氯濃縮的必要性並沒有很好明確。在這些環境中廣泛的測試表明鎳底層對很大範圍的電連接器產品的優點。

圖 3.9 顯示了孔隙腐蝕對置於模擬工業暴露環境的流動的混合氣體（flowing mixed gas FMG）測試環境中金鍍層片（coupon）的影響。測試環境由十億分之幾數量級（parts-per-billion）的氯，氫硫和氮的氧化物組成爲主要污染物，加上溫度爲 25 度的潮濕（濕度爲 75%）空氣。在孔隙周圍出現環狀腐蝕，結果腐蝕物出現圖 3.6 所示的腐蝕移動。這些腐蝕物的存在，當它們

蔓延到接觸表面時，對接觸阻抗有很大的影響。

來自於 Geckle 的圖 3.10，提供了一些有關腐蝕物移動過程特性的實例。這些數據來自暴露在上段所述 FMG 環境中的金/鈀/鎳/銅合金鍍層片，各層厚度分別為 0.1、1.5、2.5 微米。位於圖中間的縮微照片顯示了孔隙以及孔隙周圍的環狀腐蝕物。圖上面一系列 X—光線圖顯示了孔隙通過所有層的延伸。因為金、鈀和鎳層中信號的缺少及沒有缺少的強烈的銅信號，孔隙的存在是顯而易見的。裸露的銅是腐蝕物產生的根源。顯示了主要腐蝕種類（major corrosion species）位置的更低的 X—光線圖，暗示了氧氣主要停留在孔隙位置，氯可以輕微地移動，但硫腐蝕物明確局限於環狀腐蝕物範圍內。移動種類（species）明顯包括銅/硫腐蝕物。

腐蝕移動·圖 3.11 表明了一種評估腐蝕移動的實驗方法。在這種情形下的五種不同系統，自鍍有有益接觸鍍層系統的銅合金片（coupon）沖制（stamped）一圓盤形狀。沖制過程產生暴露的基材金屬邊緣，其在 FMG 暴露環境為可腐蝕位置，暴露後的腐蝕移動大致與上述描述相同。圖中插入的數據提供了暴露在 FMG 環境一定時間後腐蝕移動距離的實驗性數據。該數據揭示了兩種所關心的效果。

第一，注意到金表面腐蝕物的移動距離比鈀大，依次，鈀表面腐蝕物的移動距離比鎳大。

第二，鎳底層將金和鈀鍍層腐蝕物的移動距離減少了一半。

這兩種效果可以根據腐蝕物移動的運動學，以一種簡單但又關聯的方式加以簡明。基本的假設是腐蝕物在光潔表面擴散得很快，這種現象可能是因為表面張力的影響，類似於濕潤現象。腐蝕物在表面自由擴散以至於超出表面膜。光潔金表面不會產生氧化膜。鈀是一種催化劑（catalytic）材料，易於在其表面形成一層有機薄膜，且在測試環境里是反應性的（reactive），這一點將在後面章節討論。在測試的暴露環境里（in the test exposure），鈀表面很容易形成氧化膜。鎳，正如所提到的，也會形成一層表面氧化膜。在已知假設下，腐蝕物的移動符合數據所顯示的模式，腐蝕物在金表面擴散得最迅速，鈀次之，鎳最慢，這就解釋了上述所觀察到的在三種鍍層金屬上腐蝕物具有不同的擴散速度的原因。

第二次觀察，鎳底層上腐蝕物的移動距離僅為金底層的一半，是因為鎳

阻礙了腐蝕物的擴散。在這種情況下，鎳底層就象銅合金與貴金屬鍍層之間的柵欄。雖然鎳能夠阻礙腐蝕物的擴散，但由於鎳層僅有幾微米厚，腐蝕物很容易穿透鎳層在金或鈮鍍層表面更快地擴散，在圖 3.11 所示特定的測試條件下，可以想象鎳底層的阻礙效果大約只有測試暴露環境的一半，這是簡單的但基本正確的對實驗數據的解釋。

圖 3.12 顯示了在與圖 3.11 採用的數據類似的測試暴露環境里腐蝕物在鍍有金 / 鎳 / 磷青銅鍍層金屬的沖制圓盤上的擴散。外邊緣的膜非常厚，且其擴散距離減少。表面上的亮點為探測點，其上接觸阻抗的測量以金作為探針，在邊緣位置，其阻抗值大於 2 歐姆，試驗預設的極限值成立。如圖 3.13 顯示的只有在接近底層中心時，才會出現毫歐級的阻抗值。

鎳作為阻礙腐蝕物擴散對接觸界面的正面（barrier normal to）效果明顯受限於底層的厚度。但是，其側面的阻礙（lateral barrier）是非常有效的。圖 3·14 提供了一個實例，所示端子完全鍍鎳且在其接觸面上局部（selective）鍍金。接觸下部（the lower contact）也得到附加的薄金（gold flash）鍍層（通常為 0.1 微米）。將端子置於同樣的工業環境中。薄金鍍層表面更有利於腐蝕物的擴散。當考慮到收容端子於基座（housing）的保留飛邊結構（the retention lance）的腐蝕區域是沖壓產生的形狀，這就是顯而易見的（this is obvious when considering the corrosion around the area where the retention lance that holds the contact in the housing is stamped）。沖壓成形區域的鍍層金屬覆蓋範圍（plating coverage in the stamped area）不完全是因為沖壓過程中剪斷處（shear-break）的粗糙度和這些凹陷處（recesses）不能被有效電鍍。這些區域鍍層金屬的欠缺導致基材金屬（銅合金）裸露，從而成為腐蝕源。腐蝕物在薄金接觸面很快地移動而它們在全部鎳鍍層表面的移動是受限制的。該圖表明當鎳在腐蝕物移動方向上有足夠的延伸時，它能夠有效地防止腐蝕物擴散。

擴散·鎳底層阻礙擴散的有效性可通過圖 3.15 中的數據加以說明，該圖顯示了銅通過金，鈮，銀和鎳鍍層的相對擴散。同金或鈮相比，通過一定量或更多的減少可以看出鎳是一種有效的防銅擴散金屬。相似的情況發生其它典型基材金屬成份如鋅和鋇上。通過這種方式，鎳有效的防止基材金屬成份擴散到接觸表面，在該表面基材金屬成份可與其運用環境中的各種腐蝕起反應。

耐久性·鎳也能改善貴金屬接觸鍍層的耐久性。對金鍍層的影響將被表明，但相似的影響也發生在別的貴金屬鍍層上。根據 Antler 改編的圖 3.16，表明了直接鍍有 2.0 μ m 厚鈷一金合金接觸鍍層的銅和鈹銅底層的耐久性曲線。應該注意到檢測樣品包括平面取樣片 (flat coupons) 和半球形附件 (rider)。這些數據僅與幾何形狀有關而并不代表電連接器接觸界面的典型數值。但這些數據的趨勢與連接器的耐久性有關。

耐久性可用一磨損 (wear) 指標，即一種作為通過次數函數的基材金屬暴露總數的度量 (耐久周期 (durability cycles)) 來評估。耐久性指標為 50 意味著出現的 (showed) 磨痕 (track) 有 50% 裸露了基材金屬。注意到銅基材的金鍍層耐久性明顯低於鈹銅基材的金鍍層。這種結果是由于鈹銅比銅更硬。更硬的底層金屬能夠提供支持層來增加鍍層的有效硬度，並由此而降低了在既定壓力下的接觸面積。因為磨損與接觸點的破裂有關，正如第二章所討論過的，接觸面積的減少會導致磨損降低。

鍍鎳底層可提供一個比鈹銅更硬的支持層，所以可以預測其耐久性有進一步提高。圖 3.17 証實了這種預測，顯示了磨損指標對鍍有鈷金合金的銅的配合周期次數隨不同厚度的鍍鎳底層的變化。隨鎳底層厚度的增加，耐久性立即提高。

· 總結 ·

在這里，鎳作為底層的優點概述如下：

- 鎳通過其非活性氧化物表面，封閉基本孔隙位置，從而減少孔隙腐蝕的可能性。
- 鎳在貴金屬接觸鍍層下面提供了一層堅硬的支持層可提高耐久性。
- 鎳可有效地阻礙基材金屬成份遷移到接觸表面，當基材金屬遷移到接觸表面時，會與操作環境發生反應。
- 鎳也可有效地阻止基材金屬腐蝕物的移動。

前三個優點是在金鍍層變薄的同時保持相等的或是改良的性能。多孔性的影響已經減輕，貴金屬不再用作阻礙腐蝕物移動，並且耐久性有了提高。最後一個優點是減少形成於其它地方、移動到接觸界面並導致接觸阻抗增加的腐蝕物的可能性。

這種特性(nature)的考慮突出了連接器鍍層被作為系統來考慮的事實。鍍層不同成分間的相互作用能強烈影響鍍層性能。本討論為下一節存在數據的解釋提供了一個背景。

貴金屬接觸鍍層系統的環境性能 本節將描述在模擬工業暴露環境的 FMG 測試環境里貴金屬接觸鍍層系統的腐蝕現象。被評估的鍍層系統包括：

- 0.75 金(鈷)/1.25 鎳/銅
- 1.8 鈮/1.25 鎳/磷青銅(PB)
- 1.8 鈮(80)-鎳(20)/1.25 鎳/PB
- 0.1 金/1.8 鈮/1.25 鎳/PB

上述厚度單位都是 μm 。底層金屬的不同只能影響最初的接觸阻抗的大小而不可能影響在暴露環境下接觸阻抗的變化。

圖 3.18 顯示了在可接受條件(as-received)下如預先暴露于 FMG 環境，前三個系統(first three systems)接觸阻抗對接觸壓力的數據曲線。使用軟金探測參考，該圖表明了九個探測點的數據分布。探測模式可以是隨機性的或是有選擇性的。在隨機探測中，系統掃描表面，自動在九個隨機點上探測。在選擇性探測中，探測員(probe operator)降低探針，以便避開孔隙腐蝕位置并盡可能減少任何孔隙腐蝕或者腐蝕移動對接觸阻抗的影響。在選擇性探測模式中，可以評價鍍層本身原有的腐蝕反應性。圖 3.18 中的數據是隨機探測獲得的。注意到在 100 克力的接觸正壓力下，三個系統所產生的接觸阻抗都在 $1\text{m}\Omega$ 的範圍里。

圖 3.19 表明了在同一模式下，暴露於 FMG 環境里 48 小時後得到的數據。孔隙腐蝕和腐蝕移動的影響明顯表現在金與鈮的數據上。得到的數據與在可接受條件(as-received)下得到的數據相比，有些數據沒有顯出變化，但是許多探測點已經明顯受到腐蝕物的影響。在不插拔(non-wiping) 載荷的探測系統里，需要高壓力來破裂腐蝕物。然而，鈮—鎳合金的數據則不同，取代兩種模式下的阻抗數據，其同時有一個向上的移動和阻抗分布範圍的變寬。這是表面膜的典型現象。

這種解釋被暴露 100 小時后得到的數據所證實，如圖 3.20 所示。金鍍層數據仍顯示了兩種退化(degradation)模式。在這種情況下，鈮的數據則顯示了一種高水平的孔隙腐蝕。鈮—鎳數據繼續有一向上的移動和數據分布範圍的

變寬。

圖 3.21 繪製了作為接觸壓力函數的鈮-鎳合金九個調查點接觸平均阻抗的曲線。圖表清楚的表明平均接觸阻抗隨暴露點的升高。鈮(80%)-鎳(20%)合金性能不象是貴金屬，卻象是基材金屬，這也就不奇怪在合金中加入 20%的作為基材金屬鎳金屬。圖 3.4 顯示合金暴露在空氣中有相似效果。

圖 3.22 包含的數據是測量了金和鈮接觸鍍層經過相同的 FMG 環境後得到的。注意到金的數據幾乎不隨時間變化。而另一方面，鈮的數據顯示了增大的變化和擴大的分布，盡管其比鈮-鎳合金的變化範圍要小很多。鈮則顯示了對測試環境的反應。

這些數據表明了為什麼在大多數情況下鈮和鈮-鎳合金鍍層要與一個薄的金鍍層-約幾十個微米的金，配合使用。從圖 3.23 中可清楚看到，鈮外面的金薄層對 FMG 環境下腐蝕的作用是很有效的。接觸阻抗的大小和分布表明暴露在 FMG 測試條件下 48 或 100 小時幾乎沒有變化。當金覆蓋在鈮-鎳合金上時也會出現類似的情況。

但是，應該注意到金薄層厚度可能不會完全覆蓋鈮的表面，所以薄膜效應就可能產生。這種可能性對鍍有薄金層的鈮-鎳合金更有意義，因為其更有活性。此外金的缺失例如經過磨損腐蝕，將會導致其下層的鈮的暴露。換句話說，覆蓋有金薄層的鈮和鈮-鎳合金容易受到機械磨損腐蝕退化的影響。對鈮而言，摩擦聚合物的形成是其退化的主要機理。對鈮-鎳合金而言，經過氧化過程的腐蝕將會出現。

總而言之，環境測試結果表明，這三種鍍層對環境固有穩定性按其減少的順序為：金，鈮和鈮(80%)-鎳(20%)合金。基本鈮鍍層外的金薄層可有效的減少這種變動。此外在連接器應用中這種固有穩定性的差別會通過三種作用得到控制。

第一，遮蔽此類環境下接觸界面的連接器塑膠本體的作用，有效的增加了相互配合的連接器對環境的穩定性。環境遮蔽的效果取決於塑膠本體的設計。封閉式塑膠本體將明顯比開放式更有效，盡管卡緣塑膠本體可提供如第一章所述的保護。

第二，如數據所示，與在連接器鍍層中一樣，電鍍過程中的多孔性對其受腐蝕可能性有很大影響。鈮和鈮-鎳合金鍍層的電鍍經驗表明鈮和鈮-鎳鍍層

的多孔性通常會比金鍍層的低。這種作用減少了其固有穩定性的變化差異。

第三，受到腐蝕的可能性取決於其應用的環境。在典型的辦公室環境下，僅有較少的硫和氯，實驗表明腐蝕蔓延極小且孔隙腐蝕也同樣減少。

這些考慮的因素減少了固有受腐蝕性差別的意義。在更多的腐蝕環境下，尤其是含有高濃度的硫和氯的時候，選擇接觸鍍層時就應當考慮金所天然具有的貴金屬性優點。

貴金屬鍍層系統中的耐久性考慮・選擇接觸鍍層另一個要考慮的因素是鍍層的耐久性。在此情況下，經驗表明其性能的順序與在環境中相反，至少存在金薄層時是這樣的。鍍金的鈀-鎳合金比鍍金的鈀的耐久性高，而接下來鍍金的鈀比金要高。這種趨勢被認為與鍍層硬度有關。硬金的 Knoop 硬度為 200，而鈀和鈀-鎳合金的 Knoop 硬度為 400 或 500。

以上關於金鍍層的合格性解釋非常重要，經驗也表明由於鈀和鈀-鎳合金鍍層比金硬度更高而延展性更低，所以容易產生災難性的易碎的破片結構。

3.3.2 普通金屬接觸鍍層的設計考慮因素

錫(包括錫鉛合金)，銀及鎳被是用在連接器上的重要普通鍍層材料。三者中，錫代表了大量應用的普通金屬鍍層，因此本節主集中對錫鍍層進行討論。

普通金屬鍍層與貴金屬鍍層的區別在於：普通金屬接觸鍍層的設計考慮包括配合時普通金屬接觸鍍層表面固有氧化膜的破裂/移動以及防止氧化膜的再生成。本節先討論錫接觸鍍層表面膜的破裂，接下來討論錫鍍層的退化機理，磨損腐蝕。

錫鍍層接觸界面的形成，回顧前面所述，錫用作接觸鍍層源自於：其固有的氧化膜在連接器的配合中通過接觸表面的機械變形能夠破裂和移動。因此原有的錫氧化物在連接器插接過程中將因機械毀損而被擠破和取代。重新利用圖 2.16 作為圖 3.24 來引証表面氧化物破裂的機理。又薄又硬又脆的錫氧化物在負載下容易破裂。載荷傳到錫鍍層，由於其硬度小、延展性好而易於流動。氧化物裂縫變寬，里層的錫從裂縫中擠出來形成所需要的金屬接觸界面。然而不幸的是，錫表面的再氧化導致了錫鍍層的主要退化機理：磨損腐蝕。

磨損腐蝕・圖 3.25 說明了磨損腐蝕機理。圖 3.25a 描述了包括裂縫、破

碎的氧化物和從裂縫間擠出的錫接觸區域的原始接觸界面。圖 3.25b 顯示了接觸區域移到新的位置例如在機械干擾作用下。新的接觸界面是通過相同的破碎機理形成的。然而，先前接觸區域暴露的錫被再氧化。如果這些動作重複進行，也就是說，如果鍍層系統慢慢被磨損(圖 3.25c)，暴露的錫(摩擦腐蝕的腐蝕部分)連續不斷的再氧化導致在接觸界面形成一層氧化碎片(debris)(圖 3.25d)。這些碎片將導致接觸阻抗的增加甚至露出電路。引起接觸阻抗不可接受的增加必要的磨損循環次數取決於許多因素，包括運動方式和磨損距離(length)。對轉化運動而言(translational movement)，磨損運動只要移動幾個到幾十個微米單位的距離就足夠產生磨損腐蝕。腐蝕磨損率依賴於磨損距離。磨損退化率依賴於磨損運動距離(length)，因為氧化碎片必須經過磨損距離上的累積。大位移運動有效地將錫氧化物推到運動軌跡的盡頭。同樣原因，擺動(rocking)或轉動能加快磨損，因為碎片相對比較集中。

對錫而言，產生不可接受的接觸阻抗之前的磨損循環次數已經可以從幾百到幾萬。鎳在磨損次數和接觸阻抗增加方面與錫很相似。Bare 和 Graham 報告了沒有鍍金的鈮和鈮鎳合金鍍層經過幾萬次循環之後的磨損情況。他們還報告了鍍金的鈮和鈮鎳合金鍍層經過幾十萬次循環之後的穩定性能。

如果存在不同的熱膨脹，這是連接器經常發生的情況，磨損運動可通過機械干擾或熱循環產生。考慮一下裝置於印制電路板(PWB)的連接器。印制電路板，接觸彈片與連接器絕緣本體有不同的熱膨脹系數。由於熱膨脹不同(mismatch)產生的接觸界面壓力取決於其不同的大小，溫度變化，及連接器的長度(length)。熱膨脹不同是連接器磨損運動最主要的來源。

圖 3.26 顯示了磨損腐蝕(因轉動而引起)發生後的錫接觸表面。圖示黑點表示錫表面典型磨損腐蝕區域。圖 3.27 顯示了磨損點的交錯區。圖中可以清楚看到壓損的錫和錫氧化物碎片。

圖 3.28 顯示了磨損腐蝕與增加接觸阻抗之間的聯系。圖 3.28 的曲線通過縮微照片所顯示的腐蝕點的接觸阻抗的變化。一張氧氣穿過腐蝕點的放大電子顯微線疊加到縮微照片上，氧，表現為氧化物與接觸電阻的關係非常清楚。

假如磨損腐蝕是錫接觸鍍層主要的退化機理，那麼如何才能有效地防止或減緩這種退化呢？下面將討論這個問題。

磨損腐蝕的防止。預防磨損腐蝕主要有兩種方法。第一種，也是最常用

的方法是利用高正壓力。這些正壓力提供接觸界面較大的摩擦力以防止磨損運動。然而，增加正壓力有一個極限。當正壓力增加時，連接器插拔力和耐久性都將受到相反的影響。錫因為比較軟，有一極限耐久性且由於高摩擦系數一通常為 0.7 而表現出高插拔力，相對而言金的摩擦系數僅為 0.3。

第二種，利用預防磨損腐蝕接觸潤滑。圖 3.29 說明了使用預防磨損接觸潤滑的功效。顯示的數據來自一個因熱膨脹不同而導致的磨損運動的試驗容器。熱循環溫度介於 55 到 60 度之間。升溫是用來加速氧化和潤滑的退化。在這些條件下，產生的運動位移大約為 80 微米，這是好的磨損距離。

“幹錫”——干淨的錫表面——的測試數據顯示測試系統對產生磨損腐蝕有影響。它同時也表明磨損腐蝕可能是非常快的退化機理。在循環磨損數千次後，接觸阻抗按二次方的增長速度增加。此外礦物石油潤滑劑的測試數據也被列舉出來。礦物石油潤滑劑最初很有效，但是最終仍產生磨損腐蝕。該缺點與環境中的保護無關而與礦物石油本身有關。礦物石油的結構在溫度升高時從接觸界面流走並且揮發/退化。密封作用消失，摩擦磨損開始。涂有防磨損潤滑的接觸的數據顯示在摩擦循環數千次後表現了很好的抗磨損性能。經過數百次的循環摩擦之後接觸阻抗的下降是因為接觸界面被磨光而增加了接觸面積。

應該注意到除了摩擦腐蝕外，因為錫表面固有的氧化物的保護特性，錫接觸鍍層還提供了良好的環境穩定性。錫鍍層在引起貴金屬鍍層腐蝕的 FMG 環境中表現出很好的性能。當磨損腐蝕可以防止(通過高的正壓力來防止磨損，或者通過有效的接觸潤滑來防止氧化腐蝕)時，錫鍍層在變化的工作環境和很寬的電流和電壓範圍內能提供穩定的接觸阻抗。

錫鉛合金，連接器中主要利用下面兩種錫鉛合金：含錫鉛（93/7）合金和錫鉛（60/40）合金（或者 63/37，共熔焊劑成份）。錫鉛（93/7）合金可用作可分離性連接和永久性連接，但錫鉛（60/40）合金用作可軟焊（solderable）連接。考慮成本和性能兩方面的因素而使用低鉛合金。在錫中加入鉛可防止錫須(tin whiskers)的形成，錫須是電鍍過程中固有壓力作用下形成的細小而單一的水晶狀生成物。錫須直接或通過切斷和短路其它部件而導致連接器的短路(shorting)問題。用於可分離接觸界面的錫鍍層厚度介於 2.5 到 4 微米之間，取決於其應用的方式。

60/40 合金或 63/37 合金的應用厚度介於 1 到 6 微米之間，取決於焊接過程。因為這些合金的硬度低，易蔓延性且增加了復雜的鉛腐蝕物，所以它們一般不用於可分離接觸界面。

3.3.3 接觸鍍層的其它設計考慮

接觸鍍層其它設計考慮有兩種，兩種考慮在一定程度上已經討論過，尤其是對優點的詳細討論。即底層與接觸潤滑的應用。

底層・兩種主要使用的電連接器底層材料是銅和鎳。如所討論過的，鎳的主要作用是作為貴金屬接觸鍍層的底層以保持表面鍍層的貴金屬特性。銅，作為貴金屬鍍層的底層不能提供相同的功能。如所討論的，銅是一種腐蝕源，銅蔓延能導致接觸表面的退化。銅在提高接觸鍍層耐久性方面也不如鎳有效。盡管存在這些限制，在不可接受鎳底層磁性的應用中銅仍然用作底層。

鎳底層的第二個重要作用與永久性連接有關，保證可焊性——特別是為可軟焊產品提供一種活性（a shelf life）。保持可焊性將詳細討論。

成功的焊接需要錫焊劑（tin of the solder）與基材金屬襯底（base metal substrate）成份間產生金屬間化合物。因為銅和鎳與錫形成金屬間化合物適合於焊接，因而作為底層以保持可焊性。保持可焊性的全部鍍層系統包括底層和錫，金或鈀表面塗層（coating）。不同系統分別有不同的保持可焊性機理。

塗錫或焊劑的表面是可熔的（fusible）。錫塗層在焊接過程中熔化並滲入到襯底表面產生的金屬間化合物中。比較而言，金塗層表面是可溶解的（soluble），這意味著金完全溶解在焊劑里，金屬間化合物在裸露的底層形成。金塗層實質是保護了底層的可焊性。鈀在熔劑里溶解則慢得多，焊劑的結合通常是與鈀形成。

焊劑（solder coatings）在保持其可焊性方面更加有效，就象其花費更少一樣。因為它們是焊劑而沒有引入新的退化機理。而另一方面，金則引入了新的退化機理，兩種情況都是因為錫-金金屬間化合物的形成。金-錫化合物易碎而降低了焊接的機械強度。熔化的金-錫化合物在焊液里的累積將最終降低焊接過程的有效性。因為這些原因，焊劑塗層是確保可焊性的更好方式。

焊接過程產生金屬間化合物是必要的，但金屬間化合物本身不是必須可焊

的，且過量的金屬間化合物會產生可焊性問題。室溫下金屬間化合物的增多可能導致可焊性降低並有可能提高接觸電阻。銅-錫間化合物比錫-鎳間化合物增加得更快。

許多銅合金是可焊的，且底層可以增強可焊性，尤其是鍍在黃銅基材金屬表面。黃銅表面需要底層以防止鋅的蔓延，但這也可能降低了可焊性。

接觸潤滑・接觸潤滑常完成兩種不同的功能：

- ・減小摩擦系數
- ・提供環境保護

減小摩擦系數有兩個益處。第一，它減小了連接器的配合力（mating forces）。第二，它通過減少磨損而提高了連接器的耐久性。

接觸潤滑通過形成“密封”阻止或減緩外界環境進入接觸表面而能夠提供環境保護。對錫接觸鍍層而言，接觸鍍層的首要功能是在防止磨損腐蝕方面提供環境保護。預防磨損潤滑可以減小摩擦系數，但並非其主要目的。事實上，如果潤滑不能有效防止氧化，摩擦系數的減小可能增強磨損腐蝕。摩擦系數的減小因為減小了機械穩定性而使接觸界面更容易受到磨損。在沒有潤滑存在的接觸移動中不會產生的干擾可能產生潤滑性接觸的移動。

對貴金屬鍍層而言，接觸潤滑是爲了減小摩擦系數和提高連接器的耐久力，但是，伴隨提供環境保護重要性的提高，提供環境保護成爲有益的附加功能。

幾個與接觸潤滑相關的考慮值得注意。對有效潤滑而言，其在接觸界面數量必須足夠。測量和監測（monitoring）潤滑的存在是很困難的工作。

連接器可能伴隨有適當的潤滑出售，但是組件過程（特別是，焊接或柱焊的清洗（post soldering））可能移走潤滑劑。因而，需要第二次補充潤滑劑。

潤滑劑可能收留粉塵，如果在粉塵或污染環境中應用，可能會出現接觸阻抗和耐久性問題。最後，潤滑的適用溫度可能限制它的應用。

潤滑潛在的益處—減小配合力，提高耐久性，和在環境中的保護—是非常需要的，但是在評價接觸潤滑對給定應用的連接器的總的效果應考慮所提到的限制。

3.4 接觸鍍層選擇

選擇適當的接觸鍍層決定於其應用所考慮因素的數量。包括：

- 配合需要
- 應用環境
- 線路需要

貴金屬鍍層與普通金屬接觸鍍層的區別在於其所考慮的每一性能。爲了簡單，以金作爲貴金屬的代表，而普通金屬的代表則爲錫。

爲了爲接下來的討論提供一個背景，一些通常的注解是有用的。因爲貴金屬鍍層比錫鍍層更低的正壓力要求，更高的天然耐久性，及更低的摩擦系數，在配合需要方面它們的應用更加廣泛。因錫的硬度低，錫接觸鍍層需要高正壓力來盡量減少潛在的磨損腐蝕且其耐久性較差和摩擦系數較高。最終的效果是錫鍍層的耐久性較差而配合力較高。

所有的接觸鍍層在毫伏到伏和毫安到安的一定範圍內都能提供可靠的性能。金與錫的區別在於阻抗的穩定性。磨損腐蝕也是主要的區別。產生於磨損腐蝕過程的阻抗變化能夠導致在信號線路中產生噪音和在高電流應用中熱散發的可能性。金接觸鍍層在很寬的適用條件範圍內有助於保持接觸阻抗的穩定。

應用環境必須考慮機械、熱及化學環境。機械因素，如振動，影響連接器所需的機械穩定性。接觸界面的移動將導致錫鍍層的磨損腐蝕和使金鍍層易存在外來的腐蝕物或污染物。熱環境通過不同的熱膨脹引起接觸界面的移動而達到相同的結果。然而，高應用溫度一大約 105 度—可能會因擠壓松馳而使正壓力降低。這種正壓力的降低，錫比金表現得更隱蔽。由於本章其它部分討論的外來腐蝕的各種各樣的來源，環境腐蝕對金鍍層有很大的影響儘管金具有很強的固有的抗腐蝕能力。錫除了磨損腐蝕外，由于原有的表面氧化物而表現出很好的抗腐蝕能力。

下面的討論將更詳細地考慮上述各個考慮因素同時指出金、鈮、鈮鎳合金及錫鍍層之間的一些區別。

3.4.1 配合要求

兩種配合要求必須考慮：連接器必須承受的循環配合次數和連接器配合要求的壓力（配合力）。如第一章所提到的，連接器要求的循環配合次數取決

於相互連接的層級。第 2 到 4 級連接典型的要求僅僅是幾十次的配合循環。第 5 和第 6 級連接，因為它們提供輸入/輸出功能，可能需要更高的循環配合次數。另一方面，配合壓力顯示出相反的趨勢。第 2 和第 3 級通常要求考慮最大的配合壓力，因為這些層級的連接 pin 數傾向於比第 4 到第 6 級連接的 pin 數高得多。插座和兩件式板對板連接器其 pin 數各自可能從 400 到超過 1000。而幾十到一百的 pin 數在第 4 到第 6 級連接中更為典型。

接觸鍍層及耐久性· 影響接觸鍍層耐久性的主要因素是鍍層的硬度及其摩擦系數。貴金屬鍍層具有比錫鍍層更高的硬度和更小的摩擦系數，因此貴金屬鍍層固有的耐久性也比錫鍍層高。

耐久性不僅依賴於接觸鍍層，還與下列因素有關：

- 接觸正壓力
- 接觸幾何形狀
- 接觸長度
- 潤滑
- 鍍層厚度

除了鍍層厚度以外，其他因素在第二章均已經討論過並將在第六章繼續討論。本節重點是討論接觸正壓力，因為接觸鍍層的選擇決定了連接器所需要的接觸正壓力。其他因素對貴金屬及普通金屬鍍層來講具有相似的影響。另外，鍍層厚度對耐久性的影響也應該注意。

如前所述，錫鍍層比金鍍層需要更高的正壓力來盡量減小磨損腐蝕的可能性。為了提供機械穩定性，鍍錫連接器的正壓力通常在 200 克力以上，比較而言，金鍍層連接器只需 50 克力左右的正壓力即可保證其接觸穩定性。當耐久性的需求很重要時，耐久性隨著正壓力的增加反而降低的事實使金鍍層相對於錫鍍層的優勢更加明顯。

貴金屬鍍層耐久能力的差別並不是很明顯，在 3.3.1 節，應該注意到貴金屬鍍層的相關特性，按遞減順序，為鍍金的鈀鎳合金層，鍍金的鈀及金鍍層。按這樣的順序，可以想到貴金屬鍍層是鍍在鎳底層上。

另外，鍍層的耐久性取決於鎳底層的厚度及其硬度，這些相互作用使得很難超過一般順序得到連接器耐久性的確切值。

理所當然地可以說接觸鍍層的耐久性取決於鍍層厚度，但這種耐久性與

鍍層厚度的關係也取決於前面提到的鍍底層的材料性能，所以耐久性－厚度關係不可能是一直線。

有效的接觸潤滑能通過兩種方式減少貴金屬鍍層的相對差別。潤滑結果也能減少耐久性的差別。另外，能提供環境保護的潤滑劑能減少固有腐蝕敏感度方面的差別。

影響耐久性的幾何參數上面已經列出。連接器的設計在這些方面變化很大。接觸幾何形狀和接觸長度的主要影響是各自的磨損區域和磨損軌跡長度。所有這些對比的最終結果是連接器的耐久性根據試驗的方法已被最可靠地評估出來。

接觸鍍層和配合力・配合力取決於以下幾個因素：

- ・ 接觸正壓力
- ・ 接觸幾何參數
- ・ 摩擦力
- ・ 潤滑

接觸鍍層是通過影響接觸所需正壓力的大小亦即通過影響由摩擦系數決定的摩擦力的大小來影響配合力的大小的。先前已經指出，由於金鍍層比錫鍍層具有更低的正壓力要求和更低的摩擦係數，因此金鍍層比錫鍍層具有更低的配合力。通過使用接觸潤滑可使摩擦系數的不同在一定程度上能得以改善。貴金屬鍍層之間區別很少用配合力而是用耐久性來表示。

注意到接觸配合力和更重要的參數－連接器配合力的不同是十分重要的。當然，連接器配合力不僅依賴於每個接觸接觸時的配合力，也包括連接器絕緣本體以及連接器各部分的緊固力的影響（alignment of the connector halves）。連接器的配合將在第六章更為詳細的討論。

・ 總結 ・

當應用需求包括高耐久力和高 pin 連接，那麼貴金屬鍍層是首選的。有薄金層的鈮（20%）鎳（80%）合金鍍層能提供最高的耐久力，接下來是有薄金層的鈮鍍層和金。錫鍍層，因為其固有的低硬度和需要較高正壓力來減少摩擦腐蝕的可能性，故錫鍍層與貴金屬鍍層相比表現出有限的耐久性和較高的配合力。高配合力要求限制了具有錫鍍層的連接器的接觸 pin 數。

3.4.2 應用環境

在應用環境這個標題上要考慮以下幾個因素。包括有機械環境，除了配合條件，還包括振動和磨損；熱環境方面包括溫度和溫度波動；化學方面包括溼度以及一些潛在的腐蝕如氯化物和硫化腐蝕。應用環境的每個方面都會對接觸鍍層的選擇產生影響。

機械方面・雖然機械配合是作用在連接器上的最常見的機械壓力，但在連接器的整個有效期內還會受到許多潛在的干擾。機械沖擊和振動是必須要考慮的其它因素。連接器暴露在許多潛在的沖擊和振動源中。然而，無論什麼樣的原因，所關心的效果是因為干擾而產生的對接觸界面的壓力是否足於導致連接器兩部分的相對移動。如果產生這樣的運動，它們能常被限於一定的範圍而歸屬於磨損的一種。磨損有兩種令人擔憂的結果：磨損損耗和磨損退化（fretting wear and fretting degradation）。磨損損耗是指在第二章中所描述的磨損過程，產生的結果是接觸鍍層受損。磨損退化包括摩擦腐蝕（fretting corrosion），相關的錫、鎳、鈀鎳合金以及摩擦聚合物，相關的鈀。

注意到潛在的磨損損耗是很重要的，因為它能引起鍍層的穿透性磨損。連接器期望達到的預測配合循環次數不僅僅是連接器磨損方面的唯一因素，這種考慮使得薄鍍層重要性增加，例如鈀、鈀合金和鎳鍍層外面的薄金層。因磨損所引起的薄金層的損失會導致底層的鈀和鎳裸露出來。換句話說，鍍金的鈀和鈀鎳合金對磨損退化機理是很敏感的。而對鈀來說，摩擦聚合物的形成則是其主要的退化機構。鈀鎳合金或鎳的磨損腐蝕是通過氧化作用發生的。鍍有薄金層的鈀和鈀鎳合金鍍層已被許多調查者評價。大多數而不是全部的研究，已經報告過它的穩定性能。鎳鍍層表面金薄層的使用是近期的事，所以這段時間幾乎沒有什麼証明經驗。但是，可以肯定的是這些鍍層金屬對摩擦腐蝕非常的敏感。還應該注意到，暴露底層金屬的其它機理的存在。例如：不完全的鍍層，鍍層的損壞如刮擦。

總而言之，與機械環境相關的主要論題與磨損損耗及磨損退化有關。錫鍍層對磨損退化是最敏感的。然而，金鍍層的選擇應該考慮到這些機械性的影響。

熱環境・熱環境存在兩個主要因素：應用溫度和熱波動。絕對溫度能導

致大量潛在的退化機理。熱波動的主要影響是因為熱膨脹的不同而經過的潛在性磨損。

重要的可能性敏感溫度的退化機理包括腐蝕，擴散和金屬間化合物形成。腐蝕率一般隨著溫度的升高而加快，盡管溫度對水份的吸附效果能減緩這種作用。擴散速度也隨溫度的升高而加快，結果能產生表面膜。如圖 3.4 所示。

金屬間化合物（IMC）的形成對錫鍍層是很重要的。金屬間化合物的形成速度隨溫度升高而加快。如果金屬間化合物的形成消耗了錫而在接觸面上的該點形成大量的金屬間化合物，那麼接觸電阻可能受到影響。一般來說，保留在表面上的錫，能提供有效的接觸。圖 3.30 中的數據對此作了描述。圖 3.30 顯示了一個 3 微米厚的鍍錫銅（tin-over-copper）以軟金探針所測得的接觸阻抗隨壓力的曲線。數據在可接受的條件下顯示，一是增時處理使錫轉化為錫化合物，二是增時處理和腐蝕後。IMC 阻抗的增加超過了可接受條件下的值但它對許多應用是合適的。雖然增時處理的時間足於完成從錫到金屬間化合物的全部轉化，但通常仍能發現殘留在表面上的錫。如果表面被腐蝕物取代，金屬間化合物本身的接觸導致接觸阻抗的額外增加。

總之，熱環境能導致腐蝕退化，它也能影響貴金屬的腐蝕速度和潛在地影響錫鍍層的金屬間化合物的生成。

化學性· 化學環境包括濕度及一系列可能的腐蝕種類，如氯，硫和氧。氯和硫對於貴金屬鍍層特別重要，而氧則對錫鍍層很重要。如先前所提及的，錫氧化物對錫提供了來自於在其它腐蝕源(source)的腐蝕保護。

濕度對腐蝕率和腐蝕物水合度的影響是令人擔憂的。經驗也表明，濕度變化能影響腐蝕機理和腐蝕率。

貴金屬的腐蝕機理在 3.3.1 節中已經作了討論。為了更加完整(for completeness)，對貴金屬鍍層而言，應該注意到主要的腐蝕機理隨環境成分特別是氯和硫的含量(content)的變化而發生變化。隨環境惡劣程度(in severity)的增加，主要的退化機理由多孔腐蝕變化到腐蝕擴散(creep)。正如前面所說的那樣，移動類型以銅－硫腐蝕物出現。

對於錫鍍層，由于氧在磨損腐蝕中的作用，氧是主要的反應(reactive)類型。由于錫氧化物固有的保護特性，所以錫在 FMG 環境中性能良好。

總結・總之，應用環境的考慮表明了接觸鍍層選擇上的不同權衡，取決於化學方面，熱，或是與腐蝕相關方面，何者占支配地位。在惡劣的機械環境里，因為磨損腐蝕而限制了錫的使用。但是，磨損損耗的可能性，磨損退化的產生，在惡劣的條件下不應該低估。高溫環境要求對錫金屬間化合物的產生和對影響貴金屬鍍層的蔓延/氧化的考慮。腐蝕考慮對貴金屬和錫來說是不同的。而且，磨損腐蝕主要涉及到錫。隨惡劣條件的增加，貴金屬的腐蝕机理會隨環境從孔隙腐蝕轉變為擴散(creep)腐蝕。

3.4.3 電路需求

從一個基本的觀點出發，如果能創建並保持一個金屬接觸界面，那么在一個大電壓和電流範圍里的接觸鍍層間的功能(finishes with respect to their functionality)沒什麼不同。在這樣的條件下，因硬度和阻抗系數的差別產生的阻抗的變化是相對較小的。鍍層間的不同在於阻抗的穩定性，即接觸界面對於應用條件下退化的敏感性(sensitivity)。自然地，對比羅簡單的描述有幾個限制因素。

電壓・在電連接器上，除了電能的應用，電壓相對很低——只有幾伏特。金屬間的接觸界面將以歐姆來衡量，即電壓與電流間的關係是線性的，其斜率由系統阻抗決定。只有當接觸界面不完全是金屬接觸面時(cease to be completely metallic)，也就是說，當它們開始退化時，電壓的影響才顯現出來。在這種條件下，電壓可能允許薄膜的電性中斷(breakdown)並由此而建立或重建一個較低的接觸阻抗，這一現象有時稱作自我復原(self-healing)。不幸的是，這種阻抗容易變化並且不可恢復，這也是為什麼薄膜的機械破壞和薄膜形成的避免對電性中斷是首要的。Wagar 和 Holm 提供了電性薄膜中斷特性的討論，主要概括在 2.3.2 小節中。

本討論目的關鍵點是導致中斷的必要電壓和的因此產生的高變化性阻抗。電壓的變化源自於薄膜結構本身的易變化性。厚度，組成和結構都依賴於薄膜形成的環境。阻抗的變化性產生於因為中斷引起的導電區域取決於中斷時間里電流的流過的事實。

Bock 和 Whitley 提供了有關磨損退化的電流及電壓決定條件的證據(evidence of this current/voltage dependence with respect to fretting degradation)。

電流・正如第一章所述，針對電流有兩種基本電性應用：信號和電能。對於信號應用，典型的電流通常低於 1A。而電能應用則可能需要幾十甚至上百安培的電流。

對於信號應用，在可能引入系統的雜訊或者數字式應用上可能的數據丟失方面，接觸鍍層退化的影響及在隨之而來的接觸阻抗的變化是非常重要的。Abbott 和 Schrieber 研究了這一影響，而且 Abbott 是針對磨損腐蝕來考慮。根據這些著作，發生數據丟失的可能原因是，隨接觸阻抗的退化所產生的瞬間開路趨勢的增加。在可引起貴金屬鍍層磨損腐蝕的條件下，也可以得到類似的結果。

在典型能量應用更高電流下，由於高電流下而產生的焦耳熱和紅外線，會導致額外的考慮。兩個單獨的(separate)問題值得討論：(a)什麼因素決定鍍層所能承受的最大電流。(b)高電流時，接觸阻抗的退化有什麼影響。

接觸鍍層所能承受的最大電流由接觸界面的溫度所決定。接觸界面溫度反過來又取決於產生的焦耳熱與從接觸界面到接觸彈片散熱的平衡。熱量的產生取決於鍍層阻抗系數和阻抗系數隨溫度的變化率。而散熱取決於熱傳導率和熱傳導率隨溫度的改變率。這些反應可能相當複雜，就象 Williamson 所討論的那樣。

為了本討論的目的，注意到每一個鍍層在其熔化時都有一特征電壓，特征電壓的大小，及依據前面提到的相互作用所能達到的比率就足夠了。對於金，銀和錫鍍層，各自的熔化電壓分別是 430，370 和 130 毫伏。

在實際上，通過接觸界面的電壓下降由電流產品(product of the current)和接觸界面阻抗所決定。At a first cut，熔化電壓能被用來指示鍍層的電流容量，其公式如下：

$$V_m = I * R_c \quad (3.2)$$

其中 V_m == 熔化電壓

I == 電阻為 R_c 且即將發生熔化時的電流

R_c == 接觸界面阻抗

在第二章已經討論過， R_c 取決於鍍層和接觸壓力。對於一個確定的接觸阻抗，通過熔化電流的減法，最大電流能夠被確定。恒定的電流容量一般由溫升條件所決定，而溫升條件又取決於接觸阻抗的大小，這一點將在第十二

章中討論。

按這個標準，錫具有低電流容量，然而金和銀卻是相當的。鈰和鎳則具有更高的熔化電壓，但是它們所擁有的高阻抗和低效熱傳導性能制約了這一優點。

對於高電流應用，銀由于自身的低電阻抗和高效熱傳導性能而占有優勢。在電能接觸中，銀的弱點，污點和移動趨勢并不重要。電能接觸的典型的高壓力(high forces typical of power contacts)使污點的影響降至最低。巨大的尺寸，分離和通常典型的電能應用接觸間的絕緣減少了移動反應。

接觸阻抗退化在高電流性能上的影響是明顯與前述討論有關。這樣的退化更進一步促進了接近熔化電壓。以這樣一個觀點，鍍層對退化相對的反應有更大的影響在電能應用的鍍層選擇上。再次，錫由于自身的低的熔化電壓和對磨損腐蝕的反應 poses 最大的危險。

電路參數綜述·在理論上，金屬間界面對電流和電壓沒有反應，但接觸界面的退化連同接觸界面阻抗的變化引入了一系列的考慮。

3.5 接觸鍍層概述

合適的接觸鍍層的選擇包含了使用和功能需求的考慮。例如，由于對錫的高的接觸壓力需求和在裝配壓力及磨損的共同影響，高接觸數量，高适配循環需求決定了貴金屬鍍層(參見表 3.1 和表 3.2)。環境考慮是複雜的，包括在貴金屬鍍層上的多孔性和在錫鍍層上磨損退化的可能性之間的權衡。考慮一個確定的應用，合適的鍍層是在性能與可靠性間的“最好”的折衷。

表 3.1 接觸鍍層的接觸壓力需求

鍍層	最小接觸壓力(g)	評價
金	25	最小值由機械穩定性和污染物的轉移所決定。尤其是零接觸壓力(zero-force)條件必須極力避免。
鈰	50	由于接觸反應的作用表面薄膜的可能性。此外，金的評價也適用。
金-鈰或	50	薄金表面將是多孔的，所以需要使用鈰。

鈰－鎳

錫	100	100g 是最小值。更高的值可用來解釋磨損腐蝕。但必須提供機械穩定性。
銀	75	必須解釋表面硫化膜。如用作電能接觸則可能需要更高的壓力。
鎳	300	更高的硬度需要更高的壓力來確保破壞薄膜。

表 3.2 接觸鍍層的鍍層，硬度，延展性及摩擦系數

鍍層	硬度(Knoop) (%)	延展性範圍	摩擦系數常用值
純金	<90	7-10	0.5->1 0.7
鎢金	130-200	<1	0.2-0.5 0.3
鈰	200-300	1+	0.3-0.5 0.3
金-鈰或鈰-鎳	200-300	1+	0.3-0.5 0.4
銀	80-120	12-19	0.5-0.8 0.6
錫			
粗糙度	9-12	20	0.6-1.0 0.8
亮度	15-20	3	0.4-0.6 0.5
93-7	9-12	17	0.5-0.8 0.6
雙列直插隊			0.2-0.8
直插封裝			
鎳	140-400	5	0.5-0.7 0.6

第四章 接觸彈片材料

銅合金在電氣和電連接器上得到了很廣泛的應用，其原因是由於它具有好的傳導性能、強度、成型性以及抗腐蝕性能。在本章中將從連接器使用者的觀點，來對商業上可加以利用且其性能適合於運用在連接器上的合金進行其性能的對比。然而與連接器製造相關的重要性能也沒有被忽略，因為它們同樣也影響合金材料的選擇。除了一些對連接器來說獨特重要的方面，一

般的關於銅合金的信息讀者都可從參考目錄 1-4 中得到指導。

如表 4.1 中所總結的，當選擇合金材料時連接器產品的功能性需求如設計因素和材料性能之間的相互關係將會共同作用。合金的種類能滿足產品的功能性需求以及其所分布的功能和如 4.1 部分中所總結的它們在碾磨過程中的總的方面。銅合金將會在 4.2 部分中由一般術語進行回顧，更專業的將會在 4.3 部分中的合金中另以敘述。

4.1 主要的銅連接器合金

4.1.1 銅合金的製造

銅合金材料在運用於連接器的加工過程中，先是被加工成為薄片狀的板材，然後切成條帶形狀以適應後面的沖壓過程的需要。線材同樣應用於連接器中，但是在端子元件和其他類型的連接器中這樣的材料應用得很少。

圖 4.1 描述了一個典型的薄板和條帶銅合金的製造流程。此外在參考書目 3 中可以得到更詳細的描述。合金線材以同樣的方式製造但具有幾個顯著的特點：熱擠壓，軋製，和通過沖模的拉拔以改變熱軋製和冷軋製在板材中的應用，以及退火處理過程經常用於這種產品。

溶煉和鑄造 銅合金是最先用於可回收的商業應用的金屬之一，這是因為工業上能用經濟的辦法將銅合金中的雜質維持在一個較低的水平。溶煉常用於電溶爐之中而少見於銅合金在真空和惰性氣體下的溶煉和鑄造過程中。碳層能提供一足夠的保護。此外，利用真空或特殊的空氣環境將會很大的增加合金製造的成本。

氫、氧和碳的污染影響由溶煉過程和熱力學方法來平衡其溶煉層進行控制，其中氫能溶解於銅，氧能與銅和一些合金元素形成氧化物，而碳能與有碳化物組分的合金起反應。溶煉控制包括純電解陰極銅和有選擇的相容合金碎屑。當一些純組分如鎳、錫、硅或起支配作用的合金如磷、鉍、和鉻合金組分增加時，都會引起合金成份改變。

板材鍛造的製造過程是從不連續的鑄造成大矩形橫截面金屬錠或薄鑄片開始的。前述大金屬錠的典型尺寸為約 150 毫米厚，300 到 900 毫米寬，並且經過熱軋製處理以有效的減少其厚度並消除在鑄造過程中殘餘的鑄造微片。

另一種鑄造方法是薄鑄片(常用於窄條狀鑄造材料)，其典型的尺寸是約 15 毫米厚，150 到 450 毫米寬，這些薄鑄片將直接轉到冷軋過程之中。選擇條形鑄造是基於經濟上的考慮因素(熱研磨需要較高的資金成本)以及合金的特性(一些銅合金不容易在熱條件下工作)。

前述半連續且大的金屬錠在鑄造過程中垂直利用一個中空水冷的銅模，在開始時此銅模的下底部被封住。溶化的金屬實際上並未象圖 4.1 中所示的直接進入溶模。此溶化的金屬通過一流槽及分配系統進入溶模，分配系統能通過一陶製閥系統控制金屬的流量。底關閉部從溶模中降低，此時形成一穩定的固體外殼以容納溶化的金屬。鑄造將繼續進行直到一直冷(DC)金屬錠形成以足夠熱軋製的長度。直冷(DC)金屬錠處理的經濟上的優點是幾個金屬錠可當溶爐中的溶化金屬加入相鄰的溶模時同時形成。此外接著通過熱軋製在厚度方面的分離是一個快速有效的方法，盡管在軋製以前要經過重新加熱。

水平方向進行的條狀鑄造將會產生呈盤旋狀的薄片，此薄片的厚度是與冷軋中第一次分離的軋磨容易相配合的。薄片在製造中被切成盤旋狀而不影響其鑄造過程。鑄造後的表面將會重新研磨加工以形成高的表面精度。錫青銅大多數情況下用於條狀加工是因為其較差熱環境下的工作性能，而黃銅可廣泛用於熱軋製中的大部分應用範圍，一些合金製造商還將其用於條狀鑄造加工中。

熱軋製 直冷錠在幾小時之內加熱以用於特殊合金溫度的需要，這樣就能通過回動研磨將其從 25~150 毫米的厚度減少約 10~25 毫米。在熱軋製中快速減少其厚度是可能的，因為其溫度變化可使合金快速再結晶而不是硬化。典型的預熱溫度是從 850 到 950℃。溶爐環境能有效的將氧化過程減小到中性的程度。此階段形成的氧化物對其要求並不嚴格，因為現有的熱軋製片將會在研磨中把表面氧化物及缺陷部清除。此外更重要的是熱處理抹掉了紋理粗糙的鑄造結構，這樣就能達到均勻和較好的效果。

當熱軋製完成後，而在水噴淬火及盤卷之前時軋薄片的溫度大約在 600℃左右。接著是用機械方法去除熱軋製後的表面和邊緣，此後合金片將要經過一系列的冷軋和退火處理以降低其表面粗糙度，其中退火處理能提高紋理的微觀結構、促進其均勻性並得到所需的性能。

冷軋過程 經過製造商與一系列的軋製和退火加工相配合的冷磨處理之

後將會得到一性能均勻和尺寸均勻重達 1000 公斤的盤卷片。分離軋製過程在處理中的厚度可利用前後安排的四高研磨(four-high mill)(其中兩加工軋製由一大直徑的回程軋製)，以及獨立，回程研磨。非常普遍的是通過一系列的研磨後過程可以得到最後的厚度和性能(如已知的 Sendzimir 研磨，其加工軋製是經過幾組軋製實現的)大尺寸的厚度是通過接觸計量器的盤旋長度來監測和控制，小尺寸的微觀厚度是通過 X-射線或伽瑪射線來度量。線張力和軋製形狀在軋製過程中可以調整以提供一均勻的條狀尺寸。

退火 冷軋可減少條狀厚度面增加合金強度但同時也降低了其延展性。有效加工過程中的持續性需要在加工過程中的薄片在其中的幾處通過退火處理變軟。退火過程中的變軟驅動力是軋製變形過程中存儲能量的釋放。新的紋理是從變形紋理中成形的，並且其尺寸也同時增加。至新紋理處的延伸是允許增加的，因為在成型性和強度上需要更好的紋理微觀結構，此延伸是由退火溫度及持續時間的選擇決定的。

銅合金的退火是在同一溶爐的不同盤旋片中進行的，其溫度將保持幾個小時當開放的盤旋薄片通過一退火溶爐(請參照圖 4.1)。每一退火方法都有其優點和局限。成批退火其側重點在於加重的前末端處理厚度；通過鍍層厚度處理的退火能達到更大的靈活性，並且每一種方法之間可以相互替換。

整爐退火處理是位於一可移動、類似鍾形的內腔之中進行，且此內腔的下部封閉。在內腔的盤旋片是通過處於低氧和低濕度的氮或氮-氫成分的氣體來防止其被氧化。而上述的氣體在內腔快速循環。此內腔又被一更大的可移動的外部空腔所包圍，以收容此加熱源(燃燒氣體或電加熱)。內部鍾形腔內的溫度從 250°C(一般用於純粹的銅)到約 650°C(用於一些銅合金)。表面質量是由被覆物所保持，而此被覆物可防止線圈之中包裹物的粘貼。殘餘的被覆物在之後的清除加工過程中將被去除。

合金線圈將在一到兩個小時內達到均勻的溫度，然後其設在一定溫度並保持幾個小時。通過去除了外層的容腔後退火的冷卻速度將會加快。內部容腔及其內部的保護氣體成分將一直保持到金屬完全冷卻，以避免其受到氧化。

線圈的連續退火可利用將薄片(sheet)通過溶爐而實現，此溶爐還包括有一燃燒室以通過直接接觸來對金屬進行加熱。氧化可通過控制氣體成分來減少。對如圖 4.1 中所安排的垂直溶爐來說，板材通過一頂端封閉部進入加熱

區，並且其冷卻是利用沖擊氣體在從下端封閉部退出前進行。板材在低於出口部的水中淬火。排列成一直線的酸清洗和研磨刷將會在板材被盤卷之前完成，而此過程位於溶爐線之末端。

氫氣是從壓縮的氨水中提煉出來的，它可與氮氣混合在一起而不發生化學反應。使用這些干淨氣體的火爐除了可能水平放置并且具有更高的防止外面空氣進入的密封裝置外，具有與普通燃燒爐同樣的特性，該火爐通常是在近似標準大氣壓下工作的。薄片(sheet)被外部的熱蒸餾瓶(retort)或者火爐內部自配的電加熱元件加熱升溫。薄片(sheet)在進入大氣前被噴出的氣體冷卻。

在退火過程中，銅合金氧化被減少到了最低點，但是它是不能完全避免的。氧化的程度及形成的氧化物的耐火性依賴於合金組成成分同保護氣體發生氧化反應的活性。非合金的銅和黃銅抗氧化能力相對強一些，因為退火溫度低并且由於熱力學原因，殘餘的氧化物及用于降低氣壓的露點形成控制要求是適度的。合金氧化物具有很活潑的元素，如金皮或鋁，在商業許可的環境中不能逃避被氧化。酸浸(Acid pickling)(包括稀釋的可與過氧化氫反應而生成更具腐蝕性物質的硫酸)和研磨刷及拋光被廣泛地應用於確保不會引起印刷工具不可接受的磨損的高質量表面和材料。

後處理 合金型材制造的最后工藝—退火是相當關鍵的，因為這一步形成了一種材料以達到需要的性質。進行後續退火處理材料的厚度依賴於硬化合金以達到所需的強度或生成調劑的冷軋的次數。本節後續部分提供了冷軋選定合金的例子。爲了提高合金材料的性能或降低內部殘渣的彈性伸縮率，材料冶煉過程常包括低溫退火工藝。

爲了消除片狀材料的彎曲或提高其整個面板的平整度，片狀材料可能在最後工序被拉緊撫平。拉緊撫平包括整塊材料向相反方向順序彎曲，嚙全碾平，片狀料板在拉力作用下同時保持平整。內部網孔的數量在條料寬度各段會有所變化。來於內部紡織翻轉和拉伸的反向彎曲的聯合效應引起片狀材料塑性變形並局部形成更好的配合鄰接區域。片狀材料中心處更多的塑性變形導致消除由轉曲遺留的長邊緣的皺形。延長邊緣的水平裝置用作消除中等寬度的彎曲。彎曲生產過程被設計來生產可能的最平的長條材料，該材料僅用於必要的更重要的場合。

被加工成寬度介於 250mm 至 800mm 的薄料最終要用裝在合適位置的轉

刀將之切開並壓在沖模寬度。最終沖壓件被象包扎薄餅似地輕輕地包裝以便於運輸。

4.1.2 標準的規定(*standard designations*)

合金組成. 合金元素的種類、濃度及其加入冶煉過程的影響控制著銅合金的強度。合金強度值可通過幾種途徑來提高，這依賴於合金所包括的關鍵元素類型。由溶液的原子尺寸不同於銅原子尺寸的合金元素引起的不適當的張力和來源於凝結物的張力(strain fields)代表了兩種提高合金強度的途徑。固溶合金及凝結強化合金在用作連接器的合金中占大部分。二次散佈合金的顆粒，比后者粗糙，代表了又一種高強度合金的來源。這些粒子有助於提高冷軋的強度效應。用於提高銅合金強度的機械冶煉在本章的後續部分詳細描述。

銅合金是根據其包含的重要合金構成物來分類的，因為這些重要的合金構成物對合金的性能有很大的影響。這些合金構成物包括含鋅的黃銅；含鎳，鋁或矽的青銅；含不同數量錫的黃銅及鎳與其它元素(如鋅，矽及錫等)的組合物。表 4.2 列出了連接器上應用的幾種主要的銅合金，該表還列出了這些合金名義上的組成物和北美用於區分這些合金的統一數字系統(UNS)的代號。每組中決定強度的主要元素都被列於表 4.2 中並用來標識合金的類型。

在統一數字系統(UNS)中，每一組的銅合金都用字母 C 開頭，其后跟著 5 位數字(包括以銅或黃銅開頭的 3 位數字系統)。通常只采用前 3 位或 4 位數字。(當尾部數字是零時，常將之省略以幫助銅合金的識別。)

統一數字系統(UNS)標準中，第一位數字介于 1 到 9 之間，並且數字 1 到 7 表示可鍛銅合金(第一位數字 8 和 9 表示合金鑄件)。非合金銅和高銅合金(含銅量至少在 90.6%以上)被歸入 C1xxxx 系列的一組。銅鋅合金列於其後(C2xxxx 系列)，以下依次是錫黃銅(C4xxxx 系列)、錫青銅(C5xxxx 系列)、鋁或矽銅合金(C6xxxx 系列)和鎳銅合金(C7xxxx 系列)等。后面緊跟的數字用來區別每組中的不同組成成分，如 C23000 和 C26000 分別代表含 10%或 30%鋅的銅合金。表 4.2 省略的部分是幾組含鉛的合金型號，如含鉛青銅 C3xx 系列，因為這些類型通常用於機械部分(杆狀物和條狀物)，而在連接器上用得較少。

調制回火 銅合金調劑的命名系統是由 ASTM 定義的，推荐的應用型號是 B601。該系統是爲了取代原有述語，即半硬性、彈性等，但是現在新舊命

名同時存在。表 4.3 總述了用於銅合金(不論產品形式)的退火環境。

用作特殊合金的調劑是通過回火冷作硬化或特殊熱處理等聯合效應而生產的得到的。調劑是用拉伸強度和延伸率或者屈服強度來描述的，這些都是用扭轉的方向來測量的。溶液強化合金和二次散佈強化合金是由特殊合金的厚度通過在“準備加鍍層”的回火環境(參考 4.1.1 節)冷彎曲而制得的。固溶強化合金和二次散佈強化合金，將在 4.1.3 節描述，通常是用前述方法來說明的，然而，屈服強度常用於凝結強化合金。

金屬是由許多微小顆粒組成的 (polycrystalline)，其中單個微小顆粒可以想象為泡沫。微小顆粒的平均直徑被測量為介於沿著置放在穿過樣品部分的冶金光澤上的隨意分布邊界的截距。微小顆粒在回火環境有等量退化 (equiaxed) 的趨勢，在冷軋回火環境中有延伸的趨勢。微小顆粒的尺寸在某些場合被詳細地加以說明，這已成為銅合金的習知記錄。典型的銅合金微小顆粒直徑介於 5 到 25 微米之間，包括在某些特殊情況下產生的優質顆粒和劣質顆粒。

4.1.3 合金種類及其冶煉技術

合金也根據其比純銅更可靠的占優的冶金學機械特性在表 4.2 中進行分組。而且，每種合金不同地反應了制造某種特性(該特性能區別該合金)的化合物的過程。

銅合金占優的冶金強化機理包括固體溶解強化、二次散佈強化和凝結強化等。一些合金通過多種途徑化合強化。固體溶解合金指那些主要被廣泛地溶解於合金里的元素強化的合金。當某一合金元素超出溶解極限時便產生了尺寸由粗糙(1 微米以上)到中等大小(幾十分之一微米)再到很細(幾百分之一微米)的第二階段的粒子。提高強度的最大功臣是尺寸為亞微米的細小顆粒。最大的顆粒一般來源於鑄件。具有中等尺寸的顆粒來源於熱機械過程。二次散佈強化合金包括通過增加冷加工效應來提高強度的中等尺寸顆粒。凝結強化合金把其強度歸功於由促進其形成的熱處理特殊順序生成的細小顆粒的特性。

固體溶解合金，含有鋅，錫，矽，鋁及鎳的銅合金構成了大多數商業上的固體溶解強化合金。這些合金主要另外由一到二種元素組成。錫，矽和鋁等額外元素提供了最大的強度。鋅和鎳必須加入比錫和矽更多的劑量以達到

相同的強化功效，但它們有合金中也具有更大的溶解度。經過固體溶解強化的合金具有與銅相同的原子晶體結構并且當對某部分進行微觀分析時會發現其呈現單一階段微觀結構。

把固體溶解合金象典型的沖壓那樣變成片狀的碾磨過程包括重複多次的受控冷壓過程和熱壓或鑄造環境的回火過程。圖 4.2 舉例說明了由 a read-to-finish 的回火環境得到的固體溶解合金的典型冷壓彎曲過程(該圖描述了 C260，一種含 30%鋅的黃銅合金)。這些彎曲用作定義在制造合金調劑中所需的彎曲強度值。就象厚度減小延伸性下降一樣，冷壓增加了合金的強度但也會伴隨著更低的延展性。

單獨的固體溶解合金元素的強度增加主要包括三個重要因素：(1) 由加入元素的原子半徑與銅原子半徑不合適和相對銅的電子結合（原子價）引起的強度提高效應；(2) 合金元素溶解的多少及(3) 其對從冷壓操作到最終回火條件的冷作硬化率的影響。圖 4.3 列出了三種商業合金中的鋅和錫對合金強度的單獨影響。這些合金包括含 10%銅的鋅黃銅器(C220)和含 5%銅及 8%錫的青銅各為(C510 和 C521)，該合金常與非合金銅(C110)作比較。如果在回火和冷作硬化條件下對含 5%銅的合金和含 8%錫的合金作比較就會發現兩者的強度比含 10%鋅的合金的強度提高的多得多。如果根據每種合金中合金元素的百分比含量來作比較，就會發現各種合金的強化效應具有更大的差異(由於更厚的錫比鋅含有更低的原子百分比)。

圖 4.3 顯示，若達到相同的強度，8%錫合金所要求的冷軋次數較少。拉伸度及可成型性等其它方面因此隨強化合金在高強度時更加可靠。因為銅合金需要更多次的冷軋，所以對錫-銅合金而言，冷軋銅達到相同的強度，其可成型性更差。各種合金各自的可成型性將在本章後面討論。

固溶合金中的合金元素引入了其它替換性特性。其中商業性合金的導電性只有非合金銅的一半，更多關於合金處理對導電性影響的說明將在第 4.2.1 節討論，對抗腐蝕性的影響將在 4.2.5 節將論。

通常來講，固溶合金在中等強度作用下的可成型性較好，對腐蝕及導電性有不同程度的替換。與固溶合金形成競爭的是二次散佈合金（dispersed second-phase alloy），它在中等強度作用下能夠提供更好的導電性，並且凝結強化合金在導電性、強度及成型性有更好的結合。

二次散佈合金 該組合金通過加強對亞微米粒子而不是粒子冷處理的反應而具有更優的強度。冷處理會在包含有一定比例拉伸力的金屬結構內部產生線性分離 (linear defects)。相同數量的二次散佈合金粒子與普通固溶強化合金 (solid solution-strengthened alloy) 粒子相比，二次散佈合金粒子會促進更多欠缺的產生。因運行而產生的欠缺越多，通過它們間相互干擾所產生的連續變形抵抗力就越大，即增加了它們的強度。

二次散佈強化對提高強度的作用是因為熱加工過程而不是來自於鑄造過程。選定可使合金元素形成固溶合金的臨界退火溫度，失去退火條件 (strip annealing conditions) 也須調整到不再溶化已處理合金元素而可以再結晶，盡管該退火方式也能用於再溶化所需要的合金元素。

對固溶合金而言，傳送原料帶的回火度由冷軋通過對經過退火的準備鍍層的量的控制而得到。二次散佈粒子同時也通過延遲粒子在退火過程中的增長而精煉微粒構造，因此而促進合金的強度及經常促進其可成型性。

圖 4.4 顯示了兩種不同二次散佈銅合金工件的硬化曲線。一種主要包含 2.3% 的鐵及數量更少的磷和鋅，而另一種包含了 22% 的鋅以及更少的鋁和鈷 (C688)。銅鐵合金成份超過了鐵在銅中的溶解度，且在退火過程中形成鐵粒子。這些分散粒子的主要影響是提高經冷處理後的銅合金矩陣的強度。該影響通過比較 C194 與非銅合金 C110 的冷軋曲線而更加明顯。大約不到 0.01% 的鐵保留在固溶合金中，這些散佈的鐵粒子減小了銅的導電性。

銅-22% 的鋅銅 (C688) 含有鈷-鋁金屬間化合物散佈階段，該過程對精煉粒子到 $10\mu\text{m}$ 以下尤其有效。相反， 10 到 $25\mu\text{m}$ 的粒子是典型的第一階段，固溶合金。零件的硬化率也固有意地加入 C688 粒子而得到提高。C688 與鋅銅二元合金及相同數量的鋅 (C240) 的曲線比較說明了這個效果 (圖 4.4)。對相關的那些經單獨溶解而強化的二次散佈合金而言，較少冷處理零件通常需要達到相同的強度，因此，二次散佈合金在相對強度下通常更容易成形。

二次散佈合金可提供很寬的導電率範圍 (請參閱第 4.4.1 節)。C688 與該組其它合金相比其導電率更低，盡管其硬度很高。散佈保持在銅基材合金中的鋁與鈷說明了為什麼合金的導電率較低。從該組合金中同時將較好的成型性與適當的高強度結合起來是可行的，它們性能的結合接近於凝結強化合金的這些特性。

凝結強化合金 可以在凝結強化合金中得到提高的過於精煉的二次散佈粒子通過阻止線性原子的分離運動而直接影響合金強度（對經強化了的冷處理零件中的二次散佈合金的主要影響）。它們的封閉空間，有時通過可伸縮的不適當擴大阻止產生塑形的影響範圍彈性區域的輔助，對它們的強化效果是有影響的。這種不適當的彈性源於銅與合金元素之間原子大小的不同，因為後者原子簇在以銅原子為主的合金原子矩陣中形成了粒子。

僅僅有一小部分銅合金可以得到凝結強化。它們與其它合金相比突出的特性在於：在溫升時合金元素的高溶解性，及低溫熱處理時更低的溶解性。通過持續的熱處理充分利用它們的雙重溶解特性，設計這些合金進程發展更精細的二次散佈合金。因此，處理過程在相對的高溫下通常包含料帶退火，並伴隨快速冷卻，以盡可能地溶解溶合。該處理以後，通過低溫且更長時間的臨界退火（或增加處理）產生所需要的精煉凝結粒子分布。

商業上重要的凝結強化合金是與金皮或鉻元素，或雙層鎳與銀或錫，或鉛的合金。儘管數量很少，凝結強化合金在要求更多的電連接器應用上仍是一組重要的合金，優良的成型性、對高溫下伸縮的高抵抗力、以及良好的抗腐蝕性是該組合金的特殊性質，而導電性則可以從相對較低，與最強的鈹銅相比，到適當較高的數值，與銅鉻合金相比。

凝結強化（或提高壽命）處理可以通過電連接器的加工或通過合金的研磨進行。決定選擇一種或是另一種取決於商業上對強度及沖壓成型性這種特殊的熱處理加工性能，及與室內執行該最後強化處理相關的成本對研磨處理合金的更高成本的要求。通過優化的處理溶液加上冷卻條件可以得到最高的可能強度。其成型性隨強化處理強度的增加而降低。因而，大多數對幾何形狀有要求的部件在材料處理前預先成形。凝結硬化處理前後的屈服強度如圖 4.5 所示。冷軋回火熱處理，而不僅僅是溶解處理，導致最後合金強度的增加。導電性及強度隨銅原子矩陣在合金成份中因二次強化鈹化物的形成而逐漸衰竭。

但更經常的是，凝結硬化處理過程通過料帶加工作為最後的制程，在該狀況下材料是指研磨硬化材料。這些研磨處理的回火在強度與成型性之間形成一種平衡；合金典型地被處理為在最高強度以下從而提供比完全凝結強化條件下更好的成型性。圖 4.5 所示的這種研磨硬化回火顯示了與合理有用的

成型性的關係。

通過研磨硬化回火（mill hardened tempers）有兩個優點：（1）潛在降低加工成本及（2）更好控制尺寸（dimension）。熱處理過程中沒有氧化物移動，附加的操作及挑選酸性物質處理即可以避免。在凝結過程中特定的體積變化可能改變尺寸。成形部件上殘餘的壓力促進凝結反應的進行，同時拉力促進凝結產生的體積膨脹。這種影響在商業上通過對熱處理時部件的壓迫，或成型可補償預期變形的尺寸而得到控制。大多數凝結強化合金，包括金皮銅和銅-鎳基合金，因為該理由而經常利用研磨硬化條件下（mill-hardened condition）。

4.2 電連接器合金性能

4.2.1 合金的選擇因素

材料性能與電連接器的功能性要求間的關係可參閱表 4.1 所總結。大多數重要材料與功能相關的性能包括導電率、強度及伸縮系數。通過減少接觸壓力（伸縮現象）和抗腐蝕力來影響可靠性。可成型性及尺寸控制影響滿足電連接器產品功能性需要合金的機械加工可靠進行的能力。

與導電性有關的決定性因素是電連接器是試圖傳輸電流（通常幾十安培）還是試圖傳輸電信號（通常 1 安培以下）。正如所預測的，高導電率合金更有利於電能傳輸應用以避免產生大量的焦耳熱，但在電壓必須受預定的電路損耗時，它們可能對信號傳輸更為有利。

合金產生的強度及伸縮系數決定了電連接器配合時接觸彈片的接觸正壓力。經常，對提高接觸壓力的有效性壓力可通過變曲得到。從彈性臂端子（見第 6.3.1 節）得到的正壓力（Fn）的關係可表示為：

$$F_n = \alpha \text{ modulus} \times \text{deflection} \times \alpha \text{ stress} \quad (4.1)$$

幾何上因素（如梁的寬度、厚度、及長度）使該等式最終成立。彎曲伸縮系數可遵循胡克定理提供的懸臂彈性而用於決定接觸壓力（這就是說，所加的彎曲壓力不能超過比例限度）。該比例限度隨著其它屈服強度的增加而傾向於增加，並因此受合金及其過程影響。因而，在給定材料厚度的情況下，高強度合金通常能提供更高的接觸壓力。施加壓力超過其彈性限度會導致微

結構的變形。最終結果是如果彈性移動僅僅通過伸縮應力產生則接觸壓力小於將要達到的（最大接觸壓力）。

連接器的可靠性需要連接器處於工作狀態過程中，接觸壓力保持穩定，或至少不會低於所允許的極限值。當接觸彈片處於長期的應力狀態下時，即使應力是在彈性範圍以內，微量塑性變形依然會發生。一些初始的彈性應力和張力可以被塑性變形所取代，這樣會導致接觸力減小。（一種解釋為應力釋放的現象）。冶金過程中的微塑性變形是受溫度影響的，並且，當工作溫度處於 80–100°C 時銅合金的微塑性變形會變得很明顯。某些合金對溫度的影響具有較高的抵抗力。多個連接器並聯時，接觸力的穩定性明顯增加。為了讓插入力處於一個合理的水平中，接觸力可以被設計得接近於允許的極限值，這是為了保持可靠的電性連續性。然而，這種情況下的工作過程中，初始力的降低必須保持在範圍允許的最小值。

對於可靠的連接器性能還需要滿足一個額外的要求，那就是其合金的成份必須能夠防止在工作環境中受到的化學腐蝕。如有必要，銅合金會鍍上一層金屬以增加對受污染的空氣及化學物質的抵抗能力。

折彎加工是連接器成型過程中最常見的工步。端子料帶材料存在一個在加工過程中不至於斷裂的極限範圍，該極限是選擇端子合金及其回火方式的關鍵之一。在某些連接器的組成部分要防止伴隨成型加工所生成的不規則的粗糙部的產生。如果鍍層出現很明顯的起皺現象，就會影響表層金屬的連續性，但不至於一起基材銅合金的破損，所以這種起皺現象在連接器的特定部位上發生或許是可取的。

同樣與成型加工相關的是對受成型過程或成型后熱處理過程彈性回復影響的尺寸的控制。這可依照經驗或者由銅合金料帶供應商所提供的信息來調整治具，以實現對尺寸的控制。

在以下的章節里，將選擇性的討論合金的性質，尤其是前文所提到的對連接器性能很重要的性質。首先要討論的是最具有區別特性的合金傳導率及其強度。一般來講，強度越高的合金其傳導率越低。

4.2.2 傳導率/焦耳熱

銅合金的電性傳導率是以一種獨特的方式即占純銅標準(International

Annealed Copper Standard, IACS)的百分比來描述。在早於一個世紀以前當純銅標準剛建立時，IACS 百分數值是用來表示純銅的純度。隨著冶金技術的進步，開發出許多具有商業價值的具有更高傳導率的銅合金。C110 的 IACS 百分比值為 101，它是商業純銅。純度測量的基本原理是先測出其電阻率再經由除以 172.4 從微歐轉換成 IACS 百分比值。連接器用的銅合金其電性傳導率 IACS 值一般在 5~95%範圍內。IACS 值小於 30%的銅合金其傳導率適合於信號及小電流傳輸的連接器。以傳輸電力為主的連接器其 IACS 值一般要超過 70%。表 4.4 中列出了常用的連接器合金的傳導率數值。與穩定的溶液相比，合金的傳導率會隨著各種其他金屬成份的減少而增加。插圖 4.6 描繪了向穩定溶液中分別加入鎳、錫、鋅三中雜質后所得不同傳導率的曲線。每組合金曲線體現了相應商業合金的最小傳導率主要取決於合金中的主要合金成份（當然亦包括含量較少的一些雜質元素）。某些元素如錫和鎳的存在會使傳導率大為降低。鋅雜質對合金傳導率的影響不是很明顯。經完全退火處理的合金其電性傳導率亦會降低，但這種影響較小（IACS 值在 2~3%範圍內的較為典型），而經回火處理的合金其電性傳導率受到的影響明顯得多。

溶解元素的凝結會導致較高的傳導率（如合金中鎳與矽結合形成的矽溶液，鐵從銅—鐵合金中結晶出來）。插圖 4.7 將連接器合金按照傳導率（或強度）分類描述，同時也顯示了這些合金各自的增加強度的不同方法。

銅合金的電性傳導率及熱傳導率之間是通過 LORENZ 法則聯系起來的，如插圖 4.8 示。該法則從所建立的超導體金屬模型上獲得，它指出電性傳導率與熱傳導率之間通過 LORENZ 系數相互聯系。有了這一法則，合金的熱傳導率就可以通過測量電性傳導率或電阻率而方便地得到。

在室溫環境中，低的電性傳導率對應於低的熱傳導率。可以推理得出，歐姆加熱器用低電性傳導率的合金作成，當給其加入較大電流時，由於其熱傳導率亦較小熱量不易散發而產生大量熱能。對於具有相同傳導率及相關基本組成成份的合金來說，各成份的比例關係十分重要。

LORENZ 系數與溫度有關，而且各種合金成份的電傳導率和熱傳導率與溫度變化的關係不完全一致。舉個例子說明，不含合金成份的銅，當溫度升高時，其電性傳導率比熱傳導率要降低得多得多，而對於銅的合金成份，其電性傳導率隨溫度升高而降低的同時，某些熱傳導率卻會隨溫度的升高而升

高，LORENZ 系數可在 10~20%的精度範圍內將熱傳導率從電性傳導率（或電阻率）中區別出來。

4.2.3 強度

延展特性，包括屈服強度及彈性系數，作為區分各種合金成份的一種尺度而應用於特殊連接器的設計當中。由於連接器常見的應力形式為彎應力，因此彎曲應力也要作為合金的一種機械特性而附加考慮。拉伸及彎曲應力特性是合金加工中十分重要的考慮因素。各種各樣銅合金的彈性系數均有略微不同，彈性的恆定並不是取決於各合金自身受到加工過程的影響，而是由其材料形成時結晶組織所固定的彈性系數來決定的。

拉伸強度 按照拉伸特性所選擇的連接器用合金按照其相關電性傳導率列示於圖 4.7。圖中多數結晶合金均運用回火工藝而獲得 380~700MPa 的拉伸強度，其傳導率一般低於 35%IACS，而較為離散的合金其傳導率卻較大，一般在 50%IACS 以上，其強度只比那些集中點代表的合金略低。凝結強化合金和與其具有相同傳導率的溶液強化合金相比其具有最高的強度，和二次散佈合金相比具有較高的強度但是傳導率較低。

彎曲強度/接觸壓力 對於最初的材料選擇和對它們從供應商得來的規格，可延展性能是足夠的。然而，彈性端子常常是懸臂梁，所以(and)彎曲應力—應變特性基本上是適用的。依靠材料性能上的限制是否被超出，或者當使用錯誤的應力應變數據時，接觸壓力可能被錯誤地預測。

如圖 4.9 所示的青銅在接觸彈片 (contact spring) 受壓超過了性能極限時的拉伸、壓縮和彎曲應力應變曲線。這些曲線的限制(Determination)在合適的指定的 ASTM 方法下會被覆蓋。彎曲包括暴露表面的拉伸和壓縮特性，並且這些特性間不存在必然性的對應關係。因此，彎曲應力應變曲線將對在缺少拉伸和壓縮數據時接觸壓力的預測會更有益。如例子 C260 所示的那樣，壓縮曲線在強度上比拉伸曲線更高，但這個相對的順序不能被認為是一般性的。

而且，對於冷軋制材料的管理，彎曲歪斜反應常常是相當直接的。如圖 4.9 也表明了 C260 的各向異性。當彈性端子元件被對齊普通(或垂直)長條(strip's)旋轉方向時，可以期待從合金中得到更高的接觸壓力。而且在垂直方向上，拉伸曲線比壓縮曲線更高，在橫向方向上則剛好相反。長條在橫向和

縱向上的相對強度也由合金與製程所控制。

彈性系數 合金化處理和加工過程只是稍微會影響銅合金的拉伸與壓縮彈性性能。手冊中的彈性系數的數值範圍是在高銅合金和鋅黃銅直到 C230 上加壓 117MPa，和在 C260 與錫青銅上加壓 110MPa 所得到的。例如對於鎳銀合金和 C725 加壓 124-138MPa，含鎳合金比後者具有更高一點的彈性系數。低硬度合金也具有比其它合金更高的彈性系數，即對於老化回火的鈹銅和 C7205 具有 131-138MPa 的值。

製程在兩方面影響彈性系數。冷軋制回火的穩定硬化依靠合金和回火，易於增加彈性系數 5-7MPa。製程也改變了彈性性能的方向。彈性常數直接是銅合金之類原料的三次方，不象導電率只是平方。例如 C7025 有經向和緯向上分別具有 131MPa 和 140MPa 的彈性系數。

4.2.4 應力松弛/接觸壓力穩定性

對於連接器可靠性能的關鍵是當它在工作時，它保持電性導通 (transparent)。然而，當受拉伸應力時，來源於在彈性端子原料裡多微孔性的接觸壓力的降低最終可能導致不可接受的接觸阻抗。因為發生多微孔性的製程是由於受熱引發的，所以高耐用溫度導致它們發生不同程度的變化，這依靠於合金和它如何製成。

如果端子初始變形超出了彈性變化範圍，那麼伴隨任意的原料畸變，接觸壓力在第一次插入後迅速的發展取決於彈性端子的彈性回復。當使用時，彈性變形隨彈性原料依靠時間和溫度的多孔性畸變會部分被回復，從彈性變形到塑性變形的變化結果會降低接觸壓力。這種變化稱之為應力松弛，它隨溫度的增加而增加。然而應力鬆弛不同於發生在固定不變的端子彈片上的隨時間變化而應力降低的現象，而應下意識地聯系到在裝配載荷下隨時間變化而引起的幾何形狀的變化(應變)。

許多合金在室溫條件和微小溫度變化情況下有足夠的實用性，但當工作溫度增加到 80--100 度時，表中可利用的合金性能會受到更大的限制。應力松弛的阻抗會受固溶合金元素和其它對金屬上微量塑性畸變的阻礙而變化，比如細微的二次散佈合金顆粒和凝結合金顆粒。

檢測不同銅合金的相對應力松弛的阻抗常常是在懸臂彎曲中進行的，最

初是在檢測設備中施加 50%到 100%的屈服強度壓力。按最初在制訂的持續曝光條件下保持的彈性應力的百分比數來指定穩定性標準。C510 的應力松弛性能如圖 4.10 所示。當以對數坐標來描述時，應力保持數據是線性對應的。這個線性特性允許用推斷法去預測更長遠的性能。檢測常常持續充足時間以確保應力松弛特性保持線性或者包括任意可能發生的直線斜率的變化。

圖 4.10 中的例子也表明冷工作的數量常用在取得強度上的影響穩定性(更大強度的回過火的 H08 的穩定性比 H02 要低)。在某些場合，因為具有更好的長期穩定性，低溫回火能在端子上提供更高的承載能力，甚至低溫回火能使應力低於開始狀態。同時也應該注意到其強度明顯低於初始狀態，在第一小時內，初值下降得很快也表明了這一點。

應力松弛特性也可通過最初在漫延-破裂上發展起來的雷斯密爾方法而得出。這種方法需要在大範圍內的雷斯密爾參數來決定。該參數被用來限制一個控制曲線，從而估計保持在任意時間和溫度組合條件下的壓力。該方法的一個缺點是假設了簡單機理反映了在一個決定參數的溫度範圍裡的應力松弛。因此，從這種方法中可能得出錯誤的結論；由於應力松弛特性受溫度影響，是以該方法的另一缺點仍在爭論之中。

低溫熱處理能提升應力松弛阻抗。這種處理主要目的是用來有效避免強度的改變，就象在調質退火的軋制 H08 的回火而產生 HR08 一樣。穩定性也能是具有方向性的，隨橫向和縱向的性能不同而在退火中變得更明顯，或經冷加工而使該差異更為明顯。

在某些特定的溫度下，一些合金元素能比其它元素更具有影響力。這種影響的層次相關於同樣的因素，即列在前面由溶解元素加強的因素。錫在增加了基體百分比後有額外的超過鋅的對應力松弛的影響力。如圖 4.11 所示，一種含錫 8%的青銅合金(C521)比含錫 30%的青黃銅(C260)具有更大的應力松弛阻抗。同時要注意到錫青銅具有更高的硬度(730MPa 的屈服強度--H08)相對於 C260 黃銅(590MPa 的屈服強度--H08)。

由不同合金元素所提供的溫度穩定性也不同。錫青銅能比鋅青銅用在更高溫度的場合。如圖 4.11 所示，C260 處在邊緣，因為保持在 1000 小時(折合 5 周的使用時間)後，只有低於 75%的應力存在。青銅在使用溫度上受到限制，不得超過 75 至 100 度，而錫青銅和錫黃銅可達 125 度。一些散佈層次的高強

度合金比黃銅具有更好的穩定性，如圖 4.12 所示，但 C151 是例外的。

在從中溫(105-125 度)到高溫(150-175 度)的最大的應力松弛阻抗對於結晶合金是可利用的。以 150 度調質退火的錫青銅與鈹銅的比較來看表明了這種影響(如圖 4.13 所示)。兩種所示的回火合金都具有相近的導電率。

4.2.5 成型性

對於選擇合金材料重要的是在沖壓成型過程中能夠獲得所需要的幾何形狀的能力。按治具的半徑彎曲 90 度或是更大的角度，也同時降低厚度來幫助彎曲定位，都是連接器沖製上常用的。當合金充分退火後，絕大多數成形是可利用的，但在此條件下，強度會降低。固體溶液的冷軋制和散粒硬質合金增加了強度，但卻消耗了成型性能。鑄造方式有效地改變了回火性能，這可能由於它造成的加工硬化而損害了成型性能，或者由於其厚度降低而導致有助於成形。

在它們製程中的大量的冷加工所發展起來的更高強度的回火結構也可能在一個方向上比在另一個方向上表現出更好的成型性能。當可能時，最大的成形能力出現在彎曲軸線垂直於捲曲方向。這個方向是首選的，因為它常常比另一方向的回火能具有更好的成型性。在這個方向上的成形稱之為徑向的，因為它指出了隨彎曲的進行金屬流動的方向。對應到平行於軋制方向的彎曲軸線的成形則稱之為緯向的。緯向彎曲上最小的可接受半徑能比經向上更大，特別對於高溫回火的固溶合金和散佈強化合金。在連接器殼體部分中的 90 度的彎曲常常朝向窄條導向以利用縱向的成型性。窄條能形成而不產生裂縫的沖模最小範圍為由設計者和製造商所共同支持的合金窄條所定義，其中的裂縫定義為一不可接受的粗糙表面。材料的工作性能可以從彎曲的最小彎曲半徑(MBR)而得知，由窄條厚度(t)所分割。較小的 MBR/t 值表明有較好的成型性。

圖表 4.5 中總結了所選擇合金的相關成型性。此圖表表明了名義上可拉伸強度其每一合金可接受的最小彎曲(MBR/t value)在其縱向上和橫向上從 1 到 1.5。在沖壓工具中的實際性能與此有些不同。此圖表中所示的強度在縱向上較高，這樣與通常此方向上的成型性較好是一致的。此圖表同樣表明了銅合金的一個與其獨立的強度來源相關的總趨勢。此固體溶解強化合金可提供

一較高的強度，從而能使規定的最小成型性比固溶合金以及散佈強化合金要小，因為此成形過程與其冷工作下性能的相關性很小。與此相似，在一組固溶合金中，如 C521，其溶解強度為 8%時能提供比 C511 更高的強度，而 C511 只有 C521 含有錫的一半(4%)。同樣地分布強度合金有比純銅高得多的強度。

不要忽略在固體溶液中的合金元素其強度可在傳導過程中得到增加。凝結強化合金能提供較高的傳導性且與其他類型的合金相比在高強度下有更好的成型性。靈活性可從銅模的溶液強化的聯合中得到，而此銅模與冷加工和沉積變硬結果將導致強度、研磨過程中的成型性之間的獨特的平衡。此平衡也在圖表 4.5 中得到反映。

4.2.6 抗腐蝕性

銅合金通常對化學侵襲有較強的抵抗力，所以好經常在沒有保護鍍層的情況下使用。當在苛刻的環境下使用時，如自動化應用中，銅合金通常在其表面上鍍一層錫或錫料以提高對腐蝕的抵抗能力。在這些實例中，錫或錫料鍍層也用於接觸鍍層表面。銅合金在其它的應用性能中所覆蓋的東西更為詳細。

作為連接器應用的一個重要性能，是其局部微觀結構的壓力腐蝕。可以將其描述為腐蝕性的環境和高彈性的外部拉壓力，將導致對其的裂縫產生和最終失效。此壓力的存在有一外部根源，如產生於連接器配合過程中，以及內部根源(如來自保持導引線的成形及彎曲的殘餘應力。)局部失效模式將在其作用顯現於表面時被覺察到，並且其沒有顯著的塑性變形。此裂縫路徑位於微粒之間(其可相互作用)，而裂縫可通過紋理結構進行傳播。此裂縫可通過合金與媒介進行傳播漫延。

要出現壓力腐蝕就必須有如下三個條件的存在：

- 1.合金必須易受到壓力腐蝕的影響。
- 2.其工作環境使得此特定的合金易受影響。
- 3.拉伸力的存在。

此相關的幾種合金對用於連接器的可接受性如圖表 4.6 中所總結。此指數用於在不同環境下整合其性能的分類。這些工作環境的範圍從輕-中等的工業環境到航海的條件以及最惡劣的暴露於潮濕的氨氣中的條件下。此指數成

線性分布從 0 到 1000。

最易受保護的金屬包括鋅，C260 包含有 30%的鋅是最易受保護。其作用是產生限制以達到一個良性的環境。而如只含有 15%鋅的 C230 以及含有僅僅較低鋅和附加的鎳(如 C770)，其可顯著的增加對壓力腐蝕的低抗能力。錫-青銅，鎳-硅和鈹-銅合金都是具有較好的抗腐蝕能力的銅合金。銅-鎳合金和高銅合金對化學侵襲產生的裂縫將有很重要的保護作用。

4.2.7 可焊性

大多數銅合金能被錫、錫-鉛合金、以及其他不同的常用於低溫合金的焊料焊接而用於電氣和電子應用。從比率圖系統中此相關的可焊接能力表明，對一特定的流量來說其概括了錫和焊料層的性能特性，並且與相關的容量可消除任何位於材料上的污垢。

內在的焊接性能通常由可視的樣品檢查來決定(經過軍方標準和美國材料實驗協會規定)，其通常是溶化並浸入焊料之中經過一特定的時間。一級品為完全被焊料所浸濕，而三級品的焊接性為只有 50%的被浸濕(殘余物顯示在焊接薄膜上有銅-錫合金的金屬間化合物的產生)。焊接性能在三級以上或更好的合金適用於大多數的連接器應用。電子應用中溶劑的侵入其範圍從適度的樹脂(如 R 型)到逐漸具有活性(如 RMA 型)。與我們所期望的一樣侵入更多的焊料將會導致更好的焊接性能級別。

表 4.7 顯示了當使用一種中等活性的助溶劑時所選合金固有的可焊性。大多數電連接器合金都具有 1 至 2 等級的可焊性黃銅的可焊性比其它合金差。在可焊性要求很高時，具有第 3 等級可焊性的材料是通過在鍍錫或焊劑的條件下獲得的而不是在溶化的焊劑裡加入助溶劑而製得。

錫和焊劑鑄成品被應用於銅合金條以確保由該材料製造的成品具有良好的可焊性並保持相當時間及提供抗腐蝕能力。現在可生產數種這樣的鑄成品：這些成品被機械地磨擦或被空氣刀切出一條溶化的路徑，就象電鍍和回流那樣(被加熱或高溫油浸泡溶化)。每種鑄造成品都具其自己的內部金屬厚度特性(來自於底層銅合金與錫的反應)，合金厚度邊界和公差許可的製造厚度。

在室溫倉庫中，即使是沖壓後沒有內部金屬階段的電鍍錫鑄件在一個月後也會生成 20~30 微米厚的內部金屬層。內部金屬階段的形成也表明底層合

金與錫或焊劑鑄件之間發生了金屬原子的擴散。合金成分擴散到鑄件表面並且當這些成分與硫或氧等發生化學反應而生成抵抗薄膜時，合金成分擴散就會使鑄件的焊接性能下降。一些合金的成分很可能擴散到合金表面而形成諸如鋅的反應薄膜。Steam-aging 和高溫烘烤測試被用於判斷錫鑄件的品質。接觸電阻的增加和焊接性能的下降是內部擴散和合金成分與周圍大氣反應的結果。

4.3 特殊合金性質

4.3.1 稀釋銅合金(*Dilute Copper Alloys*)

稀釋銅合金又稱高銅合金，指合金元素含量低於 4%的銅合金。作為一組，這些銅合金在所有銅合金中具有最高的導電率和極佳的在一般壓力和高壓力下的耐腐蝕能力。在足夠的成形能力下的拉伸強度被限制在低於大約 500Mpa 拉伸強度，因為其拉伸強度主要由冷卷(請回憶前面提過的主要用於降低成型性能的冷作硬化)。該合金組在相對零溫度到 80 攝氏度(華氏 176 度)之間提供了很好的對壓力松馳的抵抗能力。

表 4.8 總述了合金元素含量低的銅合金的典型特性。按合金中合金元素含量的比率來計算，上述銅合金的相對導電率有所下降。合金元素自己也極大地影響了傳導性能，這是其內部電子結構因素的結果。C151 是一種也具有最低的合金含量(含 0.1%左右的鋅)和最高的導電率的二元合金。該合金通過銅鋅的易擴散以與冷作硬化結合而生成第二階段顆粒而使其強度提高。留有固體溶解物裡的鋅元素含量不超過 0.02%。C151 的最重要的性能是在高溫下仍具有很高的抵抗壓力釋放的能力，盡管其合金元素含量很低。該合金由於在高溫下具有比其它高銅合金，包括凝結強化合金，明顯的優良性能，因此該合金等級較高。C151 在 150 攝氏度的高溫下保溫 3000 小時後仍具有其初使 87%的壓力；然而強度比凝結合金要低得多。

鎂和磷在 C155 中要反應生成磷化物。這些顆粒在通過從溶液中除去鎂和硫而達到高導電率的同時增加了冷作硬化的效應。該合金也需要加入微量的銀以在低溫回火時提高防止軟化的能力。C155 應力鬆弛阻抗在高銅合金中是適度的。

低級別的銻和錫(含於低氧銅或磷再氧化的銅)也能增加軟化抗力，如 C1443 和 C145。控制殘留的氧對避免生成防止銻元素提高軟化阻力的銻氧化物藉非常重要的。這些合金的導電率是很高的，因為留在溶解合金裡的合金添加物的含量是很小的。這類合金的壓力釋放過程並不特別。

C194、C195 和 C197 代表了一組基於鋼和磷組成物變化的合金。強度提高是因為當這些合金被冷壓以生成調劑時用作增加冷用硬化效應的磷化物的擴散(含有鈷，鋼和鎂元素)。強度和導電率是由添加於 C195 的溶解強化的錫來均衡的。在該組基於合金的磷化鋼中，C197 提供了最高的導電率，因為 C197 含有在其形成過程中生成的混合鋼和磷化鎂。

4.3.2 鋅、錫及改善黃銅(*Modified Brasses*)

銅鋅合金在用作製造工作溫度(環境溫度或焦爾熱)適中且成本低的電連接器的銅合金中最出名。在這些合金中，C230(含 15%鋅)和 C260(含 30%鋅)恐怕是最常用的了。在相同的成型能力下，C230 的強度並沒 C260 的高(如表 4.5 所示)，但是這些低合金組成物提供了更高的導電率。鋅黃銅合金(包括 C230 和 C260)的壓力釋放阻力是適度的(表 4.9)，這限制了其使用溫度大約在 75 攝氏度左右(167 華氏度)。含有 15%或稍少的鋅的黃銅合金也更不易受擠壓腐蝕裂縫的影響。

錫銅合金由於比二元銅鋅合金具有更好的強度成型組成物和壓力釋放阻力以及抵抗壓力腐蝕裂縫的能力而顯得更具特色。錫加入物在強度上是可靠的，因此在冷作硬化時需要降低組成物的含量；更好的成型性能是該舉措最直接的效益。通常含有 10%鋅和 2%錫的合金 C425 作為降低錫合金成本的替代物應用呈上升趨勢。C425 的導電率與 C260 不相上下。C425 的導電率也比最重要的錫青銅合金要高(下一節將對此討論)，但成型性能並設有錫青銅那樣好。C425 的壓力釋放阻力也要比上述鋅青銅合金好，這允許它應用於達到 125 攝氏度(257 華氏度)高溫的環境中。

鐵，鈷，鋁及矽等合金加入物和銅鋅組成物進一步改善了原本已經高度易成型的基本黃銅合金的一些重要特性。C664(表 4.9)中的鐵和鈷是擴散的粒子加入物並將導致在與 C260 相同的強度水準下獲得更高的成型性能。合金 C664 很可能在需要更高強度的應用中作為 C260 的潛在替代物。

鋅黃銅(C688)的鋁和鈷等加入物混合了來自對呈現的鈷鋁合金進行更有效的冷作硬化以獲得精煉粒子(10 微米以下)的強化功效。該結果是得到一種易成型的合金，該合金提供了不經凝結強化的可得到的最高強度。表 4.9 列出了相對於其它鋅銅合金的鋁擴散強度合金的特性。值得注意的是作為冷作硬化的高效能的組成物，需要更少的工作即可達到所需強度，成型性能在橫向與縱向是一樣的(參閱表 4.5)。與隨後說明的凝結硬化合金不同，C668 合金及大多數其它黃銅合金的壓力釋放阻力被限製應用於低於 100 攝氏度(含錫合金 C425 除外)的條件。

4.3.3 錫青銅

粗糙的錫青銅也指磷青銅，因為加入的磷(含量在 0.03 到 0.35 之間)是爲了使金屬還原和達到更好的流動性。含量在 1%到 10%之間的錫通過溶解硬化和增加錫元素給予銅的(表 4.10)加工硬化率而達成強度提高。商業上最重要的錫青銅合金是 C510 和 C521。C510 合金是最常用的錫青銅合金，當更高的強度/成型能力組成物成爲必要時，常使用成本稍高的 C521 合金。後者高出的成本是由加入的金屬基本成本和加入的錫影響熱加工而提高的成本組成。含錫量高的青銅必須鑄成條狀，因此防止大部分成本，熱壓碎成爲了可能。

源於更高的錫的允許範圍的強化處理被低導電性所抵銷，如表 4.10 所顯示的。因而錫銅合金不適用於高電流接觸，而應用於電信號傳輸上更好。錫銅對伸縮的抵抗力直到接近 125 度都有良好的特性。對更高溫度時的穩定性要求已促進了錫銅合金向凝結強化合金的轉化。

錫銅合金有良好的成型性。例如，因為對強度的冷處理要求更少，C521 比 C510 能提供更好的成型性。因此，對於相同的強度 C521 的應力鬆弛抵抗力比 C510 更優。典型地，通過提高冷處理次數對 C510 的強化處理稍微減小了其伸縮抵力，但可通過減輕退火度得到提高。

與其說錫銅的應力腐蝕抵抗力受到影響不如說錫的抵抗力提高。在個觀點上，錫銅與鋅銅的區別在於鋅抵抗力的提高對 應力腐蝕敏感性提高有極深地影響。

4.3.4 鋁與矽銅

鋁銅包括含有矽、鐵、鈷、或其它附加於銅-鋁基材的元素的合金。用於電連接器上的矽銅合金，含有錫及其它附加於銅矽基材中的元素。該組合金中對電連接器有重要商業意義的例子如表 4.11 所示。

C638，含有鋁及更少量的鈷和矽，可以同時提供很高的強度及良好的成型性。精細散布的鈷矽化物，具有很小的粒子，包含在該合金中對其硬度有一定影響。該合金在拉力達到近 700Mpa 時仍保持了相對成型性。C638 的應力鬆弛抵抗力比較適中，限制其利用的溫度為 75 度左右或更低。

C654 是一種固溶且經過冷軋的合金，其能提供與 C510 在 125 度（最高的推荐應用溫度）時相同的應力鬆弛抵抗力。C654 的成型性在 690Mpa 拉力作用下比 C510 更優，盡管其導電性大約只有後者的一半。與 C510 一樣，C654 實質上不受應力腐蝕分裂的影響。

4.3.5 錫與含鋅的銅鎳合金

大多數重要的用在電連接器上的銅-鎳固溶合金有 C725，C762，C770。其中，C725 因為中等強度條件下良好的成型性，適中溫度時良好的伸縮性，以及很好的腐蝕抵抗力而應用最多（表 4.12）。

4.3.6 凝結強化合金

溫度升高時，高強度、良好成型性、優良的應力鬆弛抵抗力、以及適中的導電性最有利的適中結合，從那些能夠通過熱處理得到強化的合金中實現。該組合金突出的特性在第 4.2.2 節中已經討論。

主要的凝結銅合金以鈹（與鈷或鎳結合）或鎳（與矽或錫結合）。這些合金與電連接器相關的可能用到的性能總結在表 4.13 中。

所有銅合金中能夠加熱處理到最高強度的含鈹合金是 C172。鈷的加入是為了通過高溫溶合退火步驟中形成粒子周圍的鈷鈹化合物而控制微粒的大小。在其最高強度及應力鬆弛抵抗力時，鈷有很差的成型性。在需要最高性能的情況下，合金料帶（the alloy strip）在熱處理達到其最高強度前，首先從溶化處理或溶化處理狀態下的冷軋回火形成部件。經常，冷軋餘熱淬火料帶，用於表示強度與成型性之間的平衡。應力鬆弛抵抗力也考慮冷軋料帶的優點但是其不如高強度狀況下穩定。正如第 4.2.2 節中所提到的，因為需要移走熱

處理過程中形成的鉍氧化物，也可能為避免變形而需要移走設備，故部件熱處理會產生附加的加工成本，在性能與最終的決定條件（final aged condition）總結在圖 4.4 中。

C175，C172 中稀釋鉍的形式，在壓延回火（mill-hardened tempers）過程能提供更高的導電性，但缺少可成型性。為了降低金屬成本而實質上不影響金屬的性能，C175 已被 C1751 所替代，而 C1751 中的鎳被鈷所替換。C175 中鉍與鈷的容量進一步減少到一定程度已經被作為 C1741 介紹過，C1741 只有在壓延條件下才是可用的。但是後者在強度輕微下降的同時，卻有更好的成型性。

加入銅鎳基材合金中的矽通鎳矽氧化物的凝線導致足夠硬度的合金。訪組中的合金[C7025（其也包含有鎂）及 C7026]因為在適中導電性時有良好的強度/成型性而有貴金屬性。C7025 對溫度升高有相適配的抵抗力和其它可與稀釋鉍銅相競爭的性能。C7025 的應力腐蝕抵抗力與高抵抗力的磷銅合金。

加入銅-鎳基材中的錫，根據合金的成份和熱處理，能提供與 C172 幾乎相同的強度。該組中最強的含錫合金是 C729。這些合金主要的強化處理是一種被稱為旋節分解（spinodal decomposition）的精煉凝結。該組合金中鎳與錫的含量範圍從最高的 C729（15%的鎳及 8%的錫）到 C7265（8%的鎳及 5%的錫）。更為稀釋的成份，如 4%鎳-4%錫（C726），和 9.5%鎳-2.3%相對的錫（C725）不能通過凝結熱處理得到強化。C729 據報告在高溫工作環境中可提供非常好的應力鬆弛阻抗，例如暴露在 200 度環境中 1000 小時能保持 90%的初始壓力。而 C7265 經過相同的條件強度有輕微降低，穩定性也有些下降，同時可保持 80%的壓力。C7265 與 C729 是該組中最常用的合金。但是，因為制程及金屬成份的成本，使得它們很成本很高；且後者因為較差的熱性能通常通過粉末壓合來加工。像鉍銅一樣，鎳-錫合金在冷軋回火（為了增加形成后的壽命）及壓延回火也是可用的。

4.4 相關成本因素

對選定的高容量（high-volume）的商業銅合金的定價如圖 4.14 所示，實際的價格根據銅與各自合金成份的價格、定購數量、容許的尺寸要求，以及金屬供應商的不同而有所不同。鋅銅是最不昂貴的，因為歷史上鋅的價值比

銅低。更高的錫及鎳的價格反應到錫銅合金及含鎳銅合金的價格更高。含鈹成份，此處通過 C172 和 C1751 非獨有的成份來代表，歷史上已經成為銅合金中最昂貴的銅合金，而 C172 是最昂貴的銅合金。大多數很高的鎳錫合金、凝結硬化合金（precipitation-hardenable alloy）的定價都以 C172 為參照。

第五章 連接器用工程熱塑性材料

工程塑膠由於具有良好的韌性、尺寸穩定性、高阻抗、化學抗蝕力、短期熱穩定性及長期抗老化性之類的關鍵特性，因而逐漸成為許多連接器供應商的主要原材料。近年來，連接器的生產及開發技術趨勢極大的改變了市場。隨著高密封裝和微元化趨勢的流行，今天的連接器設計要求在更小的空間里實現更高的性能，因此表現出更薄的壁厚。塑膠原料應能滿足在更長的連接器本體上填充薄壁的設計，並能保持原有的性能，同時也滿足成本與生產工時的需求。

人們現在正在研制流動性更好的塑膠原料來滿足薄壁的要求，並且允許更快的生產循環時間。今天，在製造週期和隨後的成型生產週期里，塑膠一直被暴露在高溫條件下。例如，在高密度的電路板上安裝更小的元件，已逐漸採用表面粘著技術，可用更低的價格提供一個更可靠的集成電路板。在連接器工業上這種明顯的趨勢要求連接器材料具有更好的高溫性能、更小空間里的耐壓性能，並且具有更低的成本。

由於連接技術不斷地更新，所以連接器設計也不斷地在變化。隨之爾來的是，對連接器用塑膠原料性能的要求也极大地變化著。事實上，對連接器用塑膠，連接器的設計人、製造商和最終用戶都正不斷提出新的特點與更高的特性要求，即在這些關鍵的地方同時具有良好的溫度及物理性能。

連接器本體具有下述的功能：

- *兩兩接觸的電絕緣性能。
- *提供一定的接觸的機械支持。
- *爲可分離或永久式連接界面提供機械的/尺寸的穩定性
- *在任何使用環境下保持需求的性能

在合理成本潮流下，以上要求應當被滿足，其中每一個問題都將在本章中闡述。連接器製造廠商一直努力以最低廉的成本來提供最好性能的連接器，然而最終用戶卻想以最低的價格買到最好的連接器。

連接器本體的性能，很大程度上依賴於所使用的工程塑膠的物理特性。連接器本體必須具有良好的物理特性和製造性能。聚合物必須提供良好的韌性和尺寸穩定性，同時具有高阻抗和絕緣之類的電氣性能。聚合物也應當滿足最終使用的需求，例如：化學抗蝕力、阻燃性、短期熱穩定性、長期抗老化能力及其它成型性能。而且韌性和沖擊性能之類的性能在一定的環境里會減弱。這樣一些性能是塑膠所固有的，但常常加入添加劑以達到特別的性能水平。典型添加劑包括滑石和玻璃纖維，它們能改善塑膠的物理特性，並能有助於阻燃（參見 5.3.1 部分）。玻璃纖維添加劑能改善模具薄壁部分的填充能力。云母和滑石提供改進尺寸上的穩定性的功效，尤其在半晶體聚合物，爲增加流動與潤滑，還可加入其它一些添加劑。

對連接器原料來說，化學抗蝕力和熱穩定性是關鍵的性能。在過去几年里，這是千真萬確的。現在，當成型過程和最終使用時，它要達到這樣的水平，即連接器原料應適應不斷被暴露在各種化學環境中的工作要求。

本章的目的是在工程師和設計人員在做原料選擇時，提供使用在電子行業中的絕緣原料的信息，協助它們作出決定。這些信息，在連接器行業顯得尤爲重要，因爲正在使用塑膠原料的電機和電子工程師，可能需要一些基本的知識關於有實用性的原料、原料特性、適用範圍、強度和弱點，及其各部分之間的相互依存關係。

由於自身的性能特點，人們長期以來一直在各類連接器設計時採用這些工程塑膠。最近的原料簡介更進一步地增加了使用性設計的選擇權。本章也注意到通用性設計的考慮，所以包括了一個附加的破壞性能討論。

自從各種形狀、尺寸、顏色及功用的連接器問世以來，對於零部件原料的要求可能是具有挑戰性的。在決定做連接器本體用的原料上，連接器的最終使用及其在生產階段經歷的成型過程中扮演了重要的角色。

對於製造系統，隨著在更小空間里負載電流要求的與日俱增，在電子行業里的一個主要發展趨勢是不斷朝微元化和更好更多的功能方向發展。不久前，典型的端子觸點間的端子容室在 100~156mils 之間，而今天，它通常只有 50mils，隨之而來的是圍欄厚度減到 5~10mils，所以連接器本體的薄壁部分成了關鍵點。對於每一個薄壁圍欄，具有良好的尺寸穩定性，同時保持所需絕緣性的特殊原料很重要。它還要以更快的成型時間去填充模腔各部分，以提高產能。

決定聚合物的另一重要因素是聚合物的分子量（MW）。聚合物由何種方法製成及保管決定了分子量。分子量能影響粘度、物理性能和熱容量性能。分子量的分配，在聚合物內部，決定內鏈的長度範圍，也隨製程的變化，對以上性能產生明顯的影響。

聚合物內鏈分子量決定粘度或原料的流動性。因為分子量影響了內鏈運動和內網，這能極大的改變粘度或原料的流動性。聚合物內鏈必須具有一特定的長度，才能形成內網，從而限制內鏈的相互移動。因此，同樣基體的高分子聚合物較低分子聚合物具有更低的流動性和更高的粘度。

物理性能如延展長度也受分子量的影響。對於低分子聚合物，延展壓制的可能性為零。但隨著分子量的增加，延展長度將會增加，且到一定水平會斷裂，具有一個近似的最大延伸長度。正如在晶體聚合物部分的討論，形成晶體物質的必要條件是一種聚合物必須達到一特定分子量或內鏈長度，從而使內鏈排成直線。依靠化學藥品，高分子聚合物能比低分子聚合物提供更多的機會。晶體延遲了性能的改善，例如充模能力和化學抗蝕力。一般說來，隨著分子量的增加，機械強度和熔融粘度性能會增加，但流動性和製程能力下降；同時隨分子量分配範圍變大，流動充模能力和熔化強度增加；隨著分子量分配範圍變小，抗沖擊強度增加，但 warpage 流動性和製程能力下降。

總之，分子量的增加會導致機械性能的增強。是以，大多數聚合物的分子量介於一萬到一百萬之間。除非至少可獲得分子量為一萬的聚合物，否則強度性能得不到改善。此外，分子量也能影響製程流動性和聚合物別的一些物理性能，如抗沖擊強度和延展長度。

5.1 聚合物結構

對於理解關於一特定連接器所使用的塑膠而作出的恰當的選擇，了解聚合物的結構常識是必要的。從一個微觀觀點來考慮，聚合物可畫分為兩類：無定型聚合物和晶質聚合物。

5.1.1 非晶體聚合物

非晶體聚合物由聚合物內鏈組成，這些內鏈以一個隨機無序的形式排列。在這里把它們看作為一碗意大利麵條，如圖 1 所示。相對晶體聚合物，非晶體聚合物被認為有更寬的熔解範圍、更低的收縮率、更低的 warpage 和更低的流動性。它們具有良好的延展性、抗沖擊強度及尺寸穩定性。這些原料包括了非晶體聚合物範圍，且它們所擁有的大量物理和機械性能，具有很強的溫度依賴性。低溫時，非晶體聚合物是玻璃質的，堅硬但易碎。隨著溫度的增加，非晶體聚合物超過了自身玻璃質轉換溫度 T_g ，加熱到該溫度時，聚合物結構轉向橡膠質(在冷卻時，轉化為玻璃質)。在 T_g 溫度上，聚合物將失去明顯的自身所有的機械性能，如圖 5.2 所示，in modulus shown 這些性能會急劇下降。因此，當以非晶體聚合物原料來設計連接器時，考慮大致的使用溫度是首要的。關於非晶體聚合物有聚苯乙烯和聚碳酸酯等。

5.1.2. 晶體聚合物

通常所說的晶體聚合物指半晶體聚合物並包括晶體、非晶體聚合物範疇，而非晶體聚合物只包括非晶體聚合物。晶體聚合物被推斷以圖 5.3 所示結構有序的排列。隨著早期的推斷。晶體聚合物被想象成一碗混合了煮熟的和直硬未熟的意大利面條。這種有序通常是由于聚合物內鏈有這樣一個結構，可讓它們排成直線並聚集形成晶體範圍。直線型態由這樣的幾何特征而來，並被在聚合物內鏈間形成的低能量化合物所保持這些低能量化合物如氫

合物等。中間鏈的結合依靠內鏈長(即分子量)，這就是為什麼分子量是如此重要的塑膠原料參數的原因。塑膠原料里晶體的百分比由聚合物類型(化學組成)所決定，它也影響著內鏈主鏈的柔韌性，和能促進結晶的可能的內鏈反應。例如：尼龍內鏈有能力形成氫合物，因此在聚合物內促進了結晶。聚酯也能形成氫合物，並影響構成聚合物內鏈的化學單元長度，因此促進了結晶。

晶體聚合物 sharper 熔點和玻璃質轉化溫度，比起無定型聚合物具有更高的係數和抗拉強度。儘管它們的抗沖擊性能低於那些非晶體聚合物，但通常認為晶體聚合物具有良好的化學抗蝕力。

在熔融狀態，晶體聚合物也是非晶體的；也就是說，聚合物內鏈以隨機的方向排列。但隨著熔液的冷卻，內鏈開始直線排列並形成晶體聚合物。直線型式可促使先前提到的係數和化學抗蝕力的加強。

通常，原料晶體的性質能對連接器元件的制程和物理性能施加一個可預測的影響。隨著成型過程所使用的成型方法及添加進基體塑膠的化合物的變化，晶體也隨之變化。隨著晶體百分比的增加，機械性能也增強。圖 5.4 表示了一典型的應力－應變曲線。當晶體增加時，如前敘，隨晶體百分比的增長，屈服點和主要的強度會提高。被作為一種衡量硬度的尺度的彈性的模量(應力對應應的比率)也在增加，但晶體的增長通常會造成原料韌性的下降。而內鏈的直線排列和前述的中間鏈聚合，引起了機械性能的提高。在聚合物的機械性能上，晶體的增長具有明顯的影響。晶體聚合物主要有乙烯聚合物的氯化物(PVC)，尼龍和聚酯，例如：聚乙稀、對苯二酸鹽(PET)和聚丁烯(PBF)。

· 工程塑膠原料

現在這將有助於詳細調查一些使用頻率很高的連接器原料。這些原料將根據它們是否屬於晶體或非晶體聚合物而劃分為兩大類。

5.2.1 非晶體聚合物

丙烯晴－丁二烯－苯乙烯(ABS) ABS 由一系列的有時被用於低要求連接器運用場合的配方構成。儘管 ABS 具有良好的沖擊性能，並且相對比較便宜，但它對有機溶劑幾乎沒有抵抗力，一經暴露在這類環境下，它就會變脆。ABS 也不具有長期的熱穩定性。ABS 也不具有長期在高溫環境中的使用

性能，因此不能適用於一些高要求的連接器運用場合。ABS 還具有良好的機械性能、熱和化學的抵抗力、良好的耐久性、高沖擊強度及磨損抵抗力。

聚碳酸鹽酯(PC) PC 是具有良好尺寸穩定性和沖擊強度的非晶體聚合物。當運用上需要時，它的透明也很有價值。PC 也具有相對較高的加熱性能和 1500 度的熱變形的溫度。但它不具備良好的化學抗蝕力，而且在有機溶劑中可能會被裂解。它具有良好的電性能，本質上是自衰的。PC 和其它合成橡膠、熱塑性聚乙烯、ABS 磺化聚合物混合的特性是可利用的，並可提供改善的低溫韌性和製程性能。

Polyphenylene (PPO) 由於處理和成型簡單聚合物的困難，PPO 典型被用在改變混合形式上。連接器場合上大部分的混合是隨高沖擊強度的聚苯乙烯 (HIPS) 或尼龍而變化，並是玻璃質增強的。這些混合能阻燃以達到 UL 94-VO 易燃品表單要求。PPO 和它的混合物具有良好的溫度係數和一定的化學抗蝕力（它對酸性和鹼性環境具有良好的抵抗力，但會溶解一些芳香醇和氯化溶劑）。在一個大範圍的濕度和溫度條件下，該等聚合物具有低的吸水率和良好的電氣性能。然而，PPO 不具有類似聚乙烯的良好的流動性，故無法使用在薄壁連接器上。

聚眠甲烷 市場上有許多價格與性能差異很大的聚眠甲烷。這些原料具有良好的加熱性能尺寸穩定性能，但是對有機溶劑幾乎沒有抵抗力，尤其是對氯化的碳化氫。它們具有高的受熱斜向溫度、良好的尺寸穩定性、良好的爬行阻抗及好的電性連接性能。聚眠甲烷本身具有良好的阻燃性，並具有相對較高的受熱性能。

Polyetherimide(PEI) PEI 是一種高溫非晶體原料。它通常用在需要較高受熱阻抗或尺寸穩定性條件下。它具有符合 UL94-VO 的阻燃係數。PEI 是一種高穩定的聚合物，它可以被研磨及通過復合途徑使用。它具有好的 UV 和 γ 射線阻抗。在沸水中浸泡 10,000 小時后它還能保持 85% 的拉伸強度。在不同溫度、濕度、頻率條件下，PEI 具有良好的電氣性能。它的散布對於微波是透明的。對於波峰焊和氣焊製程的 PEI 的阻抗也是通用的，這使它特別在電性運用上引人注意。PEI 主要的不利因素在於它的成本很高、製程溫度高、流動性差。

Polyether ketone(PEK) PEK 是一種相當貴的原料，它被用於高溫場合。

該原料由於固有的磨損和疲勞阻抗而具有良好的化學性能和抗腐蝕性能。只有濃縮無水的或是強酸才能對它起作用。酮唯一可溶於酸。它們對於熱水分解具有很高的抵抗力。酮有時也會發生翹曲，這可以被鑄造克服。酮類聚合物具有高達 3000 度的熔點。它們具有低煙率並在整潔環境裡通過了 UL 的 94-VO 的測試。酮類聚合物是具有一定韌性、強度、硬度和高沖擊強度和負載承受能力的。酮類聚合物會受 UV 的影響，但在一個大的溫度範圍裡對 α 、 β 、 γ 射線具有高的抵抗力。

5.2.2 晶體聚合物

Polyoxymethylenes (縮醛) 縮醛是具有良好的流動性和類似對有機溶劑的化學抵抗力一樣好的製程性能的半晶體聚合物，但它們當暴露於強酸作用下時，會發生退化。縮醛固有的缺點是不具有阻燃性，因此它們在使用上受到限制。縮醛具有在長時期大範圍裡保持良好的機械、化學、電子性能結合的能力。它們對承受負載和疲勞具有良好的抵抗力。對於在 2000 度高溫下使用，也具有較高的熱抵抗力，並具有很好的水穩定性。這些塑膠是堅硬的、牢固的和具有良好韌性的。

聚乙烯 在電子工業領域，有許多原料是聚合物內鏈的酯結合，因此都屬於工程塑膠的聚乙烯家族。許多標準連接器由聚乙烯組成是因為它能提供良好的流動性、很光滑並具有良好的溶解抵抗力。這些原料主要是 PBT、PET 和 PCT。選擇這些玻璃增強劑的性能被納歸納在表 5.1 中。簡單的樹脂不同於化學合成的，故也由於該不同而造成具有不同的性能，如表 5.2 中所示。基於用來製造不同聚合物的單體，聚合物的內鏈會被改變。結構的不同會影響到化學性能、熔點(T_m)、晶體百分比和其它一些性能。晶體的變化會在物理性能、化學抵抗力和其它一些原料的重要性能上產生很大的影響。聚乙烯的半晶體原料，很容易在成型時收縮。

PBT 具有良好的化學阻抗性能，此外還具有不受濕度影響的電氣性能。它也不受水、弱酸及其通用有機溶劑的影響。

PET 具有高的強度、韌性、尺寸穩定性、化學和熱抵抗力及其一些其它的性能。它 PBT 對水和製程中的水的百分比更敏感，這會導致成型聚合物的退化。不填充 PET 的成型收縮率是 2%，但當加入 30%的纖維添加劑後，收縮

率只有 0.1%到 0.3%。

PCT 具有 285 度的熔點，相對 PBT 的 225 度和 PET 的 255 度，更高的溫度阻抗使它更易於在表面安裝電子元件。PCT 主要的缺點是它的製程窗口由於很小的熔解和退化溫度跨距而很狹窄。但它也有很好的物理、化學、電子、機械和熱性能。

PBT 比 PET 和 PCT 更牢固。當 SMT 不成爲問題時，良好的流動性和牢固的晶體使 PBT 聚合物用在很多連接器上。這實質上是允許更快的循環時間，因爲它能更快地填充模具並成型。PET 是低晶體並因此導致更長的成型時間，這會延長循環周期。PCT 具有和 PBT 大致相當的晶體百分比，但更慢的晶體化過程而導致更慢的循環周期。PET 和 PCT 型由於它們的高熔點而需要更高的成型溫度。這類聚乙烯通常被用作絕緣原料，而且受所需的化學抗蝕力、溫度決定，並且 PBT 在使用中佔很大比重。

Polyphenylene sulfide (PPS) PPS 是具有良好流動性和受熱能力的半晶體聚合物。它具有有良好的流動製程性能並能填充複雜連接器設計的薄壁部分。大部分的 PPS 原料和混合物是下班露出增強劑，這是因爲它的簡單構造。它在成型中不易碎並不會閃光。PPS 通常用在需要高溫的 PCT 上。PPS 固有阻燃性，但它的價格限制了它的使用。PPS 被 UL 94-VO 評定過。當玻璃纖維增強後，PPS 可持續使用在 2000 度的溫度等級裡。PPS 在大的溫度和濕度範圍裡也具有很好的電氣性能。

Polyamide (PA) PA 最常見的是尼龍，可以有很多種。依靠所使用的單體，原料在性能和成本上有很大的變化。表 5.3 和表 5.4 中分別提出了選擇簡單和填充尼龍樹脂的性能。大部分尼龍是半晶體聚合物。尼龍能夠隨使用的添加劑和混合物的不同而發生很大的原料性能變化。尼龍的流動性也會發生變化，因此能被用在各種需要高強度和係數的場合。但是通常尼龍需要添加添加劑和強度添加劑。尼龍具有良好的韌性和水解穩定性。它們具有長期老化性能但不具有阻燃性。使用尼龍的缺點是收濕性；它所吸收的濕氣會隨溫度和濕度的變化而發生變化，因而會導致聚合物矩陣的延伸。但通過烘干，條件是可逆的。由於這個原因，一些 PA 不適合應用於要求三維尺寸穩定性的場合中。吸濕性也影響了一些性能，例如它增加了翹曲和沖擊強度但減少了拉伸強度。聚合物的電氣性能對於濕氣和增加了水分後的變質很敏感。尼

龍對於烴和芳香族化合物具有很強的化學抵抗力，但受強酸、堿、酚的影響。在一定的持續時間和暴露強度下，提高溫度和超聲波照射(UV)都將使尼龍退化。

液晶聚合物 (LCP) 液晶聚合物包括大量的樹脂，樹脂在熔解和固體時其結構均顯示出了很高的硬度，在薄的部分也是這樣。它們同樣顯示了較高的溫度穩定性和化學抵抗性能。用於連接器工業中的液晶聚合物通常為含酯類酸的聚脂類液晶聚合物材料。液晶聚合物具有很好的機械和熱性能同時還具有較好的流動性。因此它們用於薄壁應用中。如果連接器上端子之間的距離很小時就應該考慮使用 LCP，因為 LCP 的流動性比 PPS 的要好四至五倍。在流動方向上的塑造收縮只有千分之一英吋的大小。LCP 可歸為改善的熱塑性塑料一類，在表面安裝的應用中其比 PBT 在製造薄壁型產品的時候具有更好的性能。

液晶聚合物受基於外來芳香族化合物而導致較高的各向異性的形態的影響。這種化學作用的影響將使材料的價格的升高。為降低成本 LCP 常與其它一些的低成本的材料相混合使用，如人造樹脂、添加劑以及玻璃纖維。LCP 與 PPS 相混合使用的第一個商業目的是可降低 LCP 的成本以及減少 PPS 的閃光。液晶聚合物的性質特徵為低溶解粘性，良好的拉伸性，具有壓縮力以及彎曲係數值；以及非常好的化學，輻射，及熱穩定性。圖表 5.5 中顯示了 LCP 的選擇性有代表的性能參數值。

如圖 5.6 所示，基於其化學性 LCP 可分為三類。與熔解溫度特性相應的是其最顯著的特徵是 HDT。LCP 極具競爭力的一個優點是其快速出模和製造薄壁產品而不留毛邊的性質。此類材料具有經受高溫處理和長時間處於升溫的狀態。

在 LCP 材料中也存在如下的缺點，它們的各向異性將導致出現橫向應力，並且將導致部分的 warpage。這些問題可通過增加添加劑來改善。結晶同樣會出現在此類材料中，這樣將會減少前端流動熔合的時間。這樣將導致焊接線強度較差，但是這種問題也可通過控制成型過程和加工工具設計來加以控制。由於未充滿的 LCP 具有各向異性，為了加強其在電子方面的應用，通常在其中加入 30%到 50%的玻璃纖維。高熔解溫度在 300℃範圍內，高係數會對波動，蒸汽階段以及紅外線焊接條件產生影響。LCPs 有 UL 94-VO 的阻

燃率，以及在燃燒時不會產生煙霧。其對酸的以及稀釋堿，有機溶劑化學抵抗力非常好。強堿如氫氧化鈉和胺將會使 LCPs 到一個加高的溫度。

LCPs 在連接器市場上能有一席之地是因為有兩個重要的因素：設計上的小型化和在自動生產過程中的高生產率。近年來的趨勢是具有更高生產率的表面粘著技術，其經濟性允許使用高成本的 LCP 材料。

5.2.3 熱固性聚合物

爲了更完整的敘述接下來便是熱固性聚合物。熱固性聚合物從溶解狀態到冷卻狀態因此不能被軟化或再加熱以用於其它目的。因此它們只能提供較爲有限的機會在再研磨用的過程中。在化學上熱固性樹脂在處理中要經歷一個交叉連接的反應過程，以產生一個固定的分子間的網絡結構。熱固性材料在交叉連接的時通常是收縮的，但是這種收縮是能通過附加如添加劑和加強光纖進行控制。在熱固性狀態下的這些材料的變化可以在室溫和高溫下完成，而樹脂則能在加熱下進行得更爲徹底。總的來說熱固性材料比熱塑性材料具有更好的溫度性能。

5.3 添加與添加劑

在連接器領域應用的大多數樹脂可以通過添加劑的方式來提高其性能。這些添加劑的範圍從阻燃劑到惰性添加劑以及加強料。很多用作絕緣的材料可通過增強處理和添加劑的方式來提高其性能。增強處理通常用來提高材料的強度、硬度、尺寸穩定性以及熱和機械性能。其通常能減小熱膨脹係數(CTE)並且在薄片結構中它們能減小捲曲和收縮。添加劑通常能增強硬度、尺寸穩定性、和熱機械性能。它們有時會影響強度和工作性能。添加劑通常便宜且能降低材料的成本。在很多情況下增強劑和添加劑聯合與玻璃纖維使用以平衡成本與性能之間的關係。這裡有一些因素能控制附加添加劑的使用：

載荷---附加添加劑的數量將決定一定載荷下硬度、強度以及熱性能的增加。一般情況下 50%的載荷常常被用到。

比率---在很多情況下增強效率要由玻璃纖維和添加劑在比率方面(長度/直徑比率)來決定。很多添加劑是易碎且在材料的鑄造和成型時易碎裂和退化。具有低比率的材料經不起太大的損壞。

界面連接—很多礦物質和玻璃基於其化學組成而具有高表面積，其組成佔有很高的表面能量。Coupling agent 或 sizing 可用於量度材料增強樹脂矩陣之間的聯接。通常的 coupling agent 包括 silanes，石蠟，titinates 和胺。

混合處理----添加劑與聚合物矩陣相聯接的方法將會在其性質上產生想不到的效果。

用得最廣泛的增強和添加劑是阻燃劑、玻璃光學纖維、雲母片、wallastonite 以及滑石粉。

5.3.1 阻燃劑 (FRs)

很多電子應用上要用到阻燃樹脂。最明顯的原因是防止可燃材料的點燃。有幾種可燃途徑必須注意到，如稀釋物(添加劑)，保護層的成型(磷化物)，以及冷卻物(鋁及從水中產生的氫氧化物)。這種反應通常發生在固體或氣體階段。阻燃劑在使用了鹵素元素之後將會妨礙原子團之間的反應。經過交叉連接反應它們會在材料表面形成一個燒焦或屏障層，這些是可通過磷化物的介入而產生的。

阻燃劑能作為反應劑和填充劑。作為反應劑的時候它們自己通常要進入聚合物的矩陣結構之中，而作為填充劑時它們通常只會物理上與聚合物矩陣結構相配合作用。FRs 在工程熱塑膠材料上的應用一般是作為填充劑。其中一些在混合物中起配合劑的作用。這種阻燃劑的選擇是可擴展的，並且其總類和影響對絕緣材料的作用將會被提到。

在工程塑料領域裡應用的填充阻燃劑有最基本的兩類：含鹵素和不含鹵素的 FRs。有一些材料如 PEI 和 PPS 它們自己分子結構內部就有阻燃劑，因此也就不需要附加的阻燃劑。含鹵素的阻燃劑其效率增加的順序為：氟<氯<溴<碘。含鹵素的 FRs 通常使用溴作為鹵源而有時也使用氯，這是由於鹵素與碳原子相結合時其釋放需要有一定的能量從而能提供給 FR。FR 的化學活性已經大量的研究了但仍然存在爭議。增加鹵素通常會提高材料的成本同時也使此混合物的密度增加。含溴和含氯的 FRs 被束於脂肪類和芳香族的聚合物矩陣之中。脂肪類結合的鹵素容易被破壞，所以它們比芳香族結合的鹵素的溫度抵抗性要差。芳香族結合的鹵素在工程塑料中應用得很普遍，例如：tetrabromobisphenol A，乙 烯 (tetrabromo-phalimide)，以 及

poly(dibromophenylene)。這些材料的成分從 4%到 15%不等，這要依 FR 中的溴的含量以及能提供給阻燃劑的矩陣而定。由於分子和聚合物的不同這些材料所帶有鹵素將會影響絕緣材料的性質。例如很多聚合含鹵分子用於工程塑料之中。

大部分情況下要用到銻基化合物。這樣可以提高鹵素阻燃的效率。配合氧化劑自己並沒有 FR 的能力，然而它在含鹵化合物中具有很強的配合作用並且還可與廣泛的與鹵素相配合使用。此類反應通常發生在氣體狀態下。

非鹵素的阻燃劑同樣也在研究之中，但由於其在應用中對一些材料的基本聚合物矩陣將產生損壞性的影響，所以其應用受到了限制。例如磷基化合物用於尼龍材料中而不能用於聚脂之中是因為其與聚脂微晶不相容。磷化物所起的作用通常是在濃縮階段。其化學組成通常為高含氧成分並用於聚脂中。磷類主要包括有亞磷酸鹽、亞磷酸、磷化物、白磷、紅磷以及磷酸鹽。這些化合物可用於一些明顯的材料並且通常作為燒焦層組分和屏障層組分。作用於表面的 FRs 可對表面的性能產生一定影響。例如形成燒焦層的材料將影響聚合物表面抵抗力，它們同樣會妨礙鑄造柱形表面過程。

工程塑料中很少有適合 FRs 的礦物質，因為大多數礦物質的分解溫度比工程塑料形成溫度還要低。含有礦物質的材料，如氫氧化鎂、碳酸鎂、氫氧化鋁及含硼的化合物已經被應用。它們加熱時通常要分解，但不象其它物質那樣蒸發，而是釋放出不燃燒的氣體，如水和一氧化碳等稀釋燃料的混合氣體。同時它們也把聚合物和氧隔離，以免其被氧化。但是這些混合物因為需要高度濃縮以滿足 FR 的需要而使其在工程材料中的應用受到限制。由於材料中包括了水和更低的物理特性，尤其是流動性和相互沖擊性。許多情況下，這些材料也提供了稀釋的作用，因此那些不燃燒的其它材料對 FR 的形成具有積極的效果。聚合物中含有許多其它物質，如矽，其表現出有限的分解延緩應用性，但是它們必須考慮成本和性能。

延緩分解性的要求一般是用(Underwriters)實驗來確定的，許多確認延緩分解性的不同實驗被採用，如 UL94，DIN4102 及 NEP92-507 等。獲得 UL 證書需經過嚴格的測試。

當考察 FR 添加物和分解延緩材料時，應用的特殊性、全部材料的絕緣性能及材料的成本/性能比值都必須考慮。又，聚合物的許多性能可通過向聚

合物矩陣添加 FRs 添加劑而得以改變，這一點也是需要考慮的。

5.3.2 強化添加劑

玻璃纖維 玻璃纖維是廣泛用作強化劑中的一種。除了強化作用外，玻璃纖維還可增加分解延緩性和使材料更耐化學和熱作用。玻璃纖維添加劑可大提高材料的物理性能。如，向 PBT 中加入玻璃纖維添加劑可使其彎曲係數增加 250%，拉伸係數增加 100%。在其它樹脂中可看到相似的性能的提高。玻璃纖維添加物一般要降低樹脂的流動性並可能引起一些表面缺點。玻璃纖維對選定的聚合物性能的強化作用被列於表 5.7 和 5.8 中。

雲母 雲母也是一種用作提高熱傳導性，溫度阻值及電介質絕緣性能的同時降低熱膨脹的天然材料。它可作為添加劑或強化劑並常與玻璃纖維合用，表 5.9 說明了這一點。

Wallastonite. Wallastonite 也是一種天然的針狀材料。它常與玻璃纖維合用並表現出很好的電絕緣性能和很好的熱變形特性，表 5.10 對此進行了說明。

5.4 成型和應用

聚合物形成連接器絕緣本體的過程(通常是注塑成型)及關於成型過程部分設計的作用對連接器絕緣本體性能有很大的影響。連接器將被使用的應用也將影響聚合物選擇的標準。關於此以後將繼續討論。

5.4.1 成型過程

某種連接器應用的特殊材料的選擇可能受許多因素的影響。有時一種材料根據其物理特性來選擇。在其它情況下，連接器的使用環境也可能影響樹脂的，這一點也需考慮，並且熱和化學相容性必須作為主要因素加以考慮。作為首要考慮的因素，合適的熔化和成型溫度必須考慮材料的數據表。高的成型溫度一般導致低的成型壓力，高的成型完整性及易流入較窄部位。為了獲得統一的成型高溫，建議採用噴吐機或熱端子以從核心向外散熱。溫度平衡依賴以下三個因素：模具設計，熔化濕度及循環次數。冷模會引起過度的彎曲和收縮。

注塑壓力值是成型過程的另一重要因素。較窄的部分成型尤其困難。它

們需要大量的排氣孔，熱模及額外快速填充。注塑成型壓力值依賴於局部幾何形狀、模型設計、成型材料及熔化溫度。總的來說，連接器最常用的材料趨向於具有低粘性和易流動性。在連接器絕緣本體注塑成型時，使用低壓注射是很重要的，這樣可降低沖擊，成型壓力及模具小核心的疲勞度。如果採用過高的注塑壓力，由於模具鋼的移位或其它對模具的損害都可能引起注件尺寸的改變。

這樣的影響在連接器的局部角落顯得尤其突出，因為注塑件的外部比其內部冷卻速度要快得多。降低角落處的彎曲程度的關鍵是使連接器兩邊的冷卻率相等。達到這一點的典型做法是使角落處的內部比外部溫度低。另一種做法是使角落處的內部升溫。使核心部比外部洞穴降低到更低溫度值的能力在許多連接器工具中是很重要的。

5.4.2 應用

表面粘結技術(SMT)將作為一個聚合物/應用干擾的例子。SMT 允許向電路板密集地安裝元件。SMT 的主要優點是在裝配時可降低成本，減小尺寸及減輕重量。許多電路板的製造商都編入採用各種 SMT 技術的製造設計技術(DFM)。製造商發現 up-front、受控的放置規劃、焊劑、修理維護及測試可顯著地提高生產率和可靠性。考慮的重要設計是使用的 SMT 類型，電路板條件及可靠性和成本因素。

現在有兩種基本的用於 SMT 的接觸方式：波峰焊和流動焊。在波峰焊中，裝置和接觸面直接暴露於熔化的錫合金。流動焊依賴於傳遞的熱以熔化置放的焊劑合金(主要用作錫/導引/熔化粘著更重要的安置裝置)。波峰焊常用於穿孔插接(PTH)方式和在焊接過程中被收容於基樹脂的低輪廓裝置。流動焊則僅用作粘結以保持該裝置。

流動焊是用於 SMT 裝配方式，尤其是需要使用更新的、更好的樹脂混合物的先進的焊接方法。當幾種方法存在以有效地流動焊接粘結時，常採用紅外線來加熱。激光、熱氣、熱棒及局部集中的紅外線在流動焊接中也常用的。

波峰焊或流動焊是一種適合使用 SMT 技術的製造的共同方法。波峰焊是一個過程，在該過程中，許多連接部與流動的焊劑波接觸一小段時間，同時連接部被焊接。

除了焊接以外，粘劑和樹脂也可以用於向組裝表面安裝組成物。粘著技術可用手操作機械的注射器而達成，或使用高速輸出、可編程的機械分配手在需要組裝其它元件的位置點上粘劑。

上面的關鍵點是 SMT 向電路板和連接器環境傳熱和化學物質的過程。注意 SMT 應用的材料挑選以材料在焊接端子的 SMT 過程中暴露的時間和溫度為基礎是相當重要的。這些絕緣材料在 490 華氏度(255 攝氏度)的高溫下可以停留 30 秒到幾分鐘。

5.5 小結

電連接器材料可能暴露在熱及化學環境中。此時，材料的選擇更加嚴格。故設計者必須確定電連接器絕緣本體的材料選擇在經過長時間的不良環境以後仍能保持其性能。

選擇電連接器絕緣本體材料還有其它長期因素需要設計者加以考慮。其中之一考慮是如果部件在板清洗過程中暴露於碳化氫時對抗化學腐蝕力的要求。例如，postassembly 環境也是很重要的。例如，長期熱及化學抵抗力在覆蓋應用時（under--the--hood）應加以考慮。

高密度及小型化在電連接器市場上將會繼續發展。可以預測未來之設計將要求在更少的空間有更高的性能。因而對設計者而言，在材料領域的變及表面粘接技術上處於變化的前列更為重要。

表 5.11 列舉了不同材料的優點及缺點。同時表 5.12 包含了與電連接器應用最相關的選擇的工程聚合物的一些聚合物性能總結。

表 5.11 電連接器應用所選擇的工程聚合物的優點與缺點

材料	優點	缺點
ABS	良好的抗沖擊性能，價格低廉	較差的有機溶液抵抗力，缺少長期抗熱老化性，對大部分的連接器應用不適合
ACETAL	良好的流動性及化學抵抗力、成本低廉	在酸性或堿性環境中易退化，且阻燃性差

PBT	良好流動及光滑，良好的電氣性能及化學抵抗力，良好的熱性能	高收縮性，在負載下易發熱
PET	與 PBT 相比減小了翹曲性，比 PBT 更耐高熱	流動性比 PBT 差，對空氣濕度敏感（比 PBT 的結晶性差）
PCT	最高的熱聚合物，良好的流動性及化學抵抗力	易碎，制程窗口窄
PC	天然阻燃性，良好抗沖擊強度，尺寸穩定性，透明性，熱性能	化學抵抗力差，壓力下易分裂，流動性差
PPO blends	良好熱性能，天然阻燃性，具有一定化學抵抗力	流動性差，可著色性差
Nylons	良好流動性，抗熱性，抗沖擊性	吸濕性差，尺寸穩定性差
PPS	良好流動性，抗熱性，化學抵抗力	易碎，反光，著色性差
PEX	非常好的熱性能，良好的抗環境疲勞性，天然阻燃性	結晶慢，成本高
PEI	熱性能好，天然阻燃性好	成本高
LCP	非常好流動性，熱性能好，天然阻燃性好，電氣性能好	編織線強度，著色性，成本，機械性能與流動性相對 perpendicular

附：PEI=polyetherimide；PES=polyethersulfone；PC=polycarbonate；PBT=polybutylene terephthalate；PCT=polycyclohexylene terephthalate；PPS=polyphenylene sulfide；PA=polyamide；LCP=liquid crystal polymer；其中：PC 不含有玻璃，PPS 含有 40%玻璃，其它材料不含玻璃。

第六章 可分離式連接器

在第一章中，就連接器曾給出如下的功能性定義：電子連接器是指一種能夠為電子系統兩個子系統之間提供可分離式接觸界面的電子裝置。

可分離式接觸界面本身具有一些要求，其中包括耐久性，結合力及機械穩定性。耐久性指連接器可正常工作的結合周期。一個連接器所需要的結合周期取決於其具體應用。當製造工藝比耐久性重要時，這個數值可以較低，大約為 10。至於便攜式電腦(如辦公室或家庭用的筆記本電腦)時，就需要數千周期。耐久性主要涉及接觸面塗層消耗的可能性，其導致第三章中提到的腐蝕保護及界面最佳化的喪失。

結合力（連結連接器之插頭與插座所需的力）對於高級端子計數連接器尤為重要，這種連接器由於其結合力較大導致須以工具輔助裝設否則將被破壞。機械穩定性指連接器承受應用載荷如震動、沖擊及熱循環的能力，其可能導致接觸面干擾。這種干擾也可能產生如第三章所述的電鍍層脫落。

影響這些操作性能的主要的連接器設計及物料因素是接觸面塗層、正常接觸力及接觸面形狀。本書第二章、第三章曾就接觸面塗層對摩擦、損耗及受此影響的耐久性、結合力的重要性和影響進行說明。

本章將討論正常接觸力和幾何形狀對操作性能的影響，其中正常接觸力是重點，尤其是它的產生、大小及其穩定性的維持。

6.1 引言

爲方便起見，將前述連接器橫截面圖 1.1 再現爲圖 6.1。在連接器中各種各樣的可分離的接觸面接觸之設計拓展了在不同環境的要求下應用的連接器的範圍。可分離式連接器一般具有兩部分。大體上，連接器的一端(通常插座)是彈性部分，而另一端(插頭)之固體接觸部爲 post，pins，或者 PWB。分類上，這些裝置可歸入 post/插座，pin/插座，及卡邊連接器。

6.1.1 posts，pins 及 PWBs

圖 6.2 是典型的插頭接觸端之實例。PWB(圖 6.2.a)就是三級和一些四級連接器裝置的一部分。posts 和 pins 的主要差別在它們的幾何形不同。posts 爲方形或其他規則形，而 pins 則爲圓形。

圖 6.2.b 所示的一側邊爲 0.025 in(0.635mm)的 25 針方形 post 是目前最常見的幾何形狀，盡管小一點的 post (如 15 針方形和 0.5mm)的應用越來越多。貴重金屬塗層應用於高操作性能之領域，而錫塗層則用於電子和商業產品上。在 3、4 級產品中，post 依據工作環境不同可以直接插入板上或收容於連接器端部，其可以被遮蔽，也可以不遮蔽。

Pins 在四級產品中應用不多，其主要應用在於五級與六級產品中。根據不同情況其可應於很多尺寸。常用的兩種型號爲如圖 6.2c 所示的加工螺桿及圖 6.2d 所示的層疊式。二者主要區別在於加工螺桿的 pin 上沒有接口縫，且不易於控制其尺寸。因此，其通常被認爲具有優良的性能而同金接觸塗層一起應用於軍事和高性能系統。層疊式則用於電子及商業領域並可應用於貴重金屬及錫塗層上。

6.1.2 母端子

大多數母端子都設計成懸臂梁形狀，當然也可以看到混合接縫。一些最常見的形狀如圖 6.3 至 6.5 所示。

最簡單的母端子設計成懸臂梁，如具有卡片狀邊緣的端子(圖 6.3a)，盡管

有一部分端子呈現出如圖 6.3b 所示的混合懸臂設計一樣的複合形狀。

對於插桿插座系統，有多種的端子接縫在應用，如圖 6.4a 到 6.4e 所示的敞開或盒子形狀。除了圖 6.4e 外，在這些例子中，兩個懸臂梁使端子正對插桿的一面。敞開的雙端子由於價格低廉而在商業利用上壓製了盒子狀端子。有四種形狀的雙端子比較常見；通俗地講，他們指的是：桔叉(圖 6.4a)，扭桿(圖 6.4b)，單懸臂(圖 6.4c)和卷盒(圖 6.4d)。他們在實際製造和懸臂梁設計時有很大的不同，這些都影響到製造成本及工作性能。如圖 6.4a 的平壓端子是基本的設計。此外成形操作還帶來一些附加的特徵，圖 6.4d 所示的設計對插桿的不平直度作了一些保護，而且對端子接縫的反超限應力也起了一定的保護作用，這是因為卷盒向裡伸展。

這些系統提供了太過長的端子，它們都應用了貴重金屬而且末端鍍有錫，最後的 25 平方母端子設計圖是有四條接縫的卷盒端子，是爲了適應貴重金屬末端的要求，而主要應用了高性能和多插腳。

正如同對端子的決定一樣，爲了相同的市場公端子還應用於可機加工螺旋和沖壓成型的類型。圖 6.5a 和圖 6.5b 分別所示的是可機加工螺旋和沖壓成型的公端子。可機加工螺旋的端子常常鍍金，而沖壓成型的端子常常被發現在末端有貴重金屬和錫。

6.1.3 總結

在應用中還有許多其他的母端子，都是爲了適應耐久性配合力，成本的要求。上述有提及到，母端子彈性的一個重要功能是產生正常接觸力。

6.2 接觸正壓力

由於接觸正壓力對於以下性能特性之影響，使其成爲連接器設計中一個主要參數。

- * 配合力
- * 磨損
- * 接觸彈性部上之壓力
- * 連接器殼體上之壓力
- * 接觸電阻

增加之正壓力對以上前四項產生不利影響，而只對一項產生緩和之因素。如在第二章所討論的，一樣之接觸面結構，即冷焊後之粗糙結合部，引起了磨擦及磨損。增加之正壓力提高了磨擦力，也增大了配合力及磨損率。緩和之因素是增加之磨擦力同樣提高了端子接觸部之機械穩定性。這是一個有利的因素，因為它減少了接觸面之潛在不穩定性，降低了它受在端子接觸面或其附近出現之腐蝕性產品或污濁影響的敏感程度。

如將要被討論的，增加之正壓力使得在端子彈性部上之壓力變大，這樣反過來也對連接器殼體產生一個更高之壓力，因為在大多數連接器設計中，端子是被殼體在某些點所固持的。在端子彈性部上的更高壓力對彈性物質產生的強度和其可成形性間之權衡關係有更高之要求。在連接器殼體上之高壓力導致殼體更易發生變形，這樣可能影響彈性部之固持位置，進而影響正壓力。從這一點來看，顯示出增加之正壓力總的來講對連接性能產生不利之影響。

然而增加之正壓力卻可以抵銷這些不利影響，如在第二章所討論的，接觸電阻隨著正壓力之增加而減少，正如公式（2.9）所顯示出的，為方便敘述重複於公式（6.1）中。

R_c =接觸阻力

K =一個包括表面粗糙程度，接觸方式和彈性或塑性變形影響之系數

ρ = 電阻系數

H =硬度

F_n =接觸正壓力

增加的正壓力對接觸電阻大小之必然影響是，接觸面積增加，則接觸電阻減小。另外，接觸阻力的穩定性同樣通過兩種影響隨著正壓力之增加而增加。首先，增加之磨擦力提高了接觸面的機械穩定性，以及隨之產生的對抗端子接觸面不穩定之阻力。其次，如將在 6.7.1 節進行討論的，在端子區域裡的這種增加同樣提高了接觸面之抗腐蝕能力。

從以上之闡述可以看出，正如 Whitley 和 Mroczkowski 所論述那樣，一個連接器的“最優化”正壓力來自於較高正壓力對機械性能所帶來的不利影響與端子磨擦力有利影響間之權衡。在大多數例子中，“最優化”被譯成“最小化”以著眼於使不利之影響最小化。要理解這種權衡需要考慮對接觸阻力

之影響。兩個因素必須加以考慮，正壓力需要建立接觸面，並且需要保持接觸面之穩定性。建立接觸面需要產生一個足夠的金屬接觸區，——如果必要，通過破壞或移走表面之氧化膜或污物。在通過要求數量之配合周期後仍保持表面保護層之完整性之前提下，接觸面之穩定性來源於通過增加磨擦力而保證之機械穩定性。

來自於 Whitley 和 Mroczkowski 二人之圖 6.6 顯示，對於鍍金之接觸表面保護層，10g 之正壓力已足夠產生 3Ω 之接觸電阻，這對於實際中任何電訊裝置都能滿足需要。然而，這種“金屬”或貴金屬的最小力並不能解釋氧化膜被破壞或移走之原因。常規知識解釋說，對一個連接器“最小的”正壓力是 100g。這種常規知識之來源不為人所知，但可以追溯到一篇 1970 年貝爾實驗室中的文章。不考慮這個來源，最小量也總是闡述成 10g 以上。所得到之結論是（如在參考 1 和 2 中所討論的），最小正壓力之剩余必須能夠保證氧化膜之破壞和端子接觸面在不同應用環境下之穩定性。

簡單說來，但不是簡單量化，正壓力之要求由在連接器操作環境中的機械及熱條件下保持端子接觸面完整性之要求所決定。

如果在一個連接器中，理想的情況是將正壓力“最小化”，那麼產生正壓力之機械就會變得令人感興趣。除此之外，對於在連接器應用過程和使用壽命中保證正壓力穩定性有重要作用之設計因素，是值得討論的。這些影響穩定性之因素將會進行一些細節討論，但爲了做這項工作，必須對在連接器中正壓力是如何產生的進行討論。

6.3 端子正常作用力及端子設計

在連接器裡，端子正常作用力主要來自於兩連接器插接時插座之端子梁因與插頭配合產生的位移，該位移產生的彈性恢復力就是端子正常作用力。

6.3.1 材料性能和端子正常作用力

材料性能是決定端子正常作用力的基礎，其性能指標是伸長（或稱彈性）系數和彈性極限或屈服強度。爲方便起見，圖 6.7 根據應力與應變曲線指出這幾個性能指標，伸長系數是應力與應變曲線線性部分或稱彈性變形區的斜率，因此其亦稱彈性系數；彈性極限強度是指某一臨界點，於該點之前應力

與應變停止線性關係，而此時塑性變形即將開始；屈服強度是使塑性變形進行到某一定程度時之作用力，在絕大多數情況下，屈服強度被指定為產生 0.2% 或其它定值之殘余變形所需的作用力。下面我們將要討論的是已知端子梁之幾何形狀如何將應力與應變曲線轉換成力與位移曲線。

假如把端子近似視為一懸壁梁，遵循圖 6.8 之注釋，可得出有關端子正常作用力和梁設計參數之等式

$$F=(D/4)*E*[W*(T/L)^3] \quad , \quad (6.2)$$

其中 D==梁位移量
 E==材料彈性系數
 W==端子起拱處寬度
 T==端子起拱處厚度
 L==端子起拱處長度

該等式包括三個要素：梁位移(設計選擇)、彈性系數(材料參數)和端子拱起處之幾何形狀(亦為設計選擇)，其中每個要素都是獨立的，且據不同之考量導出。

由 Lowenthal et al. 報告的將上述等式運用於工程中，為端子承受正常作用力之連接器設計或材料選擇提供了理論依據，該研究中端子之幾何形狀與圖 6.4d 所示相似，其具有兩個獨立端子梁，其中每一個端子梁可視為簡單的懸壁梁，如 6.2 式所述。

圖 6.9 摘自參考 3，其為銅合金之選擇提供了端子正常作用力和梁位移之關係(如 6.2 式所述)。以下討論將只限於下面三種材料：C51000(磷青銅)、C72500(銅鎳錫合金，725 合金)和 C17200(鈹銅)。這些合金的材料特性如圖 6.9 和圖 6.10 所示，其它合金材料特性均羅列於參考 3。

梁之彈性率和正常作用力與位移之比例由下式可看出

$$F/D=(E/4)*W*(T/L)^3 \quad (6.3)$$

該彈性率對應於圖 6.9 所示的正常作用力與位移曲線之初始斜率，且該斜率的變化趨勢與材料彈性系數的計算結果相類似，這就是早期將形狀一定的端子的作用力與應變曲線轉變成力與位移曲線的依據，此三種合金的斜率數 725 合金最大，鈹銅次之，磷青銅最小。

端子之工作範圍設計應包括位移從 0.0025 英寸至 0.05 英寸(0.0635 毫米至

0.127 毫米)之範圍內，如 6.2 式所示，與其它兩種材料相比，磷青銅端子所受的最小正常作用力(最小位移對應的力)較小，這主要取決於其較低的彈性系數，根據 6.2 式，端子梁的位移一定，如果要得到較大的正常作用力，可通過改變端子梁的幾何形狀而獲得，正常作用力與梁寬度呈線性關係，而與梁長度和厚度則呈立方關係，為提高正常作用力可改變上述每一個參數。

提高梁寬度會有一負面影響，即難以保證連接器端子間間隔大小；而減小端子長度會使得端子柱的接觸長度變小，這也是一個潛在的消極影響；另一方面，提高端子梁厚度可減小整個端子的幾何變形，但對於相同的正常作用力，其卻受到最大的沖擊，比如在其它條件相同的情況下，梁厚度為 0.0105 英寸(0.2667 毫米)的磷青銅端子將能彌補彈性系數的差距，而達成與梁厚度為 0.010 英寸(0.254 毫米)的 725 和鈹銅端子相同的正常作用力和彈性率。

6.3.2 彈性變形之極限

公式 6.2 僅適用於端子梁之彈性變形。從圖 6.9 之數據中可以清楚地看到，情況不總是例證之端子那樣，725 合金之變形量隨力的變化曲線關偏離了線性方向，並且圖 6.10 表明了 725 合金在變形到達最大變形量 0.005 英寸(0.127 毫米)之前就存在永久變形。鈹銅與磷青銅保持"彈性"。725 合金之屈服強度較其它兩種材料稍微低一點，但其彈性極限比其它兩種低得多。因此，它在少量變形情況下就呈現塑性，在此設計中，其在未達到設計變形量 0.005 英寸(0.127mm)之前就已產生了一永久變形。

端子變形量超出其彈性變形量範圍，會對主應力產生兩方面之影響。在連接器首次裝配過程中(最初之彈性變形)，如果端子梁開始塑性變形，則主應力與變形量關係曲線將為非線性。換言之，有效之彈性系數將下降，並且在一定塑性變形情況下之主應力要比在彈性變形下之主應力低得多。

另外，在隨之進行的裝配中，端子梁會產生永久變形，主應力也會因此減小。永久變形之結果是使端子梁之設計變形量減小。例如，圖 6.10 表明從連接器首次裝配到產生最大之梁變形過程中，725 合金將產生 0.001 英寸(0.0635mm)。這個變形意味著端子之變形範圍將減小 0.001 英寸。因此能產生最小主應力之最小變形量為 0.0025 英寸(0.0635mm)，因此主應力會減小 40%。在最大變形量為 0.005 英寸(0.127mm)時，主應力將減小 20%，這仍是一個可

觀之數字。在設計時如果假定為彈性變形，不考慮永久變形，則主應力之實際值較期望值低 20-40%。

圖 6.11 中表明在首次裝配後，永久變形將繼續增長。由於變形過程中之端子彈性部硬化，永久變形將趨向於某一定值，這使得端子之屈服極限增大，如此則端子彈性部開始變形發生在其擴大了的彈性極限內。

6.3.3 應力松弛和正壓力

公式 6.4 敘述了懸臂梁上的正壓力 F_n 與懸臂梁的尺寸及懸臂梁上的應力 σ 間的聯系，它是有關表明端子之所受正壓力與其設計/材料參數間關係的第二個等式：

$$F_n = (\sigma / 6) * (WT / L^2) \quad (6.4)$$

公式 (6.4) 表明了任何的應力減少都會導致正壓力的減少。雖然應力松弛在第四章討論過，但在這還是有必要複述其定義。

應力松弛是指應力在常應變的情況下會隨著時間的延續而減弱。

就連接器而言，對公式 6.4，我們可以更確切地定義為在連接器使用期間，隨著時間的延續，正壓力會以一持續的偏差而削減。換句話說，僅僅是由於端子懸臂梁受到了因其配合偏移而產生的應力，而其所受正壓力的削減可看作是時間和溫度雙重作用和結果。當連接器的工作溫度升高，此時應力松弛就更為重要了。圖 6.12 論證了其關系。當懸臂梁位於其最大偏差 0.005 英寸 (0.127mm) 時，在 96 小時內，正壓力會隨著溫度的升高而減小。在連接器處於其一種更為典型的工作條件即恆溫的時候，時間對正壓力的作用類似於溫度對正壓力的作用。圖 6.13 出示了三種被選擇材料在 25°C 到 105°C 之間其應力松弛的數據。在室溫條件下，應力松弛對任何材料均只是稍微有影響，拿磷青銅的最糟糕的情形來說，在經過 100,000 小時 (11.4 年) 後，其應力變化小於 10%。然而在 105°C 的時候，可以看出應力會有很大損失，因而正壓力會急劇減小。

圖 6.14 是以又一種不同方式即永久性變形隨溫度的變化關系來表示應力松弛引起的結果。

在應力松弛的過程中，該應力是來源於有助於加工硬化的彈性變形和允許尺度變化的塑性變形間的轉換。這種轉換的結果如圖 6.14 所示。很明顯的，

這種永久性變形隨著時間變化而變化的趨勢類似於正壓力的損失隨著時間變化而變化的趨勢。由應力松弛而引起的永久性變形同樣對正壓力有影響，如較早以前討論過的機械永久性變形：梁的可用偏差減小，正壓力伴隨著減小。

由於溫度應用的要求增加，如何控制永久性變形也變得更加重要了。雖然，正如附注 4 和附注 5 中所討論的，設計因素對永久性變形也會有影響，但是控制永久性變形的辦法主要還是通過對材料的選擇。第四章给出了一些供許多銅合金參考的永久性變形的數據。

· 總結 ·

這種典型懸臂梁端子的特性反映了因端子所受正壓力而產生的梁的偏移和應力松弛的重要性。由機械加載或應力松弛所引起的永久性變形，其減小了梁的可用偏差，降低了正壓力。這使得我們更希望彈簧能一直在其伸縮範圍內工作，直到正壓力達到最大並還原。應力松弛可以靠操作的溫度對長期的正壓力產生重要的影響。正如第四章、附注 4 和附注 5 中所討論的，在處理應力松弛時，材料的選擇是主要的。

附圖說明：

圖 6.11 表示的是三種都做成典型端子幾何形狀的端子材料其端子永久性變形大小與其配合周期數的關係圖。其由 AMP 公司提供。

圖 6.12 表示的是三種都做成典型端子幾何形狀的端子材料其端子所受正壓力大小與其放置 96 小時之後所受溫度的關係圖。其由 AMP 公司提供。

圖 6.13 表示的是磷青銅、合金 725、鍍金銅三種材料在 25°C 到 105°C 間其永久性變形大小與時間的關係圖。其由 Olin 公司提供。

圖 6.14 表示的是三種都做成典型端子幾何形狀的端子材料其永久性變形大小與其放置 96 小時之後所受溫度的關係圖。其由 AMP 公司提供。

6.4 正常作用力和結合力學

如果說具有可分離性是我們使用連接器的主要原因，那麼很有必要了解結合力學及其如何影響結合點的壽命和結合力大小。結合力學中有三個主要因素，即端子正常作用力，端子幾何形狀和摩擦系數。

圖 6.15 所示是一條結合力與插入深度曲線，其將端子結合的兩階段裡插柱在插座的位置反映出來。

在第一階段裡，當端子正常作用力施加於插柱時，插入作用力快速增加，在該段曲線裡端子梁不斷發生偏移，此時曲線的斜率由結合的插柱或插座的表面幾何形狀、摩擦系數和端子梁的伸長率決定，亦即梁的位移與施加的作用力的比例；在第二階段，正常作用力達到最大值，端子梁的位移亦達到最大值，且插座之端子梁沿插柱滑動，並因此產生一個摩擦力，該摩擦力大小由摩擦系數和端子正常作用力決定，而最大插入力是最重要的參數，因為它決定了施加多大的力可與連接器結合。下面分別對這兩階段作一討論。

6.4.1 第一階段：插入階段

當插柱開始進入結合區，插座的端子梁產生位移並承受端子正常作用力，同時，插柱開始頂著端子梁進行滑動，相對的會產生摩擦力，由於摩擦力的方向與運動的方向相反，因此使得插入力增大，故最大插入力主要取決於摩擦力的大小和方向，而摩擦力的大小取決於摩擦系數 μ 和端子結合接觸面的幾何形狀，所以，對一定的正常作用力，最大插入力取決於端子結合接觸面的幾何形狀和摩擦系數 μ 的原因是這些參數決定了摩擦力的大小和方向。

下面最大插入力的等式是將其簡化成施加於兩夾角為 α 的平面上，這條條件與圖 6.15 所述的結合面幾何形狀類似，但這是忽略端子梁位移而不是正常作用力。

$$F_i(\max) = 2F_n(\max)[(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)/(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)] \quad (6.5)$$

其中 F_i == 插入力

μ == 摩擦系數

α == 結合面的夾角，如圖 6.15 所示

在插柱插入過程中，結合面的角度隨著插座與插柱的幾何形狀變化而發生變化。

如圖 6.16 所示，對於 100 克的端子作用力和一定結合面夾角 α ，不同的摩擦系數對應於不同的最大結合力。在未加潤滑的情況下，鍍金端子末端的摩擦系數的公稱值是 0.3。圖 6.16 表明：在這個簡單的模型裡，當結合面夾角由 15° 變至 30° 將使得結合力增加 75%。

6.4.2 第二階段：滑移階段

一旦端子梁位移達到最大，亦即插柱已達到相對插座端子插柱表面的滑移點，此時插入力可簡單視為摩擦力，如 6.6 式所述

$$F_i = \mu F_n \quad (6.6)$$

其中 μ == 摩擦系數

F_n == 端子正常作用力

· 總結 ·

最大端子結合或插入力取決於結合面端子的幾何形狀、端子的正常作用力和摩擦系數，且這其中每一個變量都是獨立的。可通過使用端子潤滑劑減小摩擦系數，從而大大減小結合力。另外，有關結合力學的研討可參閱參考 6 和 7。

顯然，連接器結合力不是簡單的各個端子結合力的累加。另外，如果在結合過程中發生端子不重合或對準不良，端子松動以及插頭與插干涉都會大大增加連接器的結合力，故當連接器的針數增加，端子插入力和結合力應重點設計。6.5 端子擦拭接觸效力

如第一和第二章所討論的，建立一個金屬接觸面對於低穩定接觸電阻來講是極其重要的要求。視接觸鍍層和應用環境而定，可能需要清除各類膜層、污濁以確保金屬接觸。擦拭接觸效力與在連接器配合過程中移走膜層、污濁之效率有關。

有關於連接配合的兩個術語經常被交換使用：接合長度與擦拭接觸。接合長度特別是指公端子插入母端子的全部距離。擦拭接觸通常指的是端子表面相對於另一面之運動。接合長度與擦拭接觸在大多數例子中從幾何學角度來講是一樣的，它們的功用卻明顯不同。接合長度之要求是需要保證端子在任何容許條件下進行配合；例如，殼體之形變部分導致連接器沿其長度方向彎曲。這種要求與特殊的端子尺寸有關。典型之接合長度可以是 100 mils 或更多。在另一方面，擦拭接觸效力要求保證有效轉移表面膜層與污濁，這些表面膜層與污濁產生於明顯少於 100 mils 之距離上。

擦拭接觸效力由接觸幾何形狀，接觸正壓力，擦拭接觸長度以及必須要破壞或移走之該種污濁。在這一節將討論擦拭接觸效力中關於確保移走在

電路板上灰塵上的最小必要擦拭接觸距離的內容。這一節之內容是總結於 Brockman, Sieber, 和 Mroczkowski 的兩篇論文。

有兩種擦拭接觸方式被考慮過了。在第一種方式中，施加了全部的正壓力，這樣擦拭接觸動作就發生了。這種方式模擬典型的連接器配合條件，在這種條件裡，爲了進行配合接觸梁在一定之距離完全偏轉。在第二種方式中，擦拭接觸只在施加了正壓力的時候才發生，這種方式是要模擬在零角度力連接器中的動作。這裡的討論將限於第一種更典型之方式。第二種方式的結果在本質上一樣的。

三個幾何形狀與兩個正壓力值作爲獨立變量在擦拭接觸距離被用到。這些幾何形狀在圖 6.17 中進行闡述。這些幾何形狀分別被描述成半球形 H，橢圓形 E，圓柱形 C。半球形的半徑只有很小的 0.060 in(1.524mm)，半球的長軸與短軸是 0.040 和 0.020 in (1.016 和 0.508mm)，圓柱形的半徑也只有很小的 0.035 in (0.889 mm)。圓柱形與橢圓形在幾何形狀上是近似的，但在相對於端子長軸運動方向上有所區別。橢圓形之長軸平行於運動方向，而它對於圓柱形的長軸則是垂直的。所有的端子在鍍層上都鍍上了 $50\ \mu\text{in}(1.27\ \mu\text{m})$ 金。

全部 50 或 120g 的正壓力施加於端子上，擦拭接觸運動由於在 X-Y 工作平台上之運動面產生。在所有的情況中擦拭接觸長度爲 0.025in(0.635mm)。

控制表面要模擬一種嚴重到不合實際狀況的污濁。在表面 $50\ \mu\text{in}(1.27\ \mu\text{m})$ 的鍍上鍍有 $50\ \mu\text{in}$ 的磷銅試樣金上，爲保持灰塵而涂有油脂，其上被覆一層看的見的灰塵。其它的試樣在一個清潔及清潔涂油處理過的條件下進行評側，發現沒有擦拭接觸的現象，最初的電阻是較低的，在擦拭接觸過程中沒有改變。

主要結果總結於圖 6.18 與圖 6.19 中。這些圖在曲線開始平直部分表示實施接觸受力。50g 接觸受力線分爲接觸受力區及擦拭接觸區還有最後的由九個不同擦拭接觸部分組成的穩定狀態。接著擦拭接觸開始，接觸電阻的下降用以作爲擦拭接觸效力的衡量。接觸電阻的穩定狀態指示在接觸幾何形狀、正壓力等因素組合下，灰塵覆蓋表面上之有效力的擦拭接觸。

首先考慮 50g 接觸受力量(圖 6.18)。半球形狀的情況沒有顯示僅僅是實施接觸受力就足夠擦拭掉灰塵。當擦拭接觸開始後，大多數樣品的電阻經過幾 mil 的擦拭接觸後會迅速降至穩定狀態。橢圓形的狀況在轉移灰塵方面沒有如

此有效力。擦拭接觸的效力是邊際性的，只有一些樣品達到了一個穩定的電阻值。對這個有點奇怪的結果，一個可能的解釋是，橢圓形在擦拭接觸方向上的長度導致在端運動過程中，端子在灰塵上有上有下的滑動。圓柱形顯示出很差的擦拭接觸效力。

在 50g 的接觸受力上，半球的擦拭接觸效力看起來是很好的，在擦拭接觸區域的 0.010 範圍裡達到一個穩定狀態。橢圓形的擦拭接觸的效力是邊際性的，圓柱形是沒有效力的。

如預計的一樣，120g 接觸受力可以觀察到同樣的趨勢(圖 6.19)，但性能有所改進。橢圓形的性能也有所提高。事實上，在 120g 接觸受力的幾個樣品中半球不用擦拭接觸動作就移走灰塵。在所有的例子中，擦拭接觸的開端導致接觸電阻實際上迅速下降到一個低穩定電阻值。橢圓形的性能同樣也得到了提高，在許多樣品中在擦拭接觸時電阻固執地有所變化。圓柱形也改善了，但仍然在邊際的情況最好。

6.5.1 總結

這些數字核實了這樣的預測，即擦拭接觸依賴於接觸力各接觸幾何形狀。增加了的力和較尖銳較有穿透性的幾何形狀產生較高的擦拭接觸效力。然而由於較尖銳幾何形狀而提高之改善必須與由於磨損痕跡的位置而產生的損耗之可能性來平衡。另外，如 Antler 所述，接觸幾何形狀對產生和保持接觸面之穩定性能有不同的影響，尤其是對在錫鍍層而言。

6.6 耐久性

在第二章中我們曾討論過接觸正壓力與耐久性的關係，其可簡要概述為接觸正壓力決定接觸區域及與此相關的表面損耗程度。大體上，隨著接觸正壓力的升高，耐久性將下降。正壓力的逐漸增加將使磨損機理發生變化。在應力較小時，摩擦損耗佔主要地位。當正壓力較大時，就會出現稠密的磨損，並且磨損速度將明顯變快。機械磨損速度的加快與接觸區域的增大和冷焊點的強度增加均有關。在 Bowde 和 Tabor¹¹ 中曾經介紹過，載荷變大將導致冷焊區域變大，強度增加，結果使其強度大於基體強度。在這種情況下，物料塊的內部會出現問題，將出現更大的磨損塊，這將使損耗過程加快。機構從

摩擦到磨損的轉換的載荷取決於表面的潤滑狀態，隨潤滑效果好而增加。

必須指出影響耐久性的其他接觸設計原因。例如，接觸區域的分布取決於接觸面的形狀，並且因此而產生固定的磨損痕跡。結合過程中預設的接觸長度也會影響耐久性。接觸正壓力和耐久性這種相互依賴使得難以準確給出二者的關係。所有的接觸面形狀和接觸動力對於確立耐久性能都很關鍵。

摘自 Mreczkowski¹² 的一個例子闡明了接觸正應力和接觸面幾何形狀的相互作用關係。該研究中所採用的物料系統是由不銹鋼球軸承組成，這些軸承具有 $0.75\ \mu\text{Co-Al}$ 及超過 $1.25\ \mu\text{Ni}$ 的鍍層。圖 6.20 和 6.21 為一些研究結果，圖 6.20 為接觸面形狀不變時不同正壓力之情況，而圖 6.21 為正壓力不變時改變幾何形狀之情況。

在討論結果之前，先依次簡要說明一下實驗程序。圖 6.20 中，每個磨損痕跡均由經過大量不同磨損周期的片段組成。獲得具有大量磨損周期的單個痕跡的方法是在一定的周期數目給定之後改變磨損痕跡的長度。換句話說，250 個周期後的磨損痕跡長度要比前一個 250 個周期的要短，而再過 500 個周期就更短。這樣做僅僅是估測，長度的變化影響結果並非很可信。

由圖 6.20 可知接觸面形狀不變時，磨損隨正壓力增加而加劇。50 克和 100 克正壓力的磨損痕跡很淺，200 克和 400 克正壓力的磨損痕跡隨時間的增加從較淺的區域開始而轉變為較寬較稠密的磨損痕跡，這種轉變是由循環壓力、循環疲勞應力累積所產生的，這些應力最終導致鍍層的破壞並改變磨損機理。在 600 克壓力(這個數目對於金鍍層是相當高的)下，稠密的磨損痕跡在第一個 250 周期就可以觀察到，隨之而來的是在更長磨損時間裡的一系列的破壞。這當然是意料之中。當正壓力增加時從磨擦轉變為磨損。

圖 6.21 與上類似，但產生的原因不同。這時，載荷及由此產生的摩擦是通過改變不銹鋼球的直徑而得到的不同結果。現在回顧一下第二章，增加正壓力的結果是引起接觸區域和冷焊的增加。在幾何形狀上集中載荷也會取得相似的結果，因為總的接觸區域取決於應用載荷。正如 Williamson 和 Greenwood¹³ 所述的集中載荷分布會得到少數但較大較牢固的斑點。圖 6.21 則示出了較尖利的幾何形狀將會加劇稠密的磨損。

圖 6.20 和圖 6.21 所示也說明了接觸正壓力與接觸幾何形狀的相互作用關係。這種相互關係使人想到運用接觸壓力，該方案將在下一節中講到。

6.7 赫茲應力與連接器性能

1989 年，Kantner 與 Hobgood 根據業界經驗提出赫茲應力可以提供一與連接器性能有關的參數。Mroczkowski 與 Fluss 提交了對此提議的鑒定。為理解此提議與鑒定，有必要作一簡單的總結。

6.7.1 赫茲應力

1881 年，赫茲提出了用於計算兩接觸物體接觸面上應力的模型。此模型假定有如下特徵：

- * 光滑平面內的點接觸
- * 與表面尺寸相比，接觸面可近似認為一點
- * 彈性變形
- * 無摩擦

在這些假定條件下，赫茲推導出許多計算接觸應力的公式，適用於多種幾何形狀接觸表面。一簡化的球面對平面公式就可滿足本節討論的需要。

$$\sigma_H = [F_n * (E/D)^2]^{1/3} \quad (6.7)$$

在這裡， σ_H ==赫茲應力

F_n ==為所施加的外力

E ==楊氏彈性模量

D ==接觸區域半徑

此公式包括材料性能參數 E 、接觸區大小參數 D 及接觸力大小的設定參數 F ，上述幾項都是獨立變化項。

6.7.2 赫茲應力的理論"有效性"

赫茲公式用於分析彈簧的性能，並且上述的假定與此項應用有一定的關聯。但對於連接器插接，情況大不相同。如第二章所述，端子接觸面可以被認為是宏觀接觸區域的許多小的接觸點。假定此描述成立的說，則假定 1 不成立，但接觸的宏觀尺寸可以滿足假定 2。因為獨立的接觸點很小，它們在標準法向力情況下就產生塑性變形，因此假定 3 不成立。假定 4 也是不成立的。出現這麼多理論上的問題，赫茲公式看起來好像不適用於連接器。拋開

理論上的難題，只考慮其基本思想是否可以提供某些指導。

Kantner 與 Hobgood 介紹對於複數柱狀端子所采用的最小赫茲應力值為 150,000psi(磅/平方英寸)，此情況下，外力、連接器的典型尺寸及典型連接器材料的屈服極限都被賦予很高的值。對於高值赫茲外力(的產生)的理解存在兩個方面的限制：較小的外力與凹凸不平的接觸面幾何形狀，較大的外力與較平緩的接觸面幾何形狀。考慮這兩個極限是如何影響連接器的三個重要特性參數——接觸抗力、疲勞強度及抗腐蝕能力。

· 赫茲應力與接觸抗力

假定端子接觸面宏觀尺寸可以被認為一獨立點，則接觸抗力的 Holm 公式可以表示為：

$$R_{\text{contact}} = \rho / d \quad (6.8)$$

這裡， R_{contact} ==接觸抗力

ρ ==材料抗力

d ==接觸區半徑

從赫茲應力觀點看， d 是重要的參數。用較小的外力與凹凸不平的接觸面將產生"高"的接觸抗力，因為接觸面積相對於較小的外力會很小，同樣直徑相對於較小的半徑會很小。相反由較大的外力對較大的接觸面積將提供高應力和高應力分布區。換句話說，對於給定值的赫茲應力所產生的接觸抗力的大小依靠如何得到此赫茲應力。

· 赫茲應力與疲勞強度

從參考文獻 12 中選取的圖 6.22 對於接觸疲勞強度同樣適用。每一疲勞軌跡曲線都顯示了相同的計算赫茲應力---115000 psi，一個比最小推薦值小得多的值。很清楚，如 6.5 節所討論的，疲勞行為也依賴於接觸法向力與接觸面積對赫茲應力交叉影響。

· 赫茲應力與接觸腐蝕

接觸面腐蝕之接觸抗力的理論分析是基於從參考文獻 12 中選取的圖 6.23。圖中所示兩接觸面處於相同的赫茲應力下，圖 6.23a 為較小的外力與凹凸不平的觸面幾何形狀的情形，圖 6.23b 為較大的外力與較大的接觸面積。原則上，由於兩個原因，圖 6.23a 中所示的接觸面較圖 6.23b 中所示的接觸面更容易腐蝕。第一，腐蝕性氣體必須經過一段較小的距離到達接觸區域。第二，

金屬接觸區域更小並且流動的更快。從上述可以看出，接觸面對於腐蝕的敏感性與通過何種方式達到定值赫茲應力有關。

· 總結 ·

茲應前述的討論揭示了赫茲應力並不是連接器性能的良好體現者，因為認識到雖然定值的赫力對於連接器的三個主要特性－接觸抗力、疲勞強度及抗腐蝕能力有著顯著的影響。連接器特性對於設計變量的敏感性已經在上一節的實驗研究中被著重強調了。

6.8 關於連接器設計/材料與連接器性能的實驗性研究

1990 年 Eammons 等人提出了一種饒有趣味的、稱之為“微型系統連接器接頭穩定性測試”的研究。在此研究中，種種商用的微型系統連接器，其重要的樣品尺寸，會受到其所處環境即預先模擬成的工業應用環境中的那種混合流動氣體的製約。在其影響下的端子阻抗的變化被作為一連接器穩定性的衡量尺度， $10\text{m}\Omega$ 的變化量習慣上作為是失穩的標準。此研究涉及到許多傳統設計/材料的變化及它們對連接器性能的影響這些要考慮的方面。這其中的有些資料在下面的部分會有概括。

6.8.1 孔隙率

如第三章中所討論的，孔隙率是端子老化的潛在因素，這是由於在無遮蔽的底層金屬上，其氣孔處會受到氣體的腐蝕。在前面研究所提及的環境下，其應該會促使氣體的腐蝕就象腐蝕的遷移或蔓延那樣。圖 6.24 和 6.25(說明書 18 中的圖 16 和 17)從兩個角度表示了孔隙率和性能之間的關係。在圖 6.24 中，孔隙率是用外觀上至少含有一個氣孔的樣品的百分率來確定的。例如，那些圖中突出顯示的數據點給出的是關於孔隙率的測試，進行測試的連接器樣品，將其暴露於氨蒸汽中，結果其 80% 的端子外觀部位上至少有一氣孔。關於其穩定性，連接器樣品經驗定顯示近 99% 的端子其阻抗的變化小於 $10\text{m}\Omega$ 。這裡要注意的是：隨著孔隙率百分比的增加，穩定性會趨於減弱。一些高孔隙率百分比的樣品顯示，其阻抗變化均沒有高出前面所說的 $10\text{m}\Omega$ 。此結論強調了前面關於孔隙率是一潛在的引起機構性能降低的因素的闡述。

以在每一端子上的氣孔數這個角度來考慮孔隙率（如圖 6.25），正如我們

預期的那樣，其結論更是否定的。然而仍有一些多氣孔的端子樣品，將其暴露於混合流動氣體中，其經針對於孔隙率所謂“降低”作用的嚴格測試，仍顯示其具有良好的性能。

爲什麼孔隙率不像預期的那樣被認爲是有害的，圖 6.2（說明書 18 中的圖 13）中的資料給出了其一個原因。這些資料圖解說明了用連接器的絕緣本體作端子接觸面的屏蔽的有效性，這正如第 1 章所說的。關於暴露於上述測試環境中的相配合的連接器組及連接器對的半邊連接器的測試資料也在此給出來了。暴露的插頭其受影響下降最大，正如預期的那樣，因爲在多數情況下端子區域會直接地暴露於該環境中。暴露的插座其受到的影響較少，這只是由於端子深入在絕緣本體內，屏蔽效果成熟。而相配合的連接器組其具有良好的性能。換句話說，絕緣本體的設計對處於腐蝕性環境中的連接器的穩定性有重要的影響。

6.8.2 端子常態力和赫茲應力

在這篇研究中，認爲端子常態力與赫茲應力是設計變量。圖 6.27 和圖 6.28(Ref.18 的圖 18 和圖 19)對這一注意很感興趣。當力或赫茲應力獲得高的結果時，所有的參數顯示性能得到了提高。不管是 100g 的力還是 150,000psi 赫茲應力在輻照下的保護特性，但是數據並沒有顯示每個參數的臨界結果。當認爲高壓力和高赫茲應力對耐久性及配合力有反面效果時，權衡和最適宜的重要性與設計參數的臨界結果相比就得顯而易見。這正是 Ref.18 結論所揭示的。

6.8.3 研究結論

引自 Ref. 18，研究的結果獲自於商業連接器系統的顯著變化。它們不能顯示性能，材料性能的傳統測量與機械設計參數之間的明確關係。這不應被解釋爲說明，當前規範或設計操作應當修改。就是說，它的解釋意味著變量之間的聯系是非常複雜。換句話說，理想上它應該是有差別的設計準則。連接器所面對的應用環境與性能要求的變化支配著設計/材料選項的獨特評估與既定申請的權衡。

6.9 總結

這一章從幾個獨立的方面評價了一些主要的設計思緒，重點是端子常態力和形狀以及它們對連接器的重要工作性能的影響，如機械穩定性、配合力、耐久性及端子保持力。有關對連接器設計的討論及對連接器性能的實驗室評估闡明了端子力、端子形狀和應用要求是高度地互相影響的自然狀態。連接器設計/選擇要求考慮許多複雜的相互作用，對材料和設計的選擇，對連接器重要工作性能如機械穩定性配合力耐久性端子保持力的權衡。這樣的思緒以及對端子最小常態力要求的考慮，從而得出的網狀結果可以通過重複先前的陳述作一個總結。

簡單地描述，並不是簡單地量化。連接器在機加工以及操作環境高溫條件下，常態力要求是被保持端子接觸面平直要求所決定的。

相似的注釋同赫茲應力或實際上任何最適宜的端子設計/材料參數是有關係的。連接器的應用環境以及所發揮的功能會區分性能要求、設計/材料選項的重要影響、權衡特定應用的最適宜性的優先次序。

第七章 永久性連接概述

正如在第一章所討論的，使用連接器的主要原因在於，出於組配、維護、輕便和/或改良的目的，在兩個電子次系統之間提供一個可分離的連接。除了可分離連接，對於被連接的次系統，連接器往往還包括永久性連接。這些連接被稱為永久性是因為一般情況下它們只連接一次。由於這個定義，它們不需要考慮結合要求間的權衡，比如耐久性和結合力這些在可分離接觸面上為主導的考慮因素。正如將要被談到的，這種自由允許以較大的力和變形來機械永久變形。

有兩種基本的永久性連接：機械方式的和冶金方式的。機械方式連接是在端子上一個特殊設計的部分和與其直接或間接連接的次系統間建立和保持一個金屬接觸區域而形成的。如在第一章討論的，機械方式連接包括卷曲式，棄皮式，壓入式和包覆技術。卷曲和棄皮是線連接，而壓入和包覆連接是與印刷電路板(PWB)，或者是采用直接方式(壓入)或者采用間接方式(包覆連接)。

冶金方式的永久性連接的形成是通過一個液體媒介在接觸彈性部與次系統之間形成一個金屬接觸面。冶金方式連接包括低溫焊、銅焊和高溫焊連接。低溫焊和銅焊用一個中間媒介(焊料或銅)來產生液體。高溫焊連接是通過直接將接觸彈性部與所連接的元件熔化來形成的。

永久性連接將在這一章以及接下來幾章進討論。在這一章里，將回顧對

機械方式永久性連接的一些基本要求。在第八章將要討論導線與接頭的材料與結構問題，其重點是它們如何影響機械方式永久性連接的形成。第九章將對導線與接頭的機械方式永久性連接進行討論。在第十章將進行 PWB 技術的概述，對於印製電路板的機械方式與低溫焊方式永久性連接將在第十一章討論。

7.1 對於機械方式永久性連接的要求

在可分離接觸面上，必須考慮對於機械變形和作用力的限制，這是因為它們對結合力與磨損的影響，然而正如所提及的，這些並不適用於永久性連接。這樣較高的作用力與變形度可以被引入到永久性連接中來。然而變形與接觸電阻、機械穩定性等性能特點之間的權衡必須又一次被考慮。由於這種連接是“永久性的”，它們也可能反而在電氣和機械方面比可分離連接遇到更為苛刻的要求。由於機械方面的要求，期望永久性連接會在組裝與/使用期間承受較高等級的機械壓力是不切實際的。這種可能性使得對於變形權衡的考慮更加重要。對於接觸電阻的要求，無論是大小還是穩定性，也可能變得更加嚴格。

這些問題將會在以下對於永久性連接的基本要求的上下文中有討論。

- *緊密的/足夠的接觸區域

- *“氣密性的”接觸面

- *機械穩定性

- *得到控制的變形

對這些要求逐一進行詳細的考慮。

7.1.1 緊密的/足夠的接觸區域

出於在第二章所討論過的原因，對於緊密接觸區域的要求對建立一個金屬接觸面來說是一個基本的要求。只有通過在一個足夠的區域里建立和保持一個金屬接觸面才能保證接觸電阻的低穩定值。電阻的大小取決於所建立的接觸區域的大小。接觸電阻的穩定性取決於保持在所處的應用環境里金屬接觸面的完整性。

對於可分離接觸面，所述接觸區域沒有被賦予特別定量的值。相反，曾

經被提到過的是，組成表面接觸區域的粗糙分布應該包含足夠數量的粗糙端子，以此來保證分布的產生好像是整個表面區域在進行。這種形爲是因爲這樣一個事實，即如在第二章討論的，所有的粗糙端子在電性上是平行的。

對於永久性電阻，這裡有兩個針對接觸電阻或接觸區域的經驗法則。對接觸電阻，一個準則是永久性連接電阻應和導體被連接的等效長度的電阻是同一個數量積。這種要求在一個碾壓連接上不費吹灰之力就能目測到，在這個碾壓連接上碾接桶的長度尺寸被定成“等效長度”。對於“接觸區域”，根據以下 Whitely 的理由，有時假設一個與導體被連接的面積相等的區域。如果這個“等效接觸區域”的要求滿足了，連接中被擠壓部分的電阻將達到一個最小值。圖 7.1 以圖示的方式解釋了在一個圓導體和一個金屬塊之間的連接，對於圖 7.1 的考慮可以理解這些理由。如果整個導體的橫截面與金屬塊相連接，在導體中的電流就不會被擠壓了。在這種條件下的擠壓電阻由公式

$$R_{\text{擠壓}} = \rho / 2d \quad (7.1)$$

其中 ρ = 金屬塊的電導率，因爲擠壓僅發生在金屬塊上

d = 導體的直徑

這是在這個幾何形狀里可得到的最小擠壓電阻。

如果碾接桶的厚度被認爲足夠可以使電流完全傳播，則考慮使用被近似爲這一相同幾何形狀的碾壓連接。如果足夠的接觸區域產生在導體和碾壓桶之間，導體/碾接桶的結合近似出導體和金屬塊的結合，因爲在導體上不發生擠壓。這是接觸區域設計目的基礎，這個接觸區域與導體橫截面相等的---最小擠壓電阻在這個區域內產生。其它的接觸區域可以提高接觸面的機電穩定性，但對於電阻的大小僅有很小的影響。

7.1.2 "氣密"的接觸界面

"氣密性"是用來描述接觸面本身的要求的，其通常的含義是要求接觸界面具有一定的抗腐蝕能力。依據上述描述，接觸面被認爲可以封堵氣體的進入，尤其是腐蝕性氣體。氣密性一般可通過以下試驗來證明校驗：將連接器外露於周圍環境中，而在這種環境中用於製造這些連接器的材料的表面會產生斑點或者失去光澤。如果接觸面保持沒有污點情況，上述試驗便證明了它的氣密性。這些要求並不會直接影響連接器的性能，而僅僅作爲抗腐蝕能力的一

個指數一種指示，當然，這種抗腐蝕能力對於保證接觸電阻的穩定是一個重要的考慮因素。

7.1.3 機械穩定性

在可分離連接中，機械穩定性是指連接器在應用載荷作用下防止移動而保持接觸界面穩定的能力，這些應用載荷是連接器可能面對的震動/沖擊或熱膨脹失調這兩種典型的應力。這種穩定性的要求對於減小磨損及減小腐蝕物的潛在影響是必需的，上述腐蝕物位於接觸界面上或其周圍。

在永久性連接中，一般來講，機械穩定性的要求要比可分離連接嚴格得多，原因是永久性連接器更易於濫用。例如，線纜的碾壓式連接部分可以直接拉長從而承受一定範圍內的拉力。而能夠實現的機械強度則取決於連接技術和連接器的整體結構。絕緣座的拉緊及定位的特點可以顯著地增加機械強度和永久連接的穩定性。這些特點對於應用 I.D.C(瞬時動作的偏移控制技術)技術的連接器來講尤為顯著。

7.1.4 變形的控制

對於變形的控制的要求就是對以下二者之間的權衡：要求保證最小接觸電阻的接觸區域和要求具有足夠機械穩定性的接觸區域。這種敘述類似於可分離連接中關於最小正壓力的論述。在這種情況下，接觸電阻由於接觸面積的增大也就是變形的增大而變小。然而，較大的變形會減少導體的橫截面，這將降低連接器的機械強度。因此，在機械永久變形連接的過程中必須控制變形量。這種要求被稱為個體連接技術。

7.2 焊接永久連接

為便於全面理解，有必要就焊接永久連接作一些說明。當然，焊接永久連接也需要考慮接觸電阻和機械穩定性的要求。不過在這種連接中焊點的尺寸決定其性能。而焊點的尺寸和幾何形狀又取決於焊接技術和連接器本身的設計。通孔和表面粘著技術在這兩個方面都存在著明顯的差別，本書第十一章將對此作簡單說明。在連接器發展日益小巧的趨勢下，焊點及其性能(尤其是負載時機械強度和塑體變形度的性能)變得越來越重要。關於這一部分的詳細

說明讀者可以參考這方面的相關資料。

7.3 總結

對於機械永久連接的要求可以概括為：這些連接和被連接的相同長度的導體而言，在接觸電阻的大小/穩定性和機械強度方面應該是相同的，或者說接近相同的，這種要求等於再一次強調了在第一章中曾經提到的永久性連接應該是線/纜或印刷電路板到它們所連接的實體的延伸。

第八章 電線與電纜

電線與電纜這兩個用詞很常見但卻不容易區分，根據 IEEE 的定義，電線是指導體加上可有的絕緣體，因此一根露的電線與一個導體是等同的。當然，電線的電氣連接點是導體製成的。這些連接點的終點操作在卷曲和遮蔽之前或在絕緣體挽置時，絕緣體會被移動。

電纜有兩種常見類型：對電線提供機械保護或便於電線處理的複選電纜，如加套和帶狀電纜；與傾向於提供特定的電氣工作性能的電纜，如防護傳輸線或同軸電纜。當然有些電纜構造混合了全部優點，如圖 8.1 所提供的電纜就是例子。圖 8.1a 顯示了一個雙層外套的導體電纜，圖 8.1b 顯示了帶狀電纜的形態結構。這些電纜並沒有提供很好的電氣工作性能。圖 8.1c 和圖 8.1d 所示的電纜提供了這些優點，圖 8.1c 所示的防護傳輸線狀電纜控制了阻抗，和非傳導性的材料一樣用於空間和導體直徑受到限制的地方，環繞在電纜周圍的防護套可保護其不受電磁干擾。圖 8.1d 所示的同軸電纜利用不同的形態結構提供了同樣的好處。

這一章根據用途和特性來組織，提供了電纜材料，構造和工作性能方面一個總的看法。它們同如同卷曲一樣形成固定的機械邊結和絕緣替代邊結發生聯系，更多的電線和電纜的細節討論可從 Refs.1-3 找到。

8.1 導體

當然，導體的功能是在兩個電氣系統或電系統之間提供一個傳導的路徑。

導體通常是金屬，這樣可以利用金屬固有的高導電性及機械強度與製造方面的優點，導體可以由兩部分組成，導體的基體金屬及在許多情況下可以提供防蝕保護或特定工作性能的末端或外套。每一部分都認為是分開的。

銅是在導體廣泛應用的金屬，這是因為它在導電性，成形性和價格上擁有不可比擬的組合優勢。其它的導體材料包括有銅合金和鋁，之所以選擇這些材料，是因以它們在導電性，拉伸強度，重量和成本方面的組合特性，使之作出應用決定，因以這些因素是非常重要的。

末端包括錫，銀和鎳，末端的選擇主要是依據在溫度，頻率和細節方面的應用要求。

8.1.1 銅

銅易於延伸，從而有廣闊的形狀範圍，能提供在安裝方面必需的柔韌性，能應用於各種不同的要求。導體直徑的較高限制是由柔韌性要求來決定的，較底的限制則是根據電線的拉伸強度的降低來變化，通常是一些製造或處理方面的原因。通過一些普通的方法(如機加工或焊接)得到的銅導體的終點是明確可信賴的。銅常被用來退火或快速回火，這樣會對拉伸強度，導電性和易彎曲缺點帶來的電阻產生重大原影響。

8.1.2 銅合金

銅合金用於對拉伸強度有應用要求時，但它通常會造成導電性能的降低，即便是低含量合金，高強度合金的例子包括銅-鎳合金(C16200)和鎳-鉻-銅合金。合適的導體合金的選擇是一項複雜的工作，包括了對成本，重量，導電性，冶金性及終點工藝需求的適宜性的考慮。8.1 節包含了對電線和電纜中應用的銅合金的電氣性能與機械性能的編輯，電氣特性可以用兩種方法列出：根據 Ω/cm 的材料電阻和國際退火銅標準所規定的導電性，即 IACS 的百分比。

8.1.3 鋁

鋁有良好的導電性與較輕的重量，但是與銅相比，其較難接到終端上。這些特性使得鋁應用在對於重量減輕要求比較嚴格的地方，例如航空、汽車等行業，然而對於終端連接技術的發展給予了較強的重視。鋁及鋁合金的一

些電氣與機械性能在表 8.1 中已給出。

從終端連接角度來看，導體鋁連接終端有困難歸結於兩個原因。第一，鋁的表面形成致密的氧化物保護膜，導致連接終端的許多焊接及機械方面的工藝問題。焊接需要在焊錫與表面有難去除有氧化層的金屬導體間形成金屬間化合物。氧化層由於其厚度與附著力會影響機械電連接。第二，，鋁對於潛伸是敏感的，潛伸-材料在壓力下的流動-此因素在設計機械連接工藝時必須要考慮到。這樣就需要在鋁線端頭處存在一彈性體，使得在金屬流動時其殘余應力可維持連接的穩定性。

鋁有低的疲勞強度與有限的彎曲能力。這些負面特性限制了鋁導體的應用。鋁導體應用最廣是在大功率輸電線、地下電纜及高空電纜(高空線纜中有鋼製增強線芯)、內部連通和 buss bar。

8.1.4 導體鍍層

銅導線通過涂、電鍍或包覆幾種金屬來增加其對於腐蝕及升溫的抵抗力。絕大部分金屬是錫、銀及鎳。錫與銀為銅提供保護，當某處不可避免地出現高溫及影響絕緣性的情況，從而導致銅的絕緣性能下降與銅的腐蝕。鎳基本上用於提高抗高溫性能。

錫鍍層提供抗腐蝕保護是由於第三章所討論的錫自身限制氧化的特性。錫也能提高端頭性能在焊接方面，因為錫是焊料的一部分，在機械式永久連接中，如第三章所討論的，卷邊與 IDC 存在較容易的氧化物轉移，增大了所需要金屬接觸表面。鍍錫導體被應用在許多商業設施，但與 bare 導體相比有價格上的損失。然而，錫的高電阻率限制了其在低頻設施上的應用，這些低頻設施其表面效應可以忽略。表面效應是指隨著電流頻率的增加，導體中電流會靠近導體邊緣流動。

相比之下銀用在高頻設施上是有利的，它的高導電率增加了導體的導電性。銀在同軸導線及線纜設備中屬於普通導體鍍層，因為它有價格較高。

鎳能提高銅導體的抗高溫能力通過其直到 250°C 時的氧化保護膜。鎳鍍層對於焊接與機械連接端頭的簡便性均會產生負面的影響，盡管此兩影響可通過適當的處理得到解決。

8.1.5 導線的結構

導線是由單束或多束純金屬絲組成，或者由成束的導體組成。每一種組成都有其優點和缺點。

“實心導線”。實心導線比起搓合導線來，成本低並且在相同的橫截面上體電阻較低。較低的電阻再加上較高的熱導性，使實心導線對於給定的導線尺寸有較高的額定電流。但是它們的撓性和抗彎曲性不高，在脫剝絕緣體時，要比搓合導線更易受到損壞。實心導線表面上的一個刻痕或擦痕，經過持續受力可以傳到整個橫截面，從而導致導線的損壞。對於搓合導線，這種損壞只局限在受損壞的單個導線中。

“搓合導線”。搓合導線的應用主要是跟實心導線相比，它們出眾的撓性及抗彎曲性。這些益處得益於用在一個導線上搓合結構，在圖 8.2 和圖 8.3 中展示了這樣一些導線。

搓合結構中束狀搓合與繩狀搓合在複雜性個不一樣。在束狀搓合中，所有的導線被當成一個單位，在單獨一股的相對位置上沒有任何控制(圖 8.2a)。束狀搓合導線呈現了最高的撓性，在製造中可能會也可能不會進行螺旋式纏繞或是捻合。在很多種搓合結構中，一個中心導線被外面的導線層所包覆(圖 8.2.b)；在這種結構中，每一層的線股數增加六個。在用於高股數的繩狀結構中，單獨導線股被多導線束所代替，這些導線是以相似的結構束狀搓合成的(圖 8.2c)。

圖 8.3 是所選擇的同心導體之結構示意圖：(a) 單層 (b) 等邊層 (c) 完全同心分布。由 AMP 公司提供。

成束的金屬成同心的排列方式，如圖 8.26 所示，可以通過層和另一種層區分。如圖 8.3 所示，若導線在加工時是彎曲的，那也能曲分。在單層結構中(圖 8.3a)導體層只有單一的間距。在等邊的結構中(圖 8.3b)導體層也只有單一的間距。但是導體層在扭曲的方向上是交替變換的。在完全同心結構中(圖 8.3c)導體層扭曲的方向和間距，每一層都有不同。

導體層每一層的間距和方向都變換是爲了導體間相互距離和導體的全部尺寸及穩定性。單層結構最具有柔韌性但控制導體的穩定性和尺寸的能力最差。完全同心結構控制所有要素的能力最強。顯然，這種尺寸控制包含面本的增加，更複雜的導體結構只有在成本劃算時才用。增強尺寸的控製能力

對於計劃發展電纜在 IDC 的應用特別重要，這正如第 9 章所述。

成束的結構對柔韌性和電阻也有影響。例如減小層間間距，結果柔韌性降低，但電阻卻有提高，這是由於導體的彎曲了導線的總長度。

成束的導體可以由一層能夠包覆整個導體長度的錫鉛外被將其捆在一起。如果此種外被用在預先包有錫鉛層的金屬導體束中，這稱作雙外被的銅。如果在裸銅導線中，則稱作具有頂層外被的銅。這種做法稍微經濟些。所有敘述表明了柔韌性減弱以及由於振動和機械濫用而更易折斷的趨勢。其也展現了更強的尺寸控制能力，以及導體位置在導線中更加穩定，這兩點能推動 IDC 的進程。

8.2 絕緣

導線絕緣有機械和電子的功能，各自的主要性取決於應用的場合。絕緣的要求也有變化，取決於電線或電纜應用是否須考慮。除了以上因素，絕緣體的化學和熱學穩定性也要著重考慮。這些特性自然是取決於絕緣體的材料、結構及尺寸。各式各樣的高分子材料被用作電線和電纜的絕緣體。

8.2.1 機械考量

電線和線纜絕緣體的機械性能要求是能避免導線磨損以及減小導線的使用應力。絕緣體的材料特性，即硬度、抗拉強度、剛度和磨擦系數會影響其使用性能。對於單線，僅因其導線的尺寸和數量與線纜不同，其承受的機械應力一般比線纜小，因此將對線纜的機械性能比對電線作更重要的討論。對於小規格電線，絕緣體主要是承受撓拉應力。

對於永久性機械連接，絕緣體的機械性能可以從多方面進行討論。對於卷邊連接，可重複且可靠地剝去導線上是一個側重點，而對於絕緣體斷層連接（IDC），當電線插入絕緣體斷層連接（IDC）的狹縫時，絕緣體的斷層處於臨界狀態。這將在第九章討論。

8.2.2 電的考量

根據使用的頻率不同，電線與線纜的電性絕緣可分為兩類，一是低頻絕緣，其乃通常所說的絕緣，以確保導線間或設備的導電元件間不會產生短路；

一是高頻絕緣，因其絕緣性能會影響信號的傳播和電線及線纜本身的阻抗而使其顯得比較重要，這將在往後的第十二章進行討論。這些性能取決於絕緣體的非導電性系數和尺寸參數（猶指厚度），在高頻領域，泡沫絕緣體通過其間夾雜的空氣可降低非導電性系數，故多用於提高信號傳播速率。

8.2.3 化學/熱量的考量

化學考量包括清潔劑的穩定性、高溫氧化、除添加劑的氣體和易燃物，絕大部分的這些材料特性取決於材料的生產。熱量考量包括溫度對絕緣體的硬度和伸長性或彎曲性的影響，以及焊接時短時間高溫輻射的穩定性。由於這些影響主要由聚合體結構決定，亦即主要由材料決定。

8.2.4 絕緣材料

根據絕緣材料的用途，可將其分為基本的兩類：一級絕緣和二級絕緣，其中一級絕緣直接裹住導體以提供電性絕緣，而二級絕緣以覆被的形式存在，可提供線纜內部導線以機械保護並有助於電線操作。據此用途對它們的要求是相似的但側重點不同。圖 8.4 表示一個具有所說的一級絕緣和二級絕緣的帶覆被線纜的例子。由於絕緣材料的種類很多用途很廣，在此僅選擇數種材料進行說明。

一級絕緣：主要一級絕緣材料包括聚乙烯胺（PVC）、聚烯烴和氟化碳化氫，其中聚乙烯胺（PVC）於商業和低頻運用領域佔有優勢，而聚烯烴和氟化碳化氫，尤其是其泡沫型號多用於高頻運用領域。

聚乙烯胺（PVC）：到處存在的聚乙烯胺因其具有合理的價格和可由多種製程獲得的優良整體性能而興起，製程材料可是 50%的可塑劑和添加劑，可形成一系列不同的柔韌度、強度和耐磨度，另外，一些 PVC 絕緣體為提高耐磨度而采用放射性交叉連接，PVC 具有很強的非導電性和絕緣性，但非導電性或電容性損失限制了它於高頻領域的運用，盡管 PVC 常用的操作溫度範圍是-20℃至 80℃，但據其製程其可於-55℃至 105℃的溫度範圍內操作。

聚烯烴：其包括聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）和這些材料的共聚物，通過改變 PE 聚合體的密度可獲得不同的 PE 絕緣性能，其高密度和低密度成品均被廣泛使用，低密度聚乙烯（LDPE）是一種強度大韌性好的聚合體，其具

低非導電性系數，這使它很適於高頻運用領域，尤其是以泡沫形式進一步減小有效的非導電性系數，高密度聚乙烯比 LDPE 具有更高的耐磨度和強度以及與 LDPE 的最高常用溫度 80°C 相比其可承受到 90°C。

氟化碳化氫：用於一級絕緣的三種主要氟化碳化氫分別是聚四氟乙烯（PTFE）、多氟乙炔（PFEP）和聚乙烯胺（PVDF），與前述材料相比，所有這幾種材料具有更廣的溫度適用範圍以及強導電性能和機械特性，然而這些優點的獲得是以材料成本和製造成本的提高為代價的，這使得它們僅用於需要特別高性能的地方。

表 8.2 總結了這些一級絕緣材料的一些主要性能，這些所給計算結果是公稱值，製造者於製造過程中可能會發現實際獲得的數值與這些數值相差很大。

8.2.5 二級絕緣材料

下面材料主要用於線纜的二級絕緣或作覆被用，有時在一些場合它們也可能是大尺寸導線的一級絕緣。

聚二氟氯乙烯：聚二氟氯乙烯（說其商標「合成橡膠」倒更熟悉些）可用不同的製程生產以適應不同使用要求，和 PVC 一樣，其聚合體可包括 50% 的添加劑以促進交叉連接和提高機械特性，該添加劑包括增強劑、增塑劑、防老劑和硫化劑，聚二氟氯乙烯具有很多優良機械特性，尤其是硬度以及作為防燃劑和耐油抗腐蝕性。

聚乙丙烯橡膠：聚乙丙烯橡膠（EPR）是一種具良好電與機械性能的聚烯烴共聚物，另外，它能適應不同天氣以及不被酸鹼和其他溶劑腐蝕。

聚胺酯：聚胺酯的熱塑塑料和合成橡膠常用作覆被材料，聚胺酯的電性能不足以用作一級絕緣，但其機械性能，尤指抗拉和防震，使其成為很好的機械絕緣體，當給小直徑導線提供很薄的絕緣時，聚胺酯也可用來作一級絕緣。

熱塑橡膠：熱塑橡膠（TPES）具有提供材料性能和加工性能的塊狀共聚體結構，以使其成為一種有用的覆被材料，TPE 具有良好的低溫彈性、低而穩定的非導電性系數和很好的伸長特性。

尼龍：用不同的製程可產出性能相似的尼龍，尼龍的優點包括低摩擦系