

可靠度技術手冊

腐蝕環境分析與設計技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十九年十二月十八日

腐蝕環境分析與設計技術

目 錄

1 前言	1
2 腐蝕環境分析與設計概論	1
3 腐蝕應力分析	2
4 腐蝕應力效應	4
5 腐蝕應力防制	4
5.1 材料選用與結構設計	4
5.2 改善環境防蝕法	5
5.2.1 陰極腐蝕防禦法	5
5.2.2 腐蝕抑制劑法	5
5.2.3 腐蝕惰化劑法	6
5.2.4 除濕法	6
5.3 表面處理防蝕法	6
5.3.1 鍍層防蝕法	7
5.3.2 陽極處理	8
5.3.3 化成處理	9
5.3.4 塗裝防蝕法	10
5.4 防霉設計原則	11

腐蝕環境分析與設計技術

1 前言

基本上，可靠度為產品的重要品質特性之一，也是產品的設計參數之一。在產品壽命週期的整個研發設計過程中，由設計人員努力所建立植入產品中。基於現代產品對可靠度的重視與要求，特別是現代精密的產品，缺乏完善的可靠度設計與分析技術和作業能量，是無法在競爭激烈的市場上佔有一席之地的。為達到此一目標，首先要確定產品的可靠度需求，然後運用各種適切的設計方法與程序，導入各種分析手法，在產品的設計過程中將可靠度需求轉換成各層次的設計特性參數，如此才能事先預防在使用時可能發生的失效現象，達到確保產品可靠度水準的目的，此即所謂「可靠度是設計入產品的」。本報告主要是就可靠度觀點，針對腐蝕環境之防護與設計等相關課題加以討論腐蝕環境(濕度、鹽霧)對物品可能產生應力之分析方法、對於一般物品可能造成的效應、以及其相對之防護與防制方法。

2 腐蝕環境分析與設計概論

在系統與裝備的生命週期中，系統硬品會遭遇到各種環境條件，一但系統中存在著較弱的部位，這些環境因素隨時都有可能侵襲和損傷裝備及其零組件，而影響系統的可靠度。因此，設計及可靠度工程人員必須充分瞭解設計品可能遭遇的環境因子及其效應，在設計時細心的選擇與應用可以忍受或抵抗這些惡劣環境的材料與設計、或採用可以改變或控制環境的方法，使之在可接受的範圍內，以減低或消除這些惡劣環境所造成的效應，如此即可提高物品的可靠度。

設計人員除明顯的環境項目之效應外，對於所選擇的設計與材料在裝備內部可能產生的微環境(Micro-environments)亦不容忽視，例如：襯墊和密封材料在高溫及低壓使用狀況下會析釋出有腐蝕性或退化作用的揮發物；鐵弗龍(Teflon)會析釋出氟，PVC 塑膠材料會析釋出氯；長久下來存在系統與裝備內部，將侵蝕材料。這些內部微環境不經意的設計入物品中，極可能會嚴重影響系統與裝備的可靠度。

為完全掌握可靠度導向的物品，在設計之初就必須考量裝備所必須具備的環境強度，不論是設計本身能夠忍受、或是採用特定的設計特徵，都可決定裝備在操作時抵抗環境所施加的惡劣應力的能力。確定及詳細說明裝備操作時之環境項目為決定必備環境強度的第一個步驟，因此必須依據系統與裝備的生命週期定義進行仔細的環境分析。其次是決定材料與零件暴露在這些環境應力時的性能，一但發現性能不足或在邊際範圍時，則必須採用減額定、複聯、保護設計、或選擇具有較高環境抵抗能力的材料與零件等改正的措施，以滿足裝備的可靠度需求。

雖然顧客對產品所要求的只是功能，但是要提供此一功能勢必要實體物品做為功能的載體。功能載體是產品的有形部份，也就是顧客購買實際所得到的。由於顧客使用產品時，必然是在一定地理位置及載體上使用，因此有必要瞭解這些使用條件與載體環境條件對物品所造成的各種應力。

除了透過各種分析方法瞭解使用腐蝕環境條件所產生的內部應力之後，接著的設計工作就是針對這些條件應力尋求適切的對策方法，常用者不外乎「莊敬自強」與「處變不驚」兩種基本原則。前者乃是使設計品具備足夠的強度，以便承受這些應力；後者則是提供適當的防護措施，以減低應力的傷害程度。美軍手冊 MIL-HDBK-338「電子裝備可靠度設計手冊」，詳細地論述了許多環境應力的預測與防制設計方法與作業程序，反映了 80 年代的環境設計技術水準。

任何系統與裝備都必須在一定的氣候環境中儲存、運輸和工作，氣候環境的各種因素都會對系統產生一定的應力，加速或造成系統失效，尤其是濕度、鹽霧、霉菌、以及空氣中一些會產生化學作用的有害成份，都會造成腐蝕現象的環境條件。因此，有必要對這些環境條件對產品所引起的應力進行分析，了解這些應力可能造成的效應，以及一些防護與防制措施。

3 腐蝕應力分析

濕度對裝備的可靠度影響很大，根據美國空軍的統計資料，連接器的失效中有 20% 是由於濕氣進入插頭引起的，而一般電氣與電子裝備使用損壞中，據統計亦有 35% 與濕度增大有關。潮濕氣候實際上是濕度和溫度的複合環境，主要是由氣候條件和地理條件所決定的，不同的氣候區域有不同的月平均及極值相對濕度，可以參考氣象單位所公佈的有關資料。

大氣種的含水量通常是以絕對濕度和相對濕度兩種表示法，絕對濕度(AH)就是空氣中的水汽密度，即單位體積空氣中的含水量。對某一特定溫度下，大氣中所含水汽量有一定極限值，即飽和水汽壓(Pv)，不同溫度下的飽和含水量如表 6 所示。

表 6: 單位體積空氣的飽和含水量

溫度()	-20	0	20	40	60
含水量 $\times 10^{-3} \text{ g/dm}^3$	1	5	17	51	130

相對濕度(RH)指在一定溫度下，空氣的實際水汽分壓(e)與該溫度下飽和水汽壓(E)之比值，亦即：

$$RH = e / E \times 100\%$$

常溫下，一般空氣的相對濕度為 50%~80%；當空氣的相對濕度小於 40% 時，則認為是乾燥的氣候；當相對濕度大於 80% 時，則認為是潮濕的氣候；當相對濕度為 100% 時，空氣是處於飽和狀態。

當絕對濕度一定時，溫度降低、相對濕度升高，當相對濕度達到 100% 時的空氣溫度稱為露點。在露點以下將有凝結的水滴，稱為凝露現象。

大氣中的含水量在同一地區隨著高度的增加而減少，離地面 1.5~ 2km 的水汽約為地面的 1/2；5km 高度的水汽壓約為地面的 1/10。

鹽霧是一種氣溶液，在海面上和濱海地區，由於浪花飛濺，致使水沫霧化並隨氣流傳播而形成鹽霧；在陸地上，含鹽礦成份被風刮起或伴隨水汽蒸發由大氣環流擴散而成，這是鹽霧的成因之一。一般海面 and 濱海地區的鹽霧含量數據分散性大，無規律性。鹽霧一般以鹽霧含量及鹽霧降落量表示，鹽霧含量的單位為 mg/cm^3 ，一般海面鹽霧含量平均值大約在 $0.148\text{mg}/\text{cm}^3 \sim 0.480\text{mg}/\text{cm}^3$ 之間，室外為室內的 4~8 倍。鹽霧降落量的單位為 $\text{mg}/\text{cm}^3 \cdot 24\text{hr}$ ，普通正常狀況常見的鹽霧降落量範圍大多落在 $3.42 \times 10^{-4} \text{mg}/\text{cm}^3 \cdot 24\text{hr} \sim 7.45 \times 10^{-3} \text{mg}/\text{cm}^3 \cdot 24\text{hr}$ 之間，且室外的降落量約為室內的 2 倍。一般而言，受鹽霧影響的主要是在離海岸約 400m、高度約 150m 左右的範圍內，距離越遠其影響就迅速減弱，至於在室內、密封艦船內或裝備車內，其影響就更小了。

鹽霧的主要成份為：NaCl 佔 77.8%、 MgCl_2 佔 10.9%、其他為 MgSO_4 、 CaSO_4 等，含量的高低不僅取決於該地區的氣候條件，如風向和強度、氣溫等，還與地理條件，如有無丘陵起伏等，以及鄰近海洋中的鹽份含量有關。

空氣中的水汽一般溶解有 N_2 、 O_2 、CO 等氣體及工業污染物質、煙塵、硫酸、亞硫酸等無機和有機物質微粒，這些物質成為霧滴的凝聚中心，當相對濕度大於 60% 時，大氣中水蒸汽霧滴直徑約為 $0.001 \sim 0.1\mu\text{m}$ ，在物體表面形成一個分子層厚的水膜。當相對濕度為 90% 時，就有二個分子層厚的水膜形成。過飽和時，霧滴直徑部大 $10\mu\text{m}$ ，形成雲和霧。雲和霧中的水含量約為 $0.8 \sim 4.8\text{g}/\text{m}^3$ ，特殊情況可達 $8\text{g}/\text{m}^3$ 。

霉菌是指生長在營養基質上而形成絨毛狀、蜘蛛網狀或綿絮菌絲狀的真菌，它是多細胞真菌的代表。霉菌種類繁多，在自然界中約有十萬種，其中對工業材料有危害的約有四萬種之多。

霉菌的菌體是由許多菌絲構成的，菌絲由細胞壁、細胞質和細胞核組成。霉菌分為兩類：一類是伸入培養基內或漫生於其表面的，它具有攝取營養物質和排除廢物功能的菌絲；另一類是伸入空氣中、頂端可產生孢子，具有繁殖功能的氣生菌絲或生殖菌絲。

霉菌的繁殖是孢子在適宜的溫度、濕度、pH 值和其他條件下發芽、生長的。其最適宜的發芽溫度為 $20 \sim 30$ 之間，少數霉菌在 0 或 40 時發芽。許多孢子長期暴露在零下或 40 下都不致受到損傷。當相對濕度低於 65% 時，孢子就停止發芽和生長。相對濕度超過 65% 時，濕度越大，生長越快。在極低的溫度下，甚至母體早已死亡，但是孢子還具有生長能力，能夠長期生存，一旦條件適宜，它還會發芽、生長並繼續繁殖。

當然，霉菌生長還需要其他營養成份，霉菌的營養特性屬導養型，需要從澱粉、糖類、纖維素、有機酸等碳水化合物中吸取碳素營養和能量，而蛋白質、氨基酸、無機氮鹽和硝酸鹽等均是霉菌的氮源，同時還需要一定的空氣，缺乏通風的環境有助於霉菌的生長。

霉菌的分佈極廣，污染途徑也很多，它的孢子體型極小，大多數直徑在 $1 \sim 100\mu\text{m}$ 之間，這樣易於隨空氣而傳播。凡是空氣能夠潛入的地方，都能受到霉菌的污染。零

組件上的灰塵含有大量霉菌生長所需的營養，在裝備搬運過程中，人手接觸所留下的污跡、油脂，都為霉菌提供營養成份，均可造成霉菌污染。

4 腐蝕應力效應

腐蝕應力主要是起源於濕度與鹽霧環境，這些環境對物品會產生不可逆的破壞效應。

濕度環境對物品所產生之效應計有：(1).材料的膨脹。(2).物理強度的喪失。(3).化學性能的改變。(4).絕緣材料性能的退化。(5).電性短路。(6).活動機件由於腐蝕及潤滑劑污濁造成卡死。(7).金屬材料的氧化腐蝕。(8).可塑性的喪失。(9).加速化學反應。(10).電子元件的退化、參數漂移。

材料曝露於鹽霧環境下之效應可分成三大類：即腐蝕效應、電性效應與物理效應：(1).電化學反應所引起之效應。(2).加速應力腐蝕。(3).鹽份在水中離子化後形成具腐蝕性之酸 / 鹼溶液。(4).電子裝備因鹽份沉澱造成損傷。(5).造成具導電性之薄膜。(6).絕緣材料及金屬之腐蝕。(7).機械件之活動零件受阻或卡死。(8).電解造成塗料起泡。

霉菌對材料和元件的污染機制可分為兩類：一類是原發性的，即直接侵蝕污染；另一類是次發性的，即間接影響。在直接影響方面，包括：(1).霉菌生長直接破壞了作為培養基的材料；(2).分解和吸收含有增塑劑、顏料、有機填料的塑膠材料和合成樹脂；(3).由於菌絲橫跨材料表面繁殖，會造成表面漏電、絕緣電阻下降。在間接影響方面包括：(1).霉菌代謝產物對材料引起的間接侵蝕，代謝物中的酸性物質和其他離子物質破壞了金屬表面的電解平衡而損壞防腐蝕的鈍化膜；(2).霉菌的生長構成了擴展性的物質推積，使有機防護層產生龜裂、起泡等現象，由於微生物的堆積形成半滲透性的膠囊，產生原電池加速金屬腐蝕。

5 腐蝕應力防制

對於防止腐蝕效應的各種方法，其有效性視設計品所選用金屬材料的種類、操作使用的狀況、暴露於濕度、鹽霧等腐蝕環境的程度，以及設計人員所採用的防禦方法不同而異。一般防止腐蝕發生的主要的方式包括材料選用與結構設計、改善腐蝕環境及表面處理等三種。

5.1 材料選用與結構設計

任何一種裝備，從概念初期到設計完成，防蝕問題是必須考慮的主要因素。在決定材料時，就必須選取同時能夠滿足強度、重量、以及其他機械上、冶金上和經濟上等的需求之外，還必須要能夠具有抵抗腐蝕作用的材料。對於承受靜態和動態應力負載的結構設計，則應該避免尖角、缺口及突然改變截面形狀的情形，因為這些位置是應力集中的區域，最容易發生應力腐蝕和疲勞腐蝕。對於遭受到振動環境的材料，則需要具備有預防磨耗腐蝕的特性。

由於不同材料具有不同的電化位能，當不同的材料組合在一起時，在合適的條件下即會開始發生電化腐蝕的效應。因此，在可能的情形下，應該盡量避免將不同的金屬結合在一起使用。萬不得已時，也應該採用電化位能接近的金屬。對於較具關鍵性零組件，則應使用較貴重的金屬。當不同電化位能的金屬必須結合在一起使用時，則應採取適當的電絕緣措施，並且盡量增大兩者之間的距離。假如無法做到完全隔離時，接合部位應該填以高絕電材料、油漆、塑膠漆、膠帶或其他絕緣材料，以增加兩者之間的電化電路電阻。

電化位能差距大的兩種材料間不得使用螺絲結合，否則螺絲很容易就會發生嚴重腐蝕。可能的話，接合處可使用由較不貴重的材料做成、更換容易的小零件，如墊圈等，而且這些零件的厚度愈厚愈好，如此在主要結構體發生破壞之前，有足夠的材料可供發生腐蝕，因而可以及時更換達到保護主結構體的目的。對於承受動力負載的結構，則宜採用搭接結合方式，以防止含鹽份的水汽入侵到裝備內部。除了材料選擇之外，設計時尚必須考慮選用適當的電鍍方法、表面處理類別以及表面光度等需求。當在鋼、鑄鐵等表面上噴塗漆或實施表面處理之前，必須注意電化位能效應可能造成的影響。

5.2 改善環境防蝕法

改善環境防蝕法乃是改善使材料發生腐蝕因素的特性，以抑制或消除腐蝕反應的進行。一般改善環境常見的腐蝕防禦方法有陰極腐蝕防禦法，腐蝕抑制劑法，腐蝕惰性劑法和除濕法等四種。

5.2.1 陰極腐蝕防禦法

在實用上，鐵和鋼材料的陰極腐蝕防禦法有兩種，第一種方法為將鐵和鋼製的結構或裝備連接到一整流器的負極，整流器的正極則連接至埋在土壤中的陽極；第二種方法乃將結構或裝備連接到如鎂、鋅銅等電化位能離鋼材料製成的金屬陽極上，其原理乃使作為保護作用的陽極材料發生腐蝕，產生犧牲作用以保護結構和裝備的金屬材料。

5.2.2 腐蝕抑制劑法

所謂腐蝕抑制劑乃在腐蝕環境中加入少量即可有效的降低金屬腐蝕率的物質。一般而言，腐蝕抑制劑可分為陽極腐蝕抑制劑和陰極腐蝕抑制劑兩種，陽極腐蝕抑制劑的作用為增加陽極的極化作用，陰極腐蝕抑制劑的作用為增加陰極的極化作用。

對於鋼、鋁和鎂合金等材料而言，腐蝕的防禦效果最好的陽極腐蝕抑制劑為鉻酸鹽，除此之外，用於防止鋼材腐蝕的主要陽極腐蝕抑制劑尚有可溶性氫氧化物、磷酸鹽、重磷酸鹽、氮化物、矽酸鹽和碳酸鹽；鎂材料常用的陽極腐蝕抑制劑則有碳酸鈣、碳酸鎂、以及鹼金屬或硫化氫和氟化氫。紅鉛丹對於鐵和鋼材料而言也是非常有效的陽極腐蝕抑制劑。在半浸水的使用狀態，鎂、鋅或鎳可作為陰極腐蝕抑制劑。

5.2.3 腐蝕惰化劑法

所謂腐蝕惰化劑乃指能改變電化位能，使其更趨向於陰極值的腐蝕抑制劑。在使用時，陽極腐蝕抑制劑如含有鉻酸鹽離子者，其防蝕效果比陰極腐蝕抑制劑更佳。

5.2.4 除濕法

除濕法對於大部份的裝備均適用，主要方法包括排水設計、氣密設計及使用乾燥劑法等三種，其原理乃控制裝備週圍空氣中的水汽含量，使凝結在裝備表面或內部的水份量不足以發生腐蝕作用。對於大部份的零件而言，當空氣的相對濕度降低至 40% 至 50% 時，腐蝕現象即很難發生。

在戶外使用的結構和裝備，必須採用更積極的排水設計，使積水得以排暢無阻。此乃因為空氣在白天受熱，到了晚上變冷，溫度冷熱變化造成空氣密度不同而發生空氣對流的現象，而空氣中的水分一旦進入到裝備內部後，濕的空氣遇到冷的溫度即在內部的零組件、材料上凝結，而且這些凝結水中很可能含有高量的鹽份，腐蝕現象於是開始發生。

對於較為精密貴重的裝備，則應採用氣密設計，並且在內部充以惰性氣體，使外面含鹽份的濕空氣無法進入內部。對於小型的精密設備，如陀螺儀等，則儘可能採用永久式密封設計，以防止在使用或儲存時，因高度或壓力變化而使含有鹽份的空氣或水汽進入到內部。使用永久性密封包裝可以消除濕氣、鹽霧、霉菌和雨淋等環境因素所造成的破壞現象。一般永久性包裝都是先抽成近乎真空，然後再填入惰性氣體，常用者包括氮氣、氬氣、乾空氣及氫氣。

使用乾燥劑也可以有效的防止濕氣效應。不過在使用乾燥劑時，必須隨時注意更換吸潮已經飽和、失去效能的乾燥劑。另外，儲存地點適當的通風措施也可以有效的改善濕氣所引起的問題，尤其是在高溫高濕環境的儲存空間，若缺乏通風考量，其所引起的破壞情形比一般狀況還要來得嚴重。

以下就使用除濕法防止腐蝕發生的方法與原則，按裝備種類分別說明如下：

- A. 機械裝備：使用適當的表面處理方法，選用無吸濕性的填墊材料，注意潤滑和組合部位密封材料的選擇，並加裝排除累積水的排水閥。
- B. 電子與電氣裝備：使用無孔性的材料，對於潮溼敏感的部份噴塗防潮漆或樹脂，對於動件部份作適當的密封措施，在電纜上打洞，以避免凝結水的累積。
- C. 電磁裝備：繞線部份噴塗防潮漆，避免使用整流器，並儘可能採用永久性密封包裝方式。
- D. 驅動裝備：使用無吸濕性材料，儘可能採用永久式密封包裝設計。

5.3 表面處理防蝕法

表面處理防蝕法乃是將容易發生腐蝕反應的金屬表面經過適當的處理，使之與產生腐蝕的環境因素完全隔離，防止電解液或氧化煤介接觸金屬表面，因而達到防止腐

蝕發生，延長裝備材料的使用壽命，提高產品的可靠度。表面處理防蝕法對於小裝備、局部容易腐蝕的材料、常需要移動的裝備等特別適用。

利用表面處理以防止腐蝕的方法，最常見者包括鍍層、陽極處理、化成處理及塗裝等四種。鍍層最常用的是電鍍法，在基體材料的表面電鍍上一層其他金屬，隔離腐蝕環境而達到防蝕的作用。金屬陽極處理或化成處理通常是使用浸漬法，在金屬表面附積一層非金屬皮膜。化成處理的作用乃在於減低基體金屬形成電化對偶的機率。塗裝法則是在外表面噴塗一層陶、瓷或有機塗料塗層來隔離腐蝕環境。通常這四種都是混合使用，例如先將表面作電鍍處理過，再配合陽極處理、化成處理的應用增加防蝕效果，同時可作為噴塗漆層打底之用，最後再在外表面噴塗漆層，達到多重保護的作用。

在一般使用的材料中，最需要的塗層或表面處理層保護的是鐵材和鋼材料，其次是鋅合金，鋁合金和鎂合金一般則先經過陽極處理或化成處理，然後再在外面噴塗一層漆。至於其他的基體金屬材料，大體上都具有相當程度的抗腐蝕能力。

5.3.1 鍍層防蝕法

產生金屬鍍層的種類與方法相當多，其中最常見者為電鍍法，其他的尚有金屬噴鍍法、真空鍍法、熔融金屬浸鍍法、金屬粉末粘合鍍法和輥壓冶金結合鍍法等數種。

鐵和鋼材料最常用的電鍍金屬有鎘、鋅、鎳、鉻、錫和鉛。在大部份情形下，鎘和鋅的電化位能均較鋼為不貴重，因此對於鋼材具有電化保護作用，同時和鋁、鎂合金接合在一起使用時也沒有不同的金屬間容易發生腐蝕的困擾。至於鎳鍍層，因為鎳較鐵和鋼材貴重，所以其防蝕效果僅是利用鍍鎳層作為障礙層、隔離環境之用，使腐蝕媒介無法滲透至基體金屬，而產生腐蝕作用。

電鍍法一般鍍層母材之種類包括鐵、碳鋼、銅、銅合金等數種，鍍材之種類則有鎘、鉻、鉛、鎳、銀、錫、鋅、銅、金、鋁、鈮、銻等。以下針對鍍鋅、鎘、鉻、鎳、銅、錫、銀、金等數種鍍材類種之特性、用途及效果說明如下：

A. 鍍鋅

鍍鋅層在濕空氣中易形成碳酸物氧化物白色膜層，酸、鹼、硫易使其腐蝕。鍍鋅的主要用途為在大氣條件和其他良好環境中使用於鋼鐵件，防蝕效果良好。

B. 鍍鎘

鍍鎘層在濕空氣中易氧化形成一層薄膜模蓋于表面可防止其繼續氧化。化學性與鋅相似，但不受鹼性腐蝕，在海面及高溫大氣中，耐蝕性良好(較鋅佳)，但在一般大氣中其耐蝕性較鋅差(除非鍍層完全覆蓋無孔隙)。鍍鎘的主要用途為在海面或與海水接觸之另件，或在 70℃ 以上之熱水中使用時，具耐蝕性、潤滑性。

C. 鍍鉻

鍍鉻層在濕空氣中很穩定，能長期保持光澤。在鹼、硝酸、硫環境中很穩定，但易溶於鹽酸、熱濃硫酸、氯化物，在大氣中易生成一薄層鈍化物。鍍鉻的主要用途為保護鐵母材，但因鍍鉻層具有多孔性，故在鋼鐵件表面直接以鍍鉻作防腐蝕效果不理想，一般是經多層電鍍(鍍銅 鍍鎳 鍍鉻)方可。目前鍍鉻廣泛地應用在提高耐磨性、修復尺寸、光反射性、裝飾等。

D. 鍍鎳

鍍鎳層在大氣中和鹼液中安定，不易變色，但易受酸作用，在一般空器中，除非鍍層完全覆蓋無孔隙，否則防銹效果較鋅差。鍍鎳的用途逐漸為銅、錫合金取代，目前多用在電鍍之中間層。

E. 鍍銅

鍍銅層在潮濕空氣中尤其含硫時易受腐蝕，銅鍍層緊密細緻與底材結合牢固，拋光性良好。鍍銅的主要用途為用作其他電鍍之底層，提高導電性，軸承減少磨擦，作鋼鐵材料防止滲碳部份之保護層。

F. 鍍錫

鍍錫層化學安定性良好，不為稀強酸腐蝕，但受濃熱鹼作用，與上述鎳及鎳相同之原理(氧化電位較鐵低)除非鍍層完全覆蓋無孔隙，否則防銹效果較鋅低。但其對銅之鍍層防銹效果甚好，故鋼鐵件可先鍍銅再鍍錫，錫之銲接性良好。鍍錫的主要用途為銅導線鍍錫可抑制銅受橡膠中硫之作用，或在鋼鐵件滲氮時，作為非滲氮表面保護層。

G. 鍍銀

鍍銀層易受硝酸腐蝕，在空氣中若有氰化物或硫化物存在，可使鍍層變褐或變黑。鍍銀的主要用途為提高導電性，避免接點氧化減少電阻。

H. 鍍金

鍍金層極為安定，但鍍層較軟不耐磨。鍍金的主要用途為提高導電性，避免接點氧化減少電阻，常用於高精密及可靠度要求的電器接頭、插腳等。

5.3.2 陽極處理

陽極處理一般分為鉻酸陽極處理(如鋁、鈦)及硫酸陽極處理(如鋁、鈦)等數，有關處理後之材料性質、尺寸影響及用途分別說明如下：

A. 材料性質

鋁合金對水份多種有機酸、硫化物及濃硝酸等具耐蝕性，但對鹼性及無機酸不耐蝕。在溶液中作為陽極使其氧化成鋁之氧化物(或鈦之氧化物)膜，此膜能更耐蝕及抗蝕。

B. 尺寸影響

處理後底材受侵蝕，形成一種組織較硬之氧化物，一般而言表面增加之厚度約為先前氧化層厚度之半。

陽極處理的主要用途：增強鋁材之抗蝕性及抗腐性、提高絕緣性、油漆加工之良底層及可以染色增加裝飾美觀。

5.3.3 化成處理

化成處理一般分為磷酸鹽處理(如鐵、鉛、鋅、鎘、錫)、鉻酸鹽處理(如鉛、鋅、鎘)、染黑處理(如碳鋼)及鈍化處理如(不銹鋼)等數種。化成處理後底材受侵蝕，形成一種組織較硬之氧化物，一般而言表面增加之厚度約為先前氧化層厚度之半。以下則將各類化成處理之特性、用途及效果說明如下：

A. 磷酸鹽處理

磷酸鹽處理應用於鐵、鋅、鎘和鋁表面，尚可分為鋅基、錳基或鐵基等三種型式，其間的擇取則視基體金屬的特性而定，其中以鋅系作業較為普及，上述各類底材在酸性磷酸鹽液中，可形成不溶解磷酸鹽。

磷酸鹽化成處理的用途依塗層厚度而定，一般在 100~1000 mg/ft² 之間，主要的用途為促進油漆附著力，並改善油漆鋼材之抗腐蝕力，較厚之塗層在 1000~3000 mg/ft² 之間，主要用于減少鋼之磨擦，並作潤滑油類之基質。

磷酸鹽化成處理的效果為磷酸鹽處理後之鋼鐵材料件，並不能防止生銹，而是為了立即噴塗油漆之需求。

B. 鉻酸鹽處理

鉻酸鹽處理廣泛地應用於鋅、鎘及鋁表面，將鋅、鎘及鋁等料件在一種活性鉻酸鹽溶液中，表面形成一層軟性膠凝體之鉻酸鹽皮膜，經相當時間(室溫下通常一天後)可逐漸硬化而變強韌，而能耐溫防蝕(如溫度升至 55℃，約兩小時即可)。

鉻酸鹽化成處理的主要應用在鋁件、母材為銅或鐵的鍍鋅件或鍍鎘件，可用鉻酸鹽後處理增強其防銹蝕性。

磷酸鹽化成處理產生的鉻酸鹽皮膜具有黃色等五彩色澤，可作為防銹能力之表示，愈深之色彩防銹效果愈好。

與磷酸鹽之比較，鉻酸鹽化成處的組織緊密、皮膜較薄、防銹力較佳、油漆附著力較差。

C. 染黑處理

染黑處理又稱發藍，係碳鋼件在熱而濃之鹼液中表面生成四氧化三鐵黑色皮膜，此層皮膜具有裂紋，故原態容易生銹，必須在化成後立即以充分水洗去除鹼液，再以鉻酸處理或塗油，以改善耐蝕性。

染黑的皮膜厚度約 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ ，尺寸變化極微，故主要應用在精密碳鋼工具、螺絲、槍砲等。

染黑化成處理的防蝕性效果差，但如無其他處理方式可採用之，經常塗擦防銹油脂保養，亦可長期保持不銹。

D. 鈍化處理

不銹鋼材表面使用強氧化液處理後，可形成一薄層氧化膜，可增強其耐蝕性，此即為鈍化處理。鈍化處理的主要用途為增強不銹鋼之耐腐蝕性。

一般不銹鋼含鉻 18 %、氮 8 %，故在氯離子高濃度存在氧的情況下，不銹鋼甚易受腐蝕，意即海岸氣候不銹鋼耐蝕性甚差，採用鈍化處理具有改善這種現象的效果。

5.3.4 塗裝防蝕法

一般常用的塗裝材料包括無機塗料和有機塗料兩大類。其中以有機塗料最為普及，適用於有防蝕需求的一般裝備材料表面。無機塗料包括陶、瓷、琺瑯等，通常是用熔融的方法覆蓋在金屬上。噴陶適用於高溫(紅熱點及更高的溫度)下使用，且需具有長期穩定者，可防止金屬與合金的晶粒間腐蝕，作為腐蝕性氣體的隔絕障礙，降低熱點發生的機會，對於重要的部位則可代替低合金金屬，並可抵抗污染物的侵蝕。噴瓷和琺瑯則適用於使用溫度較低的場合。

對於基體金屬而言，有機材料漆層的防蝕作用主要是形成一機械式的屏障，因而阻止腐蝕媒介入侵至基體金屬表面。由於具有不滲透性、附著性、耐久磨耗性和耐腐蝕性等需求，一般在應用時都採用一層以上的漆層。第一層漆通常稱為底漆，主要是改進表面狀況，使之具有最大的附層力，同時還能作為腐蝕抑制和惰化劑之用，這種惰性處理對於活化性較大的金屬如鎂、鋅、鋁和鋼等，材料是很重要的。在底漆中通常含有腐蝕抑制作用的顏料，常用者為鋅白和紅鉛丹。不過像紅鉛丹這種重金屬顏料並不適用於鎂、鋁及其合金上，因此對於這類的金屬必須使用其他種類的底漆。覆加在底漆上的漆層主要是作為隔離腐蝕媒介入侵之用。採用塗裝防蝕時，在裝備外表的尖角部分應該修整平滑或打成圓角，以免噴漆時漆層或表面處理層太薄，無法獲得保護的效果。

塗裝一般可分為清洗底漆(Wash Primer)、底漆(Primer)及面漆(Coating)等三種，其特性分別說明如下：

- A. 清洗底漆：底材表面對油漆附著力不良時，可先使用此項底漆以增加附著力，主要參考資料為美軍規範 MIL-C-8514。
- B. 底漆：包括抵抗化學藥劑和溶劑之環氧聚醯氨底漆，主要參考資料為美軍規範 MIL-P-23377。
- C. 面漆：環氧聚醯氨面漆，主要參考資料為美軍規範 MIL-C-22750。

5.4 防霉設計原則

首先，根據裝備使用場所的氣候環境條件如溫度、濕度、陽光等，以及其他與霉菌生長有關的條件，確定霉菌生長及造成污染的可能程度。其次，按照產品、元件、材料的使用要求、技術指標的變化極限，以及霉菌生長的影響，確定防霉等級。有關防霉設計的原則說明如下：

- (1). 防護結構設計：零組件或裝備採用密封結構設計，並且在內部充填乾燥清潔空氣或惰性氣體，密封結構內安裝加熱器，或放置乾燥劑，使內部相對濕度低於65%，以防止霉菌生長。
- (2). 選用耐霉性能良好的材料。絕緣材料、塗料及其他有機材料的應選擇能夠延緩霉菌生長者，避免使用潤滑劑及其他有助於霉菌生長的材料，進行材料改善，加入防霉劑或在材料表面噴射殺菌劑；
- (3). 改善裝備使用環境：控制室內溫度、濕度，保持足夠的空氣流通速度，減少灰塵積聚，採用殺蟲劑控制塵蟎的活動，應用紫外線照射進行消毒，使用環境保持適當濃度的臭氧等，均能控制霉菌的生長；
- (4). 防霉設計應當與溫度、濕度環境及其他環境因素綜合考量，以確定防護設計方案。