

塗佈與腐蝕

著作權所有：惠達雜誌 / 撰文：Guy Avellon

一般而言，所有扣件表面都會有某種保護塗層，以防止受大氣腐蝕或暴露於腐蝕性的用途與環境。即使是未塗佈的高強度結構扣件，在被置於開放容器中等待使用時，也會有一層薄薄的油膜來保護裸露的鋼材。這類扣件的狀態通常會標示為「原狀」。

化學轉換式塗佈

這類塗佈也稱為磷化塗佈，是唯一會與基材發生化學反應並與之結合的塗佈。鋅、鐵和錳的金屬離子溶解後，會與鋼材表面形成化學鍵結。通常，薄型轉換塗佈適用於辦公家具等，因為它是油漆的優良底層塗佈。

用於扣件時，塗佈厚度越高，腐蝕防護效果越好。厚重的鋅磷化塗佈（約 1,000 至 3,000 毫克 / 平方英尺）可在鹽霧腐蝕測試中達到 96 至 400 小時的防護效果，取決於所用的封閉劑，如油或蠟。



鋅 >>

鋅是一種能在基材（裸露金屬部件）與大氣腐蝕之間形成犧牲性保護層的金屬。換句話說，鋅會先腐蝕，從而保護鋼材部件。鋅可透過多種方式施加於扣件，包括熱浸鍍、機械沉積、電鍍或化學轉換。

當腐蝕開始時，會產生白色腐蝕產物，這是鋅作為鋼材基底陰極保護時的金屬還原產物。



電鍍鋅 >>

電鍍鋅的厚度通常介於 0.00015 至 0.0003 英吋之間，中位數約為 0.0002 英吋（5 微米）。根據 ASTM B117 鹽霧測試，未受保護的鋅在 24 小時內會出現某種腐蝕產物，通常為紅銹。

許多鋅塗佈會進行補充性的鉻酸鹽浸泡處理，該處理可為透明或有色，作為封閉劑以抵抗鋅層的孔隙性並增強防腐蝕能力。因此，白色鋅腐蝕產物通常在 36 小時後才會出現。

鉻酸鹽浸泡液中可添加色素及增厚膜層，膜層越厚，防腐蝕能力越強，鹽霧防護時長可達 96 小時。常用的後處理

包括六價鉻和三價鉻。六價鉻膜層較厚，但因對環境和公共健康有害，已停止一般使用。為符合美國環保署（EPA）及 RoHS 規範，三價鉻已取代六價鉻成為主流選擇。

三價鉻部件的顏色沒有六價鉻那麼光彩奪目，呈現較為柔和的黃色，而非鮮亮的色澤。其防腐蝕效果略低，且表面不同的仕様可能會影響扭矩與張力之間的一致性。如果部件表面呈現顆粒狀外觀，通常是因為在電鍍槽中通過的電流密度（每平方英尺安培數）增加，導致鍍層多孔，並可能因化學電解作用產生氫脆現象。

電鍍部件常見的一個問題是電流的控制不當。針對被鍍部件的表面積，金屬電解液的「覆蓋能力」決定了金屬在複雜幾何形狀部件上的覆蓋程度。高電流會加快沉積速度，但也會產生所謂的「聖誕樹化」現象於扣件的螺紋上。

顧名思義，「聖誕樹化」指的是外牙式扣件的螺紋峰部比螺紋根部沉積更多金屬。螺紋峰部由於其外型會較靠近陽極，通常會比螺紋根部多鍍一些金屬。然而，螺紋峰部過度的金屬沉積會導致螺帽的螺紋咬合問題或產生咬死現象。



幸運的是，非氰化物電鍍電解液已減少此類問題的發生頻率。舊式電解液使用含鋅氰化物的電鍍槽，對於產品表面的油污及其他污染物容忍度較高，但效率僅在 40% 至 60% 之間。為了加快生產，會提高電流強度，這會導致燒傷、剝落、孔隙率增加，以及大量氫氣產生，進而引發許多部件的氫脆問題。

非氰化鹼性或酸性系統的效率約為 95%，且陰極產生的氫氣較少，但對污染物的容忍度較低，因此需要進行預先處理。



螺帽塗佈厚度 >>

許多規範要求螺帽的塗佈厚度應與扣件相同，但這其實沒有必要。首先，這會造成螺紋適配問題。如前述，電鍍會在外牙式扣件的螺紋峰部造成「聖誕樹化」。螺帽也會有類似問題，只是鍍層會堆積在第一個螺紋的外側。

由於電鍍槽的「覆蓋能力」相對較低，內螺紋的鍍層沉積很少。但請記得，螺帽是與公螺紋配合，當擰緊時，公螺紋會提供足夠的保護。以熱浸鍍鋅螺帽為例，塗佈後都會進行攻牙，螺紋基本上是裸露的。當螺紋適配出現問題時，最好是減少螺帽上的塗佈厚度。



熱浸鍍鋅 >>

熱浸鍍鋅的標準見於 ASTM 標準 A123/A123M。此過程中，部件會被浸入熔融鋅浴中。由於熔融鋅的溫度約在 800° 至 990°F (423° 至 530°C) 之間，這會對 SAE 8 級 (150 ksi) 扣件的回火溫度產生較大影響，較 5 級 (125 ksi) 扣件影響更明顯。因此，此工藝僅限用於結構用 ASTM A325 (F3125)、A307、圓頂頭螺栓及輸電塔螺栓，以及各種管件和鐵製法蘭、墊片和螺帽。

A325 結構扣件允許依 ASTM B695, Class 55 標準進行熱浸鍍鋅。其他抗拉強度超過 125 ksi 的扣件則不得使用熱浸鍍鋅塗佈。塗佈於螺帽後會再進行攻牙處理。

塗佈厚度非常厚，約為電鍍鋅扣件的 10 至 30 倍，平均超過 0.005 英吋 (127 微米)，因其厚重的塗佈，在戶外使用時具有極佳的防腐蝕效果。詳見 ASTM F2329/F2329M。



鋅片塗佈 >>

其又稱機械鋅塗佈，是另一種產生厚重塗佈但不需高溫的工藝。此工藝透過鋅金屬片的漿料，利用玻璃珠或金屬珠撞擊部件表面形成塗佈。此過程不會促進氫脆的發生。塗佈厚度可控，範圍從 0.0003 英吋 (7.6 微米) 到 0.005 英吋 (127 微米) 不等。成品表面呈現暗淡的霧面或槌紋狀鋅金屬色澤。此工藝廣泛用於硬化平墊圈以防止氫輔助裂紋，但尚未通過 ASTM A490/490M (F3125/F3125M) 結構螺栓的認證。

鋅片塗佈及其他有機與無機鋅片塗佈工藝涵蓋於 ASTM 規範 F3393 中，該規範適用於 150 ksi 及 1040 MPa 扭斷式螺栓組件的塗佈。



有機 / 無機塗佈 >>

此類塗佈屬於「浸泡旋轉」塗佈法，把扣件產品浸入適當的液態介質中，然後旋轉甩除多餘液體。此技術於 1980 年代中期首次開發，早期存在厚度控制及與相配塗佈螺帽的螺紋配合問題。現今則採用多層不同基底及面層塗佈，結合不同金屬及有機塗佈材料。

塗佈中含有鋅、鋁等金屬微粒，符合 ASTM 規範 F1136/F1136M 及 F2833。多種塗佈方案包括封閉劑及面層塗佈，以提升防腐蝕性能。部分廠商提供不同面層塗佈以兼顧性能與外觀。依 B117 鹽霧加速測試，防腐蝕時長達 500 小時至 1,000 小時不等。

B117 測試的防腐蝕時長僅為相對比較，實際現場表現會因組裝方式、酸雨、紫外線等環境因素及施作者不同而異，該時長僅供參考。



無電鍍鍍 >>

顧名思義，無電鍍鍍不使用電流來將鍍沉澱在基材上，而是透過含鍍次亞磷酸鹽的電鍍液中金屬陽離子的化學還原反應，形成鍍-磷合金塗層。此反應為自催化反應，受時間及浴溫控制。

自催化反應意指鍍金屬會持續在自身表面沉積，直到刻意停止為止。類似將釘子浸入硫酸銅溶液中，銅會覆蓋釘子表面直到無裸露鐵面，反應停止，不再沉積銅。

無電鍍鍍塗佈符合 ASTM 標準 B733。這個工藝的主要優點是金屬沉積會發生在溶液接觸基材的任何地方，意味著不規則幾何形狀的零件也能獲得相同的厚度，包括通孔和螺紋周圍。非常適合用於小型調整螺絲以及符合 3 級螺紋公差的零件。

鍍沉積層的孔隙率低於電鍍鍍，因此其耐腐蝕性更好。表面非常光滑，摩擦力較小。低溫熱處理可以提高表面硬度，從而增強耐磨性。無電鍍鍍已被用於防止不銹鋼液壓接頭螺紋的咬死，其唯一缺點是化學反應中會產生氫氣，可能導致高硬度扣件的氫脆現象。■

