

# 高純度金屬冷噴塗與常見表面工程技術之差異

魏輔均 周邦彥

## 摘要

表面工程技術可分為三類，包含表面改質、薄膜技術與厚膜技術，本文介紹高純度金屬厚膜技術-高壓冷噴塗之原理與塗層特性，並將之與其他常見表面工程技術一同比較說明，包含表面改質技術（陽極處理）、薄膜技術（氣相沈積）與厚膜技術（電漿熔射、火焰熔射、電鍍、化學鍍、雷射銲接）。討論特性包含成膜機制、成膜速度、成膜厚度、成膜材料、塗層鍵結機制、基材表面與心部受熱溫度。瞭解不同表面工程技術之差異，可作為製程選擇之參考。

## 一.表面工程技術簡介

### 表面工程目的-功能性、保護性、外觀

產品或零件欲進行表面工程之目的，包含改變表面功能性、保護基材並延長其使用壽命，以及美化外觀。以改變表面功能性為例，可將高導電率、導熱率之金屬表面具有高電阻或熱阻絕性，或使電絕緣之陶瓷表面具有高導電或銲錫性；而以保護性為目的之表面工程，可用以改善材料之表面耐磨、耐蝕性或抗高溫氧化等特性，提高運作時之可靠度，並延長使用壽命。

## 不同表面工程技術之成膜機制

常見之表面工程製程方法可略分為噴覆成膜(熱噴塗、冷噴塗)、氣相沈積(CVD、PVD)、氧化還原法(電鍍、化學鍍、陽極處理)與熔覆(噴塗、冷噴塗、雷射熔覆)。其製程機制可參考表 1。

表 1 不同表面工程技術之成膜機制

成膜製程 \ 成膜機制	表面改質或成膜機制
熱噴塗	將材料熔融並噴覆於基材表面
高壓冷噴塗	使材料高速撞擊基材表面並產生塑性變形、堆積成膜
CVD	反應物經化學氣相反應並於被鍍物表面沈積為薄膜
PVD	濺鍍：於真空下，靶材表面被高能電漿撞擊後，濺射原子在被鍍物表面成膜 蒸鍍：於真空下，將欲蒸鍍的材料加熱直至汽化昇華，並使此氣體附著於放置在附近的基板表面上形成一層薄膜。
電鍍	鍍液通電後，其陽離子於陰極被鍍物表面被還原成固態鍍膜
化學鍍	鍍液之自催化反應將金屬陽離子沈積於陰極被鍍物表面
陽極處理	陽極之金屬零件在通電後失去電子而形成氧化膜，屬表面改質非成膜技術
表面鐳覆	利用高能將金屬鍍材與金屬基材熔融結合

## 二.高壓冷噴塗之原理與特性

在常見的金屬、陶瓷成膜機制中，以噴塗方式成膜者包含了熱噴塗(電漿熔射、火焰熔射)與高壓冷噴塗，此兩技術皆屬快速成膜之厚膜製程，膜厚約在 50um 以上，成膜過程中，基材僅表面受熱(<150°C)，因此基材本體之機械性質與晶粒大小幾不受影響。

電漿熔射與火焰熔射乃利用電能或化學能所產生之高溫熱源將金屬或陶瓷材料加熱至高於固相線之溫度，並以高壓氣體(空氣或保護性氣體)將半熔融材料噴覆於基材表面，並於冷卻後形成固態塗層。

而高壓冷噴塗技術乃將金屬粉末藉由溫度低於粉末固相線的高壓惰性氣體

(<5MPa) · 以高於 700m/s 之超音速撞擊於基材表面 · 將飛行之動能轉換為內能與熱能 · 使其產生塑性變形 · 並堆積成 50um 至 1cm 以上之厚膜 · 以 5cmx5cm 之成膜面積為例 · 冷噴塗之理論成膜效率可達 60um/sec · 此外 · 冷噴塗過程中 · 欲噴塗之金屬粉末幾無相轉變或氧化現象 · 且金屬顆粒經高速擠壓成膜 · 使其金屬塗層之孔隙率低於 0.5% · 塗層中幾無氧化或雜質殘留 · 具有良好之導電與導熱性 · 適合用於易氧化金屬之成膜製程 · 包含銅、鋁、鈦之成膜。

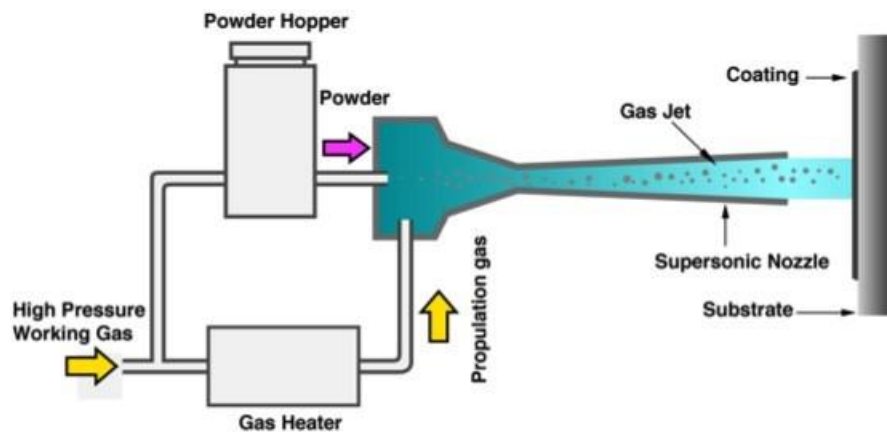


圖 1. 高壓冷噴塗機構示意圖

### 三.高壓冷噴塗與常見表面工程技術之差異

表面工程之製程選擇 · 通常考慮因素有：成膜材料選擇、成膜特性(成膜厚度、鍵結機制)、生產效率(成膜速度)、基材之熱影響(表面溫度、心部溫度)。以下為常見表面工程之特性差異說明。

#### 成膜速度

氣相沈積之成膜元素為分子或原子 · 故需較長的成膜時間 · 屬薄膜製程 · 而雷射熔覆、熱噴塗與冷噴塗具有較高的成膜速度 · 以 5cmx5cm 之成膜面積為例 · 冷噴塗之理論成膜速率可達 60um/sec。

覆膜速度由快至慢依序如下：

雷射熔覆 > 高壓冷噴塗 > 熱噴塗 > 電鍍 > 化學鍍 > 陽極處理 > PVD > CVD



## 成膜材料

高壓冷噴塗因需藉塗層材料之塑性變形方可堆積成膜，因此可成膜材料限於金屬，或者含有金屬與陶瓷之複合瓷金。陶瓷成膜技術中，熱噴塗具快速成膜之特性，但高純度氮化物與碳化物成膜，目前還是以 CVD 或 PVD 較為合適。常見表面工程之成膜材料選擇可參考表 3。

表 3 常見表面工程之成膜材料選擇

成膜材料 成膜製程	金屬 合金	瓷金	金屬 氧化物	金屬 氮化物	金屬 碳化物	石墨
熱噴塗	●	●	●		●	
冷噴塗	●	●				
CVD	●		●	●	●	●
PVD	●		●	●	●	●
電鍍	●					
化學鍍	●					
陽極處理			●			
雷射熔覆	●	●				

### 鍵結機制

高壓冷噴塗與熱噴塗之成膜機制為機械咬合，塗層鍵結強度通常為 3~7kgf/mm<sup>2</sup>，經製程後處理，其鍵結強度可超過 10kgf/mm<sup>2</sup>。表 4.為常見表面工程之成膜鍵結機制。

表 4 常見表面工程之成膜鍵結機制

鍵結機制 成膜製程	化學鍵	機械咬合	冶金鍵結
熱噴塗		●	○
冷噴塗		●	○
CVD	●		
PVD	●		
電鍍	●		
化學鍍	●		
陽極處理	●		
雷射熔覆			●

○：經製程後處理，可改變其鍵結機制

### 基材表面受熱溫度

高壓冷噴塗在成膜過程中，將微米級高速飛行金屬粒子之動能轉換為形變能與熱能，基材表面溫度可控制在 100°C 以內，且受熱時間短暫。常見表面工程之基材表面受熱溫度可參考表 5。

表 5 常見表面工程之基材表面溫度

單位：°C

表面溫度 成膜製程	100	200	300	400	500	600	700	800
熱噴塗		■						
冷噴塗		■						
CVD				■	■	■	■	
PVD			■	■	■	■		
電鍍	■	■						
化學鍍	■	■						
陽極處理	■	■						
雷射熔覆					■	■	■	





#### 四.高壓冷噴塗銅之塗層特性與應用領域

銅塗層為常見之高壓冷噴塗應用之一，其塗層具高緻密、低孔隙之巨觀特性，以及高導電(90-98% IACS%)與高導熱(320-330 W/mK)之電熱特性。此外，因冷噴塗銅塗層氧化率極低，因此具有更優異之鍍錫潤溼性，可應用於散熱與導電元件。冷噴塗銅塗層之塗層特性可參考圖 2.與表 7.

圖 2. 高壓冷噴塗銅塗層之外觀與微結構

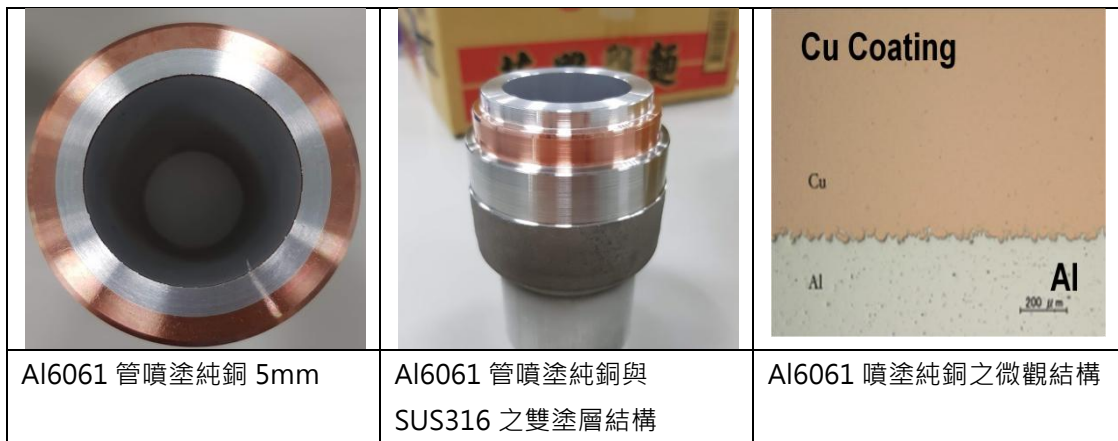


表 7 高壓冷噴塗銅塗層之塗層特性

可成膜之基材	金屬、陶瓷
成膜厚度	50um-1cm 以上
塗層孔隙率	<1%
塗層/母材接合強度	>30 (MPa)
純度	>99.5%
熱傳導率	320-330 W/mK
導電率	90-98% IACS%
鍍錫性	優於電鍍/化學鍍膜

## 五. 結論

綜觀以上，高壓冷噴塗與熱噴塗技術在成膜速度、成膜厚度上優於其它表面處理技術，在可成膜材料的種類上不亞於 PVD、CVD 等真空製程，尤其是可選用的成膜材料之多樣性與方便性更是遠遠超過其它表面處理技術。而對於一般熱噴塗製程較無法克服的氧化與熱應力問題，高壓冷噴塗技術則提供了絕佳的解決方案，高壓冷噴金屬塗層的高緻密性、低氧化程度與低殘留應力等特性，可以維持高純度金屬的熱、電性質，並堆疊高於 1 cm 之厚膜而不熱裂或剝落。惟其成膜需依賴成膜材料之塑性變形，故不適合用於堆積純陶瓷塗層。

CVD 與 PVD 為真空薄膜製程，可用於生產高潔淨度之金屬或陶瓷功能性薄膜，其材料選擇受限於可獲得的靶材種類或反應氣體，是屬於成本較高的表面工程技術。電鍍、化學鍍與陽極處理則是目前最具成本競爭力之表面工程技術，表面鍍覆則具有快速冶金鍵結之金屬厚膜覆膜特性，但有變形之問題。

進行表面工程技術之前，需考量成膜材料、成膜特性、生產效率、基材表面與心部之熱影響。此文章將常見之表面工程技術進行縱向與橫向之差異說明，可作為表面改質或覆膜製程選擇之參考。