

簡介

自1960年代人們首次觀察到具有非晶形態的過冷液態Au75Si25合金開始，非晶態金屬(amorphous metal)一直是近代材料界的研究熱點。大部份常見金屬材料多為結晶態(即內部原子呈現高度有序的周期性排列)，而非晶態金屬則不具備長程有序結構(即為非晶態，或又稱為玻璃態)。一般常見製備法為合金熔湯經過急速冷卻至過冷液相(super cooled liquid)而得，故非晶態合金(amorphous alloy)又被稱為金屬玻璃(metallic glass)或者是液態合金(liquid metal alloy)如圖1。

相較於一般傳統合金，液態合金展現出極佳的機械性質(高硬度、高破裂強度、高彈性極限...等)以及絕佳的耐腐蝕能力。

珠擊(shot peening)如圖2又稱為噴丸或拋丸，屬於冷加工製程，即以無數細微粒子高速轟擊金屬表面，捶打出微小壓痕或凹洞。金屬表面經過珠擊後，會產生加工硬化、晶粒細化、殘留壓縮應力...等等多重效果，其原理類似古人在鍛冶刀具時施與不斷的捶打，以提升刀身的硬度與強度。

珠擊所產生的強殘留壓縮應力，如圖3，可抑制金屬表面微裂紋增長，減少裂紋尖腐蝕、增加工件疲勞壽命與可靠性，是現代高端金屬製造業(如航天航空、汽機車、精密機械)不可或缺的製程技術。珠擊製程中為關鍵的要素即為所使用珠擊粉末的材質、比重、硬度與粒徑大小，並且粉材外形越接近球形則珠擊強化效果越好，如圖4、表1。若轟擊的粉材外形有尖銳角(即為傳統噴砂製程)，則會在工件表面造成尖銳粗糙的加工面以及局部殘留張應力，遇應力時容易使微裂紋大量生長，降低材料疲勞壽命與工件可靠性。故珠擊與噴砂製程對於工件材料性能的影響可謂差異極大。

表1. 常見的珠擊粉材與液態合金粉材比較表

珠擊粒子種類	鋼珠	粉末高速鋼	玻璃珠	氧化鋯珠	液態合金珠
硬度(Hv)	130-400Hv	900-1,100Hv	600-800Hv	-1,300Hv	3,200-4,400Hv
比重(g/cm <sup>3</sup> )	7.7-8.0	8.3-8.7	2.3-2.5	5.0-5.6	8.3-8.7
珠擊性能(硬度×比重)	1,000-3,200	7,470-9,570	1,380-2,000	6,000-7,280	22,720-34,320
真圓難易度	一般	一般	容易	困難	容易
耗材回收率	低(易變形)	中	低(易破碎)	中	極高
表面強化效果	低(硬度低)	中	低	中	極佳

液態合金粉末應用於珠擊製程，可以提升材料的機械性能與疲勞壽命，其所產生的強殘留壓縮應力，會使金屬表面電位趨向陰極，故較不易氧化。此外，因為液態合金的特性，在珠擊之後可以於工件表面鍍上一層液態合金薄膜，此層合金薄膜除了硬度高，耐蝕性佳，可保護工件表面之外，亦能做為後續表面處理鍍膜或上漆的中間緩衝層(inter layer or buffer layer)，提升膜層的附著性。應用於螺絲牙板模具如圖5、鎢鋼夾尾模如圖6，均改善傳統製程之不足。

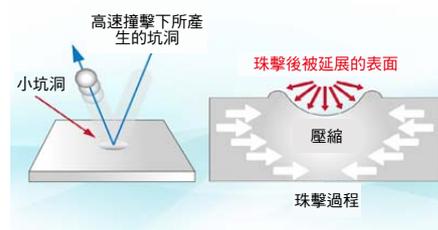


圖3. 珠擊後表面殘留應力示意圖<sup>[3]</sup>。

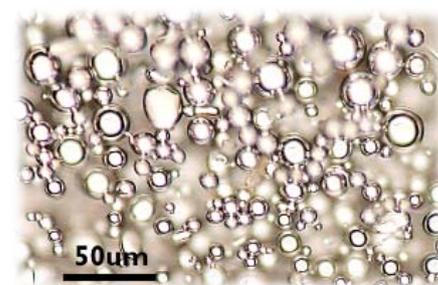


圖4. 液態合金粉末。具有極高的硬度與極強的耐腐蝕能力。

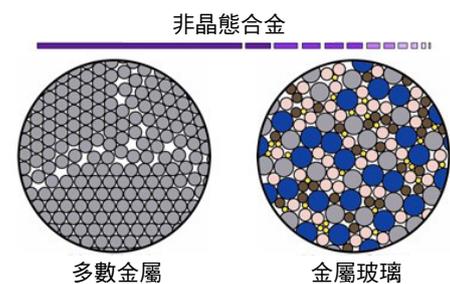


圖1. 一般金屬與非晶態金屬微結構示意圖<sup>[1]</sup>。

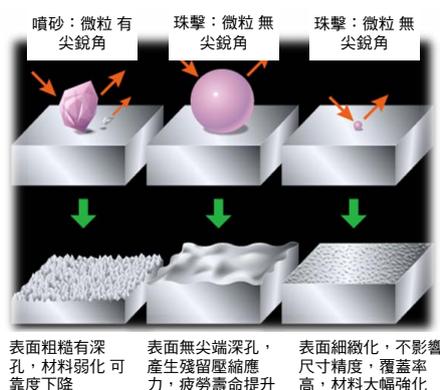


圖2. 噴砂與珠擊製程示意圖<sup>[2]</sup>。



## 螺絲緊固件等表面處理應用

金屬材料表面經液態合金珠擊後，除了機械與耐候性能的提升之外，其珠擊所產生的表面形貌亦是強化重點。一般而言，膜層(無論是陶瓷膜、金屬膜、有機或是無機漆膜)與基材之間，需要有實質的化學鍵結才能提供強而有力的膜層附著性(film adhesion)。若膜層與基材之間單純只靠凡得瓦力(Van der Waals force)吸附，則膜層的附著性不佳。當工件遭遇外力如磨擦或撞擊時，表面膜層便容易剝落失效。

如圖7所示，工件表面在經過液態合金粉末珠擊之後，表面產生綿密交疊的微型凹洞。此形貌相較於未珠擊的表面，其比表面積(真實面積/視面積)大幅提升。除了增加表面膜層與基材的接觸面積之外，其類似酒窩的形貌亦大量產生握裹、抓力與錨定效應，提供了無化學鍵結膜層可用庫倫力(Coulomb's force)抓取基材表面，大幅提升膜層的附著性。因此基材表面無需使用底漆便可以直上色漆或面漆，減少廢水處理負擔、降低成本並增加良率與產能；軟基材(如鎂、鋁、銅、鋅、鈦合金...等)鍍硬膜(如TiN、CrN、CrAlTiN、DLC...等)的膜層附著力大幅增加，鍍有硬膜的模具(如沖壓模、壓鑄模、射出模...等)則可因表面膜層不易剝落而提升壽命，鋅鋁合金材料經珠擊，其表面硬度即可提升至鉛筆硬度7H，若再塗覆溶膠凝膠矽烷材料(Silane sol gel)，硬度可輕易達到9H。故珠擊後的形貌效應對於現今的表面處理製程有著革命性的影響。



圖5. (a)經液態合金粉末珠擊強化後之高速鋼牙板模具，除搓牙壽命提升約30%~100%之外，因表面為壓縮殘留應力並沾鍍一層液態合金膜，放置30天後仍然無鏽蝕產生。(b)同一組高速鋼牙板經氧化鋁陶瓷粉末珠擊強化，放置30天後表面已嚴重鏽蝕。



圖6. (a)經氧化鋁陶瓷粉末珠擊之鎢鋼夾尾模。(b)經液態合金粉末珠擊之鎢鋼夾尾模。試件(b)除了模面的粗糙度下降、放電加工殘留層與毛邊已完全清除。由模面顏色亦可以發現經液態合金粉末珠擊後表面明顯有合金鍍膜存在。

## 太陽能支架、螺絲緊固件防腐設計

將上述效應，應用於金屬扣件以及結構支架等工件，竟然產生了另人意想不到的效果：防鏽耐蝕的全新解決方案。

一直以來，金屬工件的鏽蝕與耐候問題始終困擾著人們。根據統計，鋼鐵鏽蝕，光是在美國一年所造成的經濟損失便高達四千億美金[4]，約佔了美國GDP的3%。人們為了對抗鏽蝕，紛紛祭出各種防鏽製程，諸如熱浸鍍鋅、機械鍍鋅、表面鈍化處理、陽極處理、表面烤漆與防鏽塗層...等。一般而言，防鏽蝕的手段分為兩類：犧牲防護與隔絕防護。犧牲防護指的是在鋼材表面披覆一層對氧活性較高的鋅，使鋼鐵基材處於相對陰極，在鏽蝕的環境中先一步犧牲氧化成較為緻密的氧化鋅，進而保護基材；隔絕防護則是在基材表面披覆上一層或多層隔絕阻障層，使鋼鐵基材與氧氣無法接觸，故不產生鏽蝕。然而鍍鋅最怕酸雨與鹽鹼環境，會使鋅層迅速犧牲殆盡；而隔絕防護則是怕針孔與附著性不佳而剝落，一旦擋不住氧氣與鹽份，基材便會發生鏽蝕。

目前政府正在大力推廣綠能政策，主要目標於2025年前安裝太陽光電20GW、離岸風電5GW，其所需要的開發費用超過新台幣兆元。然而由於多數案場皆建設於高溼度、高鹽份與強陣風之環境，如海上、沿海地區以及養殖漁塢...等，結構支架與扣件的腐蝕與鏽化問題極其嚴重。

最典型的失敗案場即為政府補助3.6億在澎湖地區設置的太陽能發電系統，由於部分支架受鹽害腐蝕斷裂，其中馬公機場前中央廊道與機車停車棚太陽光電示範工程，還榮獲2013國

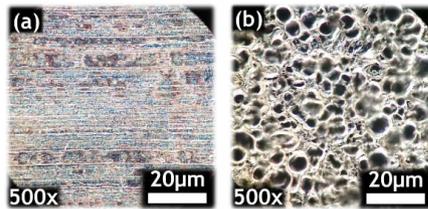


圖7. (a)金屬表面珠擊前光學顯微鏡暗視場(Dark field)圖。(b)金屬表面珠擊後之形貌，黑色為凹入，深度約0~3微米。



圖10. 典型螺絲防蝕處理

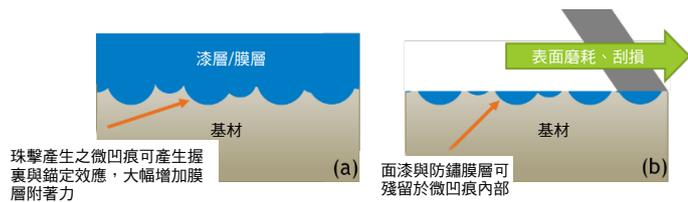


圖8. 膜層於珠擊表面受到外力磨除時，可部份殘存於微凹洞內的示意圖。

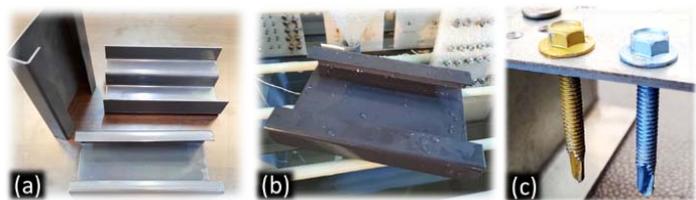


圖9. (a)型鋼經過液態合金珠擊後噴塗氟碳漆，無使用底漆，無熱浸鍍鋅，附著性良好。(b)經5%中性鹽霧試驗1000小時後，無任何紅鏽產生。(c)自攻螺絲經液態合金珠擊後上漆，攻入2mm厚之鋼板可發現色漆仍大部份殘存並帶入切口，使螺絲與鑽孔切口能具備一定程度的防鏽能力。



家卓越建設獎「最佳規劃設計類金質獎」，現今卻傳出不到5年便嚴重鏽蝕，讓外界質疑聲浪四起。當然，已安裝完成的太陽能板，也陸續發現錯用材料與規格，造成電位差腐蝕(鋁支架配不鏽鋼螺絲等)，致使緊固能力逐漸喪失，結構安全瀕危。若有大型颱風登陸，恐將造成難以估計的損失。

通常綠電案場設計皆以15~20年發電壽命來估算其經濟產值，然而現行之防鏽工藝(熱浸鍍鋅、陽極處理、防鏽漆)與規格(鋁支架、型鋼、鋁鎂鋅支架與不鏽鋼扣件)皆不足以應付台灣的環境。快則兩年，慢則五年即出現鋼材與扣件鏽蝕、鋁支架與不鏽鋼扣件產生電位腐蝕、陽極處理層與防鏽層遭飛沙磨除...等種種問題，嚴重影響案場結構的安全與壽命，亦大幅增加建成後之維護成本。

若鏽蝕問題無法解決，則投資綠電案場所必要之產物保險與銀行融資的取得將愈發困難。

利用液態合金粉末珠擊做為製程前處理，除了能免除酸洗所造成的金屬材料氫脆以及酸液與汙泥排廢環保問題之外，其工件表面微結構形貌能大幅度增加膜層附著力如圖8、9。配合環境使用相應漆面處理(富鋅有機/無機漆與耐UV彈性面漆)之扣件與型鋼支架，即可有效解決材料的鏽蝕問題，降低案場的維護成本與投資風險，並且緩解目前陽極處理與熱浸鍍鋅製程產能緊缺以及對環境的衝擊，使綠電建設能達成其環境保護的立意與願景。

## 自攻螺絲表面處理於攻入支架之鹽霧測試結果

一般螺絲防蝕處理如下圖10，電鍍鋅、鉻酸鹽鈍化(三價或六價鉻)、環氧樹脂塗層(螺絲塗料常見為Ruspert)，須知攻入堅硬無比的鐵板後，無論塗層、鈍化層，甚至一定厚度的鍍鋅層也被刮除殆盡，因此鹽水噴霧測試不滿24小時即出白鏽，如圖11(以304複合螺絲，表面處理為鋅電鍍、塗裝Ruspert，SST 500小時Bi-metal screws)，不出意外，紅鏽出現時間應該於240小時之內便會發生[5]，說明即使304複合螺絲亦不適合用於沿海潮濕與高鹽鹼的地理環境。

除非支架的結構或攻入面重新思考填入防水、防鹽害腐蝕的保護海綿、橡膠等，否則預計安裝於台灣沿海一帶與漁電共生的太陽能發電系統，終將因為支架腐蝕的問題，而功虧一簣!

★ 使用液態合金粉末珠擊做為前處理之優勢如圖12、13：

1. 工件性質強化，殘留壓應力可增加材料硬度、強度、疲勞壽命，減少裂紋尖端腐蝕。
2. 珠擊後表面鍍有液態合金薄膜，可做為耐氧化層與鍍膜中間緩衝層，增加後續膜層附著性。
3. 液態合金粉末珠擊可於工件表面製造細緻綿密的微結構，其握裹與錨定效應可大幅增加膜層附著性。
4. 表面處理前製程以液態合金粉末珠擊取代噴砂與酸洗，不但能避免微裂紋與氫脆問題產生，還能因珠擊強化的效果而增加材料可靠性。
5. 工件基材不限於鋼鐵材，鎂、鋁、鋅、銅、鈦合金...等，無論是擠型、鍛造、澆鑄、壓鑄、甚至粉末冶金與3D列印成型之工件皆適用此製程。
6. 液態合金粉末可完全回收循環再使用，製程環保無汙染，工序簡化，產能提升，長期製造成本下降。

## 參考文獻

1. <https://metallurgyfordummies.com/amorphous-metal.html>
2. <http://www.wpctreatment.com/image/mediablast.jpg>
3. <https://xianfeng.com.tw/upload/images/peening-3-01.jpg>
4. <https://kknews.cc/zh-tw/science/xnkq6y8.html>
5. <https://www.strongen.com.tw/>
6. <https://www.ey.gov.tw/File/63628207FB62D7F8/2e32dca5-543f-46bf-bd39-28608e6558c7?A=C>



圖11. 304複合螺絲(Bi-metal screws)攻入鐵板，經24小時鹽測外觀。



圖12. 碳鋼螺絲，經液態合金珠擊、富鋅鋁合金膜層塗佈，超過SST1000小時，不出紅鏽。

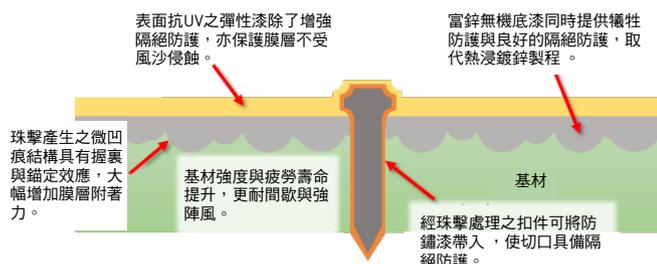


圖13. 針對台灣特殊環境需求所設計之扣件與結構材料耐鏽蝕處理程序示意圖。

## 結語

人稱工業之米的螺絲緊固件，時常在臨門一腳發揮至關重要的角色，台灣是否有機會逐漸步入非核家園，「2025年實現再生能源占比達20%、天然氣50%、燃煤30%的發電結構，且能穩定供電」[6]，最重要合理的電價等。螺絲的防鏽處理良窳、成本合理否等，才是決勝的關鍵。

