



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.201906\_33(2).0004

## 高階瓷金&陶瓷熔射塗層防蝕研究

# The study on the corrosion resistance of mechanical coatings and ceramics coatings deposited using thermal spraying

唐國樑<sup>1</sup>、林坤道<sup>1</sup>、沈會勝<sup>\*1</sup>

Tang Kuo-Liang<sup>1</sup>、Lin Kun-Tao<sup>1</sup>、Shen Hui-Sheng<sup>\*1</sup>

### 中文摘要

本研究目的為尋找在高濕度或高鹽份的環境中具有腐蝕抵抗能力的材料，並兼具良好的機械性能，因此所選擇的材料需具有相當的縱向耐磨耗性及剪力抗彎曲性能，為此目的，漢泰的研發團隊進行相關論文研究與材料資訊的搜集，以搜尋具有較耐腐蝕、耐磨耗能力的材料，以進行相關熔射製程研究。本研究中假設塗層需要承受不斷的往復動作，而磨耗測試則等同模擬實際的使用狀況，可得知在這樣的狀況下，何種材料可以有較低的磨耗重量損失。熔射皮膜的斷面金相檢驗，用以確認目前各種選擇材料在進行熔射製程後之皮膜狀況，觀察各塗層皮膜的氣孔多寡、進行硬度之量測、與基材的結合程度之觀察，並確認所製作之熔射皮膜的品質。在腐蝕環境下，塗層需具備長時間抵抗侵蝕的耐蝕性，且部件在不同的使用情況下可能還會承受軸向與縱向的應力，甚至承受彎曲應力，一但塗層因彎曲應力產生裂縫可能導致整層塗層的剝落。利用以上幾種測試綜合評比結果選擇了 WC-20Ni7Cr 為最適合本測試使用環境之材料。

**關鍵詞：**瓷金、陶瓷、熔射、防蝕。

### Abstract

The purpose of this study is to find materials with corrosion resistance in high humidity or high salt environments, and have good mechanical properties, so the selected materials need to have considerable longitudinal wear resistance and shear resistance. For this purpose, Han-tai's R&D team conducts network-related paper research and material information collection to search for materials with corrosion resistance and wear resistance for related spray process research. In this study, it is assumed that the coating needs to undergo constant reciprocating motion, and the abrasion test is equivalent to simulating the actual use condition, and it can be known which material can have a lower wear weight loss under such conditions. The cross-section metallographic examination

收到日期：109年03月06日

修訂日期：109年03月30日

接受日期：109年12月29日

<sup>1</sup> 漢泰科技股份有限公司

<sup>1</sup> HAN-TAI TECHNOLOGY Co.,Ltd.

\*聯絡作者：y307@han-tai.com.tw

of the sprayed film is used to confirm the film condition of various selected materials after the spraying process, and to observe the pore size of each coating film, measure the hardness, and observe the degree of bonding with the substrate. And confirm the quality of the produced spray film. In corrosive environments, the coating needs to have corrosion resistance against corrosion for a long time, and the components may withstand axial and longitudinal stresses under different conditions of use, and even with bending stress, once the coating is cracked due to bending stress. May cause peeling of the entire coating. Using the above comprehensive test results, WC-20Ni7Cr was selected as the most suitable material for the test environment.

**Keywords:** Cermets; Ceramics; Thermal spraying; corrosion resistance.

## 1. 前言

本試驗的需要，尋找在高濕度、高鹽份的海洋環境中具有腐蝕抵抗能力的材料，在此同時由於機械的作動，會有縱向的磨耗及橫向的剪力，因此所選擇的材料又同時得具有相當的磨耗性及抗彎曲性能，為此些目的，漢泰的研發團隊開始透過論文研究的搜集<sup>[1][2][3]</sup>，先搜尋具有此些能力的材料，另外也參考腐蝕手冊選擇在此樣環境中具有較耐蝕能力的材料。

根據搜尋結果顯示在海洋環境防蝕能力、耐磨耗及抗彎曲能力方面，可選擇的材料很多，例如陶瓷材料、鎢金 WC 系列、Ni 基材料等等，而陶瓷材料與鎢金 WC 系列具有優良的耐腐蝕性、耐磨耗性，而 Ni 基合金則具有更佳的韌性，考慮本計畫的目的及漢泰的製程能力，能使用熱噴塗的方式製作塗層的材料，並且具有市售的粉末材料或線形材料則相對有限，因此依據此些條件，漢泰選擇下列材料 Ni-Cr、Ni 基、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>、WC-Co、WC-Co-Cr、WC-Ni-Cr 來進行試片的噴塗，以及進行各材料試片之金相組織觀察、塗層硬度的量測、試片磨耗比較試驗以及試片氣孔率的檢測。

金相組織觀察是用來觀察各種材料所製作塗層的品質，觀察其是否有過多的未熔顆粒，或是有過多的雜質發生，以及塗層與基材的接合狀況等等；塗層硬度的量測是用來比較塗層的硬度，因為在具有往覆性的摩擦動作中，材料的硬度越高則其應會有更長的使用壽命，因此塗層的硬度比較可以用來做為材料選定的參考；磨耗比較試

驗是使用往覆式磨耗試驗機來進行試片的磨耗測試，其相當於模擬實際使用時所遇到的狀況，所以這樣的測試結果可用來比較測試所選定的幾種材料在相同的磨耗條件下，其重量損失程度的差異，以便材料選定之參考。

氣孔率的檢測是用來觀察熔射材料經熔射製程的塗層中具有多少的孔隙，過多的孔隙在具有腐蝕因子的環境下，會造成基材的銹蝕，進而造成熔射塗層的破壞，因此氣孔率的高低也可用來選擇適合在本試驗的使用環境中的材料。最後再利用此上述的測試結果進行比較，選擇出在海洋環境防蝕能力、耐磨耗及抗彎曲能力具有最佳搭配的材料。

## 2. 實驗方法

### 2.1 高速火焰熔射(High Velocity Oxy. Fuel)

高速火焰熔射(簡稱 HVOF)是以氣體火燄為熱源之火焰熔射法之一種。如圖 1.所示。以提昇噴槍燃燒室之壓力產生跟爆發熔射火焰匹敵之高速火燄。將粉末材料送至火燄射流的中心使其熔融或半熔融，然後進行高速連續噴射之熔射，粉末熔射材料以超高速衝擊基材，故可形成非常緻密的高密著力皮膜。特別是碳化物鎢金材料的耐磨耗性皮膜的形成，更能發揮功用。

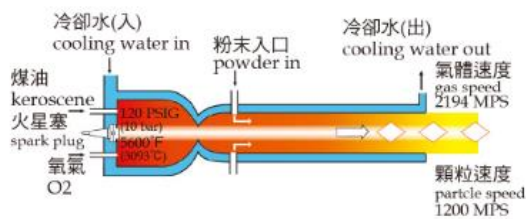


圖 1 HVOF 熔射原理。

Figure 1 Schematic of HVOF

## 2.2 電漿熔射

利用電漿熔射噴槍所產生的電漿噴流將溶射材料加熱，電漿火焰中心溫度可達 15,000°C 所以熔射材料廣泛，將熔融或半熔融狀態的熔射材料粒子噴覆在目標母材上形成皮膜。如圖 2 所示。這是一種利用能量密度極高、超過 10,000°C 的高溫電漿噴流，將各種陶瓷為代表的高熔點材料，以及陶瓷與金屬或合金結合而成的瓷金粉末材料熔融後噴射在加工物表面的熔射方法。工件施工溫度可控制在 200°C 以下。

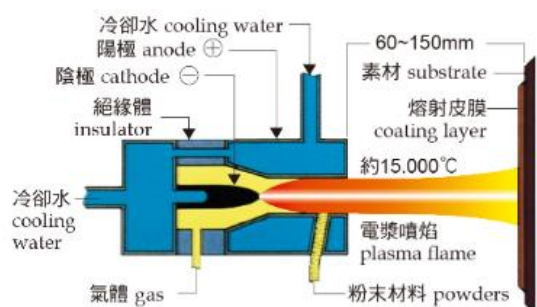


圖 2 電漿熔射原理。

Figure 2 Schematic of Plasma spray-coating

## 2.3 金相組織觀察&氣孔率的檢測

本實驗係進行熔射皮膜的斷面金相檢驗，用以確認目前各種選擇之暫定材料在進行熔射製程後之皮膜狀況，觀察各塗層皮膜的孔隙多寡、進行硬度之量測、與基材的結合程度之觀察等特色，並確認所製作之熔射皮膜的品質，是否有異常的

結構產生，再利用綜合評比結果來選擇最適合在本專案使用環境之材料。在金相組織觀察項目中，以金相顯微鏡來進行熔射皮膜的結構觀察，以研磨拋光機進行試片的研磨拋光的程序，如圖 3 所示。研磨完成後開始進行拋光程序，待試片完成研磨拋光程序後，即可使用金相顯微鏡進行金相觀察，觀察的倍率則為 50X、100X、200X 及 500X 等四種倍率，主要觀察目的為熔射塗層堆疊的狀況以及熔射塗層與基材的結合狀況。

熔射塗層是為了保護基材料而進行的一樣保護措施，而其為粉末顆粒的撞擊堆疊而形成，因此塗層製作的時候，多少會有一些微小孔隙的產生，而不同系列的材料進行熔射製程後會其相對應的孔隙率產生，而此塗層的孔隙可能會導致腐蝕現象的發生使得塗層的使用壽命的降低。腐蝕現象泛指材料與週遭的物質產生化學反應進而解體的現象，換句話說，腐蝕是指金屬物質因化學反應所導致的損耗。

過多的孔隙會造成使用環境中的腐蝕因子(如水、酸鹼等)由這些孔隙滲入到塗層而到達基材，一但發生這樣的狀況時，腐蝕因子會造成基材的腐蝕，腐蝕產生的氣體與鬆散的氧化物組織會由基材與熔射塗層之間慢慢產生，經一段時間的腐蝕與產物的累積後，會造成熔射塗層的破損，使其保護性下降，進而又使基材的腐蝕程度加劇，惡性循環下會造成嚴重的破壞與損失，因此熔射塗層需進行氣孔率的檢測。氣孔率的量測為斷面金相觀察後的一接續步驟，此部份漢泰利用氣孔率量測軟體來進行測試試片的氣孔率量測，其測試方法一樣得先將測試試片進行切割鑲埋，再進行研磨拋光，最後以金相顯微鏡觀察試片之斷面，並拍攝固定倍率之圖片，載入量測軟體中，進行氣孔率的量測。

氣孔率之檢測的圖片倍率為 200X，太低的放大倍率不易孔隙的觀察，因此以 200X 為最適合

觀察之倍率。氣孔率觀察的結果中，氣孔率最低的屬於鎢金系列的 WC-Co、WC-Co-Cr 和 WC-Ni-Cr 三種，接下來為金屬系列的 Ni-Cr 和 Ni 基，而陶瓷系列的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 有著較高的孔隙率，因此單就未經處理的塗層氣孔率的觀察，陶瓷系列的塗層在具有腐蝕因子存在的環境下，其可能會較其它兩種材料更早發生腐蝕現象，造成基材的損害及塗層的破損。

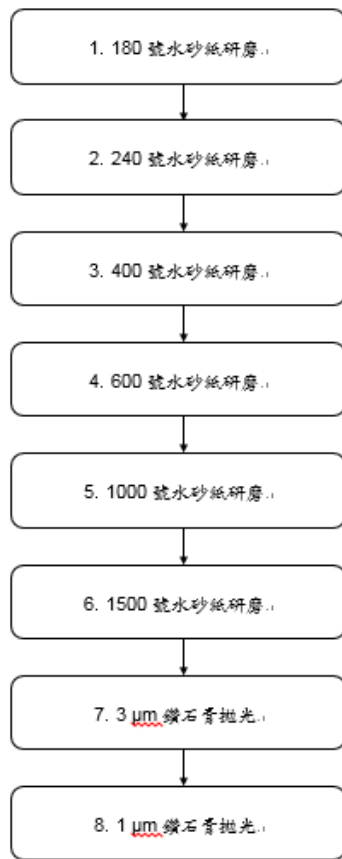


圖 3 研磨拋光程序。

Figure 3 methods of grinding and polishing.

## 2.4 塗層硬度的量測

為了能夠承受不斷的往覆動作，在這樣的條件下，熔射塗層需要良好的硬度，以提供耐磨耗的功能。本實驗接續在金相觀察步驟之後，為進行測試試片的斷面微硬度量測，斷面硬度的量

測方式為使用微小硬度機進行。如圖 4.所示。

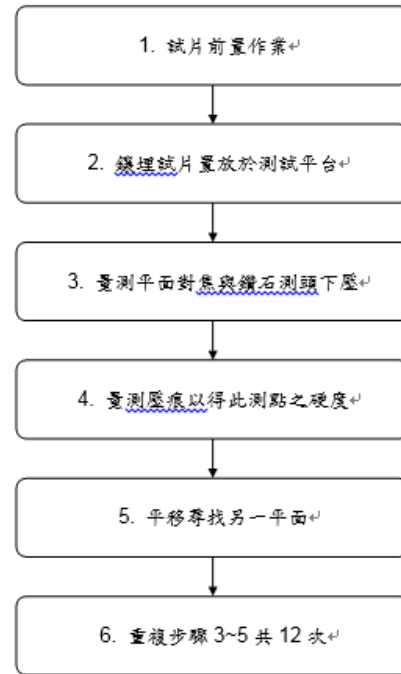


圖 4 維克氏硬度量測程序。

Figure 4 Vickers hardness test.

## 2.5 磨耗比較試驗

塗層需要承受不斷的往覆動作，磨耗測試則等同模擬實際的使用狀況，而磨耗測試的結果，即可得知在這樣的狀況下，何種材料可以有較低的磨耗重量損失，可做為材料選定的參考<sup>[4]</sup>。本次測試係使用往覆式磨耗試驗機，將試片固定在往覆滑臺，在下部轉動輪的表面黏上已裁切好之砂紙，每當往覆滑台滑動一次後，轉動輪也會轉動 0.9 度，當滑台往覆 400 回後，砂紙轉動輪也會旋轉一圈，此用意是為了讓試片每次的往覆動作所磨擦到之砂紙皆為新的部份，以確保每次的往覆磨耗條件都為一致的狀態。當 400 回磨耗結束後，先將磨耗部位以高壓空氣進行清潔，再進行試片重量之量測，減少之重量即為此步驟之磨耗損失量，接著將磨輪上的砂紙取下更換新的砂紙，再將試片置放回滑台繼續下一回的測試，每片試片

的磨耗試驗總共要進行五個回合，即 2000 次的磨耗量。待所有的測試試片測試結束後，再進行每一片試片的累積磨耗量計算，並將每片試片的累積磨耗量曲線進行疊圖和磨耗量的比較。

## 2.6 彎曲試驗

塗層在各種使用環境中不只承受軸向與縱向的應力，還可能承受受到橫向的力量(或扭力) 因此產生些許的變形，受到過大的彎曲變形時，塗層產生裂縫可能導致整層塗層的剝落，故須測試塗層面對各種環境下抵抗彎曲變形的能力<sup>[4]</sup>。如圖 5 所示。使用油壓機從試片背面施加一荷重使試片彎取角度接近 90 度後停止，觀察試片塗層面經過彎曲後塗層有無剝落。如圖 6 所示。

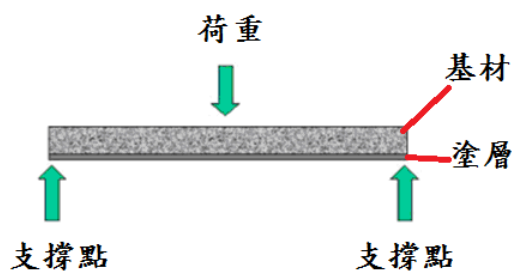


圖 5 彎曲測試方式。

Figure 5 Bend Test.

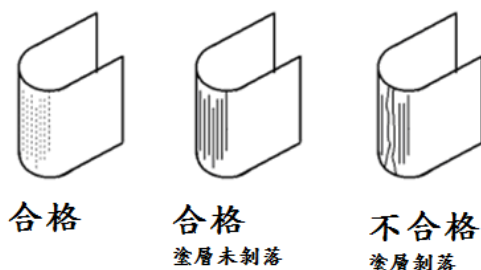


圖 6 判定方式。

Figure 6 Determination.

## 2.7 鹽霧試驗

塗層除了需具備承受往覆磨耗的耐磨耗外，也需具備長時間抵抗具有腐蝕氣氛的作業環境。本實驗為依據 JIS Z2371 鹽霧試驗所進行<sup>[4]</sup>，測試 1000 小時，符合 JIS Z2371 通過 RN8 等級測試，若塗層可以通過 1000 小時的 JIS Z2371 RN8 等級的試驗，表示此塗層可在實際使用環境中，等同承受 15 年的腐蝕環境，且能確保基材與塗層並不會發生銹蝕的問題。根據耐磨耗測試與抗彎曲測試結果篩選出 WC-Co-Cr、WC-Ni-Cr 與 WC-Co 為熔射材料進行鹽霧測試，鹽霧測試條件為：

鹽霧溶液：5%氯化鈉

實驗溫度：47°C ± 2 °C

實驗時間：1080 小時

## 2.8 拉力試驗

本實驗為依據 JIS H8402 拉力試驗所進行<sup>[4]</sup>，材料結合強度需大於 7000psi(49MPa)。用來量測熔射塗層與基材的結合能力，若熔射塗層與基材的結合力過低的話，可能會在實際使用時因受到彎曲或撞擊時產生剝落的問題，因此使用符合國際規範的測試，可用來證明塗層的穩固性。本試驗的方式採用 SUS304 母材拉力棒 如圖 7 所示，拉力棒組合當中，將熔射塗層製作在下部的熔射塗層拉力棒上，再使用拉力試驗的專用膠塗佈在熔射塗層上，並將上部的打砂拉力試棒緊壓在專用膠上，並輕輕旋轉將氣泡擠出，若在此界面中含有氣泡的話，會影響到拉力值的表現，需將固化後的拉力試棒組長鎖定在拉力試驗機上，進行拉力試驗，並觀察其拉力值，每種材料進行五次的拉力試驗。

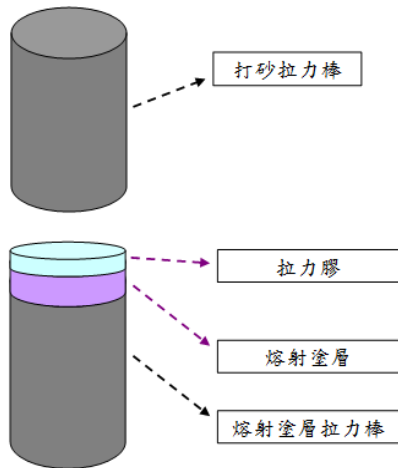


圖 7 拉力試棒。

Figure 7 Tensile test sample.

### 3. 結果與討論

#### 3.1 金相與氣孔率量測結果

Ni-Cr 粉末，根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 8 所示，熔射塗層的堆疊狀態良好，無過多的氧化物生成而造成熔射塗層間的剝離，檢測塗層孔隙率只有 0.4%，熔射塗層與基材的結合也無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等。

Ni 基粉末根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 9 所示，熔射塗層的堆疊正常，無過多的氧化物生成而造成熔射塗層間的剝離，檢測塗層孔隙率為 0.9%與同屬金屬材料的 Ni-Cr 相比差異性不大，熔射塗層與基材的結合也無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等，熔射參數並未有明顯的問題。

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 10 所示，熔射塗層的堆疊正常，無明顯的未熔顆粒發生，檢測孔隙率則稍微偏高 2.9%，但熔射塗層與基材的結合也無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 粉末根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 11 所示，熔射塗層的堆疊還屬正

常，無明顯的未熔顆粒發生，檢測孔隙率高於同屬陶瓷材料的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 為 10.1%，但熔射塗層與基材的結合無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等。

WC 混合 Co 金屬的瓷金粉末根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 12 所示，熔射塗層的堆疊屬正常，無明顯的未熔顆粒發生，檢測孔隙率很低只有 0.1%，熔射塗層與基材的結合無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等。

WC 混合 Co 與 Cr 金屬的瓷金粉末根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 13 所示，熔射塗層的堆疊屬正常，無明顯的未熔顆粒發生，檢測孔隙率與同屬瓷金材料的 WC-Co 則相同為 0.1%，熔射塗層與基材的結合無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等。

WC 混合 Ni 與 Cr 金屬的瓷金粉末根據其試片的斷面金相組織觀察結果，如圖 14 所示，熔射塗層的堆疊屬正常，無明顯的未熔顆粒發生，目視孔隙率與同屬瓷金材料的 WC-Co 及 WC-Co-Cr 無明顯差異為 0.2%，熔射塗層與基材的結合無明顯的問題發生，例如剝離的狀況等。

材料	200x	氣孔率：0.4%
Ni-Cr		

圖 8 Ni-Cr 熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 8 Ni-Cr Thermal spray coating Metallographic and porosity.

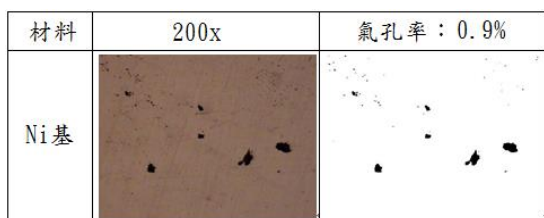


圖 9 Ni 基熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 9 Nickel Thermal spray coating  
Metallographic and porosity.



圖 12 WC-Co 熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 12 WC-Co Thermal spray coating  
Metallographic and porosity.

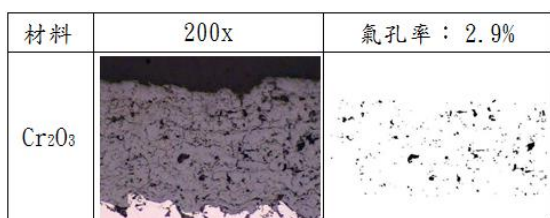


圖 10 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 10 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Thermal spray coating  
Metallographic and porosity.



圖 13 WC-Co-Cr 熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 13 WC-Co-Cr Thermal spray coating  
Metallographic and porosity.

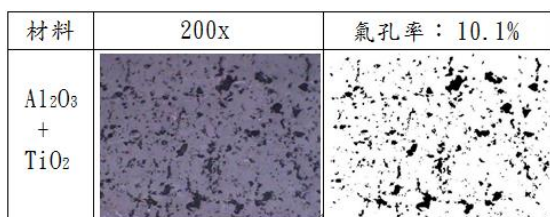


圖 11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Thermal spray coating  
Metallographic and porosity.

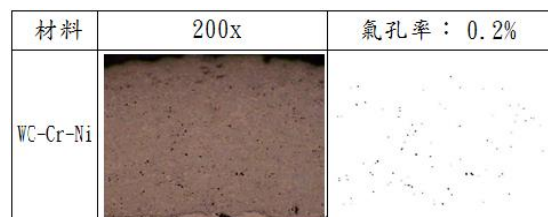


圖 14 WC-Cr-Ni 熔射塗層斷面金相&氣孔率。

Figure 14 WC-Cr-Ni Thermal spray coating  
Metallographic and porosity.

### 3.2 塗層硬度量測結果

各試片微小硬度量測值如表 1 所示，硬度高低排列為 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > WC-Co > WC-Cr-Ni > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> > WC-Co-Cr > Ni-Cr > Ni 基，但前中段的硬度值相差不大，其為陶瓷材料與瓷金材料，而最

低的兩種皆為金屬材料，因此與前中段材料的硬度值有較明顯的差異。依此部份測試結果，若要選擇較適合在本試驗中使用的材料，應以陶瓷系的  $Al_2O_3-TiO_2$  和  $Cr_2O_3$  以及瓷金系的 WC-Co、WC-Cr-Ni、WC-Co-Cr 等材料較為適當。

表 1 維克氏硬度結果簡表。

Table1 Vickers hardness test Results.

塗層材料	Hv 最小值	Hv 最大值	Hv 平均值
$Cr_2O_3$	1443	1637	1517
WC-Co	1130	1400	1274
WC-Cr-Ni	963	1320	1144
$Al_2O_3-TiO_2$	871	1393	1138
WC-Co-Cr	719	1328	997
Ni-Cr	362	426	411
Ni 基	333	437	386

Hv 0.1

### 3.3 塗層磨耗測試結果

磨耗試驗結果如圖 15 所示，而此次的磨耗測試結果中，以 WC-Co、WC-Cr-Ni、WC-Co-Cr 和  $Cr_2O_3$  這四種的試片的磨耗表現最佳，其 2000 回的磨耗重量累積損失量皆在 0.02 g 以下，而表現最差的為 Ni-Cr 及 Ni 基，其 2000 回的磨耗量均大於 0.16 g 與磨耗量最低的試片有明顯的差距，而  $Al_2O_3-TiO_2$  的磨耗量則介於之間，因此若以磨耗試驗結果的觀點來判斷，WC-Co、WC-Cr-Ni、WC-Co-Cr 和  $Cr_2O_3$  此四種材料為最佳選擇。

### 3.4 彎曲試驗結果

彎曲試驗結果如下圖 16~圖 22 所示，經過彎曲測試後陶瓷部分塗層皆有明顯的塗層剝離，WC-Co、WC-Co-Cr 與 WC-Cr-Ni 皆無剝離情況。

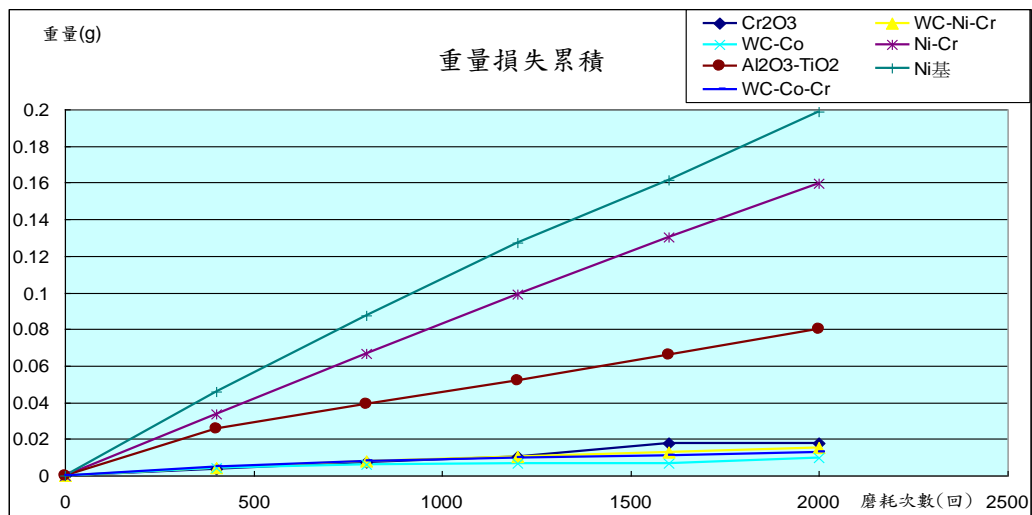


圖 15 磨耗試驗結果。

Figure 15 Wearing Test Results.





圖 16 Ni-Cr 塗層彎曲測試結果。  
Figure 16 Ni-Cr Thermal spray coating Bend Test Results.



圖 19 WC-Co  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  塗層彎曲測試結果。  
Figure 19 WC-Co  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Thermal spray coating Bend Test Results.

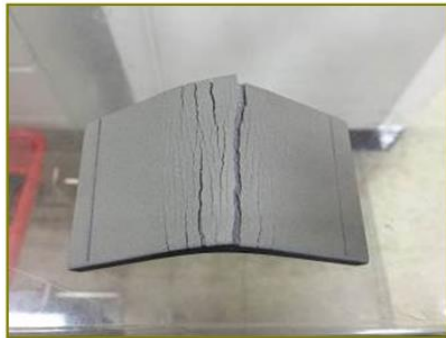


圖 17 Ni 基塗層彎曲測試結果。  
Figure 17 Ni Thermal spray coating Bend Test Results.



圖 20 WC-Co-Cr 塗層彎曲測試結果。  
Figure 20 WC-Co-Cr Thermal spray coating Bend Test Results.



圖 18  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  塗層彎曲測試結果。  
Figure 18  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  Thermal spray coating Bend Test Results.



圖 21 WC-Cr-Ni 塗層彎曲測試結果。  
Figure 21 WC-Cr-Ni Thermal spray coating Bend Test Results.



圖 22  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  塗層彎曲測試結果。  
Figure 22  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Thermal spray coating Bend Test Results

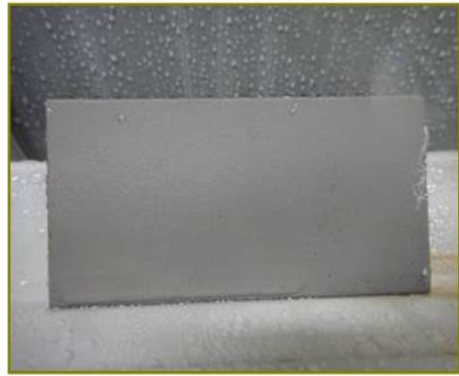


圖 24 WC-Ni-Cr 鹽霧試驗結果。  
Figure 24 WC-Ni-Cr Thermal spray coating Salt spray test Results

### 3.5 鹽霧測試結果

經過 1080 小時的測試，WC-Co-Cr 與 WC-Ni-Cr 的試片皆出現小鏽斑，且 WC-Co-Cr 的情況較 WC-Ni-Cr 嚴重，而 WC-Co 出現較大面積的生鏽，如下圖 23~圖 25 所示。

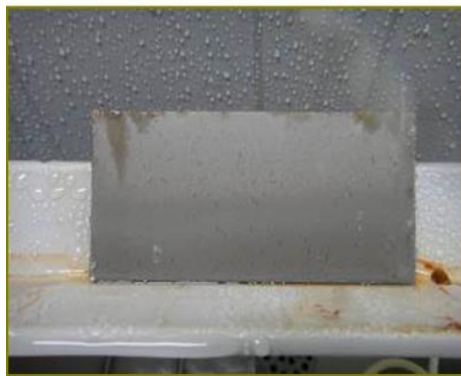


圖 23 WC-Co-Cr 鹽霧試驗結果。  
Figure 23 WC-Co-Cr Thermal spray coating Salt spray test Results

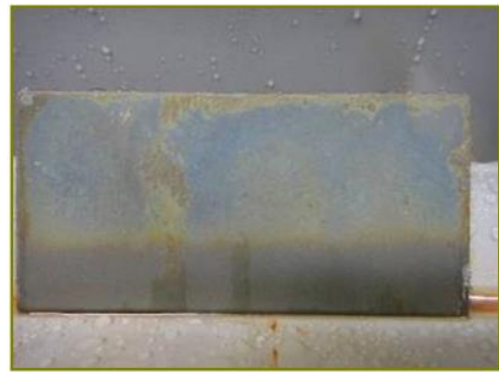


圖 25 WC-Co 鹽霧試驗結果。  
Figure 25 WC-Co Thermal spray coating Salt spray test Results

### 3.6 拉力試驗結果

拉力值結果如表 2 所示，金屬系列的 Ni 基和 Ni-Cr 兩種塗層擁有最高的拉力值，而瓷金系列的 WC-Co、WC-Ni-Cr 以及 WC-Co-Cr 三種塗層次之，而陶瓷系列的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  最低。

表 2 拉力值測試結果。

Table2 Tensile test Results

Ni-Cr	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	79.175	67.777	64.396	74.664	65.429
Ni基	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	80.582	80.316	80.016	77.52	70.464
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	28.345	27.88	26.366	29.53	27.905
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	25.267	27.264	23.235	26.248	27.249
WC-Co	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	61.482	72.478	69.214	70.013	63.031
WC-Co-Cr	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	59.663	67.48	63.662	63.138	50.538
WC-Ni-Cr	1	2	3	4	5
拉力值(Mpa)	68.009	66.586	72.046	66.691	78.48

#### 4. 結論

綜合各材料彎曲、鹽霧、拉力及磨耗測試比較，彎曲試驗結果，經過彎曲測試後陶瓷部分塗層皆有明顯的塗層剝離，WC-Co、WC-Ni-Cr 與 WC-Co-Cr 皆無剝離情況。鹽霧試驗結果，經過 1080 小時的測試，WC-Co-Cr 與 WC-Ni-Cr 的試片皆出現小鏽斑，且 WC-Co-Cr 的情況較 WC-Ni-Cr 嚴重，而 WC-Co 出現較大面積的生鏽，因此以 WC-Co-Cr 塗層的效果最好。拉力值測試結果瓷金系列與金屬系列的材料均大於 7000 psi (49 MPa)。磨耗試驗結果，瓷金系列的熔射在耐磨耗的能力則優於其他塗層。綜合各項測試條件結果如表 3 所示，如需使用在耐磨耗、抗彎曲與腐蝕環境下以 WC-Ni-Cr 塗層為最佳選擇。

表 3 各塗層綜合能力結果。

Table3 Property of Thermal spray coating.

塗層材料	硬度	耐磨耗	抗彎曲	耐腐蝕
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	◎	◎	○	-
WC-Co	◎	◎	◎	X
WC-Ni-Cr	◎	◎	◎	◎
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiO <sub>2</sub>	○	○	○	-
WC-Co-Cr	○	◎	◎	○
Ni-Cr	X	X	X	-
Ni 基	X	X	X	-
◎ 優 ○ 尚可 X 不佳				

#### 參考文獻

- [1] "An introduction to thermal spray.", Metco, Sulzer., no 5 (2012), pp.1-24.
- [2] Metco, Sulzer, in: Thermal spray materials guide. ((US) Inc., Westbury, NY, 2012).
- [3] 蓮井淳, in: "溶射工学.", 產報出版(日本, 東京, 第4章, 1996)。
- [4] "JIS ハンドブック金属表面处理.", 日本規格協会., JIS H8502, めっきの耐食性試験方法, (2008), pp.462-494.