

## 工具鋼與碳化鎢硬焊衝頭研究 Investigation of Brazed Punch using Tool Steels and Tungsten Carbide

楊宗座<sup>1\*</sup>、邱六合<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大同大學材料工程學系

\*E-mail: ylsh5566861@gmail.com

科技部計畫編號MOST 107-2622-E-036-002-CC3

### 摘要

本研究利用 BNi-2 鎳基硬焊填料進行工具鋼與碳化鎢結合衝頭之真空硬焊及熱處理複合製程，工具鋼包含 AISI S7 耐震工具鋼以及 JIS SKD61 熱作模具鋼，碳化鎢 Co 含量有兩種。設定實驗熱處理條件使工具鋼熱處理以及硬焊接合在一爐次完成，實驗試片針對 S7 及 SKD61 設計 1020°C 及 1050°C 分別持溫 5~15 分鐘完成硬焊後，以 2 kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> 氣淬，冷卻後並於 300°C 回火 1 小時。結構分析包含 OM、SEM、EPMA，接合性能檢測包含硬度及剪切強度。研究結果顯示 S7 於真空爐 1050°C 持溫 5-10 分鐘經 N<sub>2</sub> 氣淬，300°C 回火 1 小時之硬度可達 56.5HRC，且在微觀組織可以看到填料層與接合母材交界有良好冶金結合。將接合件放入自製剪切模具以萬能試驗機進行剪切強度測試，結果顯示隨著硬焊時間增加以及碳化鎢選用之 Co 含量越多，則剪切強度越高(>360MPa)。直徑 7mm S7 工具鋼棒，1020°C 持溫 10 分鐘之衝擊值接近 142J，持溫時間為 15 分鐘時衝擊值也只下降了 15J，表示接合圓棒之 S7 桿身在高硬度仍具有韌性。真空硬焊衝頭之 KG5、ST7 碳化鎢，在荷重 92N 進行磨耗實驗，經 10,000 轉之重量損失皆小於 1mg。本實驗成功接合碳化鎢與工具鋼，同時達到基材調質之效果，且隨硬焊時間增加以及選用碳化鎢 Co 含量越高而使接合強度提升，由 228MPa 提升至 447MPa。

**關鍵詞：**碳化鎢，真空硬焊，工具鋼，活塞桿

### Abstract

In this study, BNi-2 nickel-based filler has been used for accomplishing the vacuum brazing and heat treatment of the tool steel and tungsten carbide brazed punch. The tool steels include AISI S7 shock resisting tool steel and JIS SKD61 hot work die steel. Co content of the tungsten carbide has two kinds. The heat treatment conditions were set to complete the tool steel tempering and brazing in one furnace. The brazing were designed at 1020°C and 1050°C for 5 to 15 minutes respectively. After brazing, the brazed specimen were decrease to 940°C and 2 kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub> gas was used to quench. Structural analysis includes OM, SEM, EPMA, and hardness, Shear test and strength are also evaluated. The research results show that S7 specimen is quenched by N<sub>2</sub> gas at a temperature of 1050°C in vacuum furnace for 5-10 minutes, and the hardness of tempering at 300°C for 1 hour can reach 56.5HRC. The microstructure of the filler layer and tool steel can be seen the good metallurgical bonding reaction. The brazed specimen was placed in a self-made shearing die and tested by universal testing machine for shear strength. The results show that the higher brazing time and the higher Co element content of the tungsten carbide, it caused the higher shear strength (>360MPa). Impact value of S7 specimens of 7mm diameter at 1020°C for 10 minutes is 142J. The impact value are decreased

to 15J when the brazing time was 15 minutes. It means that S7 tool steel is still tough at high hardness. The vacuum brazed punch KG5, ST7 tungsten carbide was subjected to a wear test at a load of 92N, and the weight loss after 10,000 revolution was less than 1mg. In this study, tungsten carbide and tool steel were successfully vacuum brazed and heat treated. The bonding strength increased from 228MPa to 447MPa with the increasing of brazing time and the higher Co element content of the tungsten carbide.

**Keyword:** Tungsten carbide, Vacuum brazing, Tool steel, Piston rod

## 1. 前言

連續衝模衝頭、氣動釘槍撞針及火藥釘槍活塞桿等產品，此類產品的前端需要高耐磨性，桿身也需要一定的強度及韌性組合，在高端市場上對此類產品要求極度嚴苛。碳化鎢合金是將鈷(Co)與碳化鎢(WC)顆粒，置於 1300°C 至 1500°C 之真空爐內，進行液相燒結，使 Co 熔化將碳化鎢顆粒定位包覆所產生的兩相複合材料燒結碳化物。其中碳化鎢顆粒提供高硬度及耐磨耗性；而鈷主要用來作為碳化鎢顆粒的黏結相，並提供了韌化的功能，形成了兼具硬度與韌性的複合材料。其在室溫耐磨及高溫耐磨表現皆優於高速鋼，因此造成強力的取代作用。碳化鎢可以製造出各類零件，而這些零件將擔負著最艱鉅的耐磨損任務，因此為了能應用在這些艱鉅的環境中，常常會選用磨耗性佳、耐高溫、耐腐蝕材料來使用，例如：鎢鋼材料，壽命可增加 6~10 倍，大大降低生產成本[1-2]。

在使用碳化鎢作為硬面耐磨耗性材料時，須用一種較軟且韌性足夠的金屬或合金黏接在零件表面[3-4]，黏結金屬常見的有 Fe、Co 和 Ni，這三種元素在週期表上位置相鄰，故性質上有很多相似之處，這幾種元素不僅韌性好，且其與碳化鎢的潤濕角接近於 0°，形成極佳的潤濕性，且在熔融狀態下能夠透過毛細管作用充分滲入碳化鎢中。而根據 Ogburn 等人[5]的研究指出，碳化鎢的接合劑以 Co 為最佳，原因是由於 Co 在液相燒結時對 WC 的潤濕性佳，可利用毛細現象將 WC 急速緻密化，而 Ni、Fe 則次之。而在硬面材料中使用鎳和鈷主要是為了碳化鎢硬面材料的耐蝕性和耐高溫性質。

Uzkut 等人實驗 WC-Co/L-CuZnNi10/SAE 1040，碳化鎢中的 Co 元素會擴散到接合層，隨硬焊持溫時間增加而其擴散層面積愈大，所得到之接合效果越好[6]。張舫誠等人進行 WC-Co/Cu-9Sn /KDA1 硬焊接合，使用銅基合金對接碳化鎢與 KDA1 工具鋼，所得到之剪切強度值為 280MPa[7]。

德製活塞桿分析實例，A 公司提供德製活塞桿給我們分析，由倒推法去分析德製活塞桿之製程以及用料。故使用 EMPA 電子微探儀之點分析分析活塞桿母材、焊料和碳化鎢用料，以及使用 Linescan 分析焊道元素分佈情況。另外測試活塞桿表面硬度以及衝擊試驗值來參考熱處理製程。EMPA 電子微探儀之點分析分析焊料，其成份大部分符合 BNi-2 的成分規範，

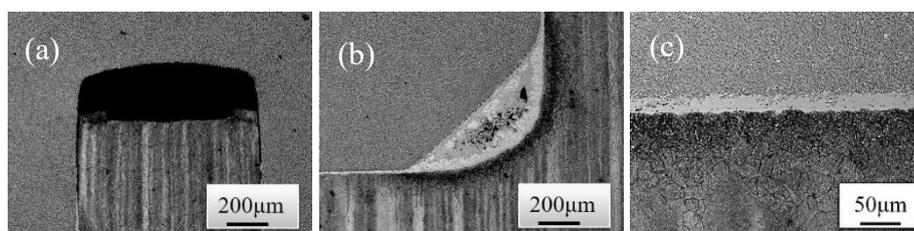


圖1-1 德製活塞桿金相圖(a)前端放大倍率50倍 (b)全貌放大倍率50倍 (c)碳化鎢、填料以及工具鋼之金相放大倍率500倍

圓棒成品之平均硬度為 58HRC。直徑 7mm 圓棒的衝擊試驗得出結果平均為 105J。由硬度測試以及衝擊測試結果，說明德製活塞桿母材在經過硬焊完畢後經沃斯田鐵化一段時間並且淬冷至室溫後，回火溫度勢必低於 300°C 且回火時間長，才能夠有如此高硬度且韌性值高。

故本實驗將著重於 WC-Co/BNi-2/S7-SKD61 之硬焊接合研究，碳化鎢則使用 KG5(12wt% Co)以及 ST7(20wt% Co)做為主要參數，故加以探討增加碳化鎢 Co 含量對於硬焊結果之影響，設定實驗熱處理條件使工具鋼熱處理以及硬焊接合在一爐次完成。

## 2. 實驗步驟

### 2.1 材料及樣品製備

實驗用料為 KG5(12wt%Co)以及 ST7(20wt%Co)碳化鎢，對接母材分別為 AISI S7 耐震工具鋼以及 JIS SKD61 熱作模具鋼，使用 OXFORD 公司之 Foundry-Master X' Pert 光譜分光儀 (Optical Emission Spectrometer, OES) 分析用料成分，如表 2-1，使用填料為 BNi-2 鎳基合金填料，成分為 15wt%Cr，3.5 wt%B，4.5 wt%Si，2.6 wt%Fe，0.05 wt%C、Al、Ti，74.25 wt% Ni。

表 2-1 工具鋼之成分表

	C 碳	Si 矽	Mn 錳	P 磷	S 硫	Cr 鉻	Mo 鉬	V 釩	Ni+Cu 鎳+銅
S7 原材	0.46	0.23	0.60	<0.0010	<0.0010	3.01	1.42	0.17	0.21
S7 成分規範	0.45-0.55	0.20-1.00	0.20-0.90	MAX 0.003	MAX 0.003	3.00-6.50	1.30-1.80	MAX 0.35	MAX 0.75
	C 碳	Si 矽	Mn 錳	P 磷	S 硫	Cr 鉻	Mo 鉬	V 釩	-
SKD61 原材	0.38	1.09	0.30	<0.0001	<0.0001	5.12	1.32	1.17	-
SKD61 成分規範	0.35-0.42	0.8-1.20	0.25-0.50	MAX 0.003	MAX 0.003	4.80-5.50	1.00-1.50	0.80-1.20	-

### 2.2 真空硬焊接合

#### 2.2.1 硬焊前母材之處理

本實驗所採用之母材於硬焊前須經以下步驟處理，以確保實驗結果及品質。首先將碳化鎢以 #100 號砂紙研磨，並且以丙酮浸泡放入超音波震盪機清洗 10 分鐘，確保徹底去除表面髒污及水份。S7 耐震工具鋼則以 #100、#240、#400 號砂紙進行研磨，確保接合平面平整且無黑皮氧化層，接續一樣以丙酮浸泡放入超音波震盪機清洗 10 分鐘，使表面無髒污與水份。

#### 2.2.2 硬焊試片製備

本實驗採用堆疊法，如圖 2-1 所示。為了使碳化鎢確實固定於中心點，會先在工具鋼母材上定個中心點，再將焊料塗滿中間區域後把碳化鎢黏著固定於中心，再將整個接合件置入真空爐中進行真空硬焊。

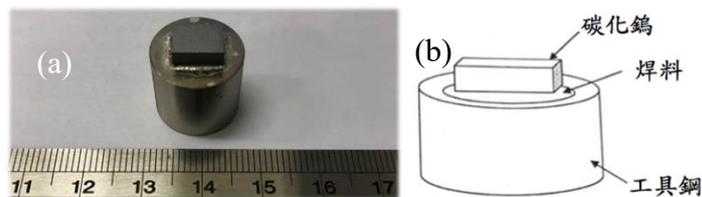


圖2-1 (a)硬焊完成實務照 (b)硬焊示意圖

### 2.2.3 真空硬焊接合

本實驗為了精準控制加熱溫度及加熱時間，採用爐式真空硬焊法(Furnace Vacuum Brazing)，使用臻龍(Vac Long Vacuum Industry Co.)公司所出產的雙腔式真空熱處理爐來作為硬焊爐具，其外觀及結構示意圖如圖2-2，(a)所示。熱處理製程參數如圖2-2，(b)所示，使用兩階段升溫以及持溫平台(500°C、800°C)來確保試片溫度內外達到相同溫度，於800°C前升溫速率為10°C/min；500°C及800°C持溫15分鐘，接著提高升溫速率13°C/min至硬焊溫度後分別持溫5-15分鐘後，以2 kg/cm<sup>2</sup> N<sub>2</sub>氣淬，冷卻後並於300°C回火1小時。

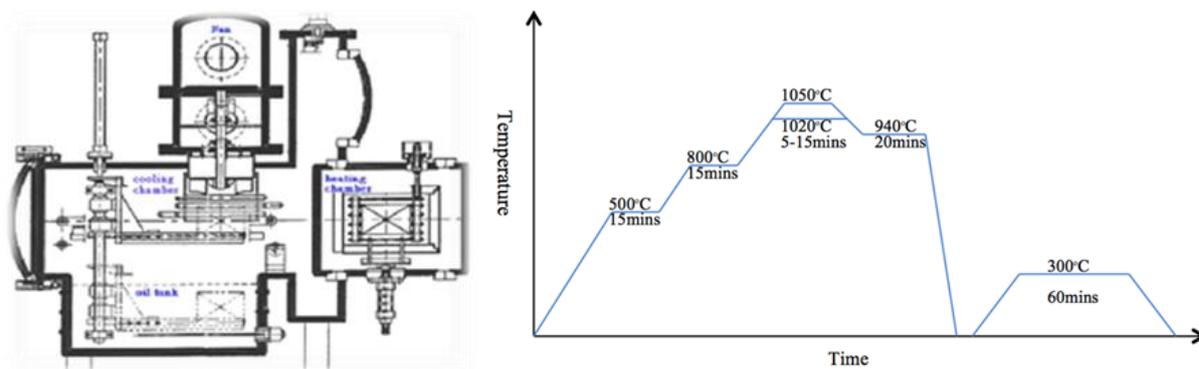


圖2-2 (a)雙腔式真空熱處理爐結構示意圖 (b)熱處理製程參數

### 2.3 硬度分析

工具鋼硬度檢測使用Matsuzawa® Rockwell type洛氏硬度機HRC，以及焊道硬度檢測使用Vickers微氏硬度機測試。

### 2.4 結構分析

鑲埋後以鑽石拋光盤依序由#80、#120、#240、#600、#1200研磨，再以0.05μm之Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>氧化鋁粉進行拋光，使用3%的硝酸酒精進行腐蝕，再以OLYMPUS-BX60M型光學顯微鏡觀察微觀組織。使用FESEM觀測剪切測試以及磨耗測試之微觀二次電子影像圖。

### 2.5 電子微探儀(EPMA)分析

以場發電子微探儀(FE-Electron Probe X-ray Micro analyzer, EPMA)作為硬焊接合件之界面定量分析及元素分佈。操作條件為加速電壓15KV，試片電流10<sup>-7</sup>~10<sup>-12</sup>A，進行點分析及線掃描分析(Line scan)。

### 2.6 衝擊試驗

依照ASTM-E23衝擊試驗之規範，使用SATEC之SI-1D3衝擊試驗機(單擺式)，以附加荷重及擺幅之最大衝擊值為162.7JOULES，單位刻度0.50JOULES標準進行衝擊。試片製備採用圓棒直徑7mm長度55mm，以進行衝擊試驗。

## 2.7 剪切強度測試

目前測試接合強度並沒有一定的規範，因此測量方法多樣且不盡相同。常使用的方法有三點彎曲、四點彎曲法及拉伸試驗法等。由於本實驗所使用之母材為碳化鎢屬於脆性材料，並不適用以上幾種方法。因此本實驗設計之模具，以萬能試驗機進行單剪式強度測試，其定速度 1mm/min 壓力進行。模具所使用材料為 SKD11 冷作工具鋼，並以淬火回火熱處理來增加強度，模具硬度可達 60HRC。

## 2.8 磨耗測試

採用 PLINT 公司 TE53/842 型磨耗試驗機在無潤滑的情況下進行試驗，其對磨材之表面經 HVOF 熱噴覆噴上一層厚度約 4mm 厚之 WC-Co 硬質層，將焊接完之試片裁切成 12.7×12.7×9.7mm，以便固定於磨耗機上方，如圖 2-3 所示。磨耗試驗之條件為室溫下施以荷重 92N，轉速為 200rpm，進行 10000 轉之磨耗試驗。藉由摩擦力及正向力，求出摩擦係數。每 2000 轉取下試片進行秤重，記錄其重量損失，求出重量損失對轉圈數曲線圖。

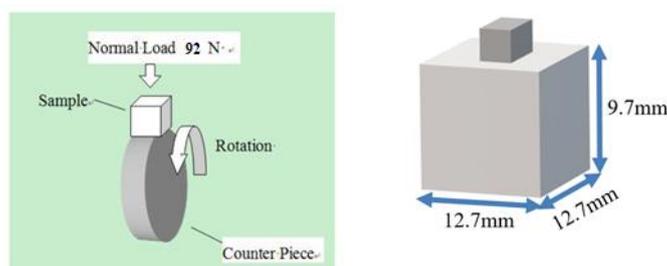


圖 2-3 磨耗試驗示意圖(左)，磨耗試片裁切製備(右)

## 3. 結果與討論

### 3.1 硬度分析

使用洛氏硬度機檢測 S7 工具鋼經 1020°C 製程以及 1050°C 製程後之硬度，如表 3-1 及表 3-2 所示，原始鋼材硬度為 19HRC，經真空硬焊完成後氣淬硬度值達 59HRC，但隨著硬焊持溫時間越長其相同回火條件(300°C, 1hr)之硬度稍微下降，其原因為硬焊溫度對於 S7 工具鋼之沃斯田體化溫度相較於過高，而導致工具鋼內部晶粒可能成長而導致影響機械性值。

表 3-1 S7 工具鋼 1020°C 製程硬度實測(HRC)

Hardness of S7 tool specimen brazed at 1020°C (HRC)			
Brazing Time (min)	Received	Quenched	Tempered 300°C
5	19	59.5	56.5
10	19	59	55.5
15	19	59	55

表 3-2 S7 工具鋼 1050°C 製程硬度實測(HRC)

Hardness of S7 tool specimen brazed at 1050°C (HRC)			
Brazing Time (min)	Received	Quenched	Tempered 300°C
5	19	60	56
10	19	59.5	55
15	19	59	54.5

### 3.2 結構分析

在金相觀察中可以發現，碳化鎢、填料以及工具鋼皆具有良好的冶金接合現象，如圖3-1，(a、c)所示；另外可以觀察到焊道與工具鋼之金相圖中有出現固溶體相，使用維氏硬度檢測其硬度平均為850HV<sub>0.1</sub>，為了探討其介金屬相對於硬焊接合之影響，會使用電子微探儀做定量分析，並且於剪切斷面探討其影響。

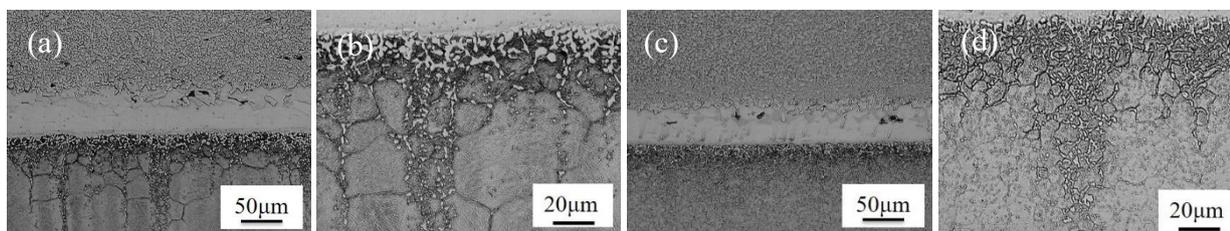


圖3-1 真空硬焊後之工件金相圖 (a)KG5/BNi-2/S7接合全貌 (b)KG5/BNi-2/S7焊道與工具鋼之金相圖 (c) KG5/BNi-2/SKD61接合全貌(d) KG5/BNi-2/SKD61焊道與工具鋼之金相圖

### 3.3 電子微探儀(EPMA)分析

由FESEM-EDX半定量檢測出之元素為基礎，再以FE-EPMA做定量的檢測。表3-3，工具鋼中的介金屬相之EPMA定量分析表，其中Point 1、Point 2以及Point 3檢測較靠近焊道之固溶體相至母材心部之固溶體相，可以發現(Point 1、Point 2)其成分組成為Fe(89.71wt%、92.08wt%)、Cr(5.45wt%、3.92wt%)、Mo(2.07wt%、2.06wt%)、Ni(1.16wt%、0.48wt%)，其餘元素Si、V、Mn、Cu成分含量不到1wt%，

表3-3 工具鋼中的介金屬相之EPMA定量分析表

	Fe	Si	Cr	V	Mo	Mn	Ni	Cu
Point 1	89.71	0.04	5.45	0.38	2.07	0.71	1.16	0.46
Point 2	92.08	0.10	3.92	0.20	2.06	0.69	0.48	0.39
Point 3	95.09	0.46	2.56	0.13	0.58	0.67	0.30	0.21

由圖3-2，(a)KG5/BNi-2/S7接合件之EPMA線分析可以發現，BNi-2填料中的硼B元素、鉻Cr元素往碳化鎢以及鋼材表層擴散；矽Si、鎳Ni元素則往碳化鎢擴散約50µm且與B、Cr元素形成新的固溶體相(圓形球狀)，而碳化鎢中的Co元素往填料中擴散。圖3-2，(b)ST7/BNi-2/S7接合件之EPMA線分析可以發現，硼B、鉻Cr、矽Si、鎳Ni元素往碳化鎢端擴散約20µm，且發現大多元素依舊存留在BNi-2填料中且無太多擴散現象，圖3-2，(b)線分析，可以發現靠近焊道之鎢元素密集，而導致碳化鎢中的Co擴散至填料後，其他元素擴散進碳化鎢較不顯著。

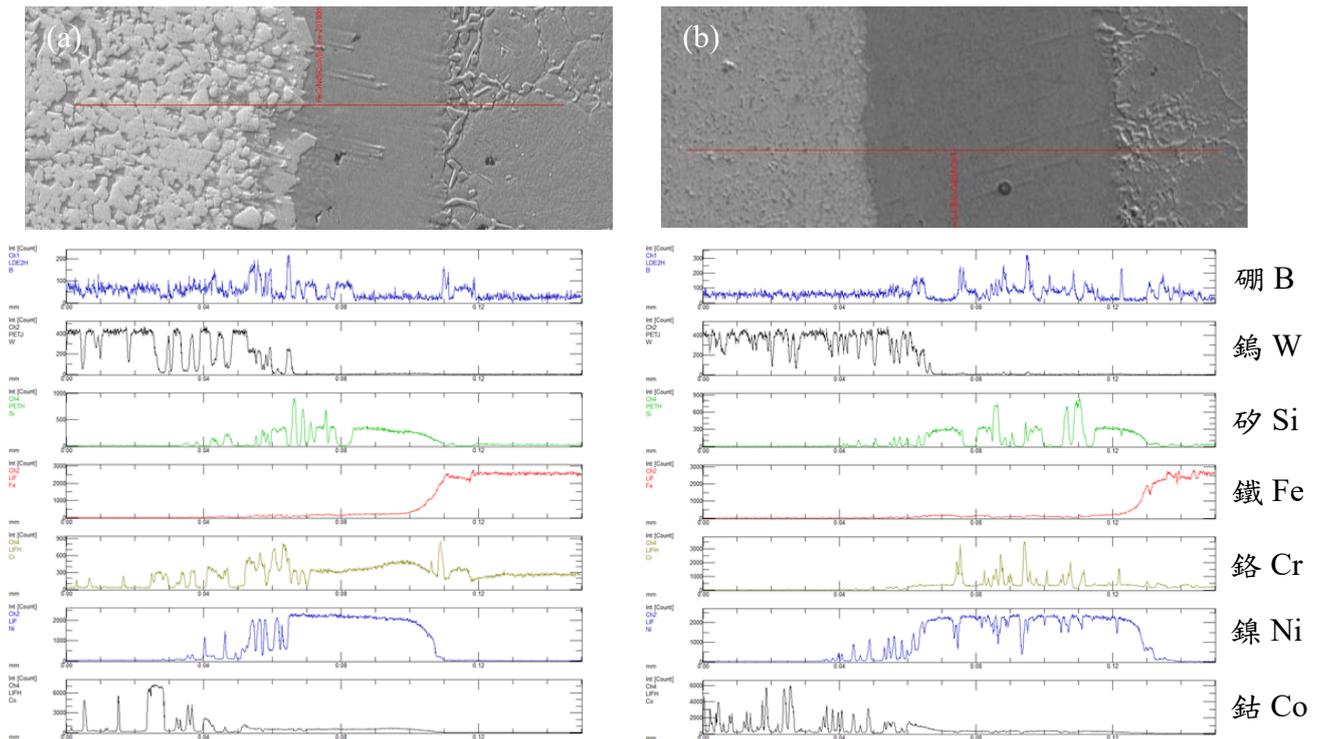


圖3-2 (a)KG5/BNi-2/S7接合件之EPMA線分析 (b) ST7/BNi-2/S7接合件之EPMA線分析

### 3.4 衝擊試驗

圖3-3為不同製程下之直徑7mm之S7工具鋼試片衝擊韌性值比較，其中20-5、20-10、20-15代表為硬焊溫度1020°C分別持溫5、10、15分鐘下，其平均衝擊值為142J、144J以及135J；另外50-5、50-10、50-15為硬焊溫度1050°C分別持溫5、10、15分鐘下，平均衝擊值為140J、150J以及133J，在兩種溫度製程下皆可以觀察到在10分鐘持溫之下其衝擊值都較另外兩種高，且持溫15分鐘下之衝擊值最低。另外940條件為S7工具鋼做沃斯體化溫度940°C下氣淬後經300°C回火，其平均衝擊值為157J。由於1020°C製程以及1050°C製程所使用之真空爐不同，導致其氣淬及回火後之硬度值有些微差異，進而影響衝擊值的表現。

### 3.5 剪切強度測試

由圖3-4，(a)可以發現1050°C、1020°C硬焊溫度兩種不同製程條件，以及碳化鎢種類不同的情況下之剪切強度，先以同種類碳化鎢相比(KG5/BNi-2/S7 1050)、(KG5/BNi-2/S7 1020)，在硬焊時間5分鐘時，其剪切強度分別為228MPa以及270MPa；硬焊時間10分鐘時，剪切強度分別為257MPa以及283MPa，隨著硬焊時間拉長至15分鐘時，剪切強度分別為288MPa以及298MPa，在相同碳化鎢的條件下1020°C製程之剪切強度皆大於1050°C製程。

(ST7/BNi-2/S7 1050)與(ST7/BNi-2/S7 1020)在硬焊時間5分鐘時，剪切強度分別為282MPa以及288MPa，硬焊時間10分鐘時，剪切強度分別為311MPa以及326MPa；隨著硬焊時間拉長至15分鐘時，剪切強度分別為338MPa以及447MPa。當剪切强度高於310MPa後由剪切面可以觀察到不一樣的破裂情形，在破裂面有一層亮白層，使用FESEM做表面微觀組織的觀察。

對接母材為SKD61工具鋼之剪切強度如圖3-5，(b) KG5、ST7/BNi-2/SKD61於1050製程下之剪切強度圖，隨著硬焊時間增加其剪切強度越高，且在碳化鎢的選用上，ST7碳化鎢之剪切強度皆大於KG5碳化鎢，硬焊時間15分鐘時剪切強度為337MPa。

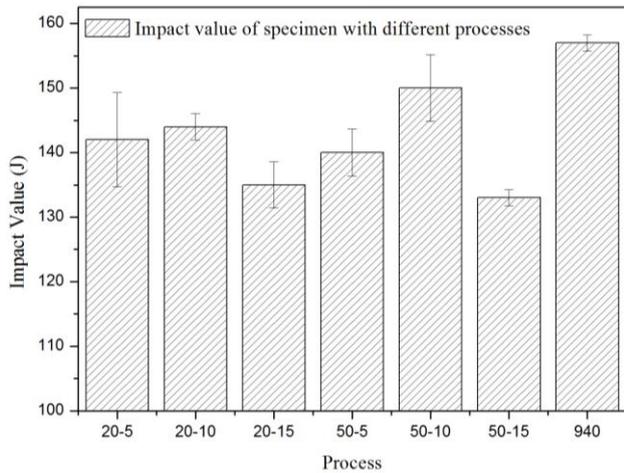


圖3-3 S7工具鋼不同製程之衝擊值(J)



圖3-4 剪切斷面實務照

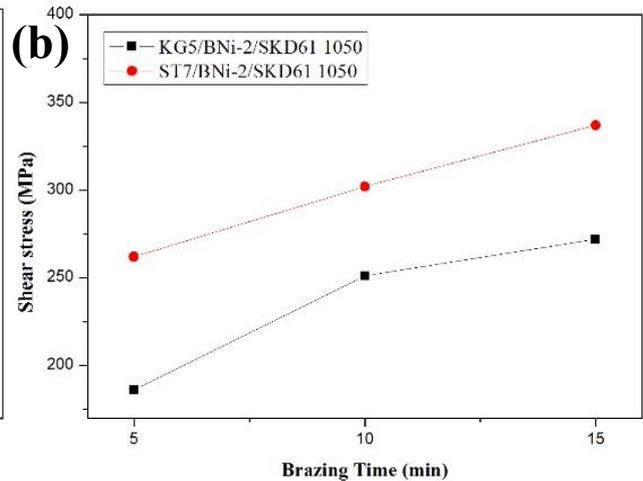
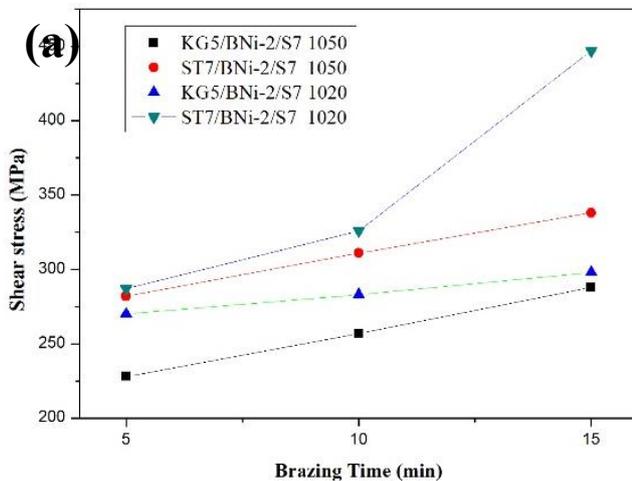


圖3-5 (a)KG5、ST7/BNi-2/S7兩種製程下之剪切強度圖 (b) KG5、ST7/BNi-2/SKD61於1050製程下之剪切強度圖

### 3.6 磨耗測試

本實驗之磨耗測試主要為探討兩種碳化鎢經過1020以及1050製程後，對於其磨耗行為有何影響。兩種碳化鎢經不同製程後以HVOF對磨，於荷重92N下，其摩擦係數則介於0.35~0.45之間，如圖3-6。另外每2000轉取下試片進行秤重，記錄其重量損失，如圖3-7，可以發現KG5碳化鎢於兩種製程下之重量損失皆小於0.1mg，且於6000轉以下有黏著磨耗之現象；ST7碳化鎢之磨耗重量損失隨圈數上升而提高，但重量損失極小皆小於1mg。另外於磨痕內中心發現一個光滑幾乎無磨痕，類似拋光之現象。

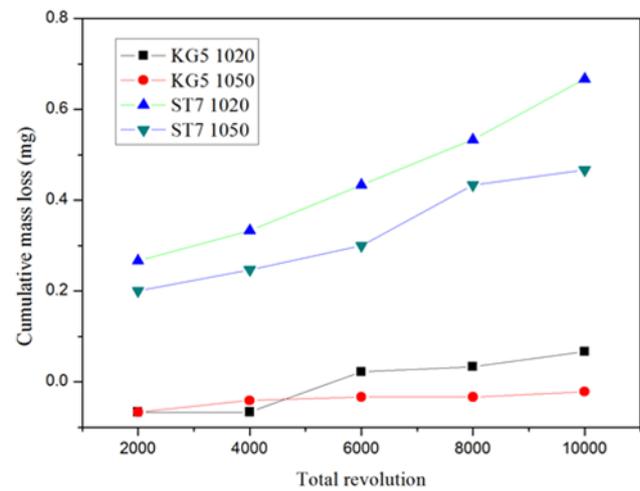
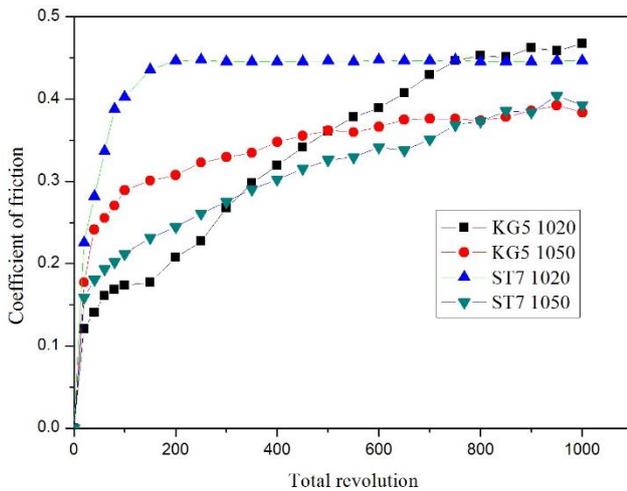


圖3-6 KG5、ST7於兩種製程下之磨擦係數圖 圖3-7 KG5、ST7於兩種條件下之磨耗重量損失

### 3.7 電子顯微鏡FESEM分析

剪切強度測試之斷面進行FESEM觀察，發現當剪切強度小於350MPa時，剪切時皆為焊道破裂，如圖3-7之(a)，另外也發現有顆粒狀的物體，經由Mapping元素地圖分析發現主要成分為Si與O，且散佈於整個斷裂面。當剪切強度大於350MPa時斷面如圖3-4右邊，在斷裂面可以觀察到明顯亮面，於FESEM二次電子影響觀察如圖3-7之(b)，右邊為填料破裂層；左邊為工具鋼亮面區，(c)另外放大3000倍率可以觀察到工具鋼亮面區表面呈現dimple狀，此判斷可能為工具鋼之表層固溶體相剪切時脫離而留下之孔洞(3 $\mu$ m)。

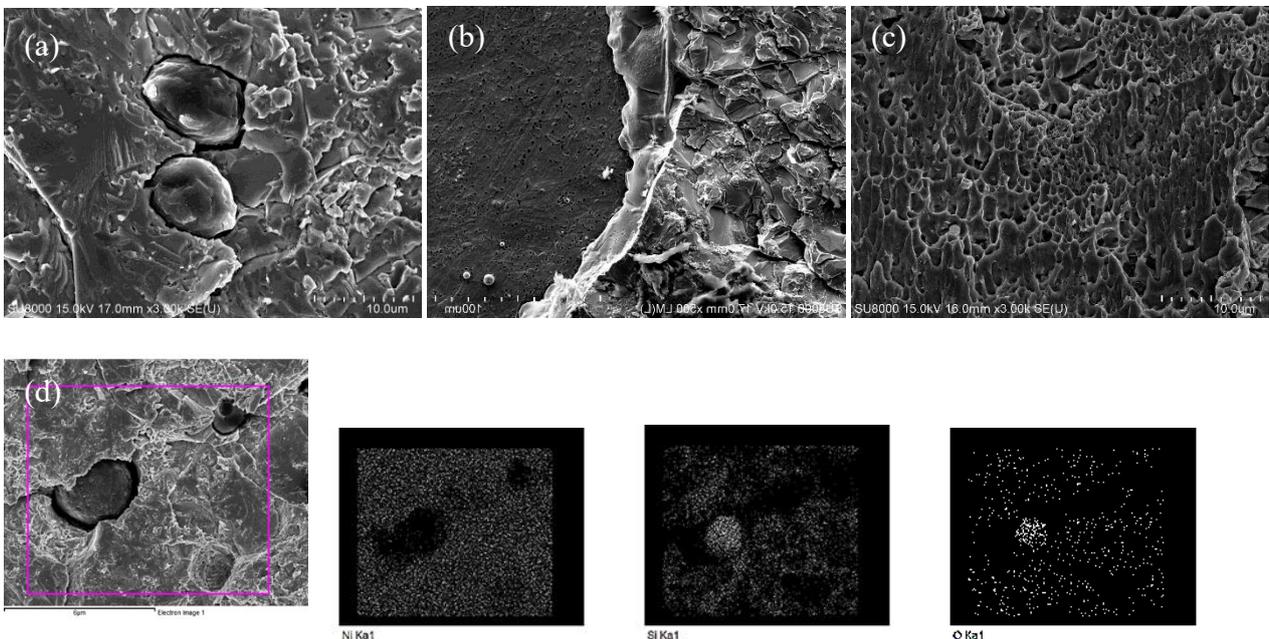


圖3-7 (a)KG5剪切斷裂面觀察 (b)ST7剪切斷面觀察 (c)ST7剪切斷面-工具鋼 (d)針對顆粒狀物體進行Mapping元素地圖分析

#### 4. 結論

1. 在真空度 $3 \times 10^{-2}$ torr的環境下進行1020以及1050°C之硬焊接合製程，使用BNi-2填料接合KG5、ST7碳化鎢與工具鋼，硬焊接合件由金相觀察以及EPMA線分析都具有良好冶金接合效果。
2. AISI S7耐震工具鋼經1020以及1050°C之硬焊接合製程後，S7工具鋼硬度有55.5HRC，並且在直徑7mm工具鋼圓棒衝擊試驗下平均衝擊值為140J。表示硬焊接合製程完成時工具鋼同時兼具強度與韌性。
3. 隨硬焊時間增加與選用ST7碳化鎢，剪切強度亦會隨之提高，在持溫15分鐘時，有最大剪切強度447MPa。基底之S7鋼材硬度下降至54.5HRC。SKD61熱作工具鋼與碳化鎢之接合性質亦然，最高剪切強度為337MPa。
4. KG5、ST7兩種碳化鎢經1020以及1050°C之硬焊接合製程，不會減低碳化鎢之耐磨性能，於10000轉下之重量損失皆小於1mg。
5. 當剪切強度高於350MPa時，剪切破裂面除了鎳基填料破裂之外，接合母材表層固溶體相會在剪切時脫離而留下之孔洞。
6. 本實驗成功地完成接合碳化鎢與工具鋼，以及基材調質之複合製程，但接合母材之硬度提升亦可調整回火溫度達成。

#### 5. 誌謝

本論文之完成感謝科技部計畫編號MOST 107-2622-E-036-002-CC3之計畫，華濤公司以經費的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

#### 6. 參考文獻

1. R.W. Stevenson, Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 7, ASM, Ohio, pp773-783, 1985.
2. N.J. Culp, D. D. Huffman and R.J. Henry, Metals Handbooks, Desk Edition, ASM, Ohio, pp18.1-18.16, 1985.
3. 薛仁愷, 硬焊之基本原理及應用, 銲接與切割, 第7卷, 第3期, pp33-43, 1997.
4. M. M. Schwartz, Brazing: For the Engineering Technologist, ASM International, 1995.
5. A. A. Ogwu, T. J. Davis, Journal of material Science, Vol.27, pp5382-5388, 1992.
6. Uzku, M (2005). Journal of Materials Processing Technology, 169(3), 409–413. 翁健洲, 2015.
7. 張舫誠, “真空硬焊時間與不同冷卻壓力對 WC-Co 與 KDA1 工具鋼硬焊接合件特性之影響”碩士論文, 2010
8. Liu, D., Song, Y. Vacuum brazing of GH99 superalloy using graphene reinforced BNi-2 composite filler. Journal of Materials Science & Technology, 34(10), 1843–1850. 2018.
9. Wang, F. Z.. Interface structure and mechanical properties of Ti(C,N)-based cermet and 17-4PH stainless steel joint brazed with nickel-base filler metal BNi-2. Journal of Materials Processing Technology, 211(11), 1804–1809. 2011.
10. Liu, Z. P. Experimental Investigation on the Kinetic Parameters of Diffusion Component for Vacuum Brazing SS316L/BNi-2/SS316L Joint. Procedia Engineering, 130, 497–508. 2015.