

溫度對碳化鎢與 SAE 1045 中碳鋼硬銲接合件

結構及特性之影響

Effect of Temperature on the Microstructure and Property of WC-Co /Carbon Steel Brazed Joints

邱六合* 王信富* 黃家寶* 徐慶宗* 陳聰吉**

Liu-Ho Chiu* Sin-Fu Wang* Chia-Pao Huang* Ching-Tsung Hsu* Tsung-Chi Chen**

電話:02-25967949 e-mail:eddyeddy555@yahoo.com.tw

摘要

本研究在探討溫度對 KE13 碳化鎢與 SAE 1045 中碳鋼異質材料硬銲接合件之影響，採用的填料包含純銅箔、C52100 青銅箔焊料。本實驗硬銲過程皆在真空環境下進行，以硬銲溫度、持溫時間為變化參數，進行硬銲接合的研究，結果顯示 WC-Co/Cu/SAE1045 在 1100°C~1140°C 間持溫時間 5~15min 與 WC-Co/C52100/SAE1045 在 1080°C~1120°C 間持溫時間 5~15min 硬銲接合。WC-Co/Cu 界面生成 Fe-Co-Cu 層狀合金相，且 Fe-Co-Cu 層狀合金相隨溫度與時間增加而成長，當持溫時間越長，反應層持續成長將兩母材連結一起。當硬銲條件為 1140°C/15min 的 WC-Co/Cu/SAE1045 接合件有最大剪切強度 320MPa。而硬銲條件為 1080°C/15min 的 WC-Co/C52100/SAE1045 接合件有最大剪切強度 358±10MPa。

關鍵字：碳化鎢，真空硬銲，微觀結構，剪切力

Abstract

Cemented Tungsten Carbide (WC-Co) and carbon steel (SAE 1045) were brazed in a vacuum condition. Copper foil and C52100 foil brazing filler were used in vacuum brazing of

WC-Co and SAE 1045.

The brazing temperature were conducted at 1100°C ~1140°C, and 1080°C ~1120°C, respectively for 5 ~ 15 minutes. The results showed that Fe-Co-Cu alloy layer was formed at WC-Co/Cu interface by using Cu and C52100 foil. The growth of Fe-Co-Cu alloy layer was affected by brazing temperature and time. The Fe-Co-Cu alloy layer was grow increasingly from WC-Co surface with increasing brazing time. The maximum shear strength of WC-Co/Cu/SAE1045 joint brazed at 1140°C for 15 min was 320MPa. The maximum shear strength of WC-Co/C52100/SAE 1045 joint brazed at 1080°C for 5 min was 363MPa.

Keywords: Cemented carbides, Vacuum brazing, Microstructure, Shear strength

1. 前言

面對切削刀具，營建機具等需要與要與硬質粒子產生接觸的工具，其嚴苛的使用環境，常常會選用磨耗性佳、耐高溫、耐腐蝕材料例如習稱鎢鋼的碳化鎢材料來使用，但是鎢鋼材料成本高、加工不易又容易脆裂，因此歐美、日本等許多知名廠商都利用碳化鎢焊接、熔

* 大同大學材料工程學系

**合春工業股份有限公司

射、植焊在鐵基材料上以製造精密工具、量測儀器、治具、刀具及鑽頭等工具上提高表面硬度、耐磨性而延長使用壽命，一般工具若表面施以碳化鎢處理，壽命可增加 6~10 倍，大大降低使用成本。〔1〕

異質接合是將兩種不同的金屬、合金或是金屬與陶瓷、石墨等非金屬材料的接合。硬鉲用來固定碳化鎢在鋼料上已經有很久的歷史，硬鉲的方式主要有火炬硬鉲法、感應硬鉲法和爐硬鉲法。通常以爐硬鉲法可以確保加熱及冷卻時的升降溫度在緩和又勻稱的狀況下進行，但當焊接完成後，必須注意避免由焊接溫度冷卻到常溫冷速過快時，會因熱膨脹係數差所引起的應力，導致接合面產生裂痕等、缺陷，工件在使用時碳化鎢容易從鋼材上脫落〔2〕。

2002 年由 Li 等人〔3〕研究碳化鎢和工具鋼(含碳量 0.45%)為母材、配置新的 Cu-Zn-Ni 為填料進行硬焊在 Ar 氣氛下，硬鉲溫度在 960°C 以下，碳化鎢不容易氧化，且與工具鋼接合效果良好，可使用在石油探勘機具鑽頭。2005 年 Uzkut 等人〔4〕利用 L-CuZnNi10 為硬焊填料，將 WC-Co 和 SAE 1040 進行硬焊，填料內的 Ni 原子與碳化鎢內的 Co 相互的擴散結合，使得 WC-Co 與 SAE 1040 有良好的接合，Lee 等人〔5-6〕利用雙層 Cu 與 Ni 填料來進行碳化鎢與碳鋼硬焊，由於 Cu 有良好的延展性，能有效降低應力集中，Ni 能固溶碳化鎢中的 Co 以更有效的結合。

本研究針對耐磨性高的碳化鎢與 SAE 1045 中碳鋼在真空下進行硬鉲接合，選擇不同溫度及持溫時間，觀察填料與接合材間界面結構，探討填料與母材界面反應及對焊接件強度之影響。

2. 實驗方法

2-1 實驗材料

本實驗所使用材料分別為碳化鎢與 SAE1045 中碳鋼。碳化鎢(WC)為春保公司所

生產之礦山工具用 WC-KE13 等級碳化鎢，尺寸為 6×8×3(mm)。使用的鋼材為一般 SAE1045 中碳鋼，尺寸為 19φ×15(mm)，成分為 97%Fe-0.45C。

2-2 硬鉲填料

先選用商用填料做測試，分別為 99.9wt.% 純銅填料與 ASTM C52100 高強度青銅焊料，焊料皆裁切成為 7×9×0.15(mm)，期望比較出何種填料能最符合使用於碳化鎢與鋼材間之接合。

2-3 硬鉲試片製作及前處理

本實驗採用三明治式堆疊方法，將焊料堆疊於碳化鎢與 SAE1045 碳鋼中間進行硬鉲。碳化鎢通常是燒結狀態，表面層會含有 η 相〔7〕，因此硬鉲前 KE13 碳化鎢試片以 120# 砂紙研磨，以去除碳化鎢表面不要的 η 相，而 SAE1045 碳鋼以砂紙研磨至 400#，使得每次接合表面有一致的粗糙度。在硬鉲前試片及片狀填料先以丙酮清洗油脂，再以超音波震盪清洗，除去表面汙漬。為了得到準確的搭疊面，將片狀填料以三明治式堆疊於碳化鎢 KE-13 與 SAE1045 試片中間，上方再放置一自製的模具以固定碳化鎢位置如 Fig. 1 所示，將整個接合件置於加熱爐中加熱以進行硬鉲接合，硬鉲後的試片如 Fig. 2 所示。本實驗為能精確控制加熱溫度與時間，所以採用真空加熱是硬鉲法。真空熱處理爐:採用臻龍公司所生產電阻式石墨加熱爐，如 Fig. 3 所示，為一小型真空加熱爐，最高溫度可達 1200°C，配有機械幫浦及擴散幫浦，真空度可達 10^{-5} torr。

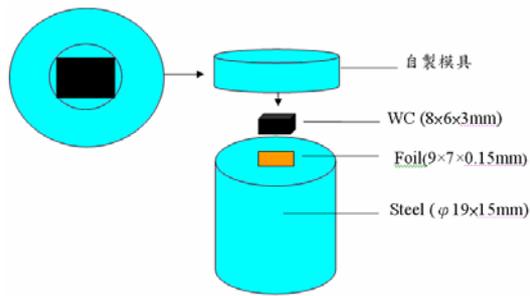


Fig .1 試片製作流程

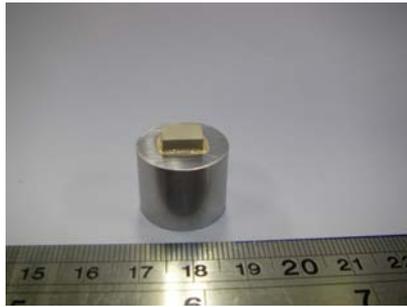


Fig .2 硬銲後之實物照

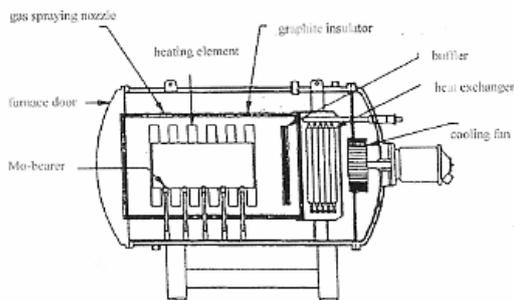


Fig .3 硬銲製程之真空爐

2-4 結構及特性分析

2-4-1 電子顯微鏡觀察 (SEM)

研究所使用的電子顯微鏡為 PHILIPS XL30 掃描式電子顯微鏡並附 EDAX DX4 能量分散 X 光光譜儀 (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer)，用以觀察填料/母材界面接合情形。

2-4-2 電子微探儀區分析 (EPMA)

以 JEOL JXA-8200M 型電子微探儀 (Electron Probe X-ray Microanalyzer, EPMA) 做硬銲接合件之界面定量分析及元素分佈，操

作條件為加速電壓 1-30KV，試片電流 $10^{-7} \sim 10^{-12}$ A，電子束直徑約 $1\mu\text{m}$ ，觀察填料/母材界面接合之原素分佈。

2-4-3 剪力強度 (Shear strength)

將硬銲接合件置於自行設計模具中，以萬能試驗機做單剪式強度測試，其夾頭速率為 1mm/min。自製之單剪式剪力強度測試模具及測試情形如圖 Fig .4 所示。

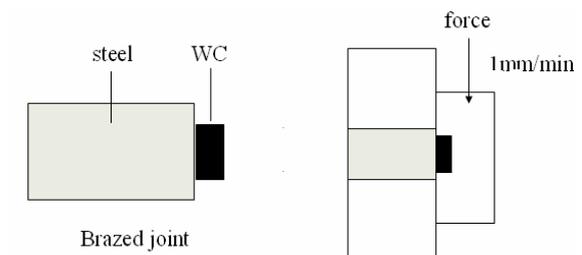


Fig .4 自製之單剪式剪力強度測試模具照片及示意圖

3. 實驗結果

3-1 WC-Co/Cu/SAE1045 硬銲接合件

3-1-1 硬銲溫度、持溫時間對接合界面微觀結構之影響

真空硬銲製程溫度選用 1100°C - 1140°C ，並於各溫度下分別持溫 5、10、15 分鐘不等的時間，且固定硬銲銅箔填料的厚度為 0.15mm。Fig. 5 分別為硬銲溫度 1100°C 持溫時間 5、10、15min 之 WC-Co/Cu/SAE1045 接合件界面微觀組織，由其界面的型態可知 Cu 填料在 WC-Co 與 SAE1045 基材上具有不錯的冶金結合，並未看到明顯的孔洞及裂紋，而且硬銲後填料區的厚度由原來銅箔厚度 0.15mm

縮小成約 0.04mm。由於在硬鉲時，硬鉲試片上施予固定荷重，當達到硬鉲溫度填料熔化，施加荷重會使得多餘的填料溢流出，也會使得接合界面更加緊密，所以硬鉲後，填料區的厚度會由 0.15mm 下降至 0.04mm。當硬鉲條件為 1100°C/5min 在鉲道中有析出白色圓型析出相，隨時間增長白色圓型析出物逐漸呈現花瓣狀，而且有增加與成長的趨勢。

Fig. 6 為硬鉲條件為 1110°C 之 WC-Co/Cu/SAE1045 接合件微觀結構如圖所示，在 WC-Co 與 Cu 間界面產生層狀析出相，當持溫時間增長，層狀析出相有成長的趨勢。Fig. 7 為在不同硬鉲溫度固定持溫時間 15min 之接合界面顯微組織，Fig. 7(a)溫度為 1100°C 接合件，鉲道中有白色析出物，Fig. 7(b)溫度為 1110°C，在 WC-Co/Cu 間界面產生層狀界面層，Fig. 6(c)溫度上升到 1120°C 層狀界面層漸漸成為圓柱狀成長，Fig. 6(d)溫度達到 1140°C 由碳化鎢(WC-Co)側層狀界面層持續成長與 SAE1045 中碳鋼連結。

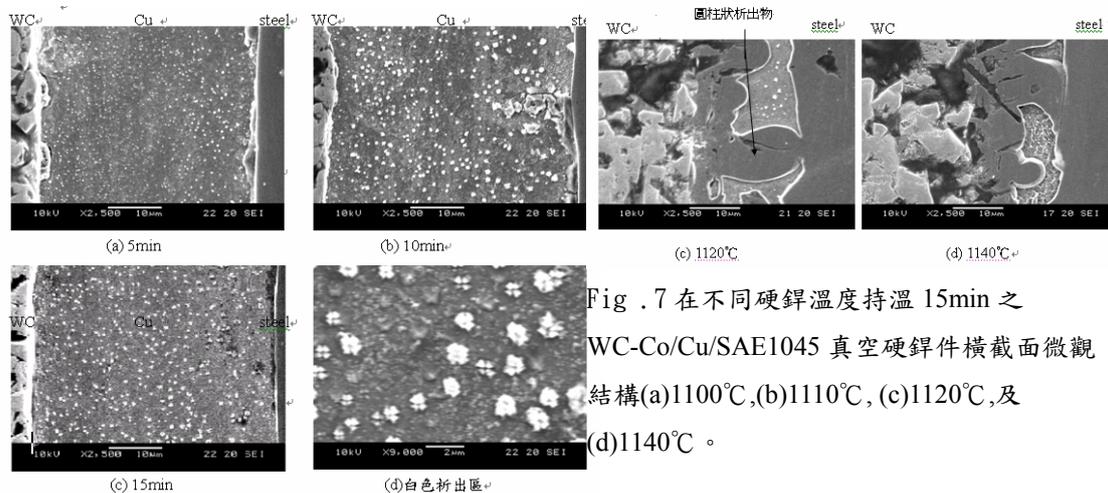


Fig. 5 WC-Co/Cu/SAE1045 真空硬鉲件橫截面微觀結構，操作在 1100°C 下(a)5min, (b)10min 及(c)15min, (d)15min-白色析出區。

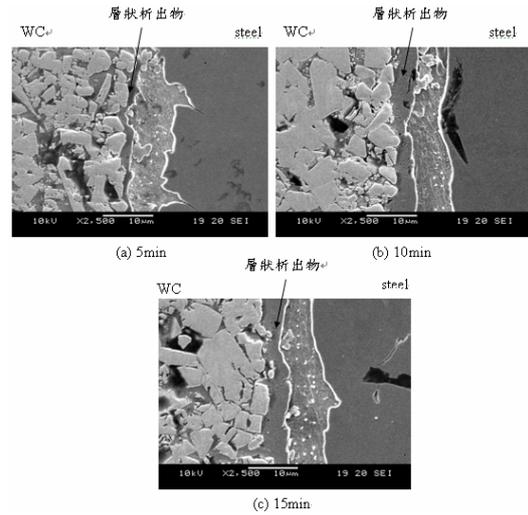


Fig. 6 WC-Co/Cu/SAE1045 真空硬鉲件橫截面微觀結構，操作在 1110°C 下(a)5min, (b)10min, 及(c)15min。

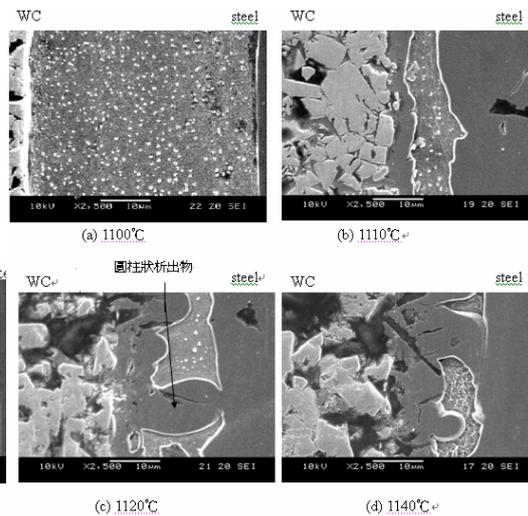


Fig. 7 在不同硬鉲溫度持溫 15min 之 WC-Co/Cu/SAE1045 真空硬鉲件橫截面微觀結構(a)1100°C, (b)1110°C, (c)1120°C, 及(d)1140°C。

3-2-2 WC-Co/Cu/SAE1045 硬鉲件的元素分佈分析及層狀析出機制

析出相成長機制如 Fig. 8 [8] 所示。當硬鉲溫度與持溫時間增加，由於碳化鎢內的 Co 原子不斷與 Fe 原子結合，也會由碳化鎢內擴散至 Fe-Co-Cu 合金層，析出相會因為 Co 原子不斷的補給和在熔融 Cu 溶液中的 Fe 原子結合而不斷的成長，直到成長至另一側的

SAE1045 碳鋼，將兩種接合材料連結一起，如 Fig. 7(d)所示。Ohmura 及 Yoshida [9] 以純銅箔(99.99%Cu)將純鐵(99.65%Fe)與純鈷(99.8%Co)在 1125°C 進行硬鉚，分別在兩基材中的 Fe 原子與 Co 原子分別固溶於熔融中的 Cu 溶液互相擴散，在兩基材與 Cu 的界面都有生成一層板狀析出層，兩基材與 Cu 的界面的板狀析出相以 EPMA 成分分析結果為 44% Co、42%Fe、14%Cu。

進一步以 EPMA 對析出相進行元素分析，圖 Fig. 9 為經硬鉚溫度 1140°C 持溫 15min 之 WC-Co/Cu/SAE1045 接合件橫截面各元素直線定量分析的結果。由兩圖中可得知在碳化鎢側析出相皆為 Fe-Cu-Co 合金。Fig. 9 之 A1 處組成為 72.8 Fe-14.5 Co-5.9 Cu-0.2 C、A2 處組成為 81.6 Fe-8.3 Co-7.3 Cu-0.64 C，說明析出層確實為 Fe-Cu-Co 合金，而在銅鉚料鉚道凝固中 Fe 含量為 3.2wt%，與 Fe-Cu 二元相圖在 1100°C 溫度 Cu 能固溶 Fe 原子的濃度結果一致。

由 Fig. 9 可以觀察得知 Co 原子由碳化鎢中逐漸擴散至熔融 Cu 中，固溶在填料之 Fe 原子也易因在 Cu 固溶量低於 3wt%，故當有 Co 原子溶出時易在 WC-Co/Cu 之一次形成 Fe-Co-Cu 固溶體相。

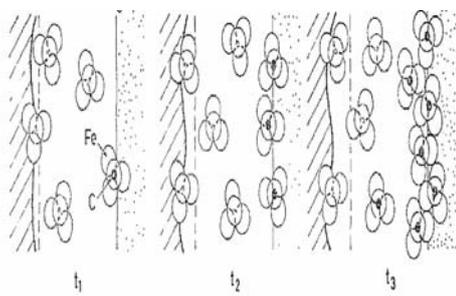


Fig. 8 WC-Co/Cu/SAE1045 硬鉚接合析出層成長機制($t_3 > t_2 > t_1$)

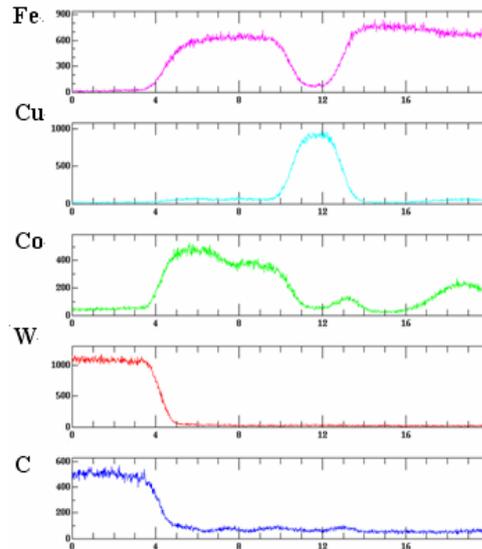
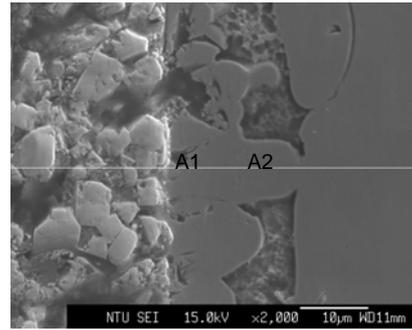


Fig. 9 溫度 1140°C 持溫 15min WC-Co/Cu/SAE1045 硬鉚接合件橫截面之 EPMA 分析

3-2-3 接合件剪切強度

利用萬能試驗機進行剪力試驗。Fig. 10 為不同硬鉚溫度及持溫時間對 WC-Co/Cu/SAE1045 硬鉚接合件剪切強度之變化，圖中顯示剪切強度隨著硬鉚時間增加而上升，剪切強度在 1100°C/5min 的 245MPa 隨著溫度上升而增加，在 1140°C 持溫 15min 有可達 324MPa，提高 32.2%。剪切力在溫度 1100-1140°C 時持溫時間增加而上升。硬鉚接合件機械性質主要受到接合界面的顯微結構所影響，推測為在 WC-Co 側所析出層狀物隨著溫度與時間都有成長的趨勢，當溫度達到 1140°C 時，析出相將兩基材連結在一起，由於析出相為主要為 Fe-Co-Cu 合金，主要為 Fe 合金，Fe 的抗剪切力較 Cu 大，當析出層逐漸成

長，對於剪切力也逐漸有上升的趨勢，當析出層將兩母材連結一起有最大接合剪切力。

接合件剪力測試後之破斷面主要產生在近 WC-Co 側，其破斷面表面型態如 Fig. 11 所示，Fig. 1(a) 在 1100°C 接合件破裂位置位於鐸道內，Fig. 1(a) 可看見破裂面呈現較大的撕裂面型態，當溫度升至 1120°C，在破裂面觀察到有白色區域，如 Fig. 11(b) 所示，溫度升至 1140°C 時如 Fig. 11(c) 所示，白色區域覆蓋面積擴大，Fig. 11(d) 為白色區域放大圖，發現白色區域呈現圓柱狀。Fig. 11(c) 硬鉲溫度達 1140°C 時，破裂面中圓柱狀物覆蓋面積增加，由 Fig. 11(d) 在 1140°C 接合界面的微觀組織可觀察到，Fe-Co-Cu 析出相成長將 SAE1045 碳鋼連結一起，所以對於碳化鎢與 SAE1045 碳鋼的接合強度有提升的作用，硬鉲溫度為 1140°C 時，Fe-Cu-Co 析出層與 SAE1045 碳鋼連結現象隨持溫時間而增加，所以硬鉲溫度 1140°C 持溫 15min 為最佳接合參數。

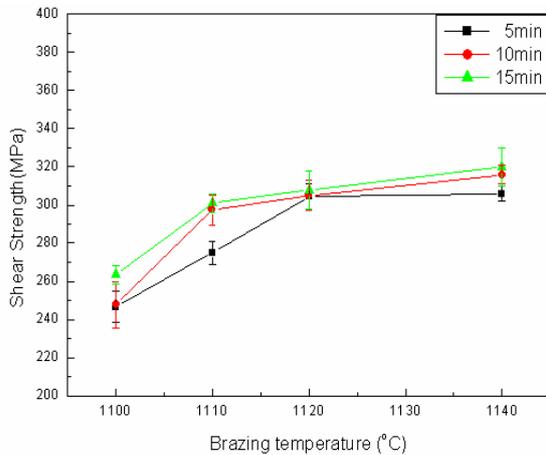


Fig. 10 WC-Co/Cu/SAE1045 於不同硬鉲溫度及持溫時間對剪切強度之變化

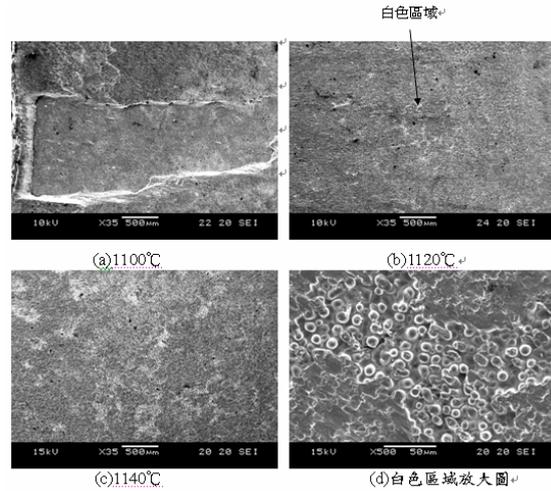


Fig. 11 於不同硬鉲溫度持溫

15min WC-Co/Cu/SAE1045 接合件碳化鎢側破裂面表面 SEM 組織

3-3 WC-Co/C52100/SAE1045 硬鉲接合件

3-3-1 硬鉲製程參數對接合界面微觀結構與元素分佈之影響

針對 C52100 銅基合金填料硬鉲選用溫度為 1080°C 及 1120°C，並於各自溫度下持溫 5、10、15 分鐘不等的時間的硬鉲處理。C52100 銅錫合金薄片厚度為 0.15mm。

Fig. 12 分別為 1080°C 持溫時間 5、10、15min 之 WC-Co/C52100/SAE1045 硬鉲接合件界面微觀組織。由其界面組織可知 C52100 填料在 WC-Co 與 SAE1045 基材均有良好的潤濕效益。當硬鉲溫度為 1080°C/5min 在 WC-Co /C52100 間界面即產生與純銅箔層狀析出層相似，因為 Sn 的加入使形成 WC-Co 側的析出相生成溫度降低，當硬鉲持溫時間增長，層狀析出層也有成長的趨勢，而在 SAE1045 碳鋼側呈現凹凸不平的鋸齒狀。Fig. 13 為在不同硬鉲溫度固定持溫時間 15min 之 WC-Co /C52100/SAE1045 硬鉲接合界面顯微組織，當溫度上升，層狀析出層厚度隨之增加。在 SAE1045 碳鋼側隨著溫度上升而逐漸平坦。以 C52100 青銅箔材對碳化鎢與 SAE1045 碳鋼進行硬鉲，在 WC-Co /C52100 間界面產生層狀析出相的機構與純銅箔一樣，析出相機構如圖

Fig. 8 所示，SAE1045 碳鋼中的 Fe 原子逐漸固溶於熔融的 Cu 溶液中，而 Cu 原子亦固溶進入 SAE1045 碳鋼中，所以在 SAE1045 碳鋼側逐漸被侵蝕，因此呈現凹凸不平的鋸齒狀。Fig. 14 為在 1080°C 持溫 15min 條件下之橫截面元素分析圖，其層狀析出層 B 主要為 57.8 Fe-22.8Co-10.3Cu-1.0Sn，為 Fe-Co-Cu 的合金相。

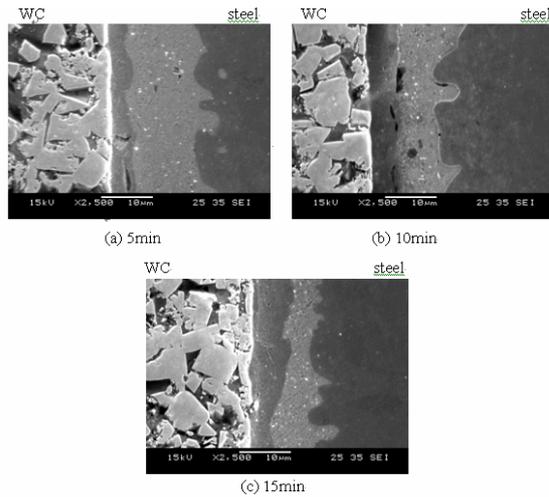


Fig. 12 經溫度 1080°C (a)5min, (b)10min, 及 (c)15min WC-Co/C52100/SAE1045 硬鉚接合件界面微觀組織

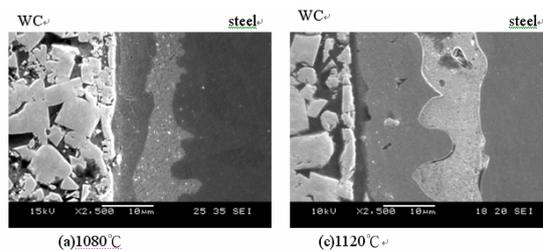


Fig. 13 在不同硬鉚溫度持溫 15min (a)1080°C (b)1120°C WC-Co/C52100/SAE1045 硬鉚接合件界面

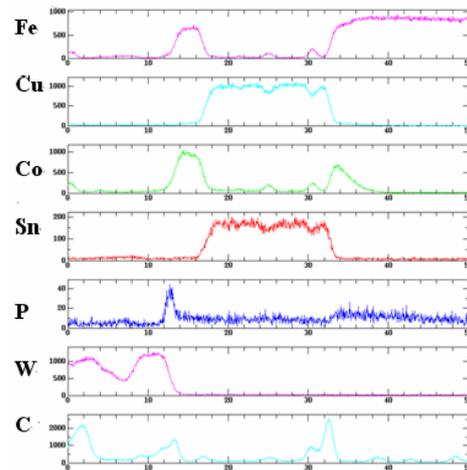
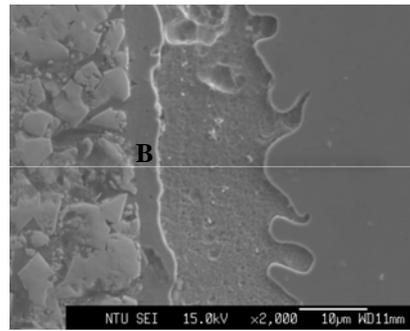


Fig. 14 溫度 1080°C 持溫 15min WC-Co/C5210/SAE1045 硬鉚接合件橫截面之 EPMA 分析

3-3-2 接合件剪切強度

Fig. 15 為於不同硬鉚溫度及持溫時間對 WC-Co/C52100/SAE1045 接合件剪切強度之影響。當硬鉚溫度為 1080°C 遲溫 5min 時剪切強度為 $340 \pm 10 \text{MPa}$ 隨時間增加剪切強度稍微上升到 $358 \pm 10 \text{MPa}$ ，增加約 5%。硬鉚溫度上升至 1120°C，剪切力隨持溫時間增加而上升然而彼 1080°C 的強度低，但皆優於以銅箔為填料之真空硬鉚接合件強度。

在硬鉚接合件介面形態對接合件的剪切強度有極大的影響，以 C52100 為碳化鎢與 SAE1045 碳鋼基材的填料，SAE1045 碳鋼在硬鉚時，Fe 原子固溶於熔融 Cu 溶液中，造成 SAE1045 碳鋼表面逐漸呈現凹凸不平，此時碳鋼與焊料接觸表面積隨之增加，所以剪力強度隨接觸表面積增加而增加。當硬鉚溫度為 1080°C 時剪力強度隨持溫時間增長而增加，硬

錒溫度為 1120°C 剪切強度隨時間增加而上升，是因為 Fe-Cu-Co 析出相所產生的影響，當持溫時間增加，Fe-Cu-Co 析出相成長將 SAE1045 碳鋼連結一起，所以對於碳化鎢與 SAE1045 碳鋼的接合強度有提升的作用。

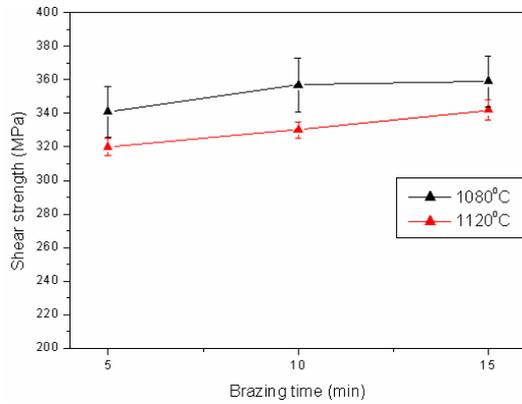


Fig. 15 WC-Co/C52100/SAE1045 於不同硬錒溫度及持溫時間對剪切力強度之變化

4. 結論

1. WC-Co/SAE1045 純銅箔進行硬錒，在 WC-Co 側產生層狀反應層，層狀反應層主要為 Fe-Co-Cu 合金相。Fe-Co-Cu 反應層隨著溫度與時間增加而成長，當持溫時間越長，反應層持續成長將兩母材連結一起。
2. WC-Co /Cu/SAE1045 接合件剪切強度隨著反應層成長而上升，在 1140°C 持溫 15min 有最大剪切強度為 320MPa。
3. WC-Co /SAE1045 接合件以 C52100 進行硬錒，在 WC-Co 側產生界面層，界面層主要為 Fe-Co-Cu 合金相，且隨著溫度與時間增加而成長。在 SAE1045 碳鋼側由於 Fe 原子固溶於液態銅溶液中，SAE1045/C52100 接合面呈現凹凸不平。
4. 由於 SAE1045/C52100 接合面呈現凹凸不平，增加接合表面積，WC-Co /C52100/SAE1045 接合件剪切強度均優於以銅箔為接合填料之 WC-Co /Cu/SAE1045 剪切強度，且隨時間增加，

由於 Fe-Co-Cu 反應層成長的影響，剪切強度也隨之上升。

致謝

國科會經 NSC95-2622-E036-005-CC3 費補助

5. 參考文獻

1. 黃慎模, 碳化鎢植焊被覆延長刀具、工具、模具及零件之壽命至 1000%, 機械材料, 192 (2001) 132-140.
2. 高鄂, 碳化鎢入門, 徐氏基金會, (1982)。
3. Y.J. Li, Z.D. Zou, X. Holly, T. Feng, X.G Wang, A study on microstructure in the brazing interface of WC-TiC-Co hard alloys, International Journal of Refractory Metal & Hard metals, 20 (2002) 169-173.
4. Mehmet Uzkut, N. Sinan Koksall, B. Sadik Unlu, The determination of diffusion in connecting SAE 1040/WC material by brazing, Journal of Materials Processing Technology, 169 (2005) 409-413.
5. Won-Bae Lee, Byoung-Dae Kwon, Seung-Boo Jung, Effect of bonding time on joint properties of vacuum brazed WC-Co hard metal/carbon steel using stacked Cu and Ni alloy as insert metal, Materials Science and Technology, 20 (2004) 1474-1478.
6. Won-Bae Lee, Byoung-Dae Kwon, Seung-Boo Jung, Effect of Cr₃C₂ on the microstructure and mechanical properties of the brazed joints WC-Co and carbon steel, International Journal of Refractory Metal & Hard metals, 24 (2006) 215-221.
7. Hirohiko Ohmura, Tohru Yoshoda, Deposit Mechanism of Columnar

Fe-Cu-C Alloy in Cu Brazing to
Dissimilar C Steel, Yosetsu Gakkai
Ronbunshu , 2 (4)(1984) 35-42.

8. Hirohiko Ohmura, Tohru Yoshoda,
Dissolution and Deposit of Base Metal
in Brazing to Dissimilar Materials and
its Application (Part 4) , Yosetsu Gakkai
Ronbunshu , 50 (29) (1981) 84-89.