

# 銀基填料對高熵合金真空硬鋸特性之研究

學生：邱垂昌

指導教授：周長彬

國立交通大學工學院精密與自動化工程學程 碩士班

## 摘 要

高熵合金為近年國內自行開發出來的新材料，運用多種金屬元素共同組成，每種元素至多不超過 35 %，經各種元素排列組合後，可組合成許多種新合金，較傳統合金更耐蝕、更耐高溫、硬度高且不易氧化。

本研究中以 BAg-2 及 BAg-3 二種銀基硬鋸填料，於真空爐中進行高熵合金硬鋸性能研究，研究結果顯示， $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.5}$  高熵合金鑄件為 FCC 相及微量的 BCC 相所組成，樹枝間相為富 Cu 的偏析相，經硬鋸熱循環 750 °C 持溫 15 分鐘熱處理後，BCC 相之繞射強度明顯較鑄造態增強，顯示基地有更多之 BCC 相被析出。 $\text{FeCoNi}_{0.5}\text{CrAl}_{0.5}$  高熵合金鑄件結構由 FCC 相及 BCC 相所組成，主因為合金成份中缺少 FCC 相的促進元素 Cu，與減半的 Ni 元素，故在凝固過程較易形成 BCC 相。以 BAg-2 銀基填料真空硬鋸  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.5}$  及  $\text{FeCoNi}_{0.5}\text{CrAl}_{0.5}$  高熵合金，接合區域均無界面化合物產生；而以 BAg-3 銀基填料進行真空硬鋸，高熵合金母材成份元素中 Fe、Ni、Cr、Co 在硬鋸接合過程中融入接合區域之交界處中。

關鍵字：高熵合金、硬鋸、偏析相

# **The Vacuum Brazing Characteristics of High Entropy Alloys using Silver-Based Filler Metals**

**Student : Chui-Chang Chiu**

**Advisors : Chang-Pin Chou**

**Department of Automation and Precision Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University**

## **ABSTRACT**

The development of high-entropy alloys has aroused considerable interest recently. These newly developed alloys have good corrosion and wear resistance, high temperature mechanical properties, and special physical and chemical properties.

The objective of this study was to investigate the properties of two high-entropy alloys,  $\text{FeCoNiCuAl}_{0.5}$  and  $\text{FeCoNi}_{0.5}\text{CrAl}_{0.5}$ , and their brazing ability with filler metals BAg-2 and BAg-3. The vacuum brazing process was used. Optical metallography and SEM+EDAX analysis were conducted to investigate the microstructure analysis and element distribution.

The results of this study shown as follows: The microstructure of  $\text{FeCoNiCuAl}_{0.5}$  high entropy alloy casting showed that the matrix consists of a FCC phase with a small amount of BCC phase on it, and the interdendritic segregation was specified as a copper rich phase. The microstructure of  $\text{FeCoNi}_{0.5}\text{CrAl}_{0.5}$  high entropy alloy consisted of FCC phase and BCC phase. Using silver based BAg-2 as a vacuum hard solder for  $\text{FeCoNiCrCuAl}_{0.5}$  and  $\text{FeCoNi}_{0.5}\text{CrAl}_{0.5}$  high entropy alloys, no interface compound formed at joint area. However, when using BAg-3 as the hard solder, it was found that the constituent elements of the matrix, such as Fe, Ni, Cr and Co dissolved into the interface during the joint process.



## 誌 謝

本碩士論文的完成，需要感謝許多在這段研究期間，曾經鼓勵我、關心我、幫助我的人，在此獻上最高敬意。

首先感謝我的指導教授 周長彬 博士，在這段碩士班期間的指導與協助，讓我在研究學習領域裡更上層樓，同時在這段研究歲月裡，學習到無限人生道理，我要在此跟您說聲 老師，謝謝您。

而對於我的論文最大學習上的幫助是 林國書 博士班學長，沒有學長您的指導，哪有今天學弟我傑出的表現，學弟在此感謝您的費心幫助。跟您說聲，感謝您。

對於我最敬愛的論文評審，李義剛 博士、陳明祥 博士，感謝你們的嚴厲指導與鼓勵，讓學弟在未來有更大進步的動力與發展空間。在此，謝謝你們對學弟的照顧。同時也感謝 曾光宏 博士、蘇程裕 博士，對於學弟論文初報計畫時的嚴厲指導與支持，謝謝你們的寶貴建議。

關於本論文研究期間的相關協助上，感謝國立台灣師範大學 鄭慶民 博士所帶領的 SEM 實驗室，沒有學長您的幫忙，就沒有今天論文完美的成果。感謝您與相關的研究。對於在交通大學碩士班銲接實驗室的同門師兄弟，謝謝你們的支持與幫忙，謝謝你們，祝福你們，在未來日子，更有成就。同時也感謝 蔡希杰 博士，感謝您的寶貴建議與研究經驗，讓學生成長茁壯。

最後獻上此碩士論文，獻給我親愛的雙親與關心我的朋友們，謝謝大家。

# 目 錄

摘要	I
Abstract	II
誌謝	III
目錄	IV
圖目錄	VII
表目錄	IX
一、前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	3
二、文獻回顧	4
2.1 研究背景	4
2.2 高熵合金的定義	5
2.3 高熵合金的特點	6
2.4 高熵合金研究成果	8
2.4.1 高熵合金特性研究	8
2.4.2 高熵合金銲接性質研究成果	10
2.5 影響硬銲的要素	11
2.5.1 填充金屬之液化與母材之潤濕	11



2.5.2 影響硬鉲品質之要素	16
三、研究方法與步驟	26
3.1 實驗流程	26
3.2 實驗材料	27
3.2.1 鉲接母材	27
3.2.2 填料金屬	27
3.3 實驗步驟	28
3.3.1 試片製備	28
3.3.2 硬鉲實驗	28
3.3.3 拉伸試驗	30
3.3.4 微硬度量測	31
3.3.5 金相顯微組織觀察	31
3.3.6 EDS 元素分析	31
3.3.7 X-ray 繞射分析	32
四、結果與討論	33
4.1 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金性質研究	33
4.1.1 鑄件及受硬鉲熱循環熱處理之微結構分析	33
4.1.2 鑄件及受硬鉲熱循環熱處理之機械性質研究	39
4.2 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金性質研究	42



4.2.1 鑄件及受硬鉲熱循環熱處理之微結構分析	42
4.2.2 鑄件及受硬鉲熱循環熱處理之機械性質研究	48
4.3 銀基真空硬鉲微結構研究	51
4.3.1 銀基硬鉲填料金相觀察	51
4.3.2 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件硬鉲研究	52
4.3.3 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件硬鉲研究	55
4.3.4 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 及 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金異種硬鉲研究	58
五、結論	61
六、參考文獻	62



## 圖目錄

圖 2-1 填充金屬之熔滴與母材金屬間之作用力示意圖	14
圖 2-2 使用於高應力及低應力之搭接接頭設計	20
圖 2-3 平面接頭之臨界搭接距離計算公式	21
圖 2-4 為管狀搭接接頭示意圖	22
圖 3-1 實驗流程圖	26
圖 3-2 硬鋁試片夾持示意圖	29
圖 3-3 硬鋁溫度循環曲線圖	29
圖 3-4 剪強度試驗試片尺寸(單位:mm)	30
圖 4-1 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金金相照片(a)鑄造態；(b)熱處理	34
圖 4-2 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 X-Ray 繞射圖(a)鑄造態；(b)熱處理	35
圖 4-3 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件 SEM 照片(a)500 倍；(b)1000 倍	37
圖 4-4 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件經熱處理後之 SEM 照片(a)500 倍；(b)2000 倍	38
圖 4-5 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件拉伸破斷面 SEM 照片(a)500 倍；(b)1000 倍	40
圖 4-6 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件及熱處理後硬度比較圖	41
圖 4-7 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金金相照片(a)鑄造態；(b)熱處理	43
圖 4-8 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 X-Ray 繞射圖(a)鑄造態；(b)熱處理	44
圖 4-9 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件 SEM 照片(a)500 倍；(b)1000 倍	46



圖 4-10 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件經熱處理後之 SEM 照片(a)500 倍；(b)2000 倍	47
圖 4-11 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件拉伸破斷面 SEM 照片(a)500 倍；(b)1000 倍	49
圖 4-12 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件及熱處理後硬度比較圖	50
圖 4-13 BAg-2 硬鉲填料鉲片未硬鉲前之金相照片	51
圖 4-14 BAg-3 硬鉲填料鉲片未硬鉲前之金相照片	51
圖 4-15 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 BAg-2 鉲料硬鉲鉲道(a)SEM 照片；(b)各元素 EDS 分析圖	53
圖 4-16 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 BAg-3 鉲料硬鉲鉲道(a)SEM 照片；(b)各元素 EDS 分析圖	54
圖 4-17 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 BAg-2 鉲料硬鉲鉲道(a)SEM 照片；(b)各元素 EDS 分析圖	56
圖 4-18 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 BAg-3 鉲料硬鉲鉲道(a)SEM 照片；(b)各元素 EDS 分析圖	57
圖 4-19 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 及 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 BAg-2 鉲料異種硬鉲鉲道(a)SEM 照片；(b)各元素 EDS 分析圖	59
圖 4-20 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 及 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金 BAg-3 鉲料異種硬鉲鉲道(a)SEM 照片；(b)各元素 EDS 分析圖	60

## 表 目 錄

表 3-1 高熵合金鑄件編號及組成成份(at%)	27
表 3-2 銀合金填料金屬化學成份表(wt%)	28
表 4-1 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件成份表(at%)	33
表 4-2 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件 EDS 分析表	37
表 4-3 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件經熱處理後之 EDS 分析表	39
表 4-4 FeCoNiCrCuAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件拉伸機械性質表	40
表 4-5 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件成份表	42
表 4-6 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件 EDS 分析表	46
表 4-7 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件熱處理 EDS 分析表	48
表 4-8 FeCoNi <sub>0.5</sub> CrAl <sub>0.5</sub> 高熵合金鑄件拉伸機械性質表	48