



防蝕工程

期刊網址: <http://www.anticorr.org.tw>

防蝕工程



10.6376/JCCE.201803_32(1).0001

鎂添加對 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti 活性無鉛鉛錫之腐蝕行為影響研究 The Effect of Magnesium Addition on the Corrosion Behavior of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti Active Lead-Free Solder

李成鎧、許國揚、張嘉麟、張世穎*

C. K. Li, G. Y. Shiu, C. L. Chang, S. Y. Chang*

中文摘要

本研究主要探討添加鎂對 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti 活性無鉛鉛錫之鹽水腐蝕行為的影響。在 Sn-3Ag-0.5Cu 無鉛鉛錫中添加 4 wt.% 鈦及 1 wt.% 鎂可使固相線與液相線分別由 218.4°C 及 221.8°C 降至 215.3°C 及 216.7°C。隨著添加 4 wt.% 鈦、1 wt.% 鎂及 0.1 wt.% 混合稀土元素(Re)於 Sn-3Ag-0.5Cu 鉛錫合金中, Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 合金電阻及硬度值均微幅增加, 片電阻值約 0.0244Ω/□, 而硬度值約 22.46Hv。同時添加 4 wt.% 鈦、1 wt.% 鎂及 0.1wt.% 稀土元素之 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 合金在 25°C 之 3.5wt%NaCl 水溶液中具有最高的腐蝕電位-859.7mV。Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 合金之腐蝕電位分別-1227.2mV 及-1245.5mV。腐蝕電流密度 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re、Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 分別為 $1.02 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 、 $3.72 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 及 $1.38 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 。顯示 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 具最佳的耐蝕性, 由金相顯微組織觀察亦具最小的反應層厚度 12.96μm。幾種添加鎂之活性無鉛鉛錫合金經電化學極化後其反應生成物主要為 SnO、SnO₂、及 Sn₃O(OH)₂Cl₂。

關鍵詞: Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti 活性無鉛鉛錫、鎂、動電位極化法、鹽水、腐蝕。

Abstract

The effect of magnesium on the corrosion behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu-4Ti active solder alloys was investigated in NaCl solution. The addition of 4 wt.% Ti and 1 wt.% Mg in Sn-3Ag-0.5Cu lead free solder decreased both solidus and liquids from 218.4°C and 221.8°C to 215.3°C and 216.7°C, respectively. The addition of 4 wt.% Ti, 1 wt.% Mg and 0.1 wt.% mixed rare earth element (Re) in Sn-3Ag-0.5Cu solder alloy significantly increased both resistance and hardness. The sheet resistance and hardness of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re alloy were 0.0244Ω/□ and 22.46Hv, respectively. Polarization studies indicated that the Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re alloy with 4 wt.% Ti, 1wt.% Mg and 0.1 wt.% mixed rare earth element (Re) had the highest corrosion potential

收到日期: 2017 年 07 月 22 日

修訂日期: 2018 年 12 月 20 日

接受日期: 2019 年 05 月 24 日

國立雲林科技大學機械工程系

National Yunlin University of Science & Technology

*聯絡作者: changsy@yuntech.edu.tw

-859.7mV in 3.5 wt.% NaCl solution at 25°C. The corrosion potentials of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg and Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re were -1227.2mV and -1245.5mV, respectively. The corrosion current densities of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re, Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg and Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re were $1.02 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, $3.72 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ and $1.38 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, respectively. The results revealed that the Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re alloy had the best corrosion resistance. Moreover, the metallographic observation indicated the corrosion scale thickness on Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re alloy was 12.96 μm . The corrosion products were mainly SnO, SnO₂ and Sn₃O(OH)₂Cl₂ on the polarized surface of magnesium containing active lead free solders.

Keywords: Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti Active Lead Free Solders, Magnesium, Potentiodynamic Polarization, Salt Solution, Corrosion.

1. 前言

隨著電子通訊產品微小化與多功能的快速發展，使得表面黏著技術(SMT)成為現今電子構裝主要的技術。自2006年無鉛RoHs指令的限制，無鉛化的電子構裝已經普及全球，然而現今SMT技術大量微小接點，高密度、高功率這對錒錫有更嚴峻的要求，因應各種不同需求，一系列的無鉛錒錫如Sn-Ag、Sn-Cu、Sn-Zn、Sn-Ag-Cu或Sn-Ag-Zn等應運而生。其中Sn-Ag-Cu系列的無鉛錒錫因具有較佳的潤濕性、高溫穩定性、抗潛變及耐疲勞等特性，已經成為無鉛錒錫的主流^[1-3]。但隨著構裝對錒點可靠度的要求不斷提高，以及基板材料多元化，具有高可靠性以及能適應高電流密度的無鉛錒錫，如添加奈米顆粒或稀土元素以提升無鉛錒錫的潤濕性、潛變強度或抗拉強度等^[4-6]。在先前的研究指出，在無鉛錒錫合金中添加鈦與稀土元素可促進錒錫的潤濕性能，甚至可在未金屬化陶瓷表面潤濕，具有十分良好的反應接合性^[7-9]。此外，亦發現高活性的元素鎂添加於無鉛錒

錒中，能大幅提升錒錫的反應潤濕性，此高活性的無鉛錒錫亦已成功應用於許多難潤濕的材料接合^[10-13]。由於電子元件體積小，構裝密度高，接點小的特點，輕微的腐蝕即可能導致電子元件的破壞，因此，對於錒錫合金的腐蝕特性的了解在電子構裝工程上具有重大的意義^[14-17]。本研究應用電化學和表面分析方法，研究Sn-3Ag-0.5Cu活性無鉛錒錒中添加鎂、鈦或稀土元素等活性元素對其腐蝕性質影響。

2. 實驗方法

本研究使用純度在99.95%以上的錒、銀、銅、鈦及純度為99%以上之鎂與稀土元素，依所欲配置的合金比例以真空電弧熔煉方式配製而成。本研究使用之錒錒合金之化學組成如表1所示。其中稀土元素為價格較低未經分離純化之混合稀土，組成為77.82 wt.% La、16.84 wt.% Pr、3.24 wt.% Ce、2.10 wt.% Nd。

表 1 本研究使用的錒錒合金化學組成(wt.%)。

Table1 Chemical composition of solder alloys used in the studies.

Alloy	Sn	Ag	Cu	Ti	Mg	Re
Sn-Ag-Cu-Ti	Bal.	3	0.5	4	-	-
Sn-Ag-Cu-Ti-Mg	Bal.	3	0.5	4	1	-
Sn-Ag-Cu-Mg-Re	Bal.	3	0.5	-	1	0.1
Sn-Ag-Cu-Ti-Mg-Re	Bal.	3	0.5	4	1	0.1

熔煉配製完成的鉛錫合金鑄錠，軋軋加工成約300 μ m厚的片狀。利用示差掃描熱量計(DSC)在氬氣流量為20ml/min的保護氣氛下，以10 $^{\circ}$ C/min的升溫速率量測鉛錫合金的熔化溫度區間。再將切割成10mm x 10mm x 1mm大小的不同鉛錫合金，使用四點探針量測其片電阻。腐蝕試驗採用電化學動電位極化方式，以恆電位儀Jiehan ECW-500在25 $^{\circ}$ C之3.5% NaCl溶液下進行，使用Ag/AgCl做為參考電極，以白金作為輔助電極，電位掃描速率為5mV/s，掃描範圍則為-1500mV至+1500mV。完成極化試驗的樣品，使用場發射掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)觀察腐蝕形貌及鉛錫金相顯微組織，配合X-ray能量放射光譜(EDS)分析合金及腐蝕生成物元素分布情形。使用X-ray繞射分析儀(Rigaku D/MAX2500)以銅靶在電壓40KV，電流為100mA在3 $^{\circ}$ /min掃描速度下分析腐蝕生成物之化學組成。

3. 結果與討論

圖 1 為 Sn-3Ag-0.5Cu 合金之金相顯微組織，在錫基底中存有細小的 Ag_3Sn (白色顆粒) 及 Cu_6Sn_5 (黑色顆粒) 介金屬析出物。在 Sn-3Ag-0.5Cu 合金中添加 4wt.% 的鈦 除 Ag_3Sn 與 Cu_6Sn_5 析出物外，則形成有較大尺寸的 Ti_6Sn_5 的塊狀介金屬化合物，如圖 2 所示。在 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti 中再添加 1wt.% 的鎂，由於鎂在錫中的溶解度很低^[18]，而形成 Mg_2Sn 介金屬，如在 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 合金中，同樣均可發現 Mg_2Sn 介金屬。如圖 3 至圖 5 分別為 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re、Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 之金相顯微組織。圖 6 為本研究使用之鉛錫合金 X 光繞射分析結果，由 X 光繞射峰獲得在合金中所對應的相。

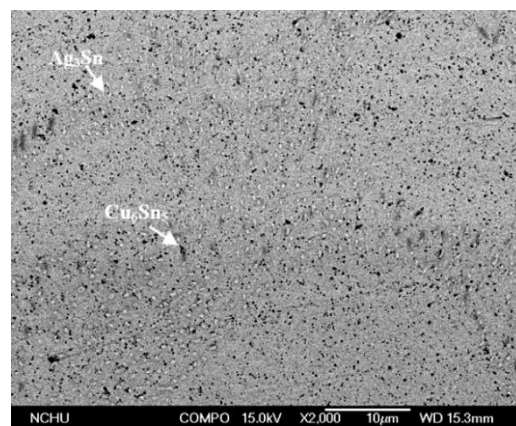


圖 1 Sn-3Ag-0.5Cu 合金金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 1 SEM image of the microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu alloy.

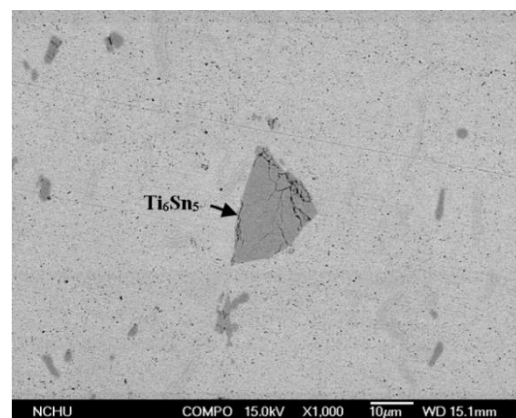


圖 2 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti 合金金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 2 SEM image of the microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti alloy.

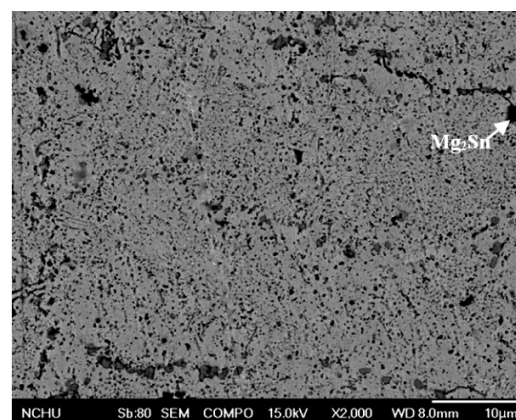


圖 3 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 合金金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 3 SEM image of the microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re alloy.

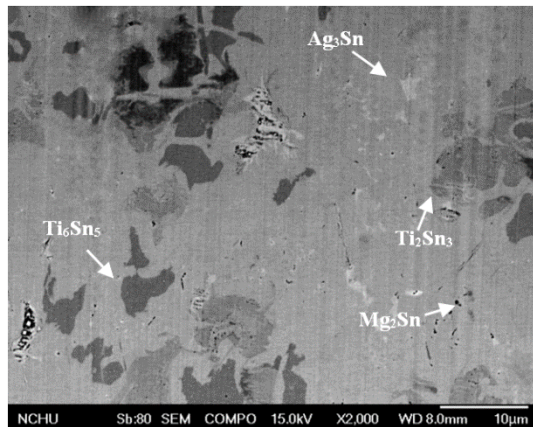


圖 4 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 合金金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 4 SEM image of the microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg alloy.

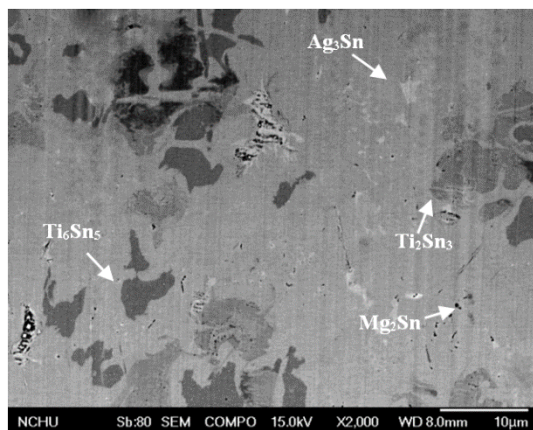


圖 5 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 合金金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 5 SEM image of the microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re alloy.

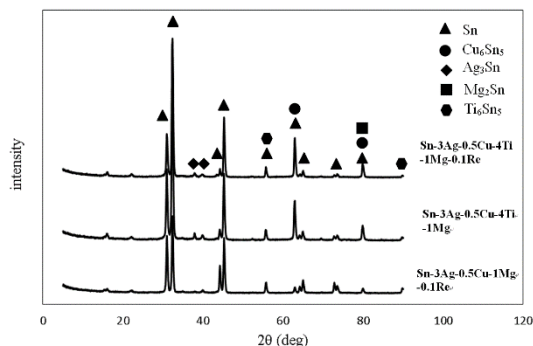


圖 6 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 、 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 鉛錫合金 X 光繞射分析。

Figure 6 XRD patterns of Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re, Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg and Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1 solder alloys.

圖7為鉛錫的示差掃描熱分析結果，Sn-3Ag-0.5Cu鉛錫合金的固相線溫度約218.4℃，而液相線溫度為221.8℃。在Sn-3Ag-0.5Cu無鉛鉛錫中添加4 wt.% 鈦及1 wt.% 鎂，可使固相線與液相線分別下降至215.3℃與216.7℃。添加1wt.% 鎂、4wt.% 鈦及0.1wt.% 稀土元素時，對固、液相線的溫度影響很小，同時添加鎂、鈦及稀土元素時，固相線溫度為216.1℃，液相線溫度為221.5℃與Sn-3Ag-0.5Cu鉛錫合金的熔化溫度區間十分接近。

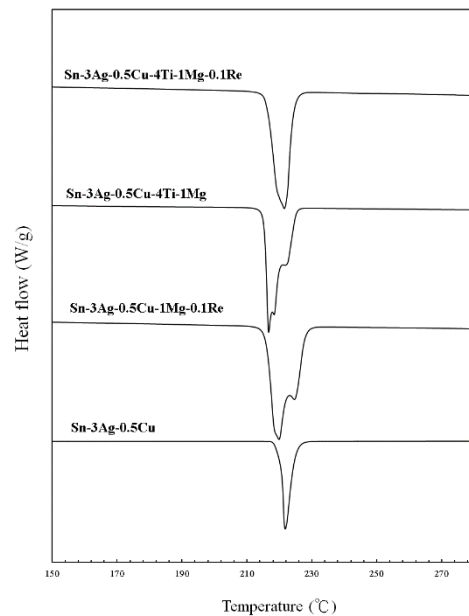


圖 7 Sn-3Ag-0.5Cu 、 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg -0.1Re 、 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 鉛錫合金之熱分析曲線圖。

Figure 7 DSC curves of Sn-3Ag-0.5Cu, Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re, Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg and Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1 solder alloys.

以四點探針量測 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 、 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 的表面片電阻，獲得電阻值分別為 0.024397、0.024403 及 0.024415Ω/□，隨著合金添加量增加，片電阻值僅微幅上升。以微式維克氏硬度計量測硬度，經五次試驗獲得 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 、 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-

0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 的平均硬度值分別為 20.50、21.30 及 22.46Hv，如同電阻值變化，當較多的合金元素添加，有較多的介金屬相析出，硬度值亦隨合金元素添加量增加而增加。圖 8 為 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 在 25°C 的 3.5%NaCl 溶液之電化學極化曲線，由圖中可見 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 之陽極極化曲線可明顯分為幾個不同的區域，包含活性溶解區、活化-鈍化轉化區和鈍化區。隨掃描電位升高，產生兩次過鈍化現象，這可能是由於鈍化膜發生局部孔蝕所產生，而且均能恢復鈍態，鈍態電流密度值呈現不穩定，電流密度有波動現象，顯示鈍化膜狀態不穩定。當 Sn-3Ag-0.5Cu 合金中添加 1wt.% Mg 及 0.1wt.%Re 時，如圖 9 中 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 之極化曲線，同樣具有兩階段鈍化區，鈍態電流密度值亦有波動呈現不穩定。當再添加 4wt.%Ti 時，如圖 10 中 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 之極化曲線，首先出現的陽極鈍化，電流密度低，顯示相較其他合金有較佳的鈍化效果。由於低的起始掃描電位，造成 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 合金表面 pH 值改變，而導致開路電位產生變化。由圖 8 至圖 10 之極化曲線獲得 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg、Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 之腐蝕電位分別為 -1227.2、-1245.5 及 -859.7mV，而腐蝕電流密度則分別為 $3.72 \cdot 10^{-6}$ 、 $1.38 \cdot 10^{-6}$ 及 $1.02 \cdot 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 。Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 合金在 3.5wt.%NaCl 水溶液中具有最高的腐蝕電位，而以 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 具最低的腐蝕電位。在腐蝕電流密度方面，Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 的腐蝕電流最小，而 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 的腐蝕電流密度最大，比較 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 與 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 可發現，添加有微量稀土元素的 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 具較高的腐蝕電位及較低的腐蝕電流密度，顯示具有較佳的抗腐蝕性。

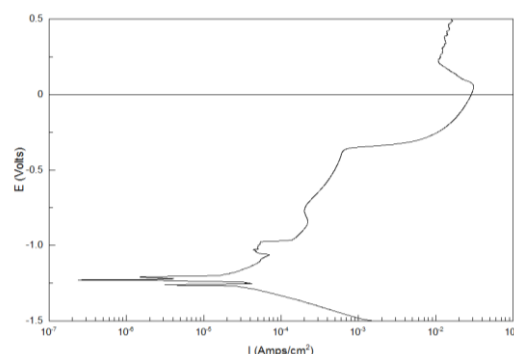


圖 8 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 鉚錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 溶液之動電位極化曲線。
Figure 8 Potentiodynamic polarization curve of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg solder alloy at 25°C in 3.5%NaCl solution.

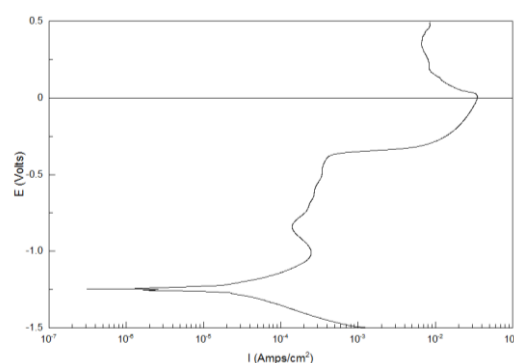


圖 9 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 鉚錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 溶液之電化學極化曲線。
Figure 9 Potentiodynamic polarization curve of Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re solder alloy at 25°C in 3.5%NaCl solution.

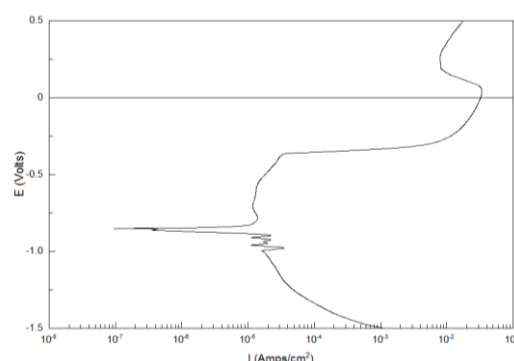


圖 10 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 鉚錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 溶液之電化學極化曲線。
Figure 10 Potentiodynamic polarization curve of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re solder alloy at 25°C in 3.5%NaCl solution.

圖 11 至圖 13 分別為 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg、Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re，在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的表面金相顯微組織，在表面均形成了片狀的鈍化層，其中 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 其片狀組織較不完整且有明顯的裂縫存在。圖 14 至

圖 16 為三種鉛錫之橫截面金相，由圖可見有明顯的鈍化腐蝕反應層，在 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg、Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 表面上的鈍化層厚度分別為 19.26、18.88 及 12.96 μm 。由 XRD 分析，如圖 17，腐蝕反應物主要包含有 SnO、SnO₂ 及 Sn₃(OH)₂Cl₂。

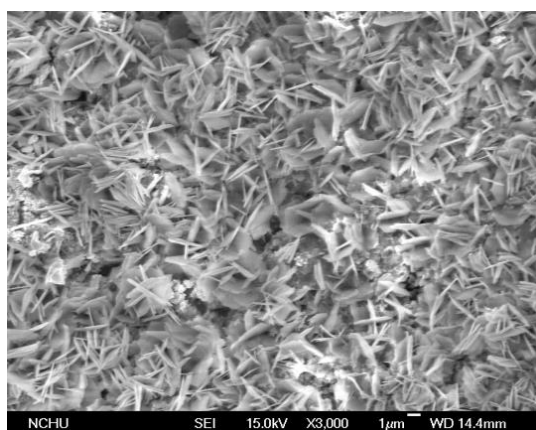


圖 11 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 鉛錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的表面金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 11 SEM image of the surface microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg solder alloy after electrochemical measurement in 3.5%NaCl solution at 25°C.

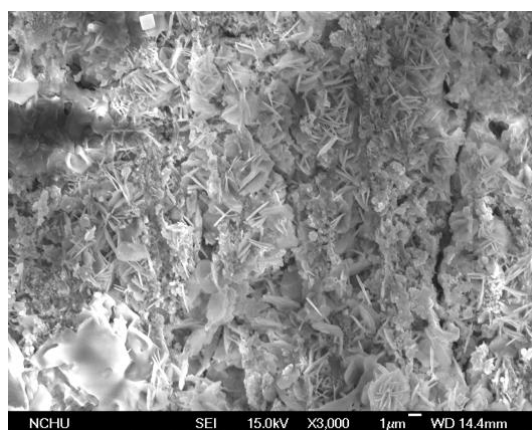


圖 12 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 鉛錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的表面金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 12 SEM image of the surface microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re solder alloy after electrochemical measurement in 3.5%NaCl solution at 25°C.

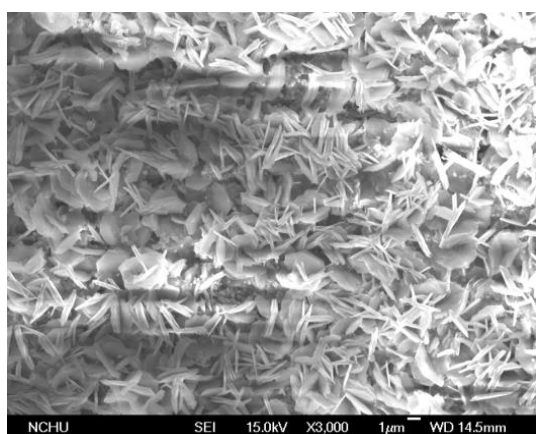


圖 13 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 鉛錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的表面金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 13 SEM image of the surface microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re solder alloy after electrochemical measurement in 3.5%NaCl solution at 25°C.

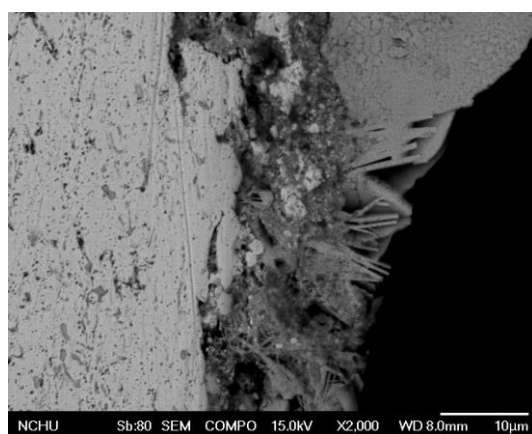


圖 14 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 鉛錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的橫截面金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 14 SEM image of the cross-section microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg solder alloy after electrochemical measurement in 3.5%NaCl solution at 25°C.

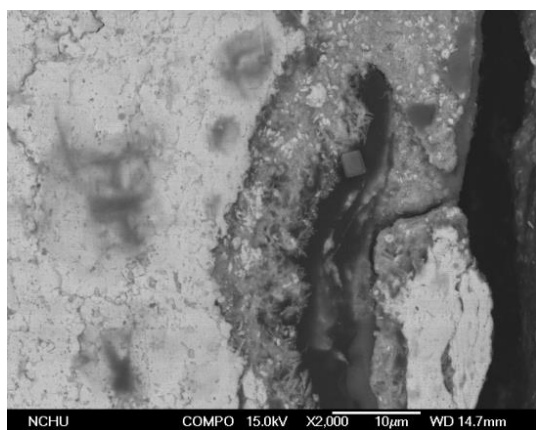


圖 15 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 鉚錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的橫截面金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 15 SEM image of the cross-section microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re solder alloy after electrochemical measurement in 3.5%NaCl solution at 25°C.

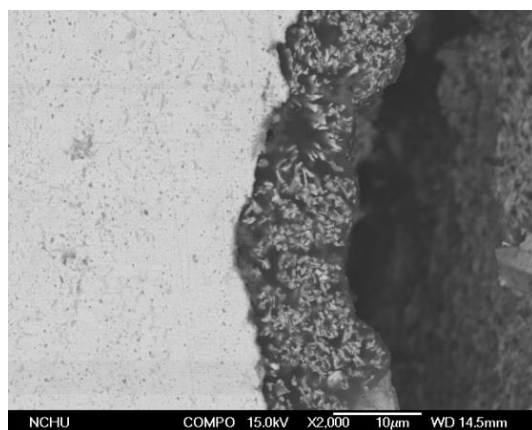


圖 16 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 鉚錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後的橫截面金相顯微組織 SEM 圖。

Figure 16 SEM image of the cross-section microstructure of Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re solder alloy after electrochemical measurement in 3.5%NaCl solution at 25°C.

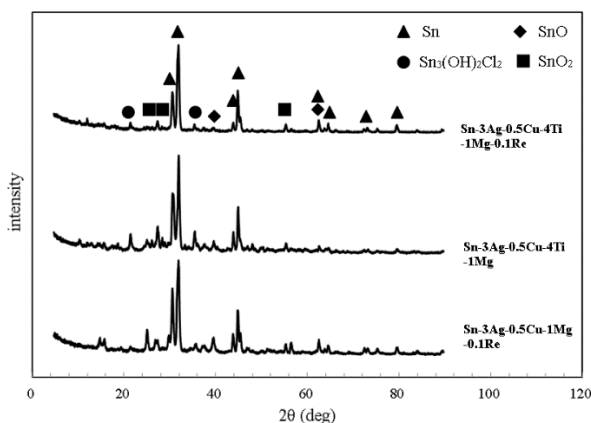


圖 17 Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re、Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 鉚錫合金在 25°C 的 3.5%NaCl 水溶液中經電化學極化後 X 光繞射分析。

Figure 17 XRD patterns of corrosion products formed on the surface of Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re, Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg and Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1 solder alloys after electrochemical measurements in 0.5 M NaCl solution in 3.5%NaCl solution at 25°C.

4. 結論

本研究於 Sn-3Ag-0.5Cu 鉚錫中添加鎂、鈦及稀土元素等活性元素，提升鉚錫活性。由 DSC 熱分析結果顯示添加少量的鎂、鈦及稀土元素於 Sn-3Ag-0.5Cu 中，對於熔點並不會造成顯著的改變，固相線溫度維持在 Sn-3Ag-0.5Cu 鉚錫合金共晶溫度 220°C 附近。以電化學動電位極化方式在 25°C 的

3.5% NaCl 溶液下分析，獲得 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg、Sn-3Ag-0.5Cu-1Mg-0.1Re 及 Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 之腐蝕電位分別為 -1227.2、-1245.5 及 -859.7mV，腐蝕電流密度則分別為 $3.72 \cdot 10^{-6}$ 、 $1.38 \cdot 10^{-6}$ 及 $1.02 \cdot 10^{-6} \text{A/cm}^2$ 。Sn-3Ag-0.5Cu-4Ti-1Mg-0.1Re 具較高的腐蝕電位及較低的腐蝕電流密度，顯示具有較佳的抗腐蝕性。同時含有鎂、

鈦及稀土元素的鉍錫合金經鹽水腐蝕後其表面形成之 SnO 、 SnO_2 及 $\text{Sn}_3\text{O}(\text{OH})_2\text{Cl}_2$ 等氧化物分佈較均勻緻密，於極化後形成之反應層厚度最小。

參考文獻

- [1] “Microstructural Evolution in Lead-free Solder Alloy: Part II. Directionally Solidified Sn-Ag-Cu, Sn-Cu and Sn-Ag”, S. L. Allen, M. R. Notis, and R. R. Chromik, *Journal of Materials Research*, 19 (2004) pp.1425-1431.
- [2] “Effects of Cooling Speed on Microstructure and Tensile Properties of Sn-Ag-Cu Alloys”, K. S. Kim, S. H. Huh, and K. Suganuma, *Materials Science and Engineering A-Structure Materials Properties Microstructure and Processing*, 333 (2002) pp.106-114.
- [3] “A Review of Mechanical Properties of Lead-free Solders for Electronic Packaging”, H. Ma and J. C. Suhling, *Journal of Materials Science*, 44 (2009) pp.1141-1158.
- [4] “Strengthening Mechanism of Nano- Al_2O_3 Particles Reinforced Sn3.5Ag0.5Cu Lead-free Solder”, T. H. Chuang, M. W. Wu, and S. Y. Chang, S. F. Ping and L. C. Tsao, *Journal of Materials Science- Materials in Electronics*, 22 (2011) pp.1021-1027.
- [5] “Influence of SrTiO_3 Nano-particles on the Microstructure and Shear Strength of Sn-Ag-Cu Solder on Au/Ni Metallized Cu Pads”, T. Fouzder, I. Shafiq, and Y. C. Ismathullakhan, *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2011) pp.1885-1892.
- [6] “High Strength Lead-free Composite Solder Materials Using Nano- Al_2O_3 as Reinforcement”, Z. X. Li and M. Gupta, *Advanced Engineering Materials*, 7 (2005) pp.1049-1054.
- [7] “Effects of Nano- Al_2O_3 Additions on Microstructure Development and Hardness of Sn3.5Ag0.5Cu Solder”, C. L. Tsao and S. Y. Chang, C. I. Lee, and W. H. Sun, C. H. Huang, *Materials & Design*, 31 (2010) pp.4831-4835.
- [8] “Properties of Lead-free Solder Alloys with Rare Earth Element Additions”, C. M. L. Wu, D. Q. Yu, C. M. T. Law, and L. Wang, *Materials Science and Engineering R*, 44 (2004) pp.1-44.
- [9] “Solder Alloys and Soldering Processes for Flux-free Soldering of Difficult-to-wet Materials”, F. Hillen, D. Pickart-Castillo, I. J. Rass, and E. Lugscheider, *Welding & Cutting*, 52 (2000) E162-E165.
- [10] “Active Solder Joining of Metal, Ceramics and Composites”, R. W. Smith, *Welding Journal*, 10 (2001) pp.30-35.
- [11] “Active Soldering of Indium Tin Oxide (ITO) with Cu in Air Using an Sn3.5Ag4Ti(Ce, Ga) Filler”, S. Y. Chang, L. C. Tsao, M. J. Chiang, C. N. Tung, G. H. Pan, and T. H. Chuang, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12 (2003) pp.383-389.
- [12] “Low Temperature Bonding of Alumina/Alumina and Alumina/ Copper in Air Using Sn3.5Ag4Ti (Ce,Ga) Filler”, S. Y. Chang, T. H. Chuang, and C. L. Yang, *Journal of Electronic Materials*, 36 (2007) pp.1193-1198.
- [13] S. Lu and C. Wei, “Effect of Mg on the Microstructure and Properties of Sn-Ag-Cu Lead-free Solder”, 6th International Conference on Electronic Packaging Technology, Ed. by IEEE, 2005, Vol. 6, pp.1-4.
- [14] “Direct Bonding of Silicon with Solders Type

- Sn-Ag-Ti,” R. Kolenak, I. Kostolný, and M. Sahul, Soldering & Surface Mount Technology, 28 (2016) pp.149-158.
- [15] “Electrochemical Corrosion Behaviour of Pb-free SAC 105 and SAC 305 Solder Alloys: A Comparative Study”, M. Fayerk, A. S. M. A. Haseeb, and M. A. Fazal, Sains Malaysiana, 46 (2017) pp.295-302.
- [16] “Corrosion Behavior of Corroded Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Alloy”, C. W. See, M. Z. Yahaya, H. Haliman, and A. A. Mohamad, Procedia Chemistry, 19 (2016) pp.847-854.
- [17] “Electrochemical Behavior of Zn-xSn High-Temperature Solder Alloys in 0.5 M NaCl Solution”, Z. H. Wang, C. T. Chen, J. T. Jiu, S. Nagao, M. Nogi, H. Koga, H. Zhang, G. Zhang, and K. Suganuma, Journal of Alloys and Compounds, 716 (2017) pp.231-239.
- [18] T. B. Massalski, H. Okamoto, P. R. Subramanian, and L. Kacprzak, in: Binary Alloy Phase Diagrams 2nd Edition (ASM International, OH, USA, 1990) p.2551-2552.