

熱浸鍍鋅製程對功能性結構用鋼特性之影響

張凱程、徐國閔、林招松

國立台灣大學材料科學與工程學系

* 通訊作者：csclin@ntu.edu.tw

摘要

現今橋梁用材逐漸由鋼材取代傳統的混凝土，加上台灣氣候多雨與潮濕，防蝕顯得愈加重要，其中熱浸鍍鋅為一常見之防蝕方法。本研究為探討建築用鋼及高強度橋梁用鋼經過熱浸鍍鋅處理後對機械性質、鍍層性質及顯微結構差異的影響。機械性質方面，經由拉伸試驗結果顯示，熱浸鍍鋅處理對鋼材銲接強度並不會造成該處強度明顯下降。研究中使用化學剝除法得知，熱浸鍍鋅後之鍍層主要分為兩部分：接近表面的純鋅以及佔鍍層中大部分的 ζ 相 ($FeZn_{13}$)，由於鐵沒有足夠的時間擴散，因此沒有觀測到鐵含量較多的 δ 相存在。此外，由於鋅浴中鋁含量極低 ($\leq 0.001\%$)，在缺乏鐵鋁障蔽層的形成下，快速的鐵鋅反應，使得鍍層內生成許多細小且不緻密的 ζ 相顆粒鍍層結構。

關鍵詞：熱浸鍍鋅、包藥電弧銲接、機械性質、化學剝除法、鍍層。

一、前言

由於鋼材相較傳統混凝土有較佳的強度、韌性、製作加工容易、施工工期短等優點，鋼材已成為現今橋梁結構與建築等建材的主要材料。然而台灣多雨的氣候對鋼材具有腐蝕加劇的影響，因此腐蝕的防護為一筆不小的開銷。鋼結構物防蝕常用方法包括熱浸鍍鋅與塗裝，其中熱浸鍍鋅能提供優異的犧牲陽極保護效果^(1,2,3,4)。然而作為建材使用下，功能性結構用

鋼銲接後的性質也是必須考慮的因素，儘管有文獻對銲接後鋼材的性質作討論^(5,6)，但銲接後熱浸鍍鋅的腐蝕行為和機械性質仍較少有人論述。

二、功能性結構用鋼銲接與熱浸鍍鋅方式

本研究中的四種熱浸鍍鋅鋼材是由中華民國熱浸鍍鋅協會提供的，包括經過熱浸鍍鋅處理的 SBHS500、SM570M、SN490B/ SN490C，化學成分及相關機械強度如表 1，銲接方式為包藥電弧銲接。

鋼材於熱浸鍍鋅前沒有予以預熱處理，熱浸鍍鋅製程如下所示：室溫酸洗處理 60 分鐘→室溫水洗 30 分鐘→助熔劑（氯化銨溶液 $[NH_4Cl]$ 、氯化鋅溶液，濃度約 32%）處理約 3 分鐘→熱浸鍍鋅（溫度約 450°C，Zn 含 98% 以上，Al ≤ 0.001%）約 5 分鐘→冷卻（水冷）約 3 分鐘。

表 1、熱浸鍍鋅鋼底材的化學組成

鋼種符號	化學成分 (wt %)					降服強度 (N/mm ²)	抗拉強度 (N/mm ²)
	C	Si	Mn	P	S		
SN490B	≤0.18	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.015	≥325	490~610
SN490C	≤0.18	≤0.55	≤1.6	≤0.02	≤0.008	≥325	490~610
SBHS500	≤0.11	≤0.55	≤2.0	≤0.02	≤0.006	≥500	570~720
SM570MB	≤0.18	≤0.55	≤1.6	≤0.02	≤0.008	420~540	570~720

三、無處理銲接鋼材與熱浸鍍鋅銲接鋼材的機械性質評估

四種銲接後之熱浸鍍鋅試樣以及僅銲接沒有經過熱浸鍍鋅處理的試樣，皆依據 ASTM E8 對銲接材料測試的規範，利用萬能試驗機做拉伸測試，每一種鋼材及製程都測試過 3 次，因再現性高，任取 1 次結果呈現於圖 1。

每種鋼材經拉伸試驗分析後，皆選用數位相機將斷裂試棒之俯視圖及破斷面拍照記錄，如圖 2- 圖 5。結果顯示，熱浸鍍鋅處理對銲接後試樣的

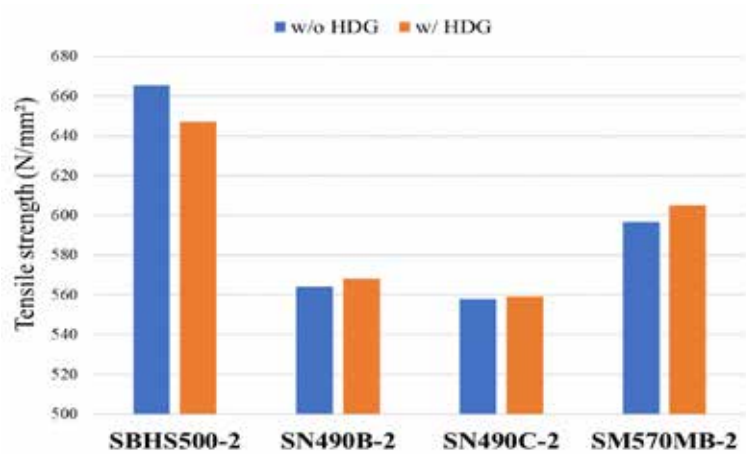


圖 1、拉伸試驗結果

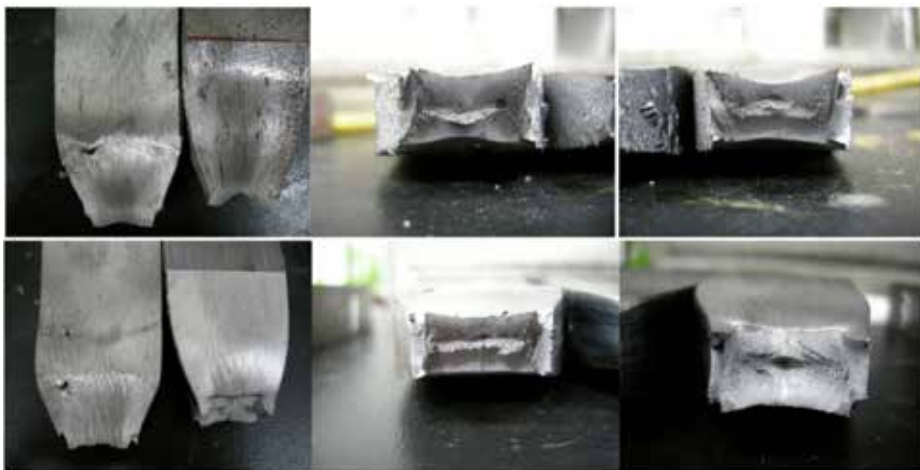


圖 2、SBHS500 (a) 未經熱浸鍍鋅與 (b) 經熱浸鍍鋅斷裂試棒之俯視圖及破斷面

抗拉強度，並無太大的影響，且破斷面之形貌，皆屬延行破壞狀。此外，破斷的位置幾乎都是位於母材，顯示鍍材強度夠高，不會因為鍍接而導致整體強度的下降。

四、鍍層分析與討論

黃澤峰⁽⁷⁾在其研究資料中提到，熱浸鍍鋅鋼板的鍍層結構主要是由鋼鐵中的鐵和鋅浴中的鋅交互擴散而形成鐵鋅合金相，鐵鋅二元平衡相圖如圖 6 所示。當鋼材浸入熔融的鋅浴中，鋅會在接觸面上和鐵基生成固溶



圖 3、SN490B (a) 未經熱浸鍍鋅與 (b) 經熱浸鍍鋅斷裂試棒之俯視圖及破斷面

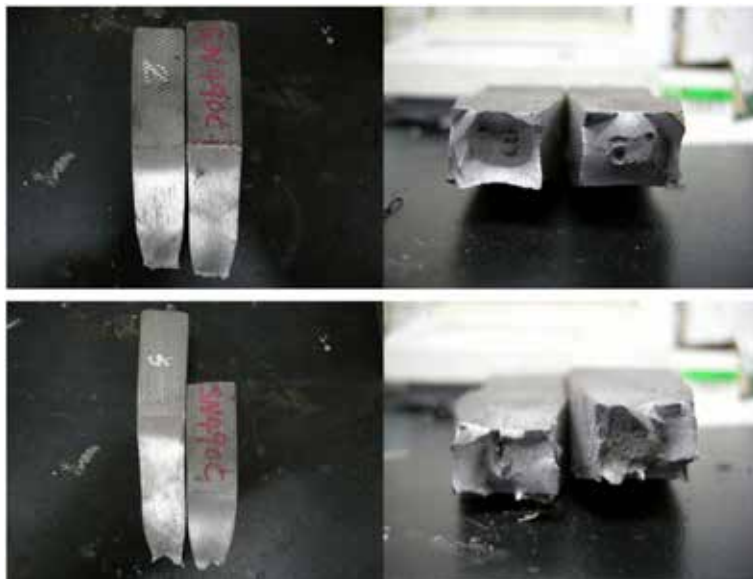


圖 4 SN490C (a) 未經熱浸鍍鋅與 (b) 經熱浸鍍鋅斷裂試棒之俯視圖及破斷面

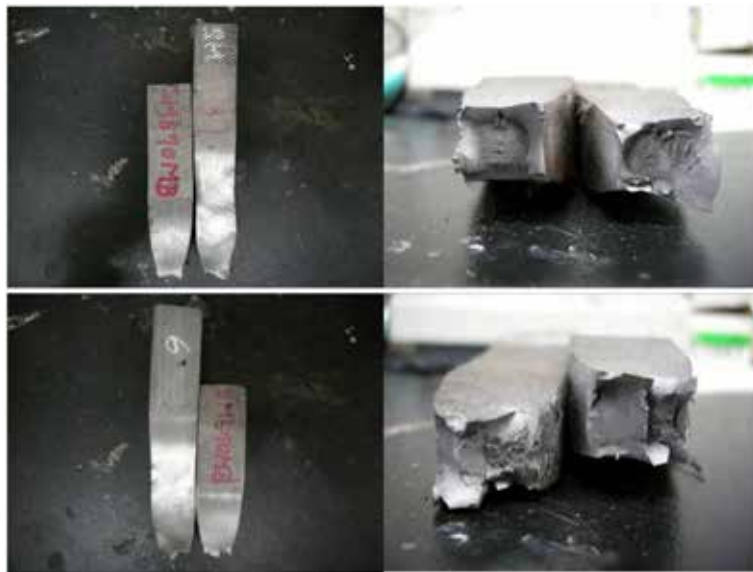


圖 5、SM570MB (a) 未經熱浸鍍鋅與 (b) 經熱浸鍍鋅斷裂試棒之俯視圖及破斷面

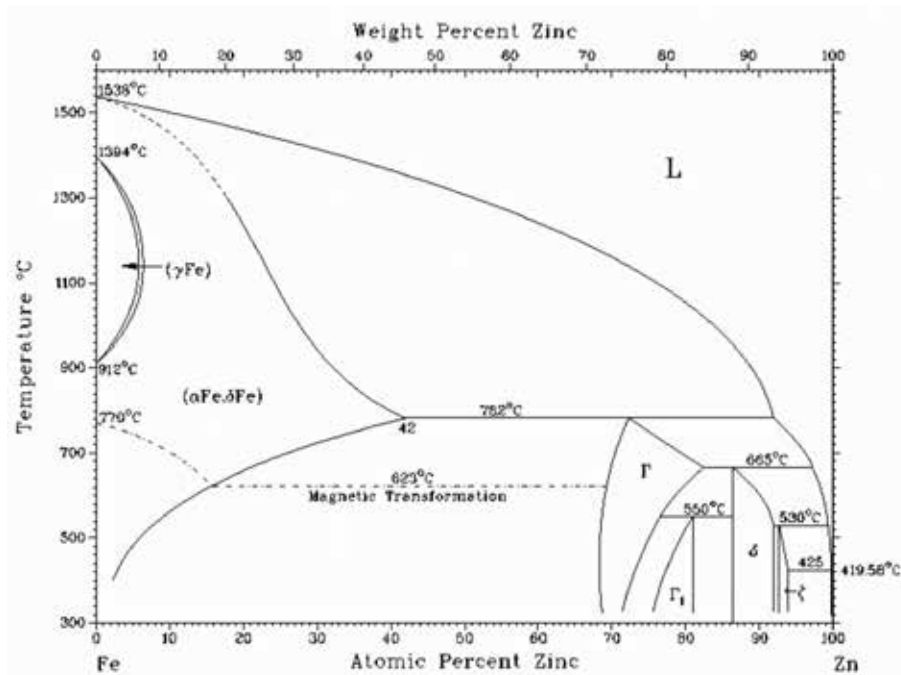


圖 6、鐵鋅二元平衡相圖

體，當鋅在固溶體中達到飽和狀態時，鋅會在鐵基材晶格中擴散而逐漸形成合金，同時，鐵也會擴散到熔融之鋅浴中而形成富鋅之金屬化合物，從圖 6 上可看出，於反應初期，在較低的鐵含量之下，鍍層內即生成 ζ 相 (FeZn_{13})，而於鍍層較表面之區域，由於鐵含量接近零，因此於鍍層表面形成接近純鋅相。

熱浸鍍鋅鋼材 SBHS500、SM570MB、SN490B、SN490C 的橫截面蝕刻如圖 7，可看出鍍層內的金屬化合物細碎不連貫，表示其並非一層一層均勻向外長，而是快速的形成。然而，鍍層內的結構主要是 Fe-Zn 相為主，其餘為純鋅相，鍍層厚度皆約為 200~250 μm 。以較高倍率 SEM (掃描式電子顯微鏡) 觀察的影像如圖 8，搭配 EDS (能量色散 X 射線譜) 分析，一種是鐵含量約為 7 at.% 左右的 ζ 相 (顏色較淺)，而另一種則為純鋅相 (顏色較深)，界面以下則為鋼底材。

圖 9(a) 與 (b) 即為以包藥電弧銲接之 SBHS500 經熱浸鍍鋅處理後的橫截面顯微組織。由圖 9(b) 中藉由觀察經化學金相腐蝕後之銲道中間、熱影響區及基材橫截面鍍鋅層區域可發現，最遠離銲道的部分和圖 7 的

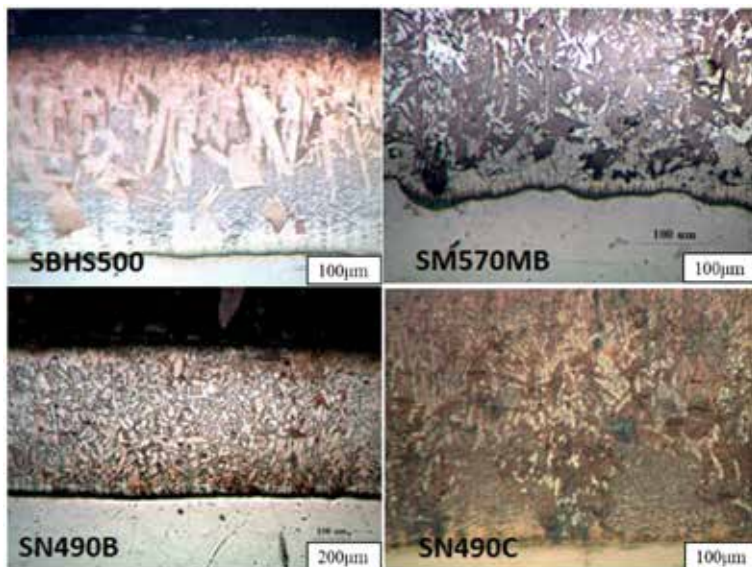


圖 7、四種熱浸鍍鋅鋼材之橫截面

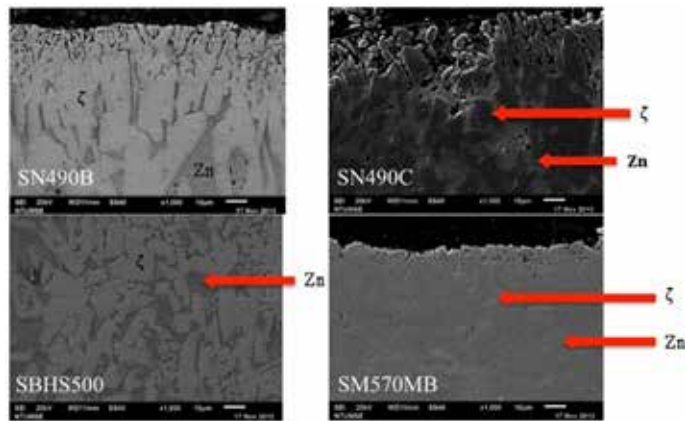


圖 8、四種鋼材經熱浸鍍鋅處理後在 SEM 下之橫截面

SBHS500 擁有相同的顯微組織，而在銲道邊緣鍍層內 Fe-Zn 相的顆粒明顯較小，其中以銲道中央區域之 Fe-Zn 相顆粒最小，銲道區域之鍍層厚度約為 $300\mu\text{m}$ 。有關鍍層內所含之金屬化合物種類，則使用化學剝除法鑑定。

在化學剝除測試中，以 7.5vol% 的鹽酸當作化學剝除液，並在化學剝除時以恆電位儀記錄 OCP (開路電位) 隨時間的變化，如圖 10，依據 OCP 的變化可分為四個區間。為了解這四個區間相對應鍍層內結構及成

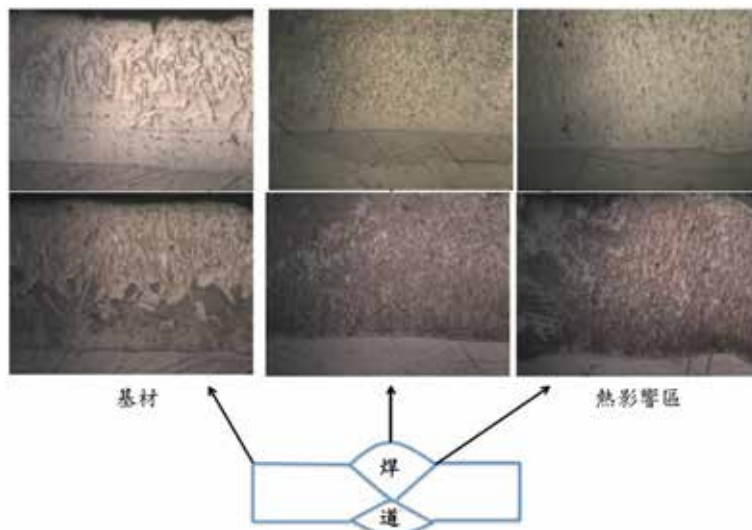


圖 9、銲後 SBHS500 經熱浸鍍鋅處理後 (a) 蝕刻前與 (b) 蝕刻後之橫截面

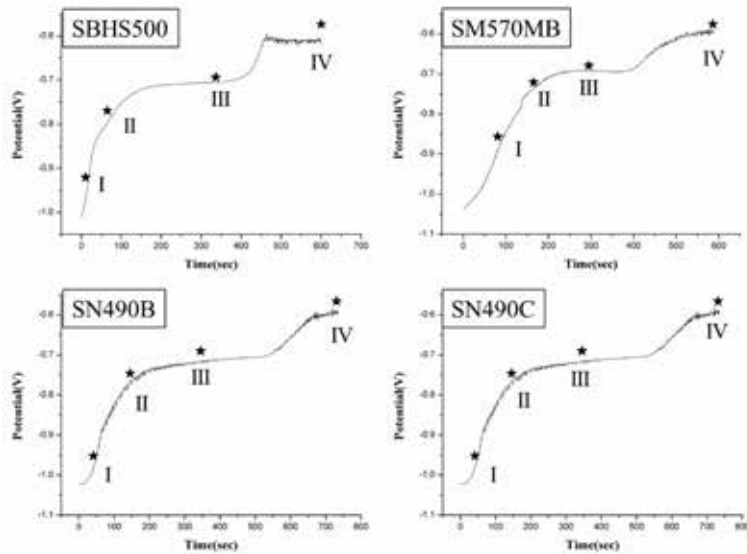


圖 10、四種鋼材在 7.5vol% 的鹽酸下隨時間變化之 OCP

分的關係，每個鋼材分別在剝除時間達到這四個時間點時，快速將試片抽離出腐蝕液並以大量去離子水沖洗，以停止化學腐蝕反應，接著以 SEM 並搭配 XRD (X 光繞射儀) 作分析，結果如圖 11、12 所示。

由圖 11 可知，SBHS500 上的熱浸鍍鋅層在化學剝除 25 秒時，表面形貌呈現顆粒狀顯微組織，明顯且尺寸粒度雷同；而經 75 秒的化學剝除後發現，顆粒狀顯微組織已消失，取而代之的是棒狀的顯微結構；化學剝除至 350 秒時，呈現出來更粗大的不規則柱狀組織；最後至 650 秒時，所有特徵組織都消失，呈現出平坦的表面形貌。搭配圖 12 化學剝除前的 XRD 結果與圖 8 SEM 的結果，可知鍍層內主要為 Zn 及 ζ 兩種結構，650 秒前也都是顯現這兩相結構，到 650 秒時則開始偵測到底材訊號(鐵)。由觀察分析結果得知，鍍層最外側含有較多的純 Zn 相存在，因此所測得的開路電位較低 (-1.02 V)，隨著剝除時間的增加，愈往介面方向移動時，鐵含量增加使得愈多的 ζ 相生成，因此開路電位逐漸提升，最後剝除至鋼底材時，電位則明顯高於鍍層內所有的結構 (-0.6 V)。此現象顯示此類鍍層對 SBHS500 而言，提供優異的犧牲保護作用，且鍍層中間部位形成

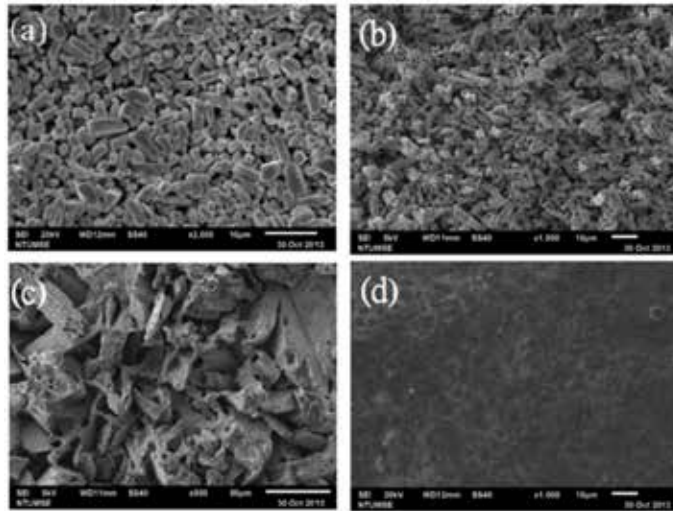


圖 11、SBHS500 在 (a) 25 秒、(b) 75 秒、(c) 350 秒、(d) 650 秒之 SEM 俯視圖

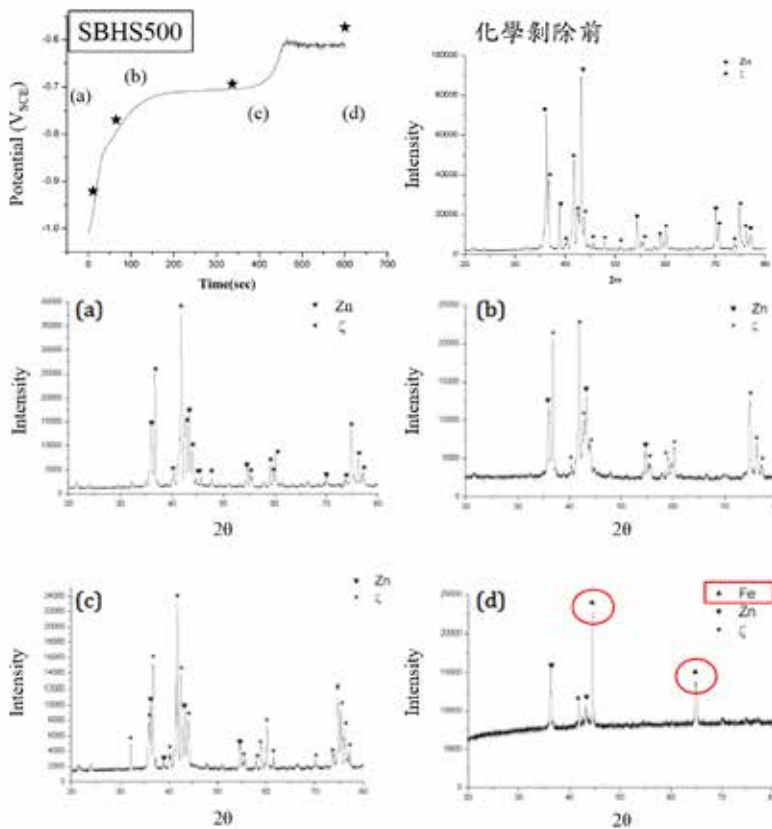


圖 12、SBHS500 經 (a) 25 秒、(b) 75 秒、(c) 350 秒、(d) 650 秒之 XRD 結果

較完整連續的金屬化合物層，不僅繼續提供犧牲保護的作用，亦可降低腐蝕速率。其餘三種鋼材結果皆與 SBHS500 類似，僅有時間上的差異，故未在此呈現。

五、結論

- 1、由拉伸試驗的實驗數據中可知，經熱浸鍍鋅處理和未經熱浸鍍鋅處理的銲接試樣，其抗拉強度沒有顯著的差異。而破斷位置皆位於母材，表示銲接後熱浸鍍鋅處理並不會造成該處強度明顯下降。
- 2、經熱浸鍍鋅處理後，由於鋅浴中鋁含量極低 ($\leq 0.001\%$)，在缺乏鐵鋁障蔽層的形成下，快速的鐵鋅反應，使得鍍層內生成許多細小且不緻密的 Fe-Zn 相顆粒。而此 Fe-Zn 相在鑑定後得知，皆為 ζ 相。

六、參考文獻

1. A. R. Marder. The metallurgy of zinc-coated steel. *Progress in Materials Science*, 45(3) (2000) 191-271.
2. K. R. Baldwin, M. J. Robinson, C. J. E. Smith. The corrosion resistance of electrodeposited zinc-nickel alloy coatings. *Corrosion Science*, 35(5-8) (1993) 1267-1272.
3. S. M. A. Shibli, B. N. Meena, R. Remya. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. *Surface and Coatings Technology*, 262 (2015) 210-215.
4. A. Gallego, J. F. Gil, E. Castro, R. Piotrkowski. Identification of coating damage processes in corroded galvanized steel by acoustic emission wavelet analysis. *Surface and Coatings Technology*, 201(8) (2007) 4743-4756.
5. R. Nandan, T. Debroy, H. Bhadeshia. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6) (2008) 980-1023.
6. S. M. A. Shibli, B. N. Meena, R. Remya. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process. *Surface and Coatings Technology*, 262 (2015) 210-215.
7. 黃澤峰，熱浸鍍鋅鋼鍍鋅層結晶構造對抗蝕性之影響，2008 年。