

田口實驗設計於低碳鋼熱浸純鋁 之應用

洪舜立*、王朝正*、林坤正*

The Application of Hot Dipping Commercial Pure Aluminum onto Low Carbon Steel

Shuenn-Lih Horng, Chaur-Jeng Wang* and Kuen-Jeng Lin**

摘 要

本研究以田口實驗計劃法針對熱浸時間、熱浸溫度、試片移出鋁湯速度及試片表面粗糙度等進行實驗規劃，以期對本系統之鍍鋁研究有一綜合性的結果。實驗結果顯示對合金化層厚度而言，「熱浸溫度」為顯著因子，其次是「熱浸時間」；對外表鋁鍍層厚度而言，顯著因子為「熱浸時間」，至於試片移出鋁湯速度及試片表面粗糙度在本研究的操作條件下對合金化層厚度及外表鋁鍍層厚度的影響極微。

關鍵詞：熱浸鍍鋁，田口式實驗設計法，低碳鋼，合金化層，表面處理。

ABSTRACT

Taguchi Method was applied to explore aluminum hot dipping onto low carbon steel. Four hot dipping parameters (i.e. operating temperature, time, speed and surface roughness) were concerned. The results indicated that the hot dipping temperature and time are the dominant parameters of the aluminized layer thickness. Besides, the hot dipping time is the dominant parameter of the thickness of external aluminum layer on specimens also. However, the dipping speed and the surface roughness of specimens are not important parameters.

Keyword: Hot Dip Aluminum, Taguchi Experiment Design, Low Carbon Steel, Alloying Layer, Surface Treatment.

一、前言

台灣地處亞熱帶與熱帶的交界且四面環海，故在材料的選用上面臨「腐蝕」的嚴重考驗。根據資料統計⁽¹⁾，台灣全年因腐蝕所造成的損失

大約為新台幣 800 億元，又距海近處之腐蝕情形較距海遠處嚴重，因此「腐蝕防制」也就成為選用材料上的重要課題。

目前在腐蝕防制上廣泛使用的方法有：選用

* 國立台灣工業技術學院機械工程研究所

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan Institute of Technology, Taipei, Taiwan, R.O.C

耐蝕材料、披覆耐蝕塗層、抑制劑和鈍態劑的使用、使用外加電流的陰極防蝕法以及消耗性的犧牲陽極等，其中「披覆耐蝕塗層」兼具抗蝕性佳及合乎經濟效益兩大優點，故廣泛的使用於各大領域。

在耐蝕塗層中，「鍍鋁」被證實具有優越的耐蝕抗蝕能力、可耐二氧化硫的侵蝕、可耐腐蝕和高溫同時作用的環境、有良好的導電性及抗滲碳性並具高反射力及耐磨性⁽²⁾，故遠在 1893 年即有相關的研究報告問世⁽³⁾。在已被研究的鍍鋁方法中「熱浸法鍍鋁」算是最經濟、最快速、最能合乎大量生產及工業自動化需求的方法，因此廣泛的使用於石油、化工、機械、建築、通訊、交通運輸及海洋工程等領域。近年來由於熱浸法鍍鋁在海洋環境及含硫、含氯的氣氛中具有優越的耐蝕性，故其應用範圍及產量不斷增加。目前，國內雖然已有能力生產熱浸鍍鋁鋼板，然而熱浸鍍鋁製品仍悉數仰賴進口，是故，研發出一套低成本的熱浸鍍鋁技術成爲國內表面處理業之努力方向。因此，「熱浸法鍍鋁技術」成爲本研究之主題。

一般而言，熱浸法鍍鋁依鋁鍍液的成分可分成兩類⁽⁴⁾，第一類是鋁矽合金（含矽量在 5~11%），具耐熱抗蝕特性，應用於高溫耐蝕的環境且具有良好的加工性。第二類爲不含矽的商業級純鋁，適用於耐大氣腐蝕及一般用途。爲簡化實驗參數本研究採用第二類的純鋁作爲浸鍍液。

此外，在實驗的設計上，田口玄一博士提出一套可減小實驗規模、縮短實驗時間、降低實驗成本，同時能評估各實驗參數的影響力大小及兼顧到可靠度的實驗計劃方法—「田口式實驗設計法(Taguchi Experiment Design)」^(5,6,7)。本研究採用田口式實驗設計法來規劃實驗內容以期能在最低成本及最短時間內找出工業上可控制的最

佳實驗參數。

最後，本研究在不討論機械性質要求的條件下，由製程研發及建立實驗設備開始，經由田口式實驗設計法找出對鍍層厚度影響力較大的參數，並且印證熱浸鍍鋁早期學者的理論。

二、實驗方法

本研究使用低碳鋼棒爲素材，其化學成份(wt%)爲碳：0.19、矽：0.02、錳：0.69、磷：0.02、硫：0.04、鉻：0.05。低碳鋼素材於車除黑皮冷軋成片後，經 930 °C、10 分鐘的正常化處理，再經水冷式砂輪切割機裁剪至約 24mm × 15mm × 3mm 之尺度，並使用十點平均粗糙度 Rz 作爲試片表面粗糙度的測量方法。每個試片均經由平面磨床之輪磨及砂紙來控制其表面粗糙度，經表面粗糙度儀的檢驗使粗糙度合乎要求，而後再經鑽孔、清洗、烘乾保存備用。在進行熱浸處理前試片需先做前處理和助熔處理。所謂的前處理亦即使用去離子水清洗工件表面，再用 10wt%的氫氧化鈉(NaOH)水溶液在超音波中振盪 10 分鐘以去除動、植物性油脂⁽⁸⁾，後經去離子水稀釋及去除殘留之脫脂劑與油垢，之後用丙酮強力去除無機油垢以達清淨之表面。再浸入 15wt%的鹽酸水溶液中做酸洗，以活化金屬表面及去除不必要的氧化物或殘留物⁽⁹⁾；再經氫氧化鈉中和及去離子水稀釋而完成前處理，詳細之流程圖如圖 1 所示。而助熔處理是使用英國 Angloward 公司製造之鋁合金焊接用低溫焊劑(Flux)爲助熔劑，將此助熔劑以 50wt%的比例調製成乳白色的水溶液，均勻塗於試片後送入爐中以 200 ~ 250 °C、乾燥 5 ~ 10 分鐘後得到一披覆均勻白色助熔劑的試片。經助熔處理過的試片即依所設定之控制因素及水準值來進行熱浸鍍鋁作業。浸鍍完成後的後處理是先使用自來水清洗，再將試片放置於 50 °C 至 60 °C 的磷酸、硝酸、

水以 1 : 1 : 1 的比例混合之水溶液中清洗 1 分鐘，再經水洗稀釋，乾燥而完成。其流程圖如圖 2 所示。

本實驗選擇熱浸溫度、試片移出鋁湯速度、熱浸時間及試片表面粗糙度等四個參數為控制因素，以合金化層和外表鋁鍍層之厚度為實驗目標，選用直交表 L₉ 來配置實驗參數，直交表四個控制因素之水準值如表 1 所示。

鍍層厚度的量測是在涵蓋鋁鍍層截面上，隨機取樣拍攝之 2 個金相照片，再將金相照片放大至 200 倍，然後於每張照片上以鋁鍍層外表面為基準，在其垂直方向分別量取合金化層和外表鋁鍍層之值，再沿基準方向每隔 5mm 處各取一個值共取 20 個值，依此求得該照片之量測平均值及其標準差^[5]，故每個試片可得到 2 個合金化層和外表鋁鍍層厚度的平均厚度值。

三、實驗結果與討論

3.1 鍍層特性

圖 3 至圖 5 為低碳鋼在各參數條件下熱浸鍍鋁後的截面金相，如圖所見，其合金化層及外表鋁鍍層厚度均隨時間之增長而加大，且合金化層厚度也隨溫度之增高而加大。

3.2 鍍層參數之分析

經量測後之合金化層厚度及外表鋁鍍層厚度的統計平均值及其標準差和 S/N 比如表 2 所示。因此為求得最經濟性的鍍著成本，這兩個品質特性在計算其 S/N 比值時以望大特性處理之^[5]。

在 S/N 比值作為品質特性的判讀依據時，以 S/N 比值愈大表示獲得愈佳的實驗結果。表 3、表 4 分別為合金化層、外表鋁鍍層各參數三水準

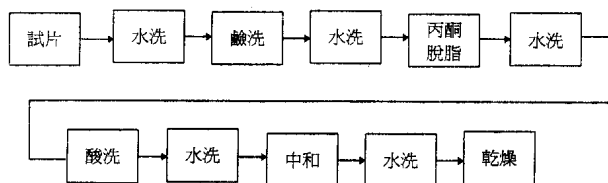


圖 1 前處理之流程圖

Fig.1 The flowchart of pretreatment

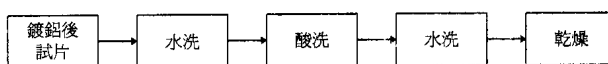


圖 2 後處理之流程圖

Fig.2 The flowchart of post-treatment

表 1 矩陣實驗之控制因素及水準值

Table1 Control Factors and levels

控制因素	水準 1	水準 2	水準 3
A 熱浸溫度 (°C)	700	750	800
B 試片移出鋁湯速度 (mm/s)	5	15	25
C 熱浸時間 (sec)	16	64	144
D 試片表面粗糙度 (μm)	0.15	0.7	3.0

表 2 矩陣實驗之統計平均值及標準差和 SN 比

Table2 The experiment values of average coating thickness, standard deviation and SN'ratio in matrix experiment.

NO	因素 ABCD	合金化層厚度			外表鋁鍍層厚度			
		N1	N2	S/N	N1	N2	S/N	
1	1111	平均值	24	21	27.83	10	10	20.30
		標準差	4.6	6.5	-15.00	1.8	0	-2.02
2	1222	平均值	33	35	30.51	36	31	30.41
		標準差	8.0	7.7	-17.87	3.4	2.4	-9.51
3	1333	平均值	40	43	32.44	64	44	34.23
		標準差	9.3	8.5	-18.99	3.0	4.0	-10.91
4	2123	平均值	83	80	38.19	27	34	29.51
		標準差	16.5	13.0	-23.42	3.3	6.5	-14.31
5	2231	平均值	117	128	41.74	53	59	34.86
		標準差	23.2	29.3	-28.43	3.4	3.1	-10.20
6	2312	平均值	21	55	28.76	20	15	22.49
		標準差	4.0	14.3	-20.42	1.8	3.1	-8.11
7	3132	平均值	189	194	45.62	37	47	32.21
		標準差	45.4	33.7	-32.04	4.5	10.1	-17.83
8	3213	平均值	82	99	39.02	12	11	21.38
		標準差	16.5	14.8	-23.92	4.2	2.2	-10.17
9	3321	平均值	143	125	42.47	31	38	30.54
		標準差	14.1	22.7	-25.54	4.7	4.0	-12.84

單位: μm

間的 S/N 比值回應表，將此結果以曲線來描繪，則分別為圖 6、圖 7 的望大特性回應圖，圖上的曲線變化愈陡峭表示該因素對此品質特性的影響性愈敏感，若有些微的改變量即會造成很大的結果變異，則此因素為重要的影響因子。

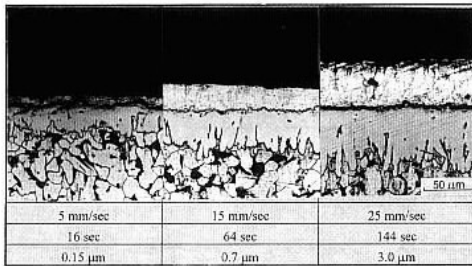


圖 3 低碳鋼於 700 °C 熱浸鍍鋁後之截面金相
Fig.3 The cross section morphology of specimens hot dipped at 700 °C.

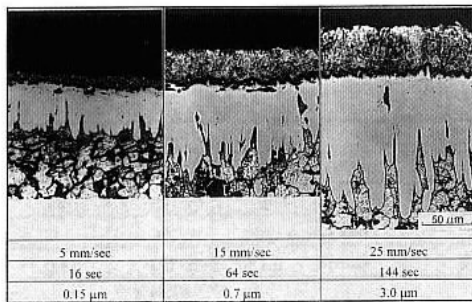


圖 4 低碳鋼於 750 °C 熱浸鍍鋁後之截面金相
Fig.4 The cross section morphology of specimens hot dipped at 750 °C.

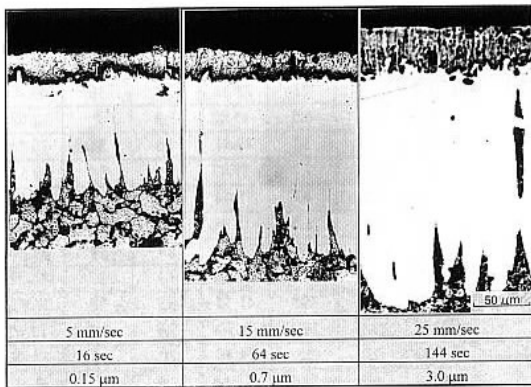


圖 5 低碳鋼於 800 °C 熱浸鍍鋁後之截面金相
Fig.5 The cross section morphology of specimens hot dipped at 800 °C

3.3 熱浸溫度之影響

熱浸法鍍鋁是靠鋁、鐵形成中間相化合物 (intermediate compound) 而結合在一起，然而，中間相化合物之成長速率主要是受熱浸溫度來

表 3 合金化層望大特性回應表

Table 3 Effects of control factors on alloying layer.

控制因素	單位: dB			
	水準 1	水準 2	水準 3	差異值
A 熱浸溫度	30.01	36.23	42.37	12.36
B 試片移出鋁湯速度	36.97	37.09	34.56	2.53
C 熱浸時間	31.62	37.06	39.93	8.31
D 試片表面粗糙度	37.10	34.97	36.55	2.13

表 4 外表鋁鍍層望大特性回應表

Table Effects of control factors on external aluminum thickness.

控制因素	單位: μm			
	水準 1	水準 2	水準 3	差異值
A 熱浸溫度	28.32	28.95	28.03	0.95
B 試片移出鋁湯速度	27.34	28.88	29.08	1.74
C 熱浸時間	21.39	30.15	33.77	12.38
D 試片表面粗糙度	28.56	28.37	28.37	0.19

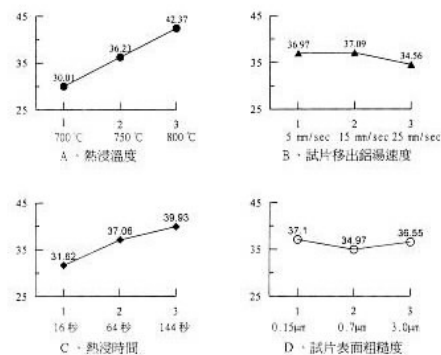


圖 6 合金化層望大特性回應圖

Fig.6 Effects of control factor on alloying layer.

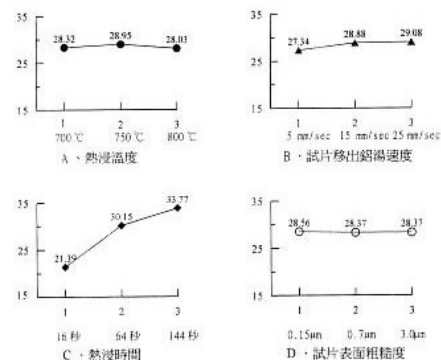


圖 7 外表鋁鍍層望大特性回應圖

Fig.7 Effects of control factor on the thickness aluminum layer.

控制。依先前之理論^[10,11,12]，熱浸法鍍鋁中鋁、鐵之接合主要是靠鐵原子擴散進入鋁鍍層內及鋁原子擴散進入鐵基材內，並形成中間相化合物

的擴散層而使鋁、鐵緊密接合在一起。然而就擴散速率而言，鐵和鋁具有不同的晶體結構，並且其原子大小相差 13%，以插入方式之結合是不可能的，最可能的方式是採空孔擴散(vacancy diffusion)機構來形成中間相化合物而接合在一起^[10]。因為熱浸時液相鋁的密度降低，表層原子空孔數目增多，有利於擴散行為的進行，而助長了中間相化合物的生成。

再就溶解度而言，由鋁鐵平衡相圖^[13]估計，在 700 °C 時鐵在鋁液中之溶解度約為 2.5wt%，而到了 800 °C 時溶解度提高到 6wt% 左右。隨著溫度之增高而使鐵之溶解度加大，因此提高溫度可有效促進鋁、鐵之接合。

基於擴散速率與溶解度之因素，由表 3 及圖 6 可清楚看出在合金化層厚度方面，熱浸溫度之三個不同水準的差異值達 12.36dB，為四個控制參數中差異最大者，故可知「熱浸溫度」為合金化層厚度之顯著因子。

相對地，在外表鋁鍍層厚度方面，由表 4 及圖 7 之熱浸溫度引起的品質差異值僅 0.92dB，顯示熱浸溫度對外表鋁鍍層之厚度影響不大。

3.4 熱浸時間的影響

對一擴散行為的反應而言，擴散量隨擴散時間之增長而加大。1974 年，Eremenko^[11]在實驗中發現到了由於鐵原子溶出量到達一定程度時會形成局部飽和狀態而阻礙了鋁原子的擴散。另外，美國的 Ryabov 等人^[12]在 1975 年的研究報告中指出，此一鐵鋁之中間相化合物係深植於鋁材內部而非均勻分佈在鋁、鐵之接觸面上。顯然地，原子半徑較大的鋁原子其擴散速率要比原子半徑較小的鐵原子慢；在熱浸時，金屬鋁呈液態，有較多的空孔，有利於鐵原子擴散。然而因鐵基材為固態，堆積密度高，液態鋁必須等到有鐵原子溶出形成空缺才能順利擴散進入鐵基材

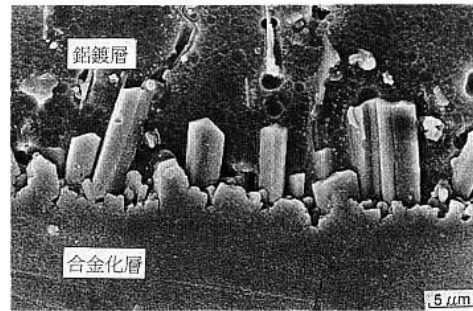


圖 8 低碳鋼在 800 °C 熱浸 289 秒後之截面 SEM 照片，圖中柱狀之凸出物為 FeAl₃ 化合物

Fig.8 SEM micrograph of the surface morphology of low carbon steel hot-dipped at 800 °C for 289sec. The protruded columns are FeAl₃ compound.

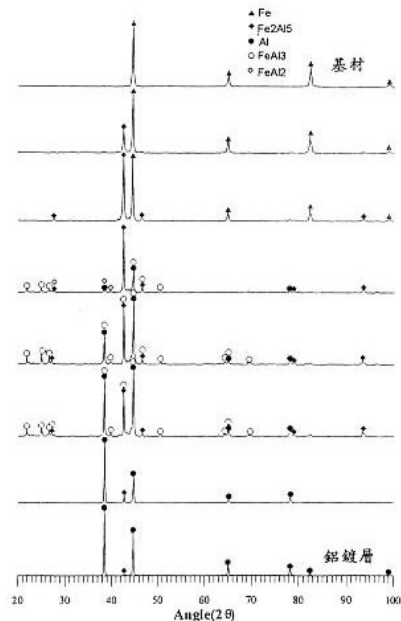


圖 9 低碳鋼在 700 °C 熱浸 64 秒後之 X 光繞射分析，FeAl₃ 存在於 Fe₂Al₅ 合金化層之外側
fig.9 XRD of low carbon steel after hot dipped at 700 °C for 64 sec, FeAl₃ was detected on the outer side of Fe₂Al₅ alloying layer.

內。因此造成了如圖 8 所見，鐵溶出時所形成柱狀組織形態之化合物，而圖 9 為試片由外表層往基材方向每 3~5μm 輕微研磨後，各做一次 X 光繞射之分析結果，由分析的結果可知此化合物為 FeAl₃。

觀察表 3 及圖 6，在合金化層厚度方面，熱浸時間之差異值為 8.31dB，僅次於熱浸溫度的

12.36dB，由此可知「熱浸時間」的影響力僅次於熱浸溫度，為影響合金化層厚度的第二個顯著因子。

在外表鋁鍍層厚度方面，如表 4 及圖 7 中所見，可知熱浸時間之差異值是 12.38dB 為四個控制參數中差異最大者，顯示「熱浸時間」為影響外表鋁鍍層之顯著因子。如圖 8 所示，鐵溶出形成的 $FeAl_3$ 柱狀組織恰構成了較低溶點外表鋁鍍層形成的骨肋。熱浸時間愈長， $FeAl_3$ 成長愈多，使得外表鋁鍍層愈厚。

3.5 試片移出鋁湯之速度的影響

試片移出鋁湯之速度關係到試片之冷卻速率以及液態鋁湯之流散量，藉此可改變外表鋁鍍層之厚度^[10]。Dovey^[13]指出若試片從金屬液中移出之速度慢到趨近金屬液之固化速率時，外表鋁鍍層之厚度會增加到幾 mm 的厚度，此時固化速率和熱傳速率變成了控制因素而主宰了外表鋁鍍層之厚度。

捷克學者 Hrbek^[14]研究當試片從金屬液中移出時，鍍層厚度和移出速度之關係，獲得如圖 10 所示之關係圖。由圖上可知鍍層厚度隨著移出速度之平方根值的增加而增厚，而在兩條直線銜接處呈現不敏感的狀態，即在速度 1.0cm/s ~ 4.0cm/s 的區間內鍍層厚度對速度平方根不敏感。如表 3 所見，對合金化層厚度而言，試片移出鋁湯速度的 SN 比差異值僅為 2.53dB，又在圖 6 中曲線呈現平緩的走勢，顯示試片移出鋁湯速度對合金化層厚度影響很小。

在外表鋁鍍層厚度方面，本研究所選取試片移出鋁湯速度之水準值為 5mm/s、15mm/s、25mm/s 正落於圖 10 中較不敏感的速度區間中，因此外表鋁鍍層厚度和試片移出鋁湯速度無顯著之關係。由表 4 中所顯示之差異值僅為 1.74dB，且在圖 7 中曲線幾近平直，所以在本研

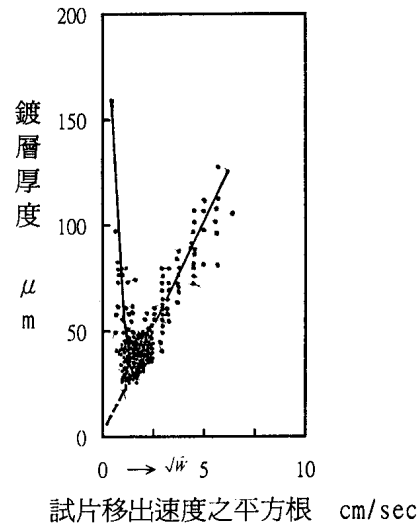


圖 10 鍍層厚度和速度平方根之關係圖⁽¹⁴⁾

Fig.10 The relationship between coating thickness and square root of speed⁽¹⁴⁾

究所選取的速度區間內「試片移出鋁湯速度」對外表鋁鍍層厚度影響極微。

3.6 試片表面粗糙度之影響

一般而言，表面粗糙度越大由於其接觸面積大所以會增加其附著性，而熱浸鍍鋁的接合，是由於鐵原子擴散出基材形成空缺後才由鋁原子擴散入基材內而結合成化合物，所以鐵原子溶出的速度決定了合金化層的厚度。

從表 3 中可知在合金化層厚度的回應表中試片表面粗糙度之差異值僅 2.13dB，又由圖 6 中可看出曲線之走勢甚為平緩，所以表面粗糙度對合金化之層厚度影響很小。

另一方面，同樣由表 4 可知在外表鋁鍍層的回應表中試片表面粗糙度之差異值僅 0.19dB，又由圖 7 中可看出三個水準幾乎連成水平線，故可知表面粗糙度對外表鋁鍍層厚度影響極微。

3.7 確認實驗

為了確認顯著因子為熱浸時間和熱浸溫

表 5 矩陣實驗與確認實驗平均值比較表
Table 5 The average thickness of coatings and alloy layers measured from matrix experiment and confirmation experiment.

單位: %

熱浸溫度	熱浸時間	16秒		64秒		144秒	
		合金化層	鋁鍍層	合金化層	鋁鍍層	合金化層	鋁鍍層
700 °C	矩陣實驗	23	11	34	31	42	49
	確認實驗	20	13	31	26	46	48
	誤差值%	13	18	9	16	10	2
750 °C	矩陣實驗	39	17	82	31	123	49
	確認實驗	43	20	71	30	116	41
	誤差值%	10	18	13	3	6	16
800 °C	矩陣實驗	91	16	149	35	195	42
	確認實驗	101	17	162	32	204	41
	誤差值%	11	6	9	9	5	2

備考: 誤差值(%) = $\frac{\text{確認實驗平均值} - \text{矩陣實驗平均值}}{\text{矩陣實驗平均值}} \times 100\%$

度，將表面粗糙度和試片移出鋁湯速度剔除，依表 1 的水準值重新再做一次實驗，實驗結果如表 5 所示。由表 5 可看出在合金化層厚度方面兩實驗間之誤差值在 5%~13%，然而在外表鋁鍍層厚度方面，兩實驗之誤差值則在 2%~18%。顯示了在高溫且長時間的條件下，誤差值比較小，但在低溫且短時間之情況，由於鋁鍍層厚度及合金化層厚度較小且初始反應較不穩定，造成了較大的誤差值。但對於尺寸精度要求較寬鬆的「熱浸法鍍鋁」製品，能容忍如此的誤差值。實驗結果驗證了外表鋁鍍層厚度及合金化層厚度主要受「熱浸時間」及「熱浸溫度」兩項因素所作用。

四、結論

1. 在本研究的操作條件下，對合金化層厚度而言，「熱浸溫度」為顯著因子，其次是「熱浸時間」；對外表鋁鍍層厚度而言，在試片移出鋁湯速度為 5mm/s~25mm/s 的區間內，顯著因子為「熱浸時間」。至於試片移出鋁湯速度及試片表面粗糙度在本研究的操作條件下對合金化層厚度及外表鋁鍍層厚度的影響極微。
2. 合金化層之厚度隨時間之增長和熱浸溫度之提高而加大。
3. 外表鋁鍍層之厚度是由鐵溶出所形成的 FeAl_3 柱狀組織所決定，故熱浸時間愈長， FeAl_3 成

長愈多，使得外表鋁鍍層愈厚。然而熱浸溫度對外表鋁鍍層厚度的作用並不明顯。

誌謝

本研究承國科會 NSC 85-2216-E011-029 經費援助，特此致謝。

參考文獻

1. 張定中、劉影、洪耀宗及陳世滄，交通部電信研究所報告彙編，16 (1986) 249。
2. ASM Metals Handbook, 9th Ed., 5 (1983) 333.
3. W. Gao and G. Li, Heat Treatment of Metals, 6 (1991) 11.
4. CNS 8297-H3100：“熱浸法鍍鋁作業方法”，民國 71 年 1 月。
5. 鐘清章校訂，in：田口式品質工程導論，中華民國品質管制學會，台北(1993)。
6. 鄭燕琴，in：田口式品質工程技術理論與實務，中華民國品質管制學會，台北(1993)。
7. 林秀雄，in：田口方法與低成本品質工程，新知企業管理顧問有限公司出版，台北(1992)。
8. 陳清松，塗料與塗裝技術，12 (1988) 56。
9. 姚小橋譯，金屬表面技術雜誌，96 (1985) 60。
10. 吳德樺，“熔湯鍛造法製造 A356 鋁合金—中碳鋼疊合材料”，國立台灣工業技術學院機械研究所碩士學位論文，台北(1991)。
11. V. N. Eremenko, J. V. Matanson, V. J. Dybkov and V. R. Ryabov, Avt. Svarka, 27 (1974) 5.
12. V. R. Ryabov, N. G. Frolov, V. P. Gordo, A. A. Gordnaya and A. N. Eremina, Automatic welding, 28 (1975) 34.
13. 張憲文，金屬表面技術雜誌，87 (1986) 62。
14. A. Hrbek, Metal finishing journal, 7 (1961) 298.