

# 田口式實驗設計於有機電鍍鋁之應用

郭朝洲、王朝正

## The Application of Taguchi Experimental Design on the Aluminum Plating from Organic Baths

*Chaur-Chou Kuo and Chaur-Jeng Wang*

### 摘要

以田口式實驗計劃法，針對電鍍液濃度、電流密度、電極距離及陰極素材表面粗糙度等四項有機溶液電鍍鋁之重要影響參數進行實驗規劃。實驗結果顯示，四項參數均對電鍍品質之電流效率、鍍層厚度、鍍層均勻性互有影響。綜合各因素的影響作用，於本研究之因素水準範圍內，以高電流效率、鍍層厚度、厚度均勻性為電鍍品質要求目標時，最佳之電鍍參數組合為：乙苯—50% w/o  $\text{AlBr}_3$  電鍍液成分、 $10\text{mA/cm}^2$  電流密度、1cm 電極距離、320 號砂紙研磨之陰極素材表面粗糙度。

關鍵詞：電鍍、田口式實驗計劃法、鋁塗層、有機電鍍液

### ABSTRACT

The effects of four important electroplating parameters, namely, electrolyte concentration in the plating bath, current density of electrodes, electrodes distance, and the surface roughness of cathode were investigated by Taguchi Method experimental design. The results indicated that the current efficiency, the thickness of plating-layer, and the homogeneity of plating-layer were related and affected by these parameters. Under the electroplating requirements of high cathode efficiency, plating thickness and homogeneity, the optimum plating conditions in this study were the combination of bath composition of ethylbenzene-50% w/o  $\text{AlBr}_3$ , current density of  $10\text{ mA/cm}^2$ , electrodes distance of 1cm and the specimen of ground to 320 mech SiC emery paper.

Key words: Electroplating, Taguchi Method, Aluminum Coatings, Organic Electrolyte

### 一、前言

合金可否生成 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{SiO}_2$ 等氧化皮膜，乃是其能否具備耐高溫腐蝕能力的首要考慮

條件。而在鐵基材料中，鉻、鋁、矽的添加雖有助於抗高溫腐蝕，但相對地，大量的添加卻又常使合金基材因為介金屬化合物之生成而脆化，或因共晶相的生成而造成熱加工上的困擾。因此原

子序與鐵相近的鉻便成為鐵基材料中，為耐蝕、耐熱目的所最常被添加的合金元素。然而 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 之氧化皮膜，於諸如含氯氣氛或大氣中1050°C以上之環境，由於生成物之揮發，使得氧化鉻形成合金有其應用場合之限制。對於含氯之高溫腐蝕氣氛環境，諸如活潑金屬之提煉冶金、塑膠單體製造、垃圾焚化等場合<sup>(1)</sup>，文獻指出Cabot 214等氧化鋁形成性合金，比一般氧化鉻形成合金具有較佳的抗蝕性<sup>(1,2)</sup>。因此，高鋁含量便成為應用於此類氣氛環境之必要選擇。然而，要製造一個得以自發生成純氧化鋁的機件，由於合金鋁對鐵、鎳基材料所造成的脆性，使得在生產上有許多技術上的問題。另一方面，純鋁的強度又太低。無法承受大荷重之結構需求。因此將其它高韌性合金材料，如具耐蝕及耐熱潛力的鐵錳鋁碳合金<sup>(3)</sup>，表面區域局部性提高鋁含量，如鋁表面高溫塗層，則是一項極具工程應用的冶金技術。

鋁塗層由於具有良好的抗腐蝕能力，表面呈現金屬光澤且為熱電的良導體。與鐵基材料具有良好的結合性，因此廣泛被應用在工業高硫氣氛、硝磷酸根肥料產製、食品工業、海洋等耐蝕需求之場所<sup>(4)</sup>。鋁塗層的製作方法很多，如熱浸(hot dip)、噴敷(spary)、塗敷(slurry)、蒸鍍、包層(cladding)、…等<sup>(4)</sup>。但對於形狀多樣，無法經由連續製造方法之物品，在考慮其厚度要求、均勻性、附著性及被覆品質等綜合條件時，則以電鍍方式最為適合。

關於電鍍鋁之製作，首推Plotnikov等人<sup>(5)</sup>於1933年為起始，但當時所得的鍍層品質很差，且陰極效率亦很低。往後幾年亦均有後續的研究，終於得到，因為電解鋁的電壓高於水的電解電壓，使得鋁鍍層無法從水溶性電解液中直接電鍍獲得之共同結論<sup>(5,6)</sup>。因此於鋁電鍍工程，非水溶液之電鍍液是其必要之條件，有機溶劑電解液<sup>(6-10)</sup>電鍍法即是其中一項常用之作業方式。由於有機電鍍電解液溶劑選擇上，需考慮溶解鋁鹽的

能力與釋放鋁離子的能力，使得溴化鋁—乙苯便成為有機電鍍電解液的常用組成<sup>(6)</sup>。

影響電鍍效果的因素有很多，其中較重要的因素為鍍液濃度、電流密度、電極間距及陰極表面粗糙度等。由於傳統實驗計劃法，具有無法完全涵蓋所有可變因素，以及因素間關連性不完整之缺失，因此本研究採用田口式實驗計劃法<sup>(11,12)</sup>，以電鍍液溶質濃度、陰極表面電流密度、電極間距、陰極素材表面粗糙度等四個參數，針對電流效率、鍍層厚度、鍍層均勻性等實驗目標進行規劃，以期在有機溶劑電鍍鋁能獲得一綜合性結果及最佳之操作條件。

## 二、實驗方法

本研究所採用之陰極為美國FAMCY鋼鐵公司所生產之鐵錳鋁碳合金，其成份為錳：31.16 wt%，鋁：11.19wt%，鉻：5.94wt%，碳：0.96 wt%，鐵：其餘。試片大小約為40×20×2mm，利用金相冷鑲樹脂鑲埋後磨除一面之樹脂，進行單面電鍍，於電鍍液之有效浸泡深度約為30mm。陽極為純度99%以上之純鋁片，電解液組成為乙苯（ $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5 > 98\%$ ，和光工業）與溴化鋁（ $\text{AlBr}_3 > 98\%$ ，Fluka）。雖然先前的報導<sup>(6)</sup>指出，極有限量的水可增加電鍍液之導電性，但過量則會生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。於本地之海島型氣候，大氣之含水量已遠高於生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 之所需，因此本實驗之電鍍槽為玻璃製可密封式，並於電鍍時以氫氣填充電鍍槽內之剩餘空間。

本實驗選擇電鍍液溶質濃度、陰極表面電流密度、電極間距、陰極素材表面粗糙度等四個參數為控制因素，電流效率、鍍層厚度、鍍層均勻性為實驗目標，選用L<sub>9</sub>直交表<sup>(12)</sup>來配置實驗參數，內側直交表四個控制因素之水準值如表1所示，外側直交表則以0.6A-min/cm<sup>2</sup>及1.4A-min/cm<sup>2</sup>兩式定值輸入能量，觀察時間的干擾性，各實驗之確切電鍍時間可由輸入能量除以電流密度

表 1 本研究各因素之實驗配置

記號	控制因素	水準 1	水準 2	水準 3
A	電鍍液溶質濃度	40%	50%	60%
B	陰極電流密度	5mA/cm <sup>2</sup>	10mA/cm <sup>2</sup>	15mA/cm <sup>2</sup>
C	兩極相隔距離	1cm	2cm	3cm
D	陰極素材表面粗度	* 100	* 320	* 1000

獲得。

電鍍結果量測的品質特性值為陰極電流效率、鍍層厚度及鍍層厚度均勻性，陰極電流效率的計算公式如下：

$$\text{陰極電流效率} = \frac{\text{金屬實際析出量}}{\text{理論析出量}} \quad (1)$$

其中：

$$\text{理論析出量} = \frac{I \cdot t \cdot A}{Z \cdot F}$$

I：輸入電流，安培

t：時間，秒

A：原子量

Z：電荷數

F：法拉第電量，96500庫侖

鍍層厚度的量測則是在涵蓋鋁鍍層截面上，隨機取樣拍攝之 4 個金相照片，再將金相照片放大至適當倍率（本研究為放大 530 倍），然後於照片上等距量取 10 點，並求平均值，故每個試片可得到 4 個平均鍍層厚度值。以此平均鍍層厚度為基準，再計算每組鍍層厚度之標準差 (Standard deviation)，其計算式如下：

$$\sigma_i = \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

其中

$\sigma_i$ ：第 i 個標準差， $i = 1 \sim 4$ 。

$y_{ij}$ ：第 i 組數據中的第 j 個厚度量測值， $j = 1 \sim$

10。

$\bar{y}_i$ ：第 i 組數據的平均厚度。

### 三、實驗結果

圖 1 為鐵錳鋁合金於  $\text{AlBr}_3$  濃度 50% w/o 電鍍液中之電鍍鍍層外觀。如圖所見，鋁鍍層呈現銀白色，且均勻而密實地附著在基材上，此附著

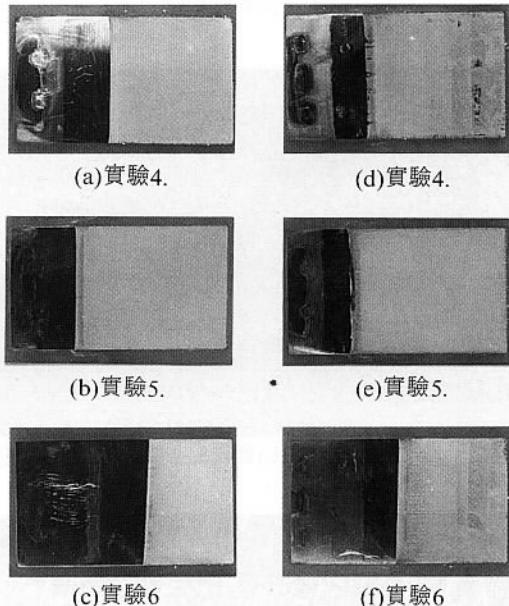


圖 1 鐵錳鋁合金於 50% w/o  $\text{AlBr}_3$  電鍍液濃度之電鍍鍍層外觀；(a)、(b)、(c) 之輸入能量為  $0.6 \text{ A-min}/\text{cm}^2$ ，(d)、(e)、(f) 之輸入能量為  $1.4 \text{ A-min}/\text{cm}^2$ ；各電鍍實驗編號之操作參數參見表 1、2、3。

情況在鍍液濃度為 40% w/o 及 50% w/o 時有較細緻的結果。而當  $\text{AlBr}_3$  濃度增加至 60% w/o 時，則呈現不均勻的現象，以肉眼即可微微看到基材。圖 2 為鐵錳鋁合金在  $\text{AlBr}_3$  濃度為 50% 的電鍍液中電鍍後的鍍層表面 SEM 照片，(a)、(b)、(c) 為輸入能量等於  $0.6 \text{ A-min}/\text{cm}^2$  的情況，(d)、(e)、(f) 為輸入能量等於  $1.4 \text{ A-min}/\text{cm}^2$  的情形。如圖所見，鍍層生長排列方式，乃是沿著素材表面的研磨刮痕紋路方向而成長鋁鍍層先以微

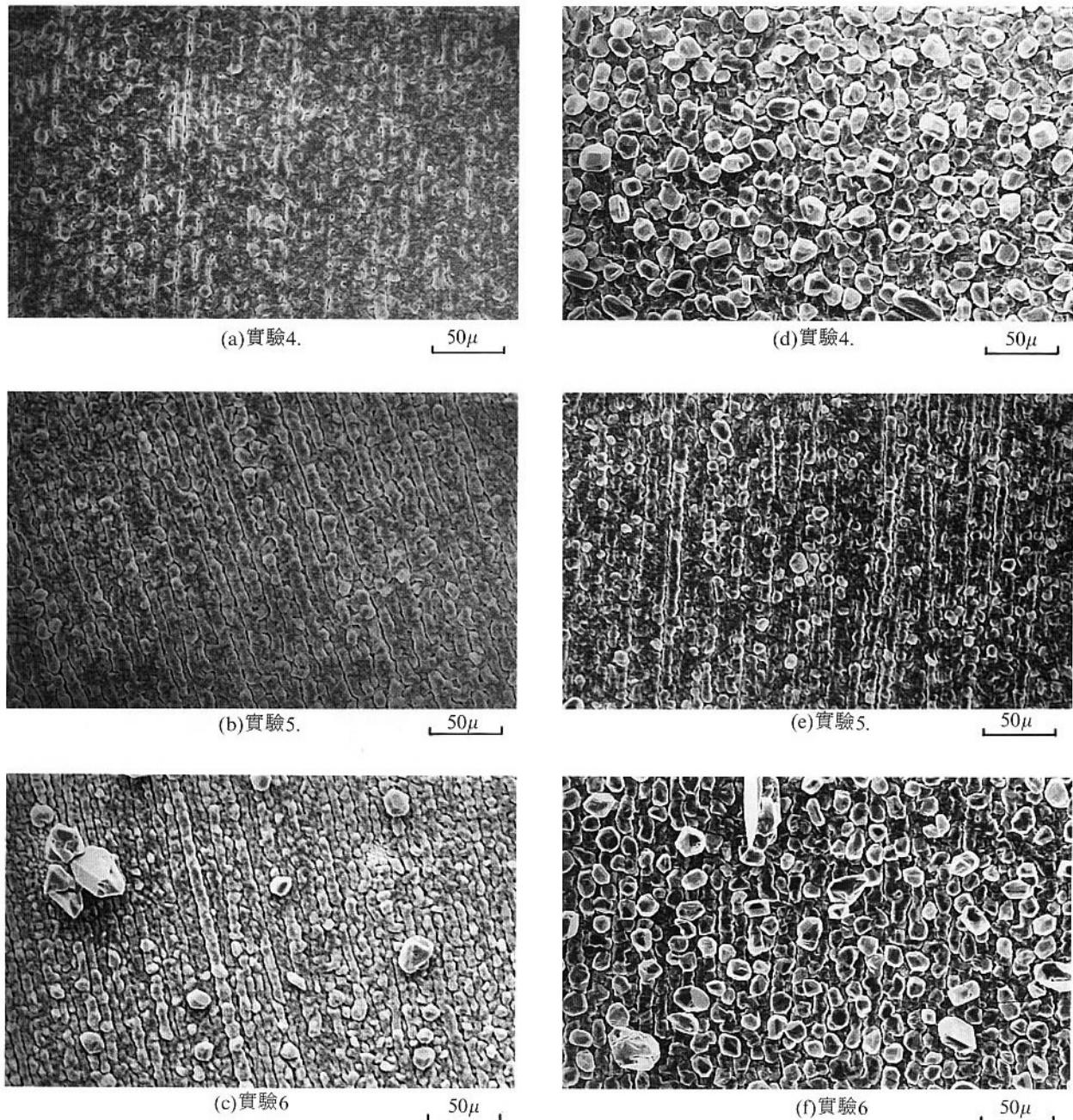


圖 2 鐵錳鋁合金於50 % w/o AlBr<sub>3</sub>電鍍液濃度之鍍層表面SEM照片。(a)、(b)、(c)之輸入能量為0.6 A-min/cm<sup>2</sup>，(d)、(e)、(f)之輸入能量為1.4 A-min/cm<sup>2</sup>；各電鍍實驗編號之操作參數參見表 1、2、3。

小的顆粒狀結晶附著於陰極，漸次成長，經一段時間後，其成長的規則排列情形開始明顯展現。隨著時間增加，顆粒成長、連結，此時規則排列的條紋狀組織即慢慢消失。觀察AlBr<sub>3</sub>濃度由

40 % w/o至60 % w/o之改變結果，可發現鋁鍍層的緻密性以50 % w/o時為最佳，而以60 % w/o的條件時最差，且鋁顆粒的大小隨著鍍液濃度的增高而加大。

## 田口式實驗設計於有機電鍍鋁之應用

表 2 輸入能量為 $0.6\text{A}\cdot\text{min}/\text{cm}^2$ 時各量測值及其S/N比值

實驗編號	參數組合*	電流效率(%)			平均厚度 $\times 530(\text{mm})$					平均厚度標準差 $\times 530(\text{mm})$				
		試驗 1	試驗 2	S/N	試驗 1	試驗 2	試驗 3	試驗 4	S/N	試驗 1	試驗 2	試驗 3	試驗 4	S/N
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	83.00	95.30	38.94	12.30	6.67	7.18	7.33	17.75	10.43	1.44	0.69	0.82	-14.48
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	58.90	58.90	35.40	5.34	5.29	5.70	5.49	14.72	0.55	0.43	0.44	1.25	2.51
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	37.30	34.70	31.11	3.66	3.65	3.09	3.71	10.87	0.36	0.35	0.09	0.31	10.45
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub>	76.00	83.20	37.99	5.78	11.65	7.54	9.90	17.89	0.44	4.78	1.14	2.54	-8.86
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	60.60	54.20	35.14	13.32	15.71	14.06	9.16	21.76	3.77	3.12	5.67	1.83	-11.72
6	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	47.70	48.60	33.65	20.51	30.37	7.43	5.82	18.94	1.03	1.08	0.70	0.43	1.39
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	74.00	69.50	37.10	10.86	7.77	7.92	8.00	18.49	3.69	1.39	2.10	1.94	-7.73
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	61.90	57.30	35.49	9.96	9.65	13.02	10.03	20.38	1.11	2.70	2.98	1.87	-7.18
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	48.80	42.20	33.09	11.68	9.64	3.55	6.27	14.91	2.36	0.80	1.09	4.07	-7.77

\*註：參數組合 A<sub>1</sub> 為因素 A ( 電鍍液溶質濃度 ) 之水準 1 ( 40% )，參見表 1 。

表 3 輸入能量為 $1.4\text{A}\cdot\text{min}/\text{cm}^2$ 時各量測值及其S/N比值。

實驗編號	參數組合*	電流效率(%)			平均厚度 $\times 530(\text{mm})$					平均厚度標準差 $\times 530(\text{mm})$				
		試驗 1	試驗 2	S/N	試驗 1	試驗 2	試驗 3	試驗 4	S/N	試驗 1	試驗 2	試驗 3	試驗 4	S/N
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	65.70	58.70	35.84	6.86	13.24	10.59	9.84	19.37	0.89	3.90	2.71	2.22	8.49
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub>	45.00	39.90	32.51	8.43	10.27	9.95	11.68	19.89	2.34	3.03	1.75	4.28	-9.55
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub> D <sub>3</sub>	27.50	31.60	29.35	5.63	6.31	6.19	7.90	16.07	1.07	1.82	1.01	1.62	-3.07
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>3</sub>	58.40	64.90	35.76	13.78	10.39	36.45	12.56	22.67	4.03	3.36	9.38	3.20	-14.97
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub> D <sub>1</sub>	49.60	49.60	33.91	15.16	7.86	14.26	15.82	21.33	1.43	1.17	3.66	2.02	-7.18
6	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	41.80	35.90	31.71	7.73	4.64	19.57	9.12	17.11	0.88	1.94	3.57	1.97	-7.24
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub> D <sub>2</sub>	54.70	54.70	34.76	11.08	9.17	11.26	10.02	20.24	4.34	3.00	4.49	3.65	-11.85
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	45.70	34.50	31.81	5.85	7.86	9.38	8.99	17.62	0.84	1.09	1.57	1.63	-2.44
9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub>	37.50	22.80	28.80	14.33	14.04	13.62	19.54	23.48	4.77	5.72	4.60	7.36	-15.15

\*註：參數組合 A<sub>1</sub> 為因素 A ( 電鍍液溶質濃度 ) 之水準 1 ( 40% )，參見表 1 。

表 2 為鐵錳鋁合金在各參數條件下，以輸入能量 $0.6\text{A}\cdot\text{min}/\text{cm}^2$ 電鍍後，所得之各品質特性量測結果及其 S/N 比值，表三則為輸入能量 $1.4\text{A}\cdot\text{min}/\text{cm}^2$ 的情況。在陰極電流效率方面，其量測結果是經式(1)計算後的計算值，而鍍層厚度為金相照片放大 530 倍後的測量數據，單位是 mm。這兩個品質特性，為獲得較大的值，因此在計算其 S/N 比值時，以望大特性處理之。其望大 S/N 比公式如式(3)<sup>(12)</sup> 所示：

$$\frac{S}{N} = -10\log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

在鍍層厚度均勻性方面，為得較均一的鍍層厚度，亦即其標準差值要愈小愈好，所以在處理上則要以望小特性來計算。其望小特性 S/N 比計算如式(4)<sup>(12)</sup> 所示：

$$\frac{S}{N} = -10\log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4)$$

由於 S/N 比值均針對各種需求而有不同的計算方式，因此，以 S/N 比值作為品質特性優劣的判讀依據時，均以 S/N 比值愈大表示獲得愈佳的實驗結果。表 4、表 5 所示為各參數三水準間的 S/N 比值回應表，將此結果以曲線來描繪，則可

表 4 輸入能量為 $0.6\text{A-min/cm}^2$ 時各因素S/N比值回應表

品質特性 因素 水準	電流效率(%)				平均厚度 $\times 530(\text{mm})$				平均厚度標準差 $\times 530(\text{mm})$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	35.15	38.01	36.03	35.72	14.45	18.04	19.02	18.14	-0.50	-10.36	-6.76	-11.32
2	35.59	35.34	35.50	35.39	19.53	18.96	15.84	17.38	-6.40	-5.47	-4.71	-1.28
3	35.23	32.62	34.45	34.86	17.93	14.91	17.04	16.38	-7.56	1.36	-3.00	-1.87

\*註：因素A：鍍液濃度，B：電流密度，C：電極距離，D：表面粗度。

表 5 輸入能量為 $1.4\text{A-min/cm}^2$ 時各因素S/N比值回應表

品質特性 因素 水準	電流效率(%)				平均厚度 $\times 530(\text{mm})$				平均厚度標準差 $\times 530(\text{mm})$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	32.56	35.45	33.12	32.85	18.45	20.76	18.04	21.39	-7.03	-11.77	-6.06	-10.27
2	3.80	32.74	32.36	32.99	20.37	19.62	22.02	19.08	-9.80	-3.69	-13.22	-9.55
3	31.79	29.96	32.67	32.31	20.45	18.89	19.21	18.79	-9.81	-8.48	-7.36	-6.83

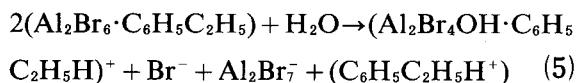
\*註：因素A：鍍液濃度，B：電流密度，C：電極距離，D：表面粗度。

得圖3至圖5的回應圖。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，若些微的改變量即會造成很大的結果變異，則此因素為重要影響因素。

## 四、討論

### 4.1 電鍍液中 $\text{AlBr}_3$ 濃度的影響

如表4、5及圖3之因素A（鍍液濃度）曲線所見，鍍液溶質濃度對陰極效率並無顯著的影響，各水準間僅有些微的差異，但仍可見得當 $\text{AlBr}_3$ 濃度為50% w/o時，可獲得較大的電流效率。此乃因為有機溶劑電鍍液的電鍍機構(mechanism)，如Capuano及Davenport<sup>(6)</sup>所揭示，於含極少量水之電鍍液之電鍍，並非由金屬直接解離、再沉積於陰極表面，而是如式(5)、(6)所示：

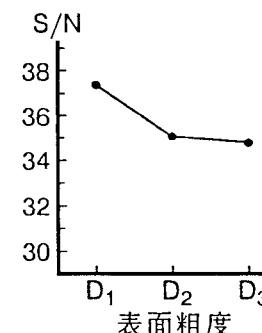
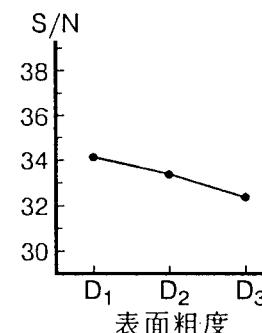
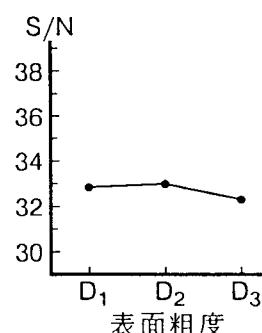
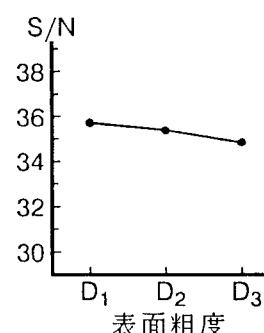
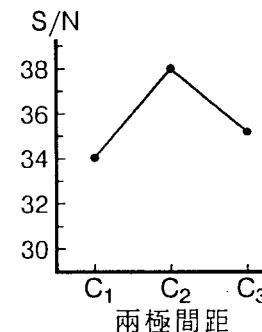
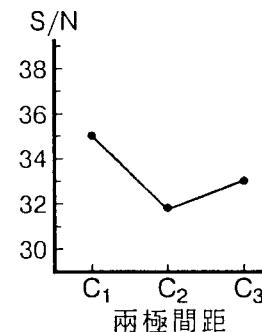
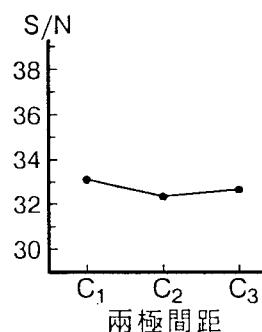
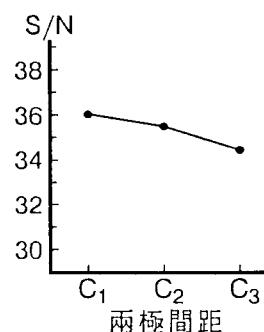
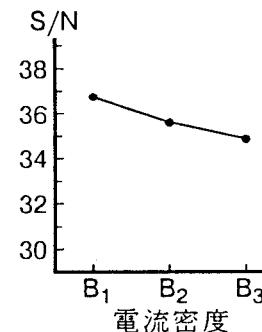
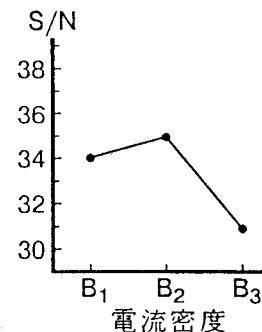
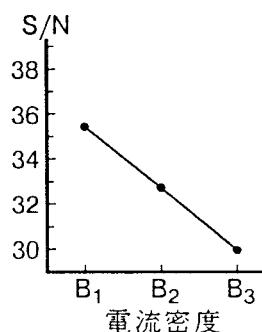
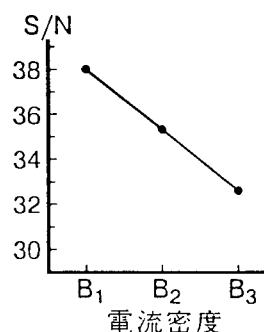
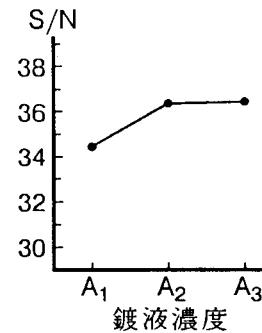
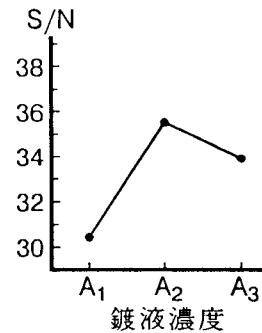
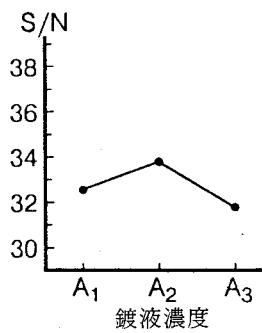
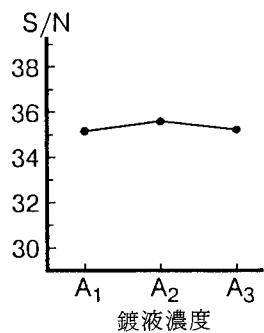


須先形成 $\pi$ 氫氣中間錯合物(Hydroxy  $\pi$ -complex,  $\text{Al}_2\text{Br}_4\text{OH} \cdot \text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5\text{H}^+$ )及 $\rho$ 中間錯合物( $\rho$ -complex,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_2\text{H}_5\text{H}^+$ )始能進行。因此，雖然濃度增加可提供更多的離子，但過多的溴離子造成電極之極化作用，對電鍍系統具有不良的影響<sup>(13)</sup>，使得50%  $\text{AlBr}_3$ 成為本有機溶劑電鍍液之最佳鍍液濃度值。

鍍層厚度值與受鍍著量(電流效率)直接有關，因此，鍍液濃度對鍍層厚度的影響亦如同電流效率一般，如圖4之A曲線所示在 $\text{AlBr}_3$ 濃度為50% w/o時，有一最大的鍍層厚度。

在鍍層厚度均勻性方面，於本系統中，電鍍液之導電性隨溶質濃度增加所造成的極化現象而降低，但電鍍液之均勻鍍著性(throwing power)會隨濃度的降低而增加<sup>(13)</sup>，使得低濃度的鍍液中，將可獲得較均勻的鍍層厚度。因此如圖5所示，當 $\text{AlBr}_3$ 濃度為40% w/o時具有最大的S/N值，即較均一的鍍層厚度。

### 田口式實驗設計於有機電鍍鋁之應用



(a)

(b)

圖 3 陰極電流效率回應圖，(a) 輸入能量為  $0.6 \text{ A-min/cm}^2$ ，(b) 輸入能量為  $1.4 \text{ A-min/cm}^2$ 。

(a)

(b)

圖 4 鍍層厚度回應圖，(a) 輸入能量為  $0.6 \text{ A-min/cm}^2$ ，(b) 輸入能量為  $1.4 \text{ A-min/cm}^2$ 。

#### 4.2 電流密度的影響

電流效率與電流密度的關係如圖 3 之 B 曲線

所見，電流效率隨著電流密度的增加而降低。在高電流密度時，由於尖端電流的影響，使得鋁顆

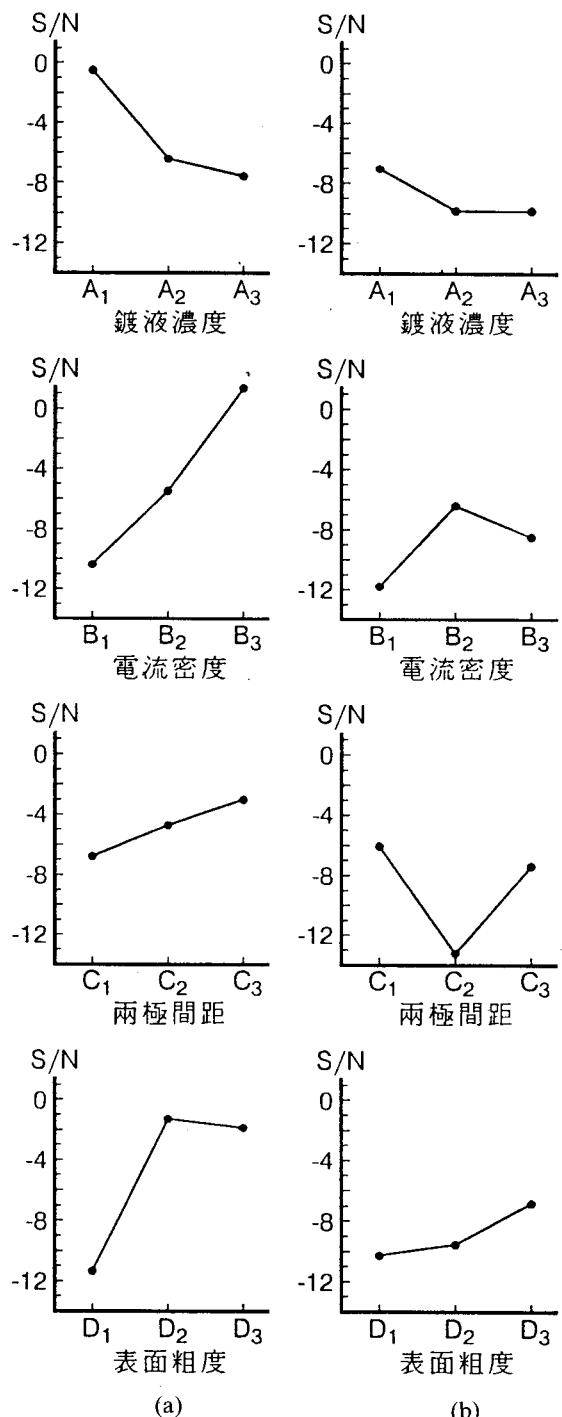


圖 5 鍍層厚度標準差回應圖，(a)輸入能量為  $0.6 \text{ A-min}/\text{cm}^2$ ，(b)輸入能量為  $1.4 \text{ A-min}/\text{cm}^2$ 。

粒沿著較尖端處成長，如試片之周圍邊緣，具有較高的生長速率。此現象在電流密度愈高時愈加

明顯，而此特別突起的鋁顆粒，因較細長且強度不足，極易掉落在容器底部，影響了最終之量測電流效率值，故高電流密度時其電流效率降低。

觀察圖 4 電流密度對鍍層厚度影響之B曲線，顯示以低電流密度施行電鍍可得到較大的鍍層厚度。如前所述，由於突起的鋁顆粒形成，造成局部電流密度較大的情形明顯，因而鋁無法在其他地方平均地沉積鋁鍍層。故實驗結果即呈現出電流密度增加，但平均厚度減小的情況。此現象若於電鍍期間對鍍液加以緩慢攪拌，應可消除此現象，即電流密度增加將可得到較大的鍍層厚度<sup>(13)</sup>。

對於鍍層之均勻性而言，如圖 5 之B曲線所示，在  $5 \text{ mA}/\text{cm}^2$  低電流密度時，其鍍層的均勻性較差。鍍層厚度均勻性受到許多因素的影響，且各因素彼此間均有交互作用。例如，在基材表面有一特別尖銳的部份，則此處的電流分佈即相對提高，使得此處的鋁成長快速，鍍層厚度量測值即特別大，造成標準差計算值之相對提高，呈現不均勻的鍍層厚度。相同地，若在電鍍期間攪拌電鍍液，增加其流動性，則應可得到均勻的鍍層厚度。

#### 4.3 兩極距離與陰極素材表面粗糙度的影響

如圖 3 中的C、D曲線所見，由於電鍍液本身的電著性(throwing power)為一固定值，因此如表四、五所見，兩極距離與素材表面粗糙度對電流效率的影響並不大。故當兩極之間距增加，鋁離子較難到達陰極表面，使得較大距離之電流效率稍微降低。

表面粗糙度對於鍍層厚度，由於較粗糙的素材表面可提供更多的附著能力，因此鋁將可更良好地沈積於試片，相對地提高其電流效率，也得到較大的鍍層厚度。故如圖 4 之C、D曲線，實驗結果顯示，愈粗糙的表面，其鍍層厚度愈大。

對於鍍層厚度均勻性而言，愈光滑的素材表

面，本質上其表面高度差異小，尖端高電流亦不易發生，使得鋁顆粒可較緻密且平順地附著於其上，造成如圖 5 之D曲線所示，表面愈光滑其鍍層厚度之均勻性愈高。相對的，粗糙的表面狀況因其原始表面即不平順，故鍍層生長時即無法均勻形成，其S/N比值亦較低。

## 五、結 論

1. 在沒有攪拌的情況下，由於鋁顆粒之附著、成長形式不同，在高電流密度時，有從優取向成長之突起鋁顆粒，此型式之鋁顆粒因強度低而容易折斷掉落，故形成高電流密度卻低電流效率的結果。
2. 本研究之結果顯示， $\text{AlBr}_3$ 濃度 50% w/o 時，其電鍍之電流效率、鍍層厚度等量測特性均可得到最佳之結果。
3. 陰極素材表面粗糙度對電流效率與鍍層厚度的影響較小，對鍍層均勻性而言，由於表面曲線之高度差異，使得愈粗糙表面之鍍層厚度均勻性愈差。
4. 兩電極距離較短時，其鍍著力大，故可得到較大的鍍層厚度，但鍍層厚度均勻性會降低。
5. 以高電流效率、鍍層厚度、均勻為電鍍品質要求目標，綜合各因素的影響情況，在本研究之因素水準範圍內，最佳之電鍍參數組合為： $\text{AlBr}_3$ 濃度 50% w/o、電流密度  $10\text{mA/cm}^2$ 、電極距離 1cm、陰極素材經 320 號砂紙研磨。

## 致謝

本研究承國科會計畫 NSC83-0405-E-011-101 經費援助，特此致謝。

## 參考文獻

1. Y.-N. Chang, F.-I. Wei; J. Mater. Sci., 26(1991)3693.
2. P. Elliott, A.A. Ansari and R. Nabavi; in: "High Temperature Corrosion in Energy System", edited by M.F. Rothman (The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, 1985)437.
3. J.G. Duh and C.J. Wang; J. Mater. Sci., 25(1990) 268.
4. ASM Metals Handbook, 9th Ed., 5(1983)333.
5. E. Peled and E. Gileadi; J. Electrochem. Soc., 119 (1972)57.
6. G.A. Capuano and W.G. Davenprot; J. Electrochem. Soc., 118(1971)1688.
7. A. Reger, E. Peled, and E. Gileadi; J. Electrochem. Soc., 123(1976)638.
8. A. Brenner; J. Electrochem. Soc., 106(1959)148.
9. E.W. Brooman; Plating and Surface Finishing, (May 1985)142.
10. R.D. Blue and F.C. Mathers; Trans. Electrochem. Soc., 69(1936)519.。
11. D.M. Byrne and S. Taguchi; Quality Progress, (December 1987)19.
12. 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，民國八十二年二月，台北）。
13. H.E. Haring and W. Blum; Trans. Electrochem. Soc., 44(1923)313.