



# 以脈衝式電漿銲接SS400低碳鋼管 內覆發泡鋁製程技術最佳化研究

Study on Optimization of the Manufacture Process of SS400 Low-Carbon Steel Pipe with Foamed Aluminum Liner by Pulse-type Plasma Welding

林永富

國立高雄第一科技大學  
機械與自動化學系

施景祥

國立高雄第一科技大學  
機械與自動化學系

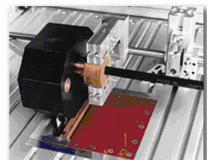
金屬工業研究發展中心  
熔鑄組

曾義豐

國立高雄第一科技大學  
機械與自動化學系

楊俊彬

國立高雄第一科技大學  
機械與自動化學系  
助理教授



## 關鍵詞

- 田口法 Taguchi method
- 主成分分析 PCA
- 發泡鋁 foamed aluminum
- 電漿銲接 plasma welding

## 摘要

鋼管內覆發泡鋁可以透過內層多孔性發泡鋁具吸收能量的特性，提高抗彎曲強度能力，但是異種(鋼/鋁)材料複合在一起欲進行銲接接合，如果銲接製程條件控制不當，因外層電氣熔鋼之高溫將會導致內層發泡鋁材料崩塌甚至熔融，而致使複合發泡鋁鋼管銲道區域，失去發泡鋁可發揮應有的吸收能量特性，而弱化複合發泡鋁鋼管的材料性能，故，本研究應用田口法搭配主成份分析，開發以脈衝式電

漿銲接 SS400 低碳鋼管內覆發泡鋁多重品質特性最佳化製程技術，採用 L18 直交表進行實驗參數設計，所採用之控制因子分別為火嘴孔徑(A)、基本電流(B)、脈衝電流(C)、工作比例(D)、脈衝頻率(E)、保護氣體(F)、電漿氣體(G)、銲接速度(H)，除了因子 A 設定兩個探討水準之外，其餘因子皆設定有三個水準。所探討的品質特性分別為發泡鋁鋼管銲件彎曲強度與抗壓強度及銲道硬度，實驗量測值透過以 SPSS 軟體進行主成份分析，再藉由主成份總得點數之因子分析，開發具有多重品質特性最佳化之製程參數組合。實驗結果顯示，最佳參數組合為 A<sub>1</sub>(Tip 火嘴為 Ø1.5mm)、B<sub>3</sub>(基本電流為 30A)、C<sub>3</sub>(脈衝電流為 100A)、D<sub>2</sub>(工作比率為 50%)、E<sub>3</sub>(脈衝頻率為 300Hz)、F<sub>2</sub>(保護氣體為 14L/min)、G<sub>3</sub>(中心氣體為 0.4 L/min)、H<sub>2</sub>(銲接速度為 4RPM)，同時藉由變異數分析結果得知，製程中最重要的控制因子為：基本電流(B)、脈衝電流(C)、工作比例(D)及銲接速度(H)，這些因子之總貢獻度高達 77.764%，所以在最佳化水準下分析時優先考慮此四個因子效應。經過



多重品質特性最佳化分析結果顯示，實驗所得最佳之製程參數組合  $A_1B_3C_3D_2E_3F_2G_3H_2$ ，能有效獲得以脈衝式電漿銲接 SS400 低碳鋼管內覆發泡鋁最佳之抗彎曲強度 3020kgf、抗壓縮強度 13650kgf 以及微硬度 180.4Hv 的性值。

It had been observed that composite foamed aluminum pipes (steel/foamed aluminum) (hereinafter referred to as CFAP) are connected by welding. If the welding process is not properly controlled, high temperature at the outer layer due to steel electrofusion will lead to the collapse, or even smelting, of the foamed aluminum liner. As a result, the weld pass of CFAP will lose its foamed aluminum feature for energy adsorption and ultimately weaken the CFAP's material performance. Hence, by combining Taguchi method and principle component analysis (PCA), this study aims to develop the optimum manufacture process of SS400 low-carbon steel pipe with foamed aluminum liner and multiple performance characteristics by pulse-type plasma welding, and adopt L18 orthogonal array in the design of its experimental parameters. Control factors include tip aperture (A), base current (B), pulse current (C), duty cycle (D), pulse frequency (E), protective gas (F), plasma gas (G), and welding velocity (H), respectively. Factor A is designed in two levels while all other factors are designed in three levels. Performance characteristics may include the CFAP weldment's bend strength, compression strength, and weld pass' hardness. Experimental values are conducted with PCA by using software, after which the total score of major components are conducted with factor analysis to obtain parameter combinations for optimum manufacture process having multiple performance characteristics. Experimental results have

identified the following optimum combination of parameters:  $A_1$ (Tip:  $\varnothing 1.5\text{mm}$ ),  $B_3$ (base current: 30A),  $C_3$ (pulse current: 100A),  $D_2$ (duty cycle: 50%),  $E_3$ (pulse frequency: 300Hz),  $F_2$ (protective gas is 14L/min),  $G_3$ (center gas is 0.4L/min), and  $H_2$ (welding velocity is 4RPM). Meanwhile, it has been observed from the variance analysis that the most important control factors during the process are base current(B), pulse current(C), duty cycle(D), and welding velocity(H). The total contribution of the abovementioned factors is 77.764%. Hence, as a priority, we need to consider the effect of these four factors when analyzing the optimum level.

Analytic result for the optimization of multiple performance characteristics reveals the optimum combination of process parameters at  $A_1B_3C_3D_2E_3F_2G_3H_2$ , which can ensure these following performances: bend strength of 3020kgf, compressive strength of 13650kgf, and micro-hardness of 180.4Hv, all of which have been obtained from pulse-type plasma welding of SS400 low-carbon steel pipe with foamed aluminum liner.

---

## 前言

---

多孔性結構發泡金屬(Metal Foam)為近年來深受矚目的結構材料，具有極低的比密度 ( $0.2\sim 1.0\text{g/cm}^3$ )，其比強度、剛性、和吸收能量等特性皆相當優良[1-3]，適用於需輕量化以及考量安全性和舒適性的運輸工具之零組件。雖然目前可製造多孔性結構金屬的製程有多種選擇，但考慮到生產製程對實際應用需求的控制和成本等因素，真正能用於工業量產的製程仍有待研發。以鋼管內覆發泡鋁結構金屬製成之保險桿和測試結果[4]，吸收衝擊



能量較空心結構增加一倍以上，因此保險桿有效應用範圍由原來設計的 8 公里/時提升到 20 公里/時，此優良之複合發泡鋁材料特性若欲延伸應用於大型交通運輸工具結構上，則需有較長尺寸的複合發泡鋁鋼管材之製造設備或良好的銲接接合技術，SS400 低碳鋼乃一般最常用的鋼種[5]，此種鋼材具有加工性佳、變形小、抗疲勞性良好等優點，通常用於建築支撐架、橋樑、船舶與交通運輸車輛之車架等高強度構件上，且有良好的銲接性質。

電漿銲接法(Plasma welding)是利用鎢電極與工件間產生能量密度  $10^8-11^{11} \text{w/m}^2$  的緊縮電弧[6]，使工件進行高穿透深度銲接。電漿銲接具有熱影響區小、氣孔率低、較大深寬比(depth to width ratio)及較低殘留應力等優點[7]。電漿銲接類似於電子束、雷射等高能量密度銲接法，作業成本也遠低於雷射及電子束銲接設備。最近發泡鋁金屬銲接研究，大部分集中在發泡鋁材與鋁合金銲接[8]。例如；Haferkamp 與 Pogibenko 等學者[9-10]曾研究利用雷射銲接發泡鋁金屬，但在雷射高能量的作用下，發泡鋁內部大量的孔隙結構會因高溫影響崩塌破壞，而難以有效銲接。德國汽車製造商 Karmann 公司[11]開發將三明治夾層板材(AFS)應用於汽車板金結構上，減低汽車板金對震動所產生的噪音，德國 Seeliger 等學者[12]利用雷射銲接、TIG 電弧銲接及雷射切割等方法，加工三明治發泡鋁夾層板材(AFS)。S.C Juang 等研究學者，以田口法望小特性進行 TIG 電弧銲接不銹鋼最佳化製程分析[13]；Tarng 等學者以田口法望大特性應用於潛弧銲，探討銲道滲透與硬度值之製程參數組合[14]。然而，Gunter 學者[15]則認為田口法在面對多重品質特性的問題時，部分需藉由工程人員的經驗決定各特性之權重值，但這易產生偏頗而造成客觀性不足，因此利用主成份分析(Principal Component Analysis: PCA)輔助解決多重品質特性間的權重問題。主成分分析法

是在 1901 年由 Karl Pearson 提出，再由 Hotelling 進一步加以發展[16]，此方法廣泛應用於製程管理上，利用原有較多的變數資料經過分析、運算、歸納之後，可以產生較少的變數而足以代表整體之決策。因此，本研究為了開發複合發泡鋁鋼管銲接接合製程技術，遂利用田口法(Taguchi Method)並搭配主成分分析(Principal Component Analysis: PCA)方法，探討以脈衝式電漿銲接 SS400 低碳鋼管內覆發泡鋁，建立最佳之銲接製程控制條件，以解決複合發泡鋁鋼管銲接時因銲接條件不當而破壞內層發泡鋁材的問題，使可真正發揮吸收能量之材料特性。

---

## 實驗方法

---

### 一、實驗材料與測試方式

本研究所使用的實驗材料為 SS400 低碳鋼管內覆發泡鋁，鋼管外徑尺寸：38mm；內徑：33mm，鋼管使用前管內清洗去油漬及噴砂徹底將污染物去除乾淨，預發泡鋁材料為 AlSi7 + TiH<sub>2</sub>，兩種材料經過混練之後，放入直徑為 50 mm 高度 100 mm 的模具中，以 80 噸之柱塞壓力軋製成胚，完成之胚體以擠形機擠製成 1000 mm×10 mm×5 mm 之鋁合金預發泡材，將預發泡材放入鋼管內加熱發泡成形，如圖一、圖二所示，發泡密度為  $0.69 \text{g/cm}^3$ 。



圖一 預發泡材放入鋼管爐內加熱發泡情形觀察



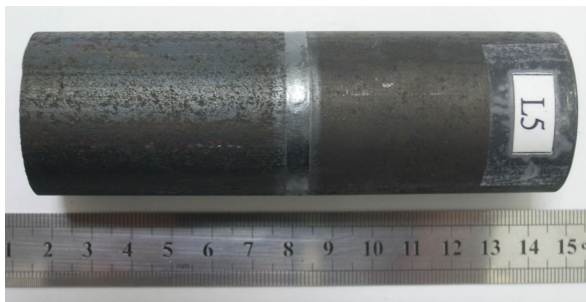
將完成之複合發泡鋁鋼管進行切割取樣，製作測試抗彎曲強度試片使用者尺寸為 150 mm，製作抗壓縮強度試片使用者尺寸為 60 mm，實驗銲接設備使用 120 安培脈衝式電漿銲接機，複合發泡鋁鋼管利用 CNC-101R 旋轉控制台夾持進行銲接，銲槍與管材距離約 2mm，完成之最終抗彎曲強度測試試片尺寸長為 300mm 以及抗壓強度測試試片尺寸長為 120mm，如圖三所示銲接完成後之試棒。使用設備為萬能試驗機分別進行抗彎曲強度試驗及抗壓縮強度試驗。測試方式：以微硬度測試機測量銲道硬度，以三點彎曲方式測試抗彎曲強度，如圖四、圖五所示。

## 二、實驗設計

以田口法方式採 L18(2<sup>1</sup>×3<sup>7</sup>) 混合型直交表，進行參數設計[13]。本實驗選定八個主要控制參數，分別是火嘴孔徑(A)、基本電流(B)、脈衝電流(C)、工

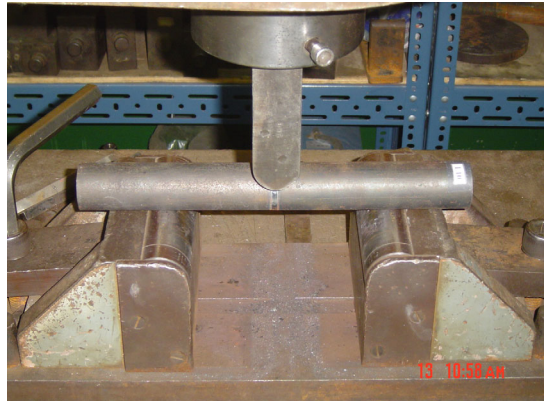


圖二 製作完成之內覆發泡鋁複合鋼管發泡密度為 0.69g/cm<sup>3</sup>



圖三 銲接完成之試棒，中間部位為銲道

作比例(D)、脈衝頻率(E)、保護氣體(F)、電漿氣體(G)、銲接速度(H)等，除了火嘴孔徑為二水準，其餘皆為三水準。實驗設計控制參數如表一所示。



圖四 以三點彎曲方式由銲道位置進行抗彎曲強度測試



圖五 兩複合發泡鋁鋼管以萬能試驗機進行抗壓縮強度測試

表一 實驗參數控制因子與水準值

NO.	Control factors	Level 1	Level 2	Level 3
A	Tip(φ)	φ1.5	φ2.0	
B	Plasma base current (A)	10	20	30
C	Plasma pulse current (A)	80	90	100
D	Duty cycle (%)	40	50	60
E	Plasma PRR (Hz)	100	200	300
F	Shielding gas(L/min)	13	14	15
G	Center gas(L/min)	0.2	0.3	0.4
H	Welding velocity (RPM)	3	4	5



更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】321期・98年12月號

每期220元・一年12期2200元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：03-582-2011