

田口實驗法應用於不銹鋼交流點銲參數優化

曾光宏* 林柏諭

國立屏東科技大學材料工程研究所

摘要

本研究選擇電極夾持力、點銲電流、點銲時間及保持時間等交流點銲製程參數，先以田口實驗探討此參數對 316L 不銹鋼接頭拉剪負荷影響，接續針對點銲電流進行品質提升實驗獲致最大接頭拉剪負荷，最後探討最佳化參數組合對 316L 不銹鋼銲核冶金性質影響。實驗結果顯示點銲電流對接頭拉剪負荷最具顯著影響性。本研究依田口實驗獲致之最佳化參數組合具 95% 信賴水準。品質提升實驗獲致之接頭拉剪負荷較田口實驗提高 12.85%。綜合田口實驗與品質提升實驗得知當採用 3 kN 電極夾持力、7.3 kA 點銲電流、15 cycles 電極擠壓時間、15 cycles 點銲時間及 7 cycles 保持時間等製程參數時，將獲致 316L 不銹鋼交流點銲最大接頭拉剪負荷。另因 316L 不銹鋼銲核存在 δ 肥粒鐵，故可獲較母材高之硬度值。

關鍵詞：不銹鋼，交流點銲，參數優化，田口實驗法。

APPLICATION OF TAGUCHI EXPERIMENT METHOD IN PARAMETER OPTIMIZATION OF ALTERNATING CURRENT SPOT WELDING OF STAINLESS STEEL

Kuang-Hung Tseng* Po-Yu Lin

*Institute of Materials Engineering
National Pingtung University of Science and Technology
Pingtung, Taiwan 91201, R.O.C.*

Key Words: stainless steel, alternating current spot welding, parameter optimization, Taguchi experiment method.

ABSTRACT

This study employed the Taguchi experiment to investigate the influence of process parameters (electrode force, welding current, welding time, and hold time) of alternating current (AC) spot welding on the tensile-shear load of the 316L stainless steel joint. A quality improvement experiment assisted by welding current was used to determine an optimal process parameter for increasing the tensile-shear load of the joint. The influences of an optimal process parameter on the metallurgical properties of the 316L stainless steel nugget were also investigated. The results show that welding current has the greatest influence on the joint tensile-shear load. According to Taguchi method statistics, an optimal combination of

*通訊作者：曾光宏，e-mail: tkh@mail.npust.edu.tw

Corresponding author: Kuang-Hung Tseng, e-mail: tkh@mail.npust.edu.tw

design parameters shows a 95% confidence level. Comparison of results obtained by using the Taguchi experiment, the quality improvement experiment can result in a 12.85% increase in the joint tensile-shear load. Based on the results of this study, an optimal parameter combination of 3 kN electrode force, 7.3 kA welding current, 15 cycles squeeze time, 15 cycles welding time, and 7 cycles hold time give the highest joint tensile-shear load for AC spot welding of 316L stainless steel. Compared with the 316L stainless steel base metal, the nugget exhibits delta ferrite in an austenite matrix, resulting in a higher hardness.

一、前言

電阻點銲 (resistance spot welding) 製程係先將欲接合工件置於上下銅合金電極間，再施加適當電極力穩固夾持工件後再通以點銲電流。因工件接觸面間之細微接觸點提供電流通路，故點銲電流通過此通路瞬間，將因焦耳效應 (Joule effect) 而產生電阻熱能。當點銲溫度達到工件材料熔點後，工件搭接面將因高溫而形成熔融銲核。當停止供應點銲電流且電極夾持力持續作用時，熔融銲核將冷凝而緊密接合工件[1-3]。由於電阻點銲具操作簡便性、作業時間短、熱影響區窄、變形與殘留應力低及可彈性搭配機器手臂進行自動化生產等製程特性，因此現已廣泛應用於汽車板金、電池殼件、沖壓零件、醫療器材及光電元件等薄板金屬製品之接合作[4, 5]。

由於電阻點銲製程係利用電流通過內部電阻產生熱能而接合工件，因此點銲過程中產生之熱能將取決於焦耳定律[6]。由焦耳定律得知影響熱能主要因素有電流、電阻及時間等，其中改變電極夾持力將影響工件接觸狀況，進而影響電阻分佈狀態[7]。由此得知點銲電流、點銲時間及電極夾持力等可視為電阻點銲製程參數，此參數將決定點銲過程中之工件受熱程度及其塑性變形狀況。國內外學者或研究單位針對鋼板電阻點銲研究主要係依據國際標準規範評估接頭強度，進而界定「製程參數」、「接頭強度」、「搭接品質」三者間之相應關係。

製程參數優化係為有效改善且持續穩定產品品質。因田口實驗法 (Taguchi experiment method) 具試驗次數較少、參數配置簡單及數據解析簡潔等特性，故現已廣泛應用於生產製造之工業領域。田口實驗法係於 1950 年代由日本田口玄一博士 (Dr. Genichi Taguchi) 首創[8, 9]。田口實驗法主要依設計參數 (控制因子及其水準值) 選用適當之直交表，另輔以訊號 / 雜音比 (S/N) 分析與變異數分析 (analysis of variance, ANOVA)，即可獲知設計參數對產品品質影響程度，進而獲致特定操作條件之最佳化設計參數組合。田口實驗法除了可大幅減少傳統試誤實驗之次數、人力及時間等外，同時亦可確實優化製程參數，達成改善產品品質與降低生產成本之雙重效益[10-12]。

由於交流點銲機具構造簡單、操作簡便、穩定度高、維護費低及故障率低等特性，因此廣泛應用於軟鋼、不銹

鋼及高強度鋼等薄板接合。影響金屬薄板交流點銲搭接品質之製程參數繁多且關聯性強，若採用傳統試誤法進行此多關聯性參數優化工作，則將耗費龐大之人力、時間及成本等。本研究選擇電極夾持力、點銲電流、點銲時間及保持時間等交流點銲製程參數，先以田口實驗探討此參數對 316L 不銹鋼接頭拉剪負荷影響，接續針對點銲電流進行品質提升實驗獲致最大接頭拉剪負荷，最後探討最佳化參數組合對銲核顯微組織與銲件硬度分佈影響。

二、實驗方法

1. 實驗鋼板

實驗鋼材選用板厚 1.2 mm 之 AISI 316L 不銹鋼 (C: 0.02%, Si: 0.45%, Mn: 1.69%, P: 0.028%, S: 0.016%, Cr: 16.6%, Ni: 10.8%, Mo: 2.11%, N: 0.05%, Cu: 0.4%, Fe: bal.)。

2. 點銲實驗

銲接方法採用電阻點銲製程進行鋼板搭接實驗。實驗設備使用 22.5 kW 額定輸出功率、60 Hz 頻率響應之立式交流點銲機，最高點銲電流為 18 kA，最大電極夾持力為 8 kN，銲機冷卻水流率為 10 l/min。電極材料選用端面直徑 6 mm 之 DOME 型 Cu-Al₂O₃ 電極帽。在進行點銲實驗前使用丙酮清潔上下電極帽端面，藉以避免污染物或附著物影響鋼板點銲搭接品質。

3. 參數選擇

田口實驗參數選擇主要係依據業界廠商習用沃斯田鐵型不銹鋼交流點銲製程條件。本研究選擇電極夾持力 (electrode force)、點銲電流 (welding current)、點銲時間 (welding time) 及保持時間 (hold time) 等交流點銲製程參數為控制因子，且每一控制因子各選定三個不同水準值。如表一所示為本研究之控制因子及其水準值規劃表，其中電極擠壓時間 (squeeze time) 固定 15 cycles。另本研究選擇試件潔淨度為雜音因子，分別選定為 N_A 試件潔淨度差 (試件表面未經研磨與清潔處理)，N_B 試件潔淨度佳 (試件表面先以 600 號數碳化矽砂紙研磨後再以丙酮清潔)。本研究選用 L₉(3⁴) 直交表配置設計參數 (如表二所示)，其中

表一 控制因子及其水準值規劃表

控制因子	水準值		
	水準 1	水準 2	水準 3
C _A (電極夾持力, kN)	3	4	5
C _B (點銲電流, kA)	3.5	5.0	6.5
C _C (點銲時間, cycles)	12	15	18
C _D (保持時間, cycles)	3	7	11

表二 L₉(3⁴)直交表

編號	控制因子				雜音因子			
	C _A	C _B	C _C	C _D	N _A	N _B	N _C	N _D
1	1	1	1	1	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
2	1	2	2	2	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
3	1	3	3	3	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
4	2	1	2	3	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
5	2	2	3	1	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
6	2	3	1	2	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
7	3	1	3	2	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
8	3	2	1	3	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
9	3	3	2	1	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄

表三 交流點銲設計參數配置表

編號	控制因子			
	C _A	C _B	C _C	C _D
1	3	3.5	12	3
2	3	5.0	15	7
3	3	6.5	18	11
4	4	3.5	15	11
5	4	5.0	18	3
6	4	6.5	12	7
7	5	3.5	18	7
8	5	5.0	12	11
9	5	6.5	15	3

y 代表接頭拉剪負荷，另此直交表配置四個控制因子 / 三個水準值與二個雜音因子 (總計三十六次田口實驗)。如表三所示為本研究之交流點銲設計參數配置表。

4. 剝離試驗 (peel test)

為研究點銲製程參數對搭接品質影響，銲後進行剝離試驗藉以獲知銲核破裂形貌。本試驗採用長度 60 mm、寬度 30 mm 試件，兩試件搭接後於重疊中心位置先進行點銲實驗，再將試件依圖 1 步驟進行剝離試驗。剝離試驗主要有夾持 (fixing)、彎曲 (bending) 及撕裂 (tearing) 等步驟。

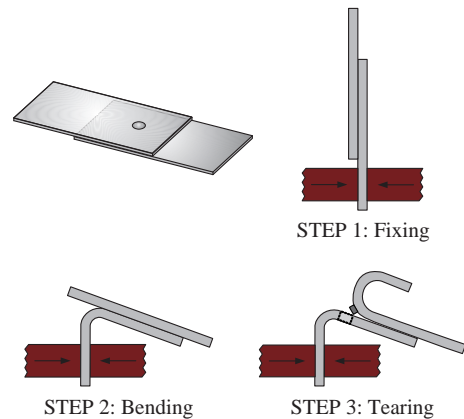


圖 1 剝離試驗步驟示意圖

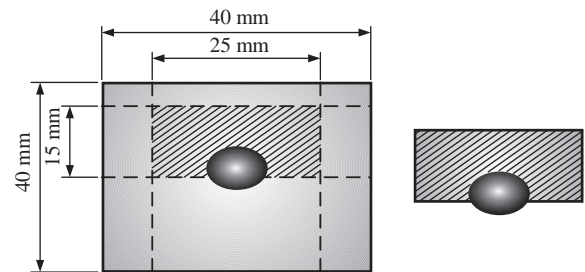


圖 2 金相試件取樣示意圖

5. 拉剪試驗

為研究點銲製程參數對接頭強度影響，銲後進行拉剪試驗藉以獲知接頭拉剪負荷。本試驗依據 JIS Z3136 規範採用長度 100 mm、寬度 30 mm 試件，兩試件搭接後於重疊中心位置先進行點銲實驗，再將試件以萬能材料試驗機進行拉剪試驗，其中拉剪速率為 2 mm/min。另完成拉剪試驗後，使用游標卡尺量測銲核平均直徑。

6. 肥粒鐵含量量測

為研究點銲最佳化參數組合對銲核肥粒鐵含量影響，銲後於銲核位置進行肥粒鐵含量量測。量測設備使用肥粒鐵含量測定儀，量測步驟為先將銲核以 600 號數碳化矽砂紙清除污染物後再以丙酮清潔，接續使用標準試片進行儀器校正工作，最後進行試件量測工作。

7. 金相實驗

為研究點銲最佳化參數組合對銲件巨觀形態及其顯微組織影響，將試件依圖 2 方式進行金相取樣。以銲核中心線為基準，取距該中心線 0.5 mm 位置裁切試件，藉以確保試件經研磨拋光後之觀測面位於最大銲核直徑處。將裁切且經鑲埋完成之試件先以碳化矽砂紙研磨至 1500 號數後再以氧化鋁液拋光至 0.05 μm。接續將此拋光完成之試件以酒精清洗並用吹風機烘乾後，再以 10% 草酸水溶液

表四 田口實驗獲致之接頭拉剪負荷 S/N

編號	N _A		N _B		S/N (dB) (註 1)
	y ₁ (kN)	y ₂ (kN)	y ₃ (kN)	y ₄ (kN)	
1	2.148	2.012	2.166	2.273	6.623
2	6.668	6.542	6.842	6.794	16.532
3	7.483	7.596	7.968	7.863	17.752
4	1.892	1.966	2.340	2.533	6.592
5	5.524	5.692	5.781	5.861	15.133
6	8.590	8.543	8.763	8.680	18.733
7	1.489	1.302	1.791	1.937	3.927
8	4.875	4.853	5.149	5.042	13.936
9	7.098	7.060	7.231	7.160	17.069

$$\text{註 1: } S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{4} \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \frac{1}{y_3^2} + \frac{1}{y_4^2} \right) \right)$$

進行電解腐蝕。最後使用光學顯微鏡拍攝鉚件巨觀形態，另使用掃描式電子顯微鏡拍攝鉚件顯微組織。

8. X 光繞射分析

為研究點鉚最佳化參數組合對鉚核相組成及其晶體結構影響，將完成金相實驗之試件進行 X 光繞射分析。分析設備使用 X 光繞射儀，光源為銅靶($\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$)，工作電壓為 40 kV，工作電流為 40 mA，掃描速度為 3.5 °/min，掃描角度 (2θ) 範圍為 35~95°。本研究將測得之 XRD 圖譜與國際繞射資料中心 (ICDD) 建置之 JCPDS 粉末繞射資料庫進行比對，藉以鑑定鉚核相組成及其晶體結構。

9. 硬度試驗

為研究點鉚最佳化參數組合對鉚件硬度分佈影響，將完成金相實驗之試件進行硬度試驗。試驗設備使用微小硬度試驗機，試驗荷重為 200 g，荷重作用時間為 15 s，試驗間距為 0.5 mm。

三、結果與討論

1. S/N 分析

由於本研究以接頭拉剪負荷為不銹鋼交流點鉚參數優化指標，亦即其值愈高代表點鉚搭接品質愈佳，因此採用望大品質特性。如表四所示為田口實驗獲致之接頭拉剪負荷 S/N。由表四得知若採用潔淨度佳之 N_B 試件進行交流點鉚，則可獲致較高接頭拉剪負荷。此係當試件表面存在汙染物時，將提高工件接觸阻抗，導致部份點鉚電流繞由汙染物處通過而產生分流效應 (shunting effect)。電流分流效應將降低作用於鉚核之點鉚熱能，進而降低該接頭拉剪負荷。由此得知試件潔淨度將影響點鉚搭接品質。

另點鉚搭接品質將反應於鉚核破壞形貌。如表五所示



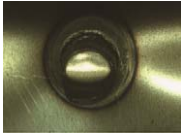

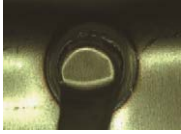

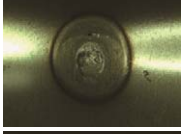
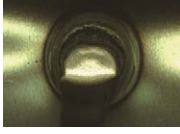

為鉚核破壞形貌與接頭拉剪負荷關係。由表五得知 316L 不銹鋼鉚件經剝離試驗後，其鉚核將呈界面破壞 (interfacial failure)、混合破壞 (mixed failure) 及鉚鉤破壞 (button failure) 等三種形貌。另由表五得知 316L 不銹鋼鉚核呈界面破壞形貌時之接頭拉剪負荷最低 (1.864~2.437 kN)；鉚核呈混合破壞形貌時之接頭拉剪負荷其次 (5.096~5.821 kN)；鉚核呈鉚鉤破壞形貌時之接頭拉剪負荷最高 (6.818~8.722 kN)。由此得知剝離試驗可簡易評估點鉚搭接品質，且當剝離鉚核呈鉚鉤破壞形貌時，將視為良好點鉚搭接品質。

若欲了解各控制因子於不同水準對接頭拉剪負荷影響，則需計算各因子水準之接頭拉剪負荷平均 S/N。如表六所示為接頭拉剪負荷平均 S/N 回應表，如圖 3 所示為接頭拉剪負荷平均 S/N 回應圖。由表六或圖 3 得知板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點鉚最佳化參數組合為 3 kN 電極夾持力 (C_{A1})、6.5 kA 點鉚電流 (C_{B3})、15 cycles 點鉚時間 (C_{C2})、7 cycles 保持時間 (C_{D2})。

2. 變異數分析

由於 S/N 分析無法判斷控制因子對品質特性影響，因此需藉由變異數分析探討控制因子對品質特性之影響程度。在變異數分析中常以 F 值表示控制因子效果對誤差變異之影響程度，若 F 值愈大則表示該控制因子相對其他控制因子較具顯著影響性。然因 F 值僅表示單一控制因子影響性而無法顯示實際影響程度，故田口博士建議採用貢獻率建立各控制因子對總平方和貢獻，此貢獻率可指出單一控制因子降低變異之影響能力。然為避免高估因子影響效果，田口博士建議將最小平方和因子併入誤差項。如表七所示之變異數分析即採用貢獻率輔以 F 值表示電極夾持力、點鉚電流、點鉚時間及保持時間等對 316L 不銹鋼交流點鉚接頭拉剪負荷影響程度。因保持時間 (C_D) 具最小平方和，故將其併入於誤差項。此係保持時間為點鉚電流

表五 銲核破壞形貌與接頭拉剪負荷關係

編號	銲核破壞形貌	銲核破壞型式	接頭拉剪負荷	編號	銲核破壞形貌	銲核破壞型式	接頭拉剪負荷
1		界面破壞	2.220 kN	6		鈕釦破壞	8.722 kN
2		鈕釦破壞	6.818 kN	7		界面破壞	1.864 kN
3		鈕釦破壞	7.916 kN	8		混合破壞	5.096 kN
4		界面破壞	2.437 kN	9		鈕釦破壞	7.196 kN
5		混合破壞	5.821 kN				

表六 接頭拉剪負荷平均 S/N 回應表

水準值	控制因子			
	C _A	C _B	C _C	C _D
水準 1	13.63	5.71	13.09	12.94
水準 2	13.48	15.20	13.39	13.06
水準 3	11.64	17.85	12.27	12.76

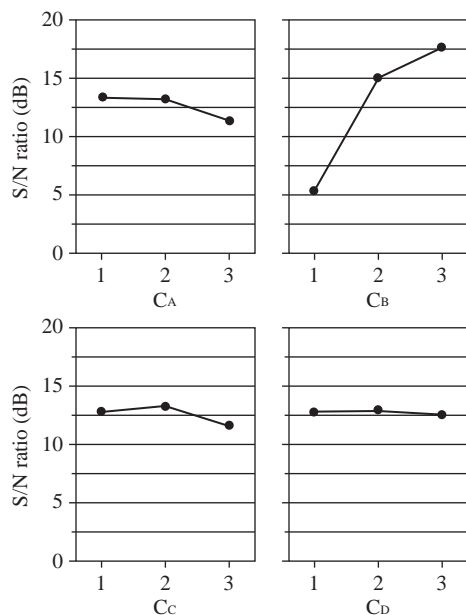


圖 3 接頭拉剪負荷平均 S/N 回應圖

停止供應後，電極夾持力仍需持續作用一段時間直至熔融銲核冷卻凝固，亦即保持時間對接頭拉剪負荷較不具影響性。

另由表七得知點銲電流 (C_B) 對板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點銲接頭拉剪負荷最具顯著影響性 (貢獻率為 96.18%)，其次為電極夾持力 (C_A) 之 2.85% 貢獻率。因電流平方與熱能呈正比，故點銲電流為影響點銲熱能主要因素，亦即點銲電流對接頭拉剪負荷最具顯著影響性。至於電極夾持力將影響工件接觸狀況，進而影響試件電阻分佈，而其需依據工件材料硬度、電極材料硬度及工件材料厚度等進行適當調控。

3. 驗證實驗

完成 S/N 分析與變異數分析後，田口博士建議需將此最佳化參數組合進行驗證實驗，藉以確認實驗結果準確性。本研究依田口實驗獲致之最佳化參數組合，分別再以二種不同試件潔淨度進行十二次驗證實驗，並採用式 (1) 之加法模式計算得知預測之訊號 / 雜音比 (S/N_{pre}) 後，再

表七 變異數分析表

變異源	自由度	平方和	均方 (註 2)	F 值 (註 3)	貢獻率 (註 4)
CA	2	7.38	3.69	52.71	2.85%
CB	2	244.32	122.16	1745.14	96.18%
CC	2	2.04	1.02	14.57	0.75%
CD	2	0.14	併入誤差	—	—
誤差項	(2)	—	(0.07)	—	0.22%
總和項	8	253.88			100%

註 2：單因子之平方和 / 單因子之自由度。

註 3：單因子之均方 / 誤差項之均方。

註 4：[(單因子之平方和 - 單因子之自由度 × 誤差項之均方) / 總和項之平方和] × 100%。

表八 驗證實驗獲致之接頭拉剪負荷 S/N

編號	N _A		N _B		S/N (dB)
	y ₁ (kN)	y ₂ (kN)	y ₃ (kN)	y ₄ (kN)	
10	8.702	8.712	8.803	8.739	18.829
11	8.683	8.714	8.813	8.879	18.861
12	8.688	8.694	8.763	8.795	18.824

與驗證實驗獲致之 S/N 相較。若兩者數值相差不大，則表示此加法模式成立且具良好再現性；若兩者數值相差太大，則表示各控制因子間可能有強烈關聯性。如表八所示為驗證實驗獲致之接頭拉剪負荷 S/N。

$$S/N_{pre} = \bar{T} + (\bar{C}_1 - \bar{T}) + \dots + (\bar{C}_n - \bar{T}) \quad (1)$$

式中

\bar{T} ：S/N 之總平均

\bar{C} ：單因子最高之平均 S/N

由表四計算得知由田口實驗獲致接頭拉剪負荷 S/N 之總平均為 12.922 dB，將此值代入式 (1) 計算得知 S/N_{pre} 為 19.026 dB。另由式 (2) 計算得知該接頭拉剪負荷 S/N 之 95% 信賴區間 (CI_{0.95}) 的容許誤差為 ±1.198。最後由表八計算得知由驗證實驗獲致接頭拉剪負荷 S/N 之總平均為 18.838 dB，該值落於 19.026 ± 1.198 dB 範圍。由此得知本研究依田口實驗獲致之板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點銲最佳化參數組合，除了具良好再現性外，亦有 95% 信賴水準。

$$CI_{0.95} = \left[F_{0.05}(1,2) \times V_{err} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中

$F_{0.05}(1,2) = 18.51$ (經查表得知)

V_{err} ：誤差項之變異數

n_{eff} ：有效觀測值

r ：驗證實驗次數

4. 品質提升實驗

本研究利用田口實驗之 S/N 分析獲致最佳化參數組合後，再經由變異數分析得知點銲電流對接頭拉剪負荷最具顯著影響性。由此得知若欲提升板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點銲接頭拉剪負荷，則可針對點銲電流進行接頭拉剪負荷提升實驗。本實驗將點銲電流由 6.5 kA 以 0.2 kA 間隔方式漸增至 7.5 kA，另電極夾持力、點銲時間及保持時間分別固定為 3 kN、15 cycles 及 7 cycles。

如圖 4 所示為點銲電流對板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼接頭拉剪負荷與銲核平均直徑影響。由圖 4 得知當點銲電流由 6.5 kA 提高至 7.3 kA 時，接頭拉剪負荷將由 8.811 kN 提高至 9.943 kN，然當點銲電流為 7.5 kA 時，接頭拉剪負荷將降低至 8.342 kN。根據文獻指出[13-16]，電阻點銲之接頭拉剪負荷與該銲核平均直徑有顯著關聯。由圖 4 得知當點銲電流由 6.5 kA 提高至 7.3 kA 時，銲核平均直徑將由 4.69 mm 增加至 6.11 mm，然當點銲電流為 7.5 kA 時，銲核平均直徑將縮減至 4.98 mm。此係當點銲熱能過高時，液態銲核將因無法承受電極夾持力作用而造成熔融金屬飛濺現象 (如圖 5(a) 所示)，此稱為飛爆 (expulsion)。飛爆除了縮減銲核平均直徑外，該銲核亦將產生縮孔 (shrinkage void) 缺陷 (如圖 5(b) 所示)，導致銲核傾向產生較低接頭

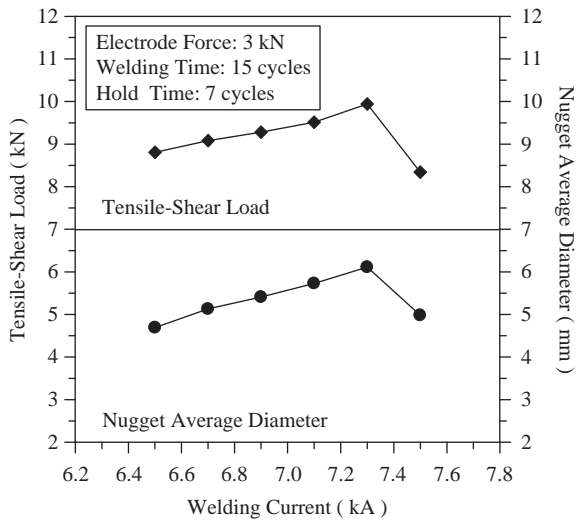
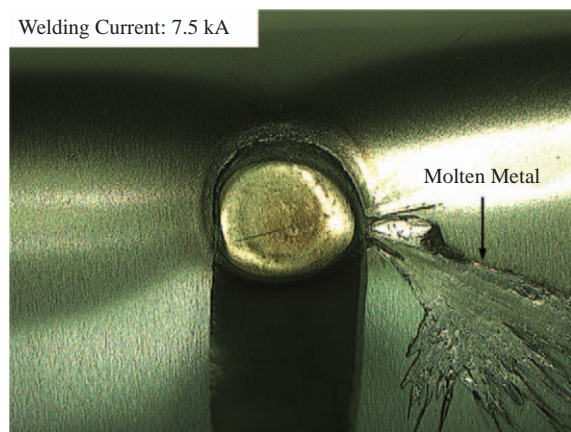
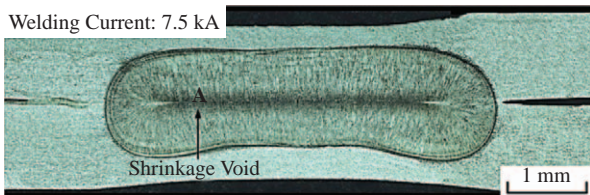


圖 4 點銲電流對接頭拉剪負荷與銲核平均直徑影響



(a) 銲核飛爆



(b) 縮孔缺陷

圖 5 銲核飛爆與縮孔缺陷

強度之脆性破壞模式[17-19]。相較 6.5 kA 點銲電流時之銲核平均直徑 (4.69 mm) 與接頭拉剪負荷 (8.811 kN)，雖 7.5 kA 點銲電流之銲核平均直徑 (4.98 mm) 增加 0.29 mm (增加 6.18%)，然該接頭拉剪負荷 (8.342 kN) 降低 0.469 kN (降低 5.32%)。由此得知當點銲電流過高而導致飛爆時，除了將縮減銲核平均直徑外，亦將降低接頭拉剪負荷。

由田口實驗獲致設計參數組合 (3 kN 電極夾持力、6.5 kA 點銲電流、15 cycles 點銲時間及 7 cycles 保持時間) 之接頭拉剪負荷為 8.811 kN。另由品質提升實驗獲致設計參數組合 (3 kN 電極夾持力、7.3 kA 點銲電流、15 cycles 點

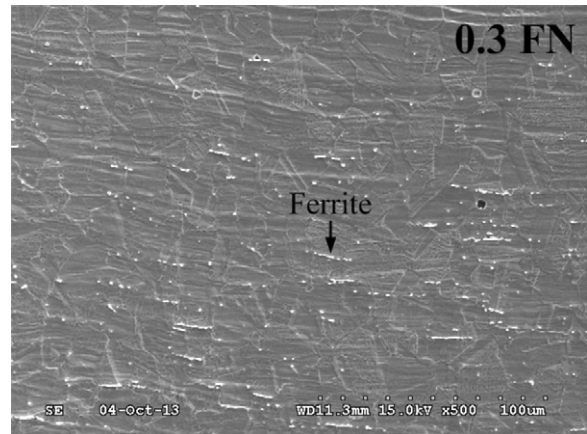


圖 6 316L 不銹鋼母材組織

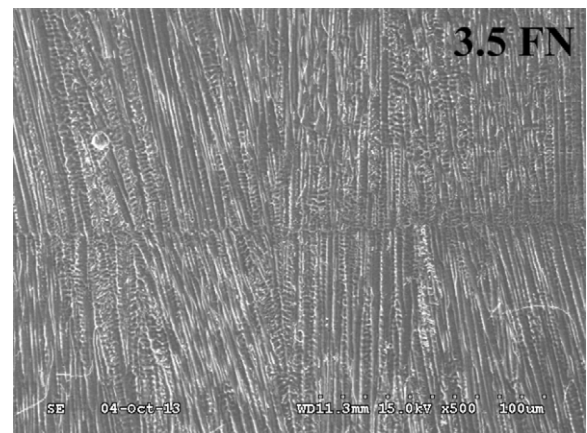


圖 7 316L 不銹鋼銲核組織

銲時間及 7 cycles 保持時間) 之接頭拉剪負荷為 9.943 kN。由此得知品質提升實驗獲致之接頭拉剪負荷可較田口實驗提高 12.85%。

5. 銲核冶金性質分析

如圖 6 所示為 316L 不銹鋼母材組織。由圖中觀察得知其除了存在沃斯田鐵外，亦存在極少含量 (0.3 FN) 之條帶狀(banded) δ 肥粒鐵。此係 316L 不銹鋼於板材熱軋加工及後續冷卻過程，因 δ 肥粒鐵生成元素產生溶質偏析現象 [20]，故促使該肥粒鐵沿鋼板軋延方向形成條帶狀形態。

藉由 316L 不銹鋼化學成份計算得知其銘當量 / 鎳當量比 (Cr_{eq}/Ni_{eq}) 為 1.57 ($Cr_{eq} = Cr + 1.37Mo + 1.5Si + 2Nb + 3Ti = 20.16$; $Ni_{eq} = Ni + 0.31Mn + 22C + 14.2N + Cu = 12.87$)，亦即 316L 不銹鋼銲接金屬屬 Ferrite-Austenite (FA) 模式 (由此可預測 316L 不銹鋼銲核應存在 δ 肥粒鐵)。如圖 7 所示為交流點銲製程於 7.3 kA 電流時之 316L 不銹鋼銲核組織。由圖中觀察得知其主要為沃斯田鐵與肥粒鐵 (含量為 3.5 FN) 雙相結構，亦即 316L 不銹鋼銲核固

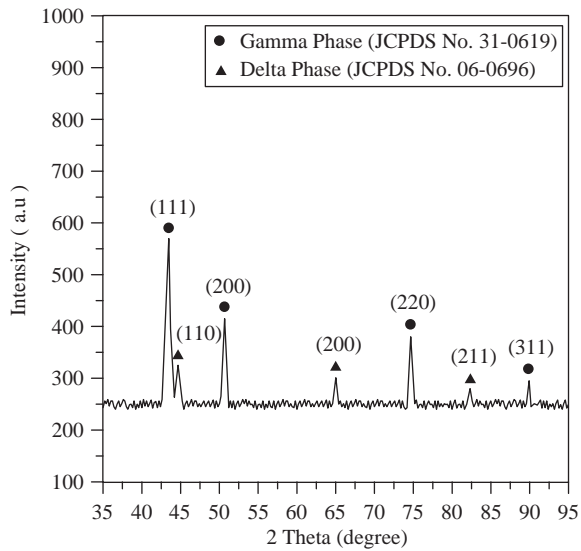


圖 8 316L 不銹鋼銲核 XRD 圖譜

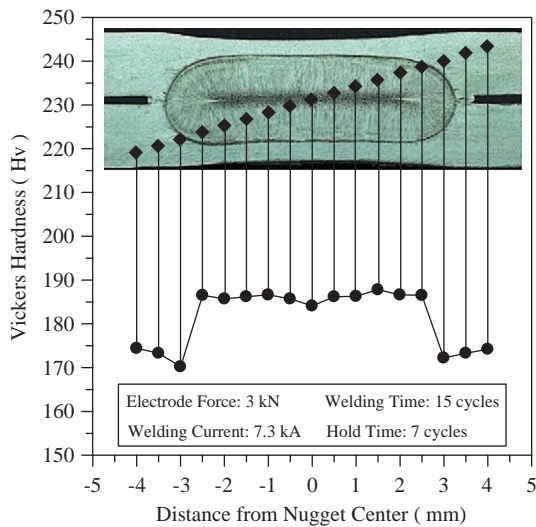


圖 9 316L 不銹鋼銲件硬度分佈

(體心立方晶體) 雙相結構。由此得知當 316L 不銹鋼銲核存在 δ 肥粒鐵時，將獲致較母材高之硬度值。

四、結 論

本研究選擇電極夾持力、點銲電流、點銲時間及保持時間等交流點銲製程參數，先以田口實驗探討此參數對接頭拉剪負荷影響，接續針對點銲電流進行品質提升實驗獲致最大接頭拉剪負荷，最後探討最佳化參數組合對銲核冶金性質影響。根據結果與討論，可得到以下結論：

1. 由田口實驗之 S/N 分析初步得知板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點銲最佳化參數組合為 3 kN 電極夾持力、6.5 kA 點銲電流、15 cycles 電極擠壓時間、15 cycles 點銲時間及 7 cycles 保持時間。另由剝離試驗得知當銲核呈鈕釦破壞形貌時，將視為良好點銲搭接品質。
2. 由田口實驗之變異數分析得知點銲電流對接頭拉剪負荷最具顯著影響性，此係點銲電流平方與點銲熱能呈正比關係。
3. 本研究依田口實驗獲致板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點銲最佳化參數組合具 95% 信賴水準。
4. 由田口實驗獲致之接頭拉剪負荷為 8.811 kN，另由品質提升實驗獲致之接頭拉剪負荷為 9.943 kN，亦即品質提升實驗獲致之接頭拉剪負荷較田口實驗提高 12.85%。綜合田口實驗與品質提升實驗得知當採用 3 kN 電極夾持力、7.3 kA 點銲電流、15 cycles 電極擠壓時間、15 cycles 點銲時間及 7 cycles 保持時間之搭接參數時，將獲致板厚 1.2 mm 之 316L 不銹鋼交流點銲最大接頭拉剪負荷。
5. 由銲核冶金性質分析得知 316L 不銹鋼母材組織主要由 γ 沃斯田鐵構成，而其銲核組織則由 γ 沃斯田鐵與 δ 肥粒鐵構成。另因 316L 不銹鋼銲核存在 δ 肥粒鐵，故可獲致較母材高之硬度值。

誌 謝

本研究承蒙國科會專題研究計畫—「活性化電阻點銲技術創新研發 (NSC 101-2221-E-020-012)」經費補助，方能順利完成，特此致上感謝之意。

符號索引

\bar{C}	單因子最高之平均 S/N
C_A	控制因子 (電極夾持力)
C_B	控制因子 (點銲電流)
C_C	控制因子 (點銲時間)
C_D	控制因子 (保持時間)
$CI_{0.95}$	95% 信賴區間
N_A	雜音因子 (試件潔淨度差)

化確屬 FA 模式。另由圖 7 觀察 δ 肥粒鐵之凝固成長係平行電流通方向，且該肥粒鐵形態呈骨骼狀 (skeletal)。

如圖 8 所示為 316L 不銹鋼銲核 XRD 圖譜。由圖中得知當 316L 不銹鋼銲核於 2θ 為 43.473° 、 50.674° 、 74.679° 、 89.934° 時，將出現 (111)、(200)、(220)、(311) γ 相繞射峰；於 2θ 為 44.674° 、 65.023° 、 82.335° 時，將出現 (110)、(200)、(211) δ 相繞射峰。由此確認 316L 不銹鋼銲核組織主要由 γ 沃斯田鐵與 δ 肥粒鐵構成。

如圖 9 所示為交流點銲製程於 7.3 kA 電流時之 316L 不銹鋼銲件硬度分佈，其中硬度分佈範圍涵蓋完整銲核與部份母材。由圖中得知銲核平均硬度為 Hv 186，母材平均硬度為 Hv 174。如前所述，316L 不銹鋼母材為沃斯田鐵 (面心立方晶體) 單相結構，而銲核則為沃斯田鐵與肥粒鐵

N_B	雜音因子 (試件潔淨度佳)
n_{eff}	有效觀測值
r	驗證實驗次數
S/N	訊號/雜音比
S/N_{pre}	預測之訊號/雜音比
\bar{T}	S/N 之總平均
V_{err}	誤差項之變異數
y	接頭拉剪負荷

參考文獻

- Aslanlar, S., "The Effect of Nucleus Size on Mechanical Properties in Electrical Resistance Spot Welding of Sheets Used in Automotive Industry," *Materials and Design*, Vol. 27, No. 2, pp. 125-131 (2006).
- Goodarzi, M., Marashi, S. P. H., and Pouranvari, M., "Dependence of Overload Performance on Weld Attributes for Resistance Spot Welded Galvanized Low Carbon Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4379-4384 (2009).
- Yoon, H. J., Kim, D. C., and Kang, M. J., "Inverter DC Resistance Spot Weldability of 590 MPa Galvanized Steel for Automotive Applications," *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 49, No. 2, pp. 112-117 (2011).
- Kocabekir, B., Kacar, R., Gunduz, S., and Hayat, F., "An Effect of Heat Input, Weld Atmosphere and Weld Cooling Conditions on the Resistance Spot Weldability of 316L Austenitic Stainless Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, No. 1-3, pp. 327-335 (2008).
- Martin, O., Tiedra, P. D., Lopez, M., Juan, M. S., Garcia, C., Martin, F., and Blanco, Y., "Quality Prediction of Resistance Spot Welding Joints of 304 Austenitic Stainless Steel," *Materials and Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 68-77 (2009).
- Podrzaj, P., Polajnar, I., Diaci, J., and Kariz, Z., "Overview of Resistance Spot Welding Control," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 13, No. 3, pp. 215-224 (2008).
- Sun, H. T., Lai, X. M., Zhang, Y. S., and Shen, J., "Effect of Variable Electrode Force on Weld Quality in Resistance Spot Welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 12, No. 8, pp. 718-724 (2007).
- Thakur, A. G., Rao, T. E., Mukhedkar, M. S., and Nandedkar, V. M., "Application of Taguchi Method for Resistance Spot Welding of Galvanized Steel," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 11, pp. 22-26 (2010).
- Muhammad, N., Manurung, Y. H. P., Hafidzi, M., Absa, S. K., Tham, G., and Rahim, M. R. A., "A Quality Improvement Approach for Resistance Spot Welding Using Multi-objective Taguchi Method and Response Surface Methodology," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 17-22 (2012).
- Esme, U., "Application of Taguchi Method for the Optimization of Resistance Spot Welding Process," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, No. 2B, pp. 519-528 (2009).
- Sijo, M. T. and Biju, N., "Taguchi Method for Optimization of Cutting Parameters in Turning Operations," *International Journal on Manufacturing and Material Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 44-46 (2011).
- Javadi, Y., Sadeghi, S., and Najafabadi, M. A., "Taguchi Optimization and Ultrasonic Measurement of Residual Stresses in the Friction Stir Welding," *Materials and Design*, Vol. 55, pp. 27-34 (2014).
- Pouranvari, M., Mousavizadeh, S. M., Marashi, S. P. H., Goodarzi, M., and Ghorbani, M., "Influence of Fusion Zone Size and Failure Mode on Mechanical Performance of Dissimilar Resistance Spot Welds of AISI 1008 Low Carbon Steel and DP600 Advanced High Strength Steel," *Materials and Design*, Vol. 32, No. 3, pp. 1390-1398 (2011).
- Chen, Y. C., Tseng K. H., and Wang, H. C., "Small-scale Projection Lap-joint Welding of KOVAR Alloy and SPCC Steel," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 211-218 (2012).
- Pouranvari, M. and Ranjbarnoodeh, E., "Effect of Welding Current on Energy Absorption of AISI 304 Resistance Spot Welds," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 17, pp. 2911-2914 (2012).
- Pouranvari, M., "On the Failure Mode of Resistance Spot Welded HSLA 420 Steel," *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 58, No. 1, pp. 67-72 (2013).
- Marya, M. and Gayden, X. Q., "Development of Requirements for Resistance Spot Welding Dual-phase (DP600) Steels. Part 1- The Causes of Interfacial Fracture," *Welding Journal*, Vol. 84, No. 11, pp. 172-182 (2005).
- Tong, W., Tao, H., Jiang, X., Zhang, N., Marya, M. P., Hector Jr., L. G., and Gayden, X. Q., "Deformation and Fracture of Miniature Tensile Bars with Resistance-spot-welded Microstructures," *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, Vol. 36, No. 10, pp. 2651-2669 (2005).
- Pouranvari, M. and Marashi, S. P. H., "Failure Mode Transition in AHSS Resistance Spot Welds. Part I. Controlling Factors," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528,

No. 29-30, pp. 8337-8343 (2011).

20. Lippold, J. C. and Kotecki, D. J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley and Sons, NY (2005).

2014年06月26日 收稿

2014年07月28日 初審

2014年08月11日 複審

2014年08月13日 接受