

# 鎳基超合金修補製程參數最佳化研究

A Study on the Optimum Condition During Repairing Process in Ni-base Superalloy

計畫編號: NSC90-2216-E-018-001

執行期限: 90年8月1日至91年7月31日

主持人: 林義成 國立彰化師範大學機電工程學系 教授

中文摘要(關鍵字：銲補、電漿銲接、超合金、殘留應力、有限元素)

本研究的目的主要利用電漿銲接研究鎳基超合金修補，並以殘留應力之分析與控制為主。實驗中所採用的銲接方法為電漿銲接，並選用 IN738LC 為母材。並藉由田口方法以銲接走速、電流、預熱溫度、束縛度為參數，以降低銲接殘留應力為目標找出最佳化參數。由於 IN738LC 材料有限，在研究過程中將利用有限元素方法模擬銲接過程之熱應力。其次，利用有限元素方法模擬亦可更廣泛了解銲補參數與熱應力與殘留應力之間相依性。最後由田口方法得知工件固定影響最小，影響最大為預熱溫度，所得最佳水準組合為銲槍走速 3.5mm/s、銲接電流為 40A、預熱溫度為 200°C、工件不用固定，在銲道部份所得殘留應力約為 865MPa 拉伸殘留應力，遠離銲道部份約為 -203MPa 壓縮殘留應力。

英文摘要要求(Key word：Repair welding, Plasma arc welding, Superalloy, Residual stress, Finite element)

In this study, the repair welding technology of plasma arc welding is used. The finite element method will be used to analyze the thermal and residual stresses during welding process. The welding parameter are welding speed, current,

preheat temperature and constraint. We can find the optimum of welding parameter by Taguchi method. An experiment will be done after analyze for identification of analytic results. During welding, the thermal cycle of different locations in weldment will be recorded to compare the temperature field obtained by finite element method.

## 1. 前言

鎳基超合金因擁良好的抗高溫腐蝕與潛變特性，常被利用於高溫與腐蝕工作環境中，但材料價格十分昂貴，且修補時因熱應力造成熱裂縫和過高殘留應力釋放可能引起之時效應變裂縫[1-3]，在傳統的電弧銲方法中均視其為不可銲補之材料，因此，銲補鎳基超合金之研究十分有意義。然而，隨著電腦速度的提升及硬碟空間的增加，使得有限元素法模擬銲接的過程可行，不僅可以得到殘留應力，亦可以得到銲接過程的熱應力分佈。[4-7]

## 2. 分析與實驗過程

本實驗為探討鎳基超合金修補製程參數對殘留應力之影響，使用材料為 IN 738，試片取自電廠葉片，以放電加工線切割方法將試片切為厚 3mm，幾何形狀如圖一，其化學成份及物理性質分別如表一及圖二所示。在銲接前將所有的試片均施以

1175°C，二小時之氣冷固溶處理。

本研究的銲接方法採用電漿電弧銲設備，銲接方式為 Autogenous。銲接過程以 Bead-on-plate 施銲，藉由田口方法以銲接走速、電流、預熱溫度、束縛度為控制因子，表二為控制因子水準表[8]，以降低銲接殘留應力為目標找出最佳化參數。

數值模擬是採用有限元素套裝軟體 MARC，並以準靜態(Quasi-steady-state)耦合(Couple)熱彈塑性(Thermo-elastic-plastic theory)分析。分析時將材料性質視為溫度函數，且以三維空間問題來模擬，有限元素網格分割(Mesh)方面，在銲道中心即附近是 1mm × 1mm × 1.2mm，整個模擬網格共有 3172 個節點(Node)及 2160 個元素(Element)，如圖一所示。銲接熱源的模擬方式是採用面熱量(Surface flux)，並根據銲槍走速，給予熱源施加時間。邊界條件則假設初始溫度為 298K，四周視為自然對流，其對流係數為 15W/m<sup>2</sup>k。

### 3、結果與討論

#### 3.1 田口分析結果

圖三 A 因子效果圖中 A1 的 SN 比大於 A2，圖四 B 因子效果圖中 B3 的 SN 比最大，圖五 C 因子效果圖中 C1 的 SN 比最大，圖六 D 因子效果圖中 D3 的 SN 比最大，因此，可知最佳參數為 A1B3C1D3。

#### 3.2 數值模擬與銲接實驗熱循環曲線之比較

圖七 為距離銲道中心下邊 4mm 之銲接實驗與數值模擬熱循環比較圖，銲接實驗最高溫為 1113K，模擬溫度為 1090K，但冷卻後模擬溫度略高於實驗溫度。圖八 為最佳化參數數值模擬銲接 16 秒之溫度分佈圖，發現銲接中心溫度為 1672k。

#### 3.3 熱應力之數值模擬

圖九為最佳化參數銲接 12 秒數值模擬於銲弧到達銲件 5/6 處之縱向熱應力( $\sigma_x$ )，在銲弧前端附近呈現壓縮應力，在距離銲弧後方較遠處，壓縮應力會轉為拉伸應力，其原因與銲道附近與外側材料收縮不均有關，其結果和 304 不銹鋼當銲弧到達試片中心時縱向熱應力呈現一樣的狀態[9]，在銲道兩邊是壓縮應力。圖十葉片最佳化參數銲接 6 秒數值模擬於銲弧到達銲件 3/7 處之縱向熱應力放大圖，發現在銲弧左右方及前方 5mm 內都為壓應力，最大壓應力發生在銲前方弧 2mm 處，其最大值約為 -800MPa，但因為壓應力，所以對裂縫產生較沒影響。在距離銲弧 5 到 8mm 處有拉伸應力產生，其最大值在銲弧上下方 6mm 處約為 594MPa，此區因銲弧未經過，所以對裂縫的產生也不會影響。主要對裂縫有影響是在銲弧後方 5mm，最大值約為 362MPa 拉伸應力。

#### 3.4 殘留應力之數值模擬

圖十一為銲接數值模擬之縱向殘留應力( $\sigma_x$ )，在銲道中心處為拉伸應力，最大值為 865MPa，銲道附近為壓縮應力，最大值為 -203MPa，圖十二為銲接數值模擬之銲道中心到外圍的縱向殘留應力值。

### 4、結論

1、田口方法得知工件固定影響最小，影響最大為預熱溫度，所得最佳水準組合為銲槍走速 3.5mm/s、銲接電流為 40A、預熱溫度為 200°C、工件不用固定。

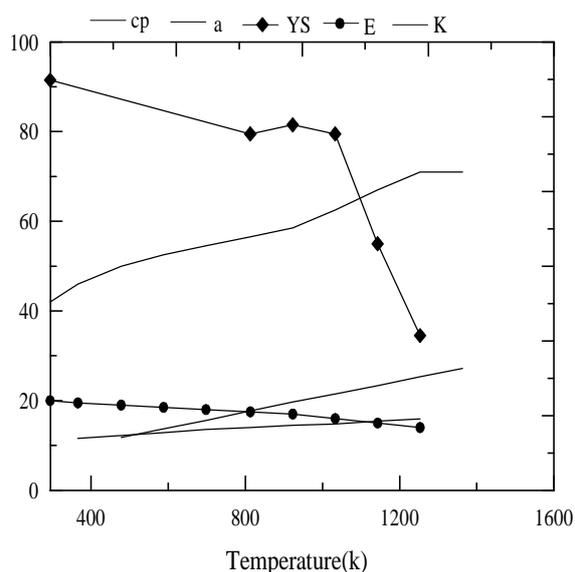
2、縱向熱應力銲弧前端附近呈現壓縮應力，在距離銲弧後方較遠處，壓縮應力會轉為拉伸應力，其最大值約為 362MPa 拉伸應力。

3、縱向殘留應力( $\sigma_x$ )在銲道中心處為拉伸

應力，最大值為 865MPa，銲道附近為壓應力，最大值為-203MPa。

參考文獻

- 1、E.G. Richards: J. Eng. Power (Trans. ASME), 1967,89(1),pp.14
- 2、R.G. Baker: Philos. Trans. R. Soc., 1976,A282,207
- 3、M. Beghini , and L. Bertini , Journal of Strain Analysis,25(2),1990,pp.103-108
- 4、A.C. Lingenfelter ,ASM Publisher, 1997, pp.3-6
- 5、陳貴文，”銲接殘留應力的研究”，國立成功大學機械研究所碩士論文，1994
- 6、薛明憲，”以簡化模式預估銲接殘留應力與變形”，國立成功大學機械研所碩士論文，1995
- 7、毛森，”以有限元素法分析銲接殘餘應力及變形之研究”，國立中山大學材料科學研究所碩士論文，1994
- 8、蘇朝墩編，”產品穩健設計”，中華民國品質學會發行
- 9、莊英任，”吸熱膠體對銲件殘留應力與角變形之數值模擬分析及實驗”，國立彰化師範大學工業教育研究所碩士論文，2000

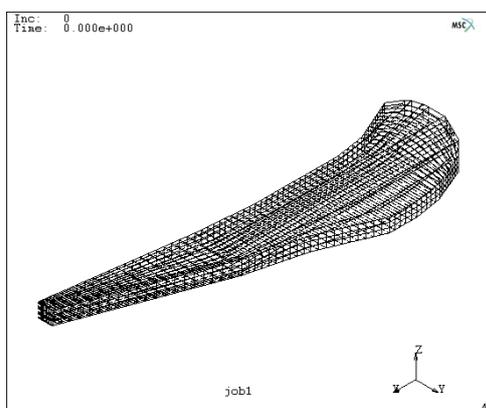


Notation	Coefficient of material	Unit
A	Thermal expansion coefficient	$\times 10^{-6}m/mk$
Cp	Specific heat	$\times 10J/kg k$
K	Thermal conductivity coefficient	W/m k
E	Young's modulus	$\times 10 GPa$
YS	Yielding strength	$\times 10 MPa$

圖二 母材之物理性質與機械性質

表一 Inconel-738LC 之化學組成

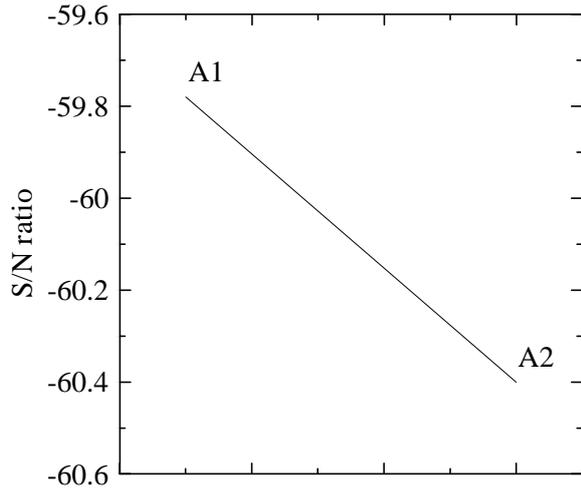
Element	Ni	Cr	Al	Ti	W	Mo	Nb	Co	Ta
w.t%	Bal.	15.9	3.4	3.3	2.5	1.6	0.96	8.3	1.72



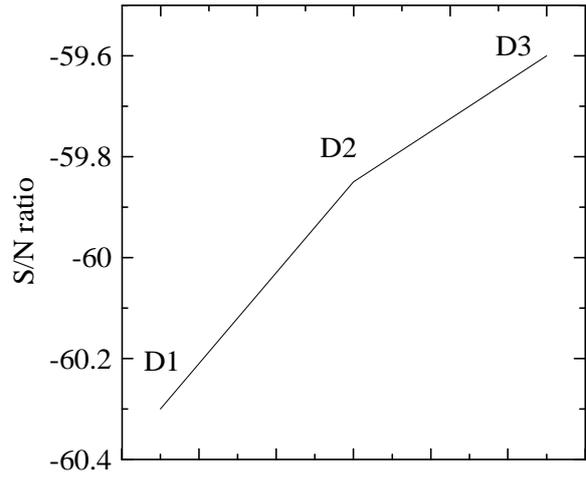
圖一 葉片 3D 之有限元素網格圖

表二 控制因子水準

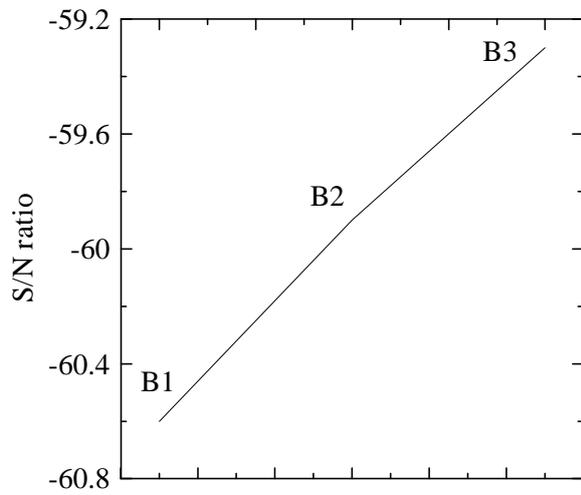
因子	水 準		
	1	2	3
A:束縛度	否	是	
B:電流(A)	60A	50A	40A
C:銲道走速 (mm/min)	210mm/min	240 mm/min	180 mm/min
D:預熱溫度 (°C)	0°C	100°C	200°C



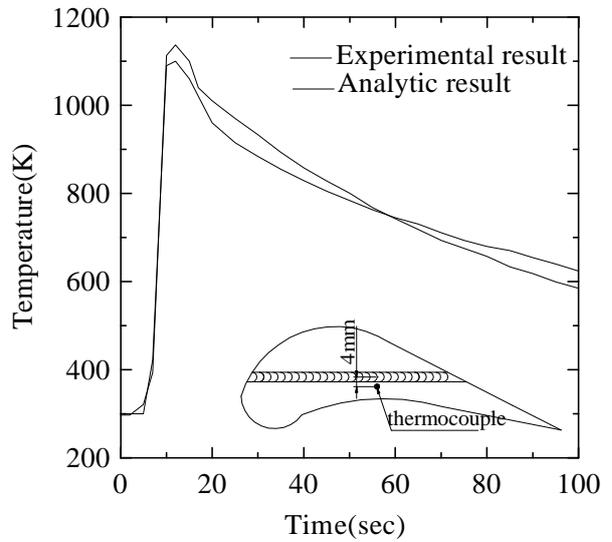
圖三 A 因子效果圖



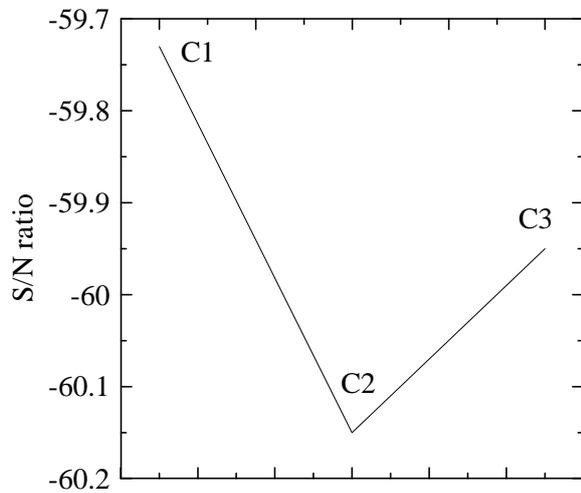
圖六 D 因子效果圖



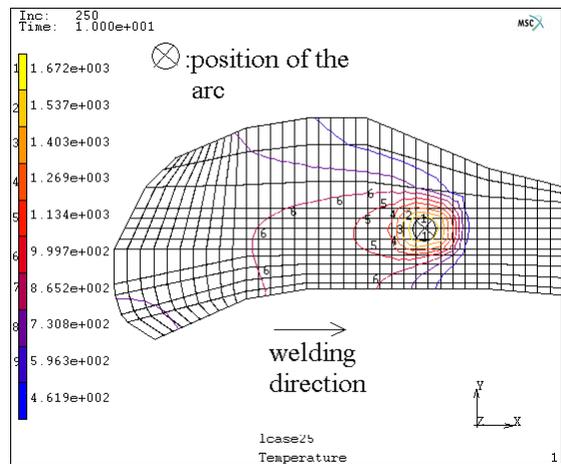
圖四 B 因子效果圖



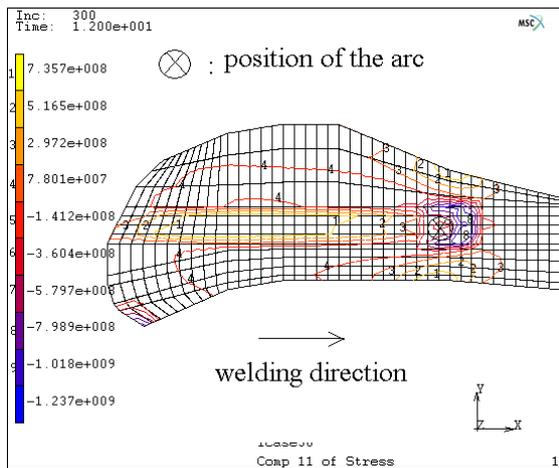
圖七 距離銲道中心下邊4mm之銲接實與數值模擬熱循環比較圖



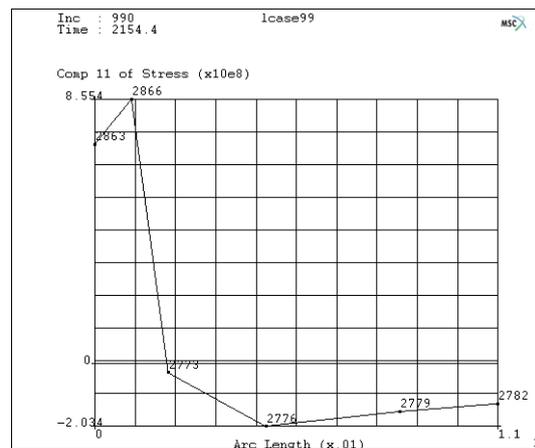
圖五 C 因子效果圖



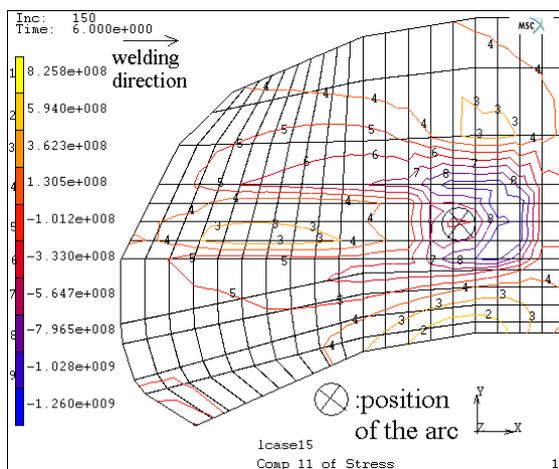
圖八 數值模擬銲接 10 秒之溫度分佈



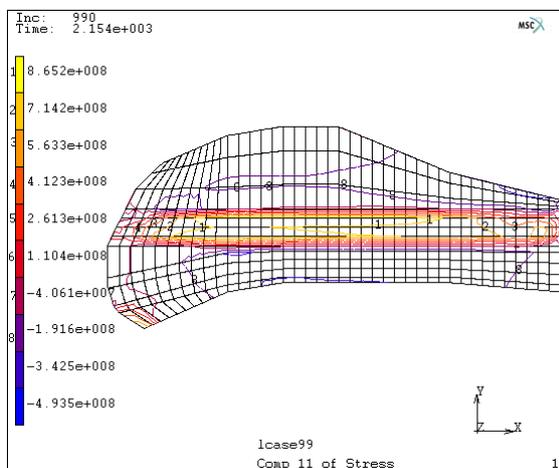
圖九 最佳化參數銲接 12 秒數值模擬於銲弧到達銲件 5/6 處之縱向熱應力( $\sigma_x$ )



圖十二銲接數值模擬之銲道中心到外圍的縱向殘留應力值



圖十葉片最佳化參數銲接 6 秒數值模擬於銲弧到達銲件 3/7 處之縱向熱應力放大圖



圖十一銲接數值模擬之縱向殘留應力( $\sigma_x$ )