

# 熱處理條件對銲後 SAE4130 鋼板殘留應力量測與消除效果之比較

吳佩芳\* 王家祥<sup>1</sup> 吳威德<sup>1</sup> 賀克勤<sup>2</sup> 吳典勳<sup>2</sup> 楊智綱<sup>2</sup> 陳裕德<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立中興大學材料系 <sup>2</sup> 中山科學研究院

## Residual stress relaxation of welded SAE4130 plate under different heat treatment condition

本研究以 SAE4130 鋼板，經過電子束銲接後產生殘留應力，探討五種不同熱處理條件，分別為 450°C 持溫 1hr、2hr 與 4hr 後空冷；300°C 持溫 2hr 後空冷；180°C 持溫 2hr 後空冷，對銲後殘留應力的影響。本研究同時利用傳統 Cu 靶- $\sin^2\psi$  法與最新 Cr 靶- $\cos\alpha$  法的 XRD 進行殘留應力量測，以比較其精準度與準確性，且探討不同熱處理條件對 Debye 環、正向應力的影響。研究結果發現，以 Cu 靶- $\sin^2\psi$  法 XRD 量測銲接後的碳鋼類材料，因有螢光效應影響，導致殘留應力誤差值為 $\pm 50\%$ ，若使用 Cr 靶- $\cos\alpha$  法，其量測殘留應力值誤差值可降至為 $\pm 15\%$ 以內。不同熱處理條件對應力消除的研究結果發現，熱處理應力消除效果以 450°C $\times$ 4h 最佳，效果達 75.12%；其次為 450°C $\times$ 1hr，效果 59.77%；450°C $\times$ 2hr，效果 56.91%；最差條件為 300°C $\times$ 2hr 與 180°C $\times$ 2hr，反而增加拉伸殘留應力。Debye 環可驗證殘留應力的準確性，故 Cr 靶- $\cos\alpha$  法所得之殘留應力值準確度優於 Cu 靶- $\sin^2\psi$  法，有取代傳統 Cu 靶- $\sin^2\psi$  法的潛力。

關鍵詞：殘留應力、4130 鉻鉬鋼、電子束銲接、 $\cos\alpha$  法

Residual stress of a 4130 steel plate was studied in present research. The steel plate was welded by electron beam welding and heat treated under five conditions. X-ray diffraction (XRD) was selected to measure residual stress with a copper and a chromium X-ray target, in order to compare their precision and accuracy. Effects of different heat treatment on Debye ring, and normal stress were discussed. Due to the heat affected zone and grain coarsening effect, the measurement inaccuracy is about 50% when copper target is used; the fluorescent effect can be avoided when chromium target is selected and the inaccuracy is reduced to 15%. The best heat treatment condition in this study is 450°C for 4 hours, which can reduce stress over 75.12%. Debye ring is suitable to examine the stress accuracy, and the ring calculated by  $\cos\alpha$  method is close to the theoretical model. When copper target is used, the Debye ring is diverged due to the fluorescent effect.

**Keywords : residual stress, SAE4130, EBW,  $\cos\alpha$  method**

### 1、前言

4130 鉻鉬鋼為低強度高合金鋼，因為具有良好的銲接性、抗潛變、廣泛運用在航空業等結構用鋼<sup>(1)</sup>。在經過機械加工、切割、銲接、組裝等程序後會有大量的殘留應力產生，殘留應力容易造成材料之破損、應力釋放時會造成

工件的變形，影響精度及品質，且過大的殘留應力甚至導致材料應力破壞、應力腐蝕破壞、或應力疲勞破壞。在飛彈武器性能要求不斷提升，設計的複雜度及加製造精度相對地要求提升下，殘留應力之量測與消除更加需要。

殘留應力是指材料或工件無外力作用與

束縛下，為達到力平衡而存在於物體內的彈性應力，彈性材料中，當荷重所產生之應力值小於降伏強度 $\sigma_y$ 時，材料屬彈性變形。當荷重所產生之應力值達 $\sigma_y$ 時，材料超過降伏點且在不變載重下保持塑性變形。若將荷重移去，卸載將沿一與加載曲線平行的直線段發生，產生永久的塑性應變 $\epsilon_p$ 。此種存留在結構中產生永久變形的應力即為殘留應力<sup>(2)</sup>。

電子束銲接具有高能量密度、熱量集中、銲道寬度狹小且滲透深特點。適合用於高精密接合零件，且相較於傳統銲接，其銲後殘留應力較少，可採用較低溫的熱處理應力消除<sup>(3)</sup>。

一般文獻大都探討經不同熱處理條件後，對SAE4130機械性質如拉伸、硬度、微觀結構等影響。本研究針對經電子束銲接後，熱處理後，兩大階段的殘留應力值量測，使用專門量測碳鋼類材料的Cr靶XRD，精準的量化殘留應力值，其誤差值降至 $\pm 15\%$ 以內。

## 2、實驗方法

### 2.1 實驗流程

本實驗主要針對 4130 鉻鉬鋼板材，經電子束銲接後，使用 Cr 靶 XRD 量測加工後殘留應力，分別經五種熱處理條件消除應力後。量化其消除效果，找出最佳的消除應力的參數。

### 2.2 實驗試片

本實驗所採用的材料試片為 SAE4130 鉻鉬鋼板材，試片的尺寸大小為 490×380×3mm。試片固溶處理為 870℃ 持溫 1 小時後油冷。再經由回火處理：550℃ 持溫 1.5 小時後水冷。

### 2.3 電子束銲接處理

銲接參數：第一次電流 35mA，走速 600mm/min；修飾電流 20mA，走速 600mm/min。試片尺寸為 45×36×3mm，銲道寬 2mm。共 5 排試片，一排約 5~7 片。依照次序銲接。冷卻

至常溫後，進行殘留應力之量測。如 Fig.1 所示。

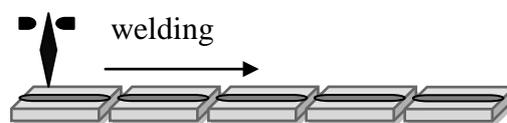


Fig.1 Schematic diagram of electron beam welding

### 2.4 殘留應力的量測

傳統 XRD 量測殘留應力原理是藉由量測受外加應力而變形的晶格間距和 X-ray 與晶格間不同繞射角度的線性關係，進而計算出殘留應力值。Cu 靶 XRD 殘留應力量測採用  $\sin^2\psi$  法如下式(1)：

$$\sigma = \left( \frac{E}{1+\nu} \right) \left( \frac{1}{d_0} \right) \left( \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \Psi} \right) \quad (1)$$

$\epsilon$ : 應變量； $\nu$ : 蒲松比 (0.29)； $E$ : 楊氏係數 (205GPa)； $\sigma$ : 殘留應力； $d_0$ : 無應力(hkl)之平面間距(1.2215 Å)； $d_{\phi\psi}$ : 受應力(hkl)之平面間距； $\Psi$ : 與初始入射 X-ray 之夾角  $\Psi$ 。由上式可知，若  $d_{\phi\psi}$  對  $\sin^2\Psi$  作圖，圖中並經由線性回歸，可得其直線斜率，最後求出試片的殘留應力。

本研究使用最新殘留應力量測技術  $\cos\alpha$  法 (Cr 靶 XRD)，量測位置為銲道正中心位置，實驗階段中共量測三次殘留應力值，分別為未加工、電子束銲接後與熱處理後，觀察各階段對殘留應力值的影響。其中  $\cos\alpha$  法原理<sup>(4)</sup>為在相同 X-ray 照射面積中，360° 蒐集到繞射訊號<sup>(5)</sup>，以形成 Debye 環，如 Fig. 2 所示，

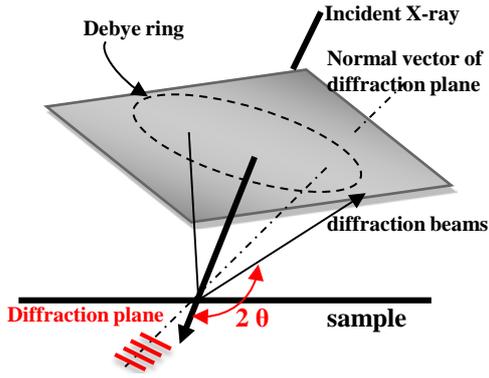


Fig. 2  $\cos\alpha$ -method for X-ray

Fig. 3 為每轉一  $\alpha_1$  角度後算出在該角度晶粒的四種應變量，代入式(2)得到一常數  $a_1$  值(式二)<sup>(6)</sup>

$$a_1 = \frac{1}{2} [(\epsilon_{\alpha 1} - \epsilon_{\pi + \alpha 1}) + (\epsilon_{-\alpha 1} - \epsilon_{\pi - \alpha 1})] \quad (2)$$

$\epsilon_{\alpha 1}$ 、 $\epsilon_{\pi + \alpha 1}$ 、 $\epsilon_{-\alpha 1}$ 、 $\epsilon_{\pi - \alpha 1}$  為在  $\alpha_1$  角度範圍下的應變量，以此類推可得  $a_1 \sim a_{90}$ ，( $a_1$  即旋轉  $\alpha_1 = 1^\circ$ ， $a_{90}$  即旋轉  $\alpha_{90} = 90^\circ$ )。  $a_1 \sim a_{90}$  對  $\cos\alpha_1 \sim \cos\alpha_{90}$  作圖，圖中並經由線性回歸，可得其直線斜率，帶入下式(3)即可得正向殘留應力值  $\sigma$ ：

$$\sigma = - \left[ \frac{E}{1 + \nu} \right] \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left( \frac{\partial a}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (3)$$

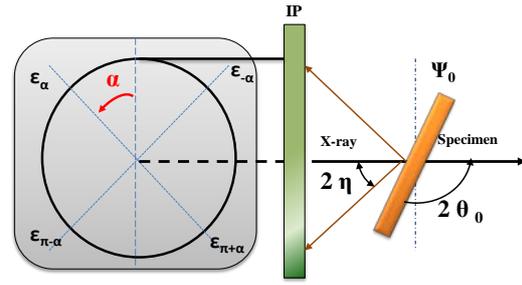


Fig. 3 Principle of  $\cos\alpha$ -method for X-ray stress

### 3、結果與討論

#### 3.1 殘留應力

Table 1 為使用Cu靶  $\sin^2\psi$  法和Cr靶  $\cos\alpha$  法 (XRD) 分別量測基材、銲接後、熱處理後所量測之殘留應力值。Cu靶  $\sin^2\psi$  法銲接前後殘留應力值。因有螢光效應影響，導致殘留應力誤差值為  $\pm 50\%$ 。

使用Cr靶  $\cos\alpha$  法為使用發現基材所測得之殘留應力值範圍介於 30 至 50MPa 之間。試片經過電子束銲接後，所量測道中心的殘留應力值大幅增加，且均為拉伸應力值。且所量測的誤差值在 15% 左右。試片經 450°C 熱處理後，殘留應力值都大幅下降 100~200MPa。

由 Table 1 可知 SAE4130 適合使用Cr靶  $\cos\alpha$  法量測殘留應力，誤差值在 15% 左右，遠低於使用Cu靶  $\sin^2\psi$  法的高誤差值(50%)。

定量Table1中Cr靶 $\cos\alpha$ 法量測殘留應力殘留應力消除後的效果，我們以鬆弛率表示，

Table2 Residual stress of  $\cos\alpha$  method by Cr-XRD

| Method           | Process        | Heat treatment |           |           |           |           |
|------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                  |                | 180°C×2hr      | 300°C×2hr | 450°C×1hr | 450°C×2hr | 450°C×4hr |
| Cu- $\sin^2\psi$ | Original       | 34±20          | 57±30     | 43±26     | 72±37     | 51±27     |
|                  | EB welding     | 354±153        | 251±153   | 351±134   | 424±234   | 224±130   |
|                  | Heat treatment | 224±134        | 324±189   | 234±150   | 200±135   | 99±67     |
| Cu- $\sin^2\psi$ | Original       | 51±12          | 30±2      | 43±9      | 38±17     | 33±13     |
|                  | EB welding     | 110±27         | 251±53    | 256±47    | 369±35    | 414±79    |
|                  | Heat treatment | 113±36         | 272±57    | 103±24    | 159±28    | 103±7     |

公式如下：，其中應力消除百分比公式<sup>(7)</sup>如下：

$$\text{Rel}(\%) = \frac{\sigma_0 - \sigma_{HT}}{\sigma_0} \times 100\%$$

其中 Rel (%) 為鬆弛率 (Relaxation rate)，相當於殘留應力消除百分比，Rel 值越大，表示熱處理消除應力效果越好。 $\sigma_0$  為加工後殘留應力 (MPa)； $\sigma_{HT}$  為熱處理後殘留應力 (MPa)。

Fig. 4 為使用  $\cos\alpha$  法 (Cr 靶 XRD) 量測不同熱處理條件消除應力值與其效果，由長條圖中黃色為電子束銲接後殘留應力值介於 100~400MPa，藍色顯示熱處理後殘留應力值介於 100~280MPa，經熱處理 450°C 應力消除後，殘留應力值大幅下降約 100~300MPa。其中 450°C×1hr 與 450°C×2hr 熱處理效果相近，(Rel 值為 59.77% = 56.91%)。在經 300°C×2hr，熱處理後卻獲得更大的拉伸殘留應力。效果為 -8.367%。經 180°C×2hr 熱處理後，殘留應力小幅增加，其效果為 -2.727%。結論為在五種熱處理條件中，450°C×4hr 殘留應力消除效果最佳(75.12%)，300°C×2hr 殘留應力消除效果最差(-8.367%)。

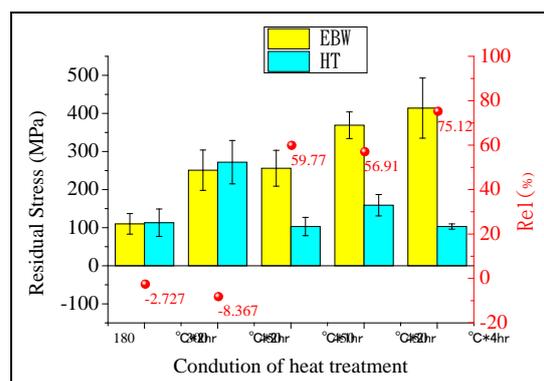


Fig. 4 Effects of different heat treatments on residual

### 3.2 $\sin^2\psi$ 法對鐵基材料高誤差之因素

使用 Cu 靶  $\sin^2\psi$  法量測碳鋼類材料，因為 Cu 的原子序(29)與 Fe(26)相近，使用銅靶產生出的波長與臨界游離能和鐵基材料太相近，產生的繞射強度低，故有螢光效應產生，會遮蔽特性 X-ray 產生之繞射訊號，使殘留應力量測產生極大誤差之現象(標準差為平均值 ±50%)，Fig. 5 為螢光效應造成 Debye 環訊號微弱現象圖示，此圖  $a_1 \sim a_{90}$  取點上困難且會造成軟體誤判。

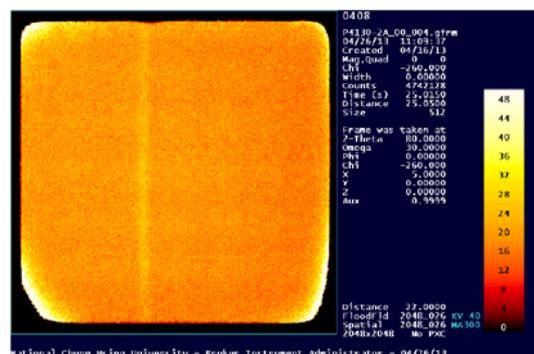


Fig.5 The part of Debye ring of SAE4130 by Cu-XRD

### 3.3 SAE4130 之 Debye 環圖形

Xray 與滿足布拉格定律的晶粒產生干涉現象，而有干涉圓錐出現，將此圓錐投影到平面成一圓環，此環即為 Debye 環<sup>(8)</sup>。Debye 環上每個點即為產生繞射的平面(hkl)，環越完整，X-ray 打到有利方位的晶體越多，殘留應力誤差值越小。受到殘留應力影響的扭曲晶格越多將會使繞射強度變弱。Fig. 6 為銲道上所蒐集到 Debye 環，Fig. 6(a)與(b)條件分別電子束銲接熱處理前與熱處理(條件:450°C×4hr)，Debye 強度以顏色顯示，蒐集繞射電子強度由弱變強(藍綠黃紅)，強度最強紅色表示，蒐集的訊號最弱則以藍色表示，分別以平面和立體方式呈現。熱處理後較多扭曲晶格轉變為較多完美晶格，即殘留應力消除，且晶格結構越完美越符合理論 Debye 環，如圖 Fig. 6(b)所示，結構完美且強度均勻。

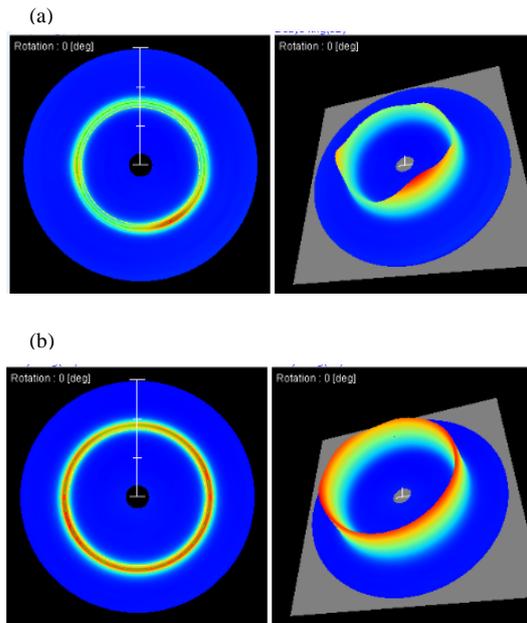


Fig.6 Debye ring in SAE4130 weld (a) before heat treatment; (b) after heat treatment (450°C×4hr).

#### 4、結論

研究主要在探討加工製成前後殘留應力的定量化，以及不同熱處理條件對銲後殘留應力消除的情形，從實驗結果可得到以下幾點結論：

1. 使用銅靶 XRD 量測鐵基材料，發現 Cu 靶的波長與臨界游離能和鐵基材料太相近，產生的繞射強度低，有螢光效應產生。
2. 使用 Cu 靶  $\sin^2\psi$  法量測鐵基材料殘留應力殘留應力值。因有螢光效應的影響，導致殘留應力誤差值為 $\pm 50\%$ ，而使用 Cr 靶  $\cos\alpha$  法誤差值達 15% 左右。
3. EB 銲道中心有拉應力殘留，經熱處理 450°C 應力消除後，殘留應力值都大幅下降。其中 450°C x 1hr 與 450°C x 2hr 效果差不多 ( $59.77\% \approx 56.91\%$ )。
4. 經 180°C x 1hr 之應力消除後，殘留應力值微幅增加 (110MPa $\rightarrow$ 113MPa)，消除效果為 -2.727%。

5. 300°C x 2hr，熱處理後便更大的拉伸應力 (251MPa $\rightarrow$ 272MPa)。效果為 -8.367%。
6. 因為熱處理後，應力消除且均勻，且扭曲晶格變成較完美晶格，所以 Debye 環計算其殘留應力值可發現標準差值較低。

#### 5、參考文獻

- (1) C.C. Huang, Y.C. Pan, and T.H. Chuang, "Effects of Post-Weld Heat Treatments on the Residual Stress and Mechanical Properties of Electron Beam Welded SAE 4130 Steel Plates" *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1997, Volume 6, pp.61-68.
- (2) Mohammad W. Dewan, Jiandong Liang, M.A. Wahab and Ayman M. Okeil, "Effect of post-weld heat treatment and electrolytic plasma processing on tungsten inert gas welded AISI 4140 alloy steel", *Materials and Design*, 2013, pp.6-13
- (3) Jordan T. Maximova, Galya V. Dunchevab, and Ivan N. Mitev D, "Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel," *Journal of Constructional Steel Research*, 12 July 2008
- (4) M.E. Fitzpatrick, A.T. Fry, P. Holdway, F.A. Kandil, J. Shackleton and L. Suominen *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction*, 2nd Ed., National Physical Laboratory, England, pp.14-16, 2005.
- (5) Yuichi SHITABA, Tetsuro ISHIKAWA, Shin-ichi OHYA, and Koichi AKITA" *Development of Stress Analyzer Using Whole Back Reflection*

Ring”, Journal of the Society of  
Materials Science, Vol. 55, No.12, pp.  
1139-1145,

- (6) Koichi Hiratsuka, Toshihiko Sasaki,  
Katsuhiro Seki and Yukio Hirose,  
“Development of measuring system for  
stress by means of image plate for  
laboratory X-ray experiment’,  
International Centre for Diffraction  
Data 2003, Advances in X-ray Analysis,  
Volume 46, pp. 61-67
- (7) 張錠全, 何嘉文, ”材料中殘留應力 X  
射線衍射分析和作用’, 西安交通大  
學出版社, 1999
- (8) Toshihiko SASAKI and Yuichi  
KOBAYASHI, “X-ray multiaxial stress  
analysis using two debye rings”  
JCPDS-International Centre for  
Diffraction Data 2009, pp. 248-255

誌謝

謹此致謝行政院國科會科學委員會對本  
計畫的支持:計畫編號:

101WFA0500271