

實物現場 X-ray 殘留應力量測及其振動應力消除技術

The On-Site X-ray Stress Measurement and Vibratory Stress Relief Technique

陳尚青、許道生、吳威德

Shang-Ching Chen, Tao-Sheng Hsu, Weite Wu

殘留應力雖常見於工業界，但由於產生於無形，工業界並不知其中的重大危害將影響工件變形、精準度失效、降低疲勞強度等危害，所以必須考慮應力消除後不能影響工件的機械性能，本文所要介紹的振動消除應力技術，藉由外加低頻波使材料產生自發性高頻波動，以釋放材料內部的殘留應力，並藉由非破壞應力量測技術，準確地知道殘留應力的數值，確保工件使用上的安全性。此技術已被證明更能有效地降低殘留應力、避免工件變形並提升材料強度等優點。

Although the residual stress is often to appear on the industries, due to the residual stress that is not observed, the industries don't know that the residual stress will affect the deformation, failure of accuracy, and decreasing fatigue strength of the workpieces. So, we must consider that it cannot influence the mechanical properties of the workpieces. Now, we will introduce the vibratory stress relief (V.S.R) technique that spontaneously makes the vibration waves to reduce the residual stress of the inside of the workpieces. And, we use the non-destructive stress measure technique to get the values of the residual stress. In the long term, we will make sure of the safety of using the workpieces. The vibratory stress relief (V.S.R) technique has been proved some advantages, such as to lessen the residual stress effectively, to avoid from the deformations, and increase the strength of the materials.

一、殘留應力的定義

工件在製造過程中，將受到來自各種加工製程等因素的作用與影響，殘留應力是當物體沒有外部因素作用時，在物體內部保持平衡而存在的應力。凡是沒有外部作用，物體內部保持自相平衡的應力，稱為物體的彈性應力。然而材料內部因「儲存應變能」將產生三種等級的殘留應力：第一級為巨觀殘留應力，即一般鑽孔法或 X-ray 所量測到的殘

留應力，此為巨觀彈性應變儲存能將存在於材料內部，例如進行拉伸試驗，應力應變曲線圖下的面積積分所得的彈性應變能儲存所累積的殘留應力。第二級為晶粒與晶粒之間交互作用所造成的儲存應變能。第三級為微觀殘留應力，只能藉背散射電子繞射分析技術 (electron backscatter diffraction, EBSD) 分析計算晶粒內部應變能，此為晶粒內部差排所造成的晶格應變能，通常此應變能為動態回復或動態結晶的驅動力，此晶粒儲存應變能將造微觀的殘留

應力。

常見的材料製程包含鑄造、鍛造、銲接、塑性加工與熱處理等，尤其以銲接所造成的殘留應力最大，因金屬融化後再度凝固冷卻收縮所造成的極大應力為所有製程之冠。其中殘留應力來源可分成四大類，以鋼結構製程為例，如圖 1 所示：

1. 熱應力：材料由於溫度變化所產生的緩和累積收縮之應力，例如正常化、切割、銲接、熱整與鑽孔之鋼結構製程。
2. 相變應力：由沃斯田鐵相經由淬火相變化形成麻田散鐵造成體積急速膨脹之應力，例如鋼板切割、熱整與銲接。

3. 塑性加工應力：幾乎任何材料塑性加工的過程，都會對造成材料內部殘留應力的累積，而殘留應力的累積，對於後續的加工、產品的品質有重大的影響。最典型的例子是加工變形，使得產品的尺寸與原先設計不符合，或者必須消除應力後才能在進行下一步驟的加工，以免應力累積超過降服點造成材料破壞，因此應力消除在精密的工程中必不可少。例如熱滾軋製程、矯直、鑽孔與組裝等造成工件塑性變形所造成的應力。
4. 凝固收縮應力：主要為銲接製程所造成的應力。

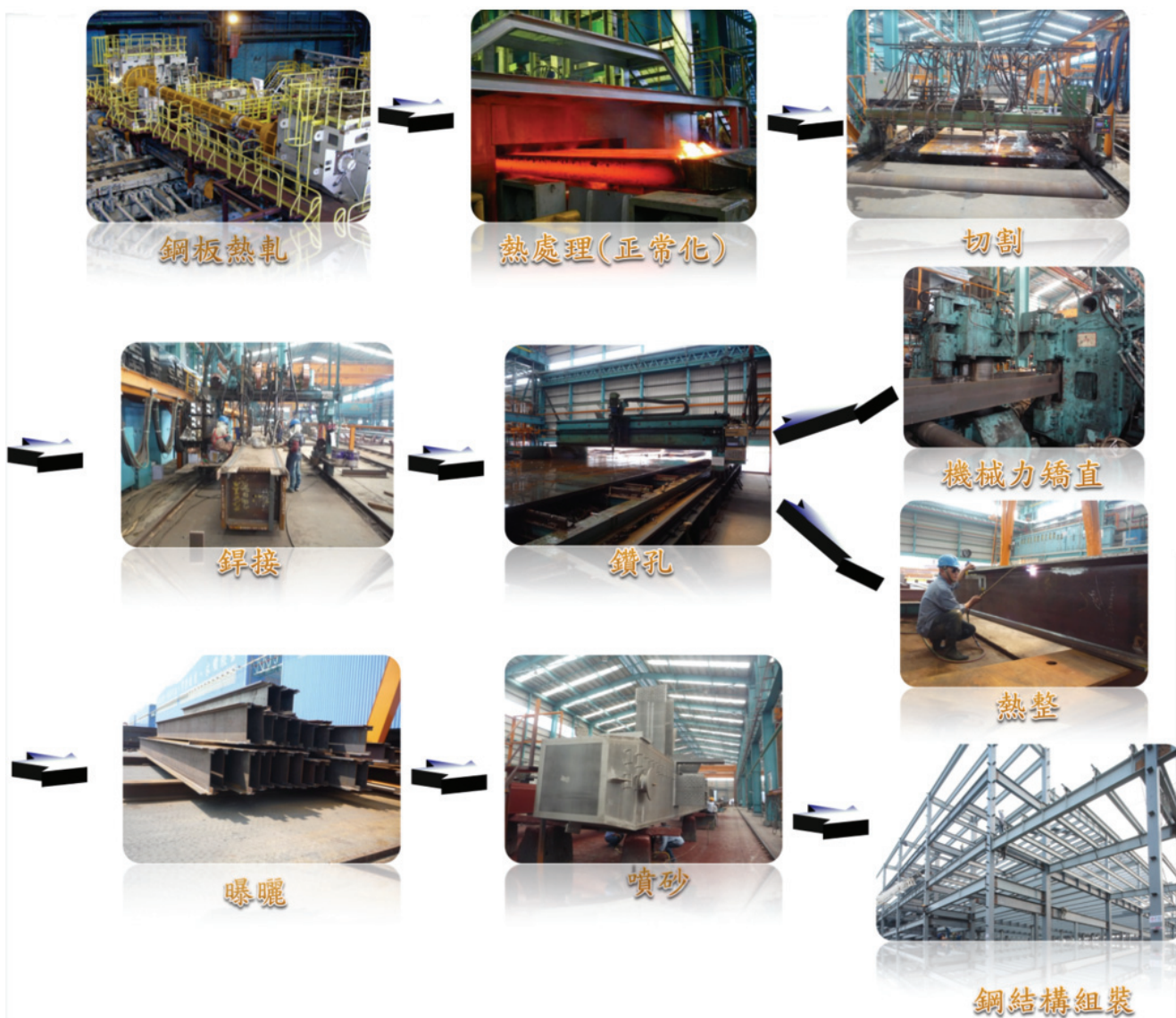


圖 1. 鋼構結構製程導入殘留應力。

二、X-ray 殘留應力量測技術

1 X-ray 法之殘留應力量測原理

當利用 X-ray 繞射測量殘留應力原理是根據材料在未受力時的晶格面間距和受力後的晶格面間距之差異作為殘留應力的量測依據。當材料中無殘留應力時，晶格面間距為一定值，若材料受到拉伸應力，應力施加方向的晶格面間距會增加，反之，材料受到壓縮應力，應力施加方向的晶格面間距會減少，此兩現象均會造成繞射峰位置往其他角度偏移。所以從繞射峰的偏移量或 d 值的變化量可推測材料所受之應力。另外，所以根據材料在未受力時的晶格面間距與受力後的晶格面間距的差異作為殘留應力的量測方式。原理如圖 2 所示，當材料中無殘留應力時，晶格面間距為一定值。若試片表面受到拉伸應力時，應力作用方向的晶格面間距會增加，反之，平行於表面方向之晶面間距會較無應力時窄些，當試片傾斜後，繞射雖然發生在同一種晶面上，但卻來自於不同的晶粒，若此時晶面較垂直於應力，則這些晶面間距會較寬。結果造成繞射峰位置往低角度位移。從 d 值隨試片測試傾斜角的變化關係，再帶入理論公式，可推算試片所受之應力。

2. 非破壞殘留應力量測 Cr 靶 X-ray

儀器的功能有別於傳統的 $\sin^2\psi$ 法，屬於德拜-謝樂環試片表面不用經過電解拋光處理也能夠精確量測，全程無外加雜項因素影響下才是最真實

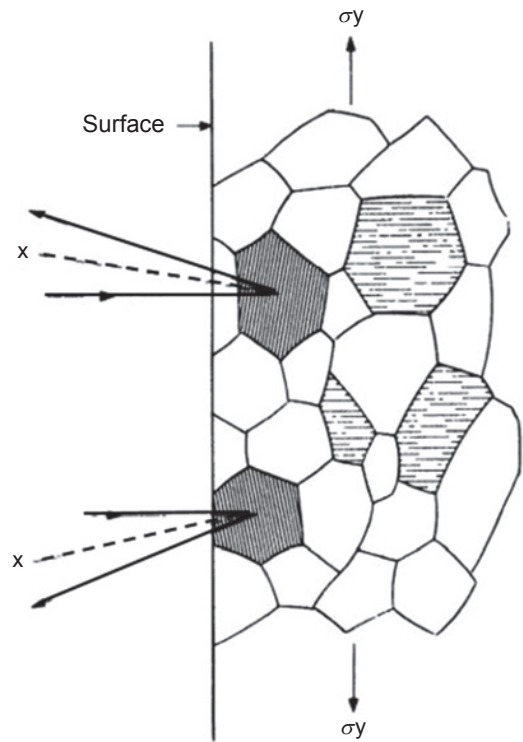


圖 2. 晶粒間距與繞射角度關係。

的應力分布狀態，本實驗室使用 $\cos\alpha$ 法—殘留應力量測技術 (Cr 靶 X-ray)，使用儀器為 μ -X360™，由 Pulstec Industrial Co., Ltd 公司所開發，其中 X-ray 管電壓 30 kV，電流 1 mA。量測位置為整體試片的 stress mapping 分析。

Cr 靶 X-ray 之區塊圖如圖 3。共分三大主體，遮蔽箱材料為聚氯乙稀，厚度達 5 mm，主要遮蔽 X-ray 已達安全標準，遮蔽箱外之偵測出 X 光量為

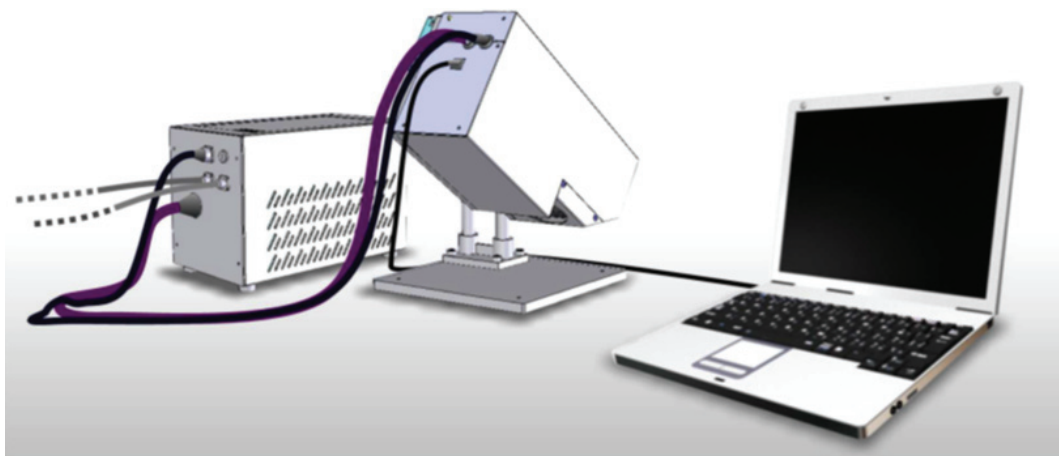


圖 3. Cr 靶 X-ray 儀器設置圖。

1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下 (自然放射線等級，對人體不致造成危害)。前門裝有安全開關，在門開著的狀態下是機台無法啟動。遮蔽箱中設置有 X-ray 測量儀器，另外再將偵測器蒐集到之德拜-謝樂環訊號外輸送到電腦，做訊號分析。電腦中輸入各合金的各項參數，殘留應力檢測時被測物之測試，會一邊確認偵測器內附之 CCD Camera 影像，一邊將測試物調整至標記 LED 的亮燈位置。不同材料有各自不同最佳工作距離，將各材料之工作距離調製適當位置，標記 LED 及螢幕用照明，利用內建 LED 變更亮度，故可容易確認影像來調整光量。CCD Camera 所拍攝影像，會儲存顯示在檢測數據中。檢測結束後，要輸出檢測數據值時，拍攝影像也能夠再現，很容易就能掌握測試物之情況，另外由圖 4 知儀器 X-ray 入射方向平行於 σ_x 軸方向；橫向垂直加工方向平行於 σ_y 軸方向，且採用 0-360 度德拜-謝樂環上所有繞射峰訊號之平均值，更具有代表性與精準性，因一次性量測出完整德拜-謝樂環上訊號，故評估時間更加快速，具有不錯的研究性潛力。

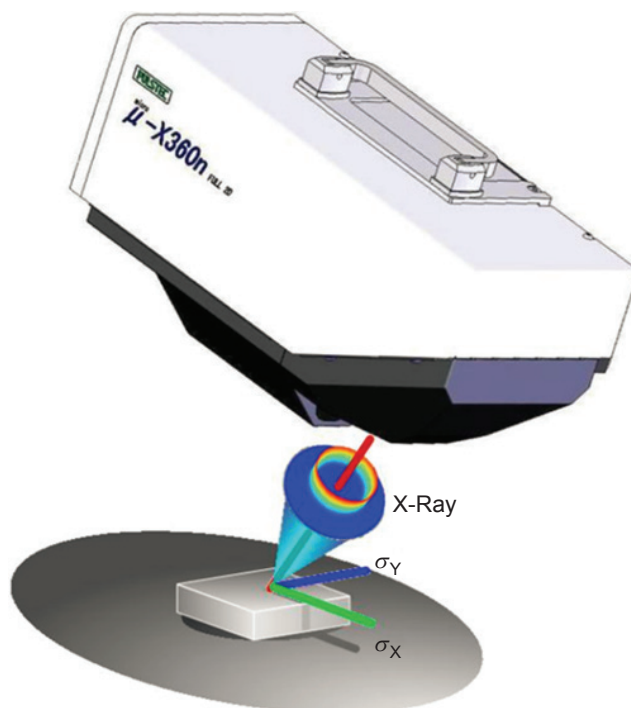


圖 4. 試片量測應力過程示意圖。

3. 殘留應力 $\cos\alpha$ 法計算方法

$\text{Cos}\alpha$ 法原理為在相同 X-ray 照射面積中， 360° 地蒐集繞射訊號以形成德拜-謝樂環，滿足布

拉格定律的晶面產生繞射，便有繞射圓錐出現，將此圓錐投影到平面即為德拜-謝樂環 (Debye-Scherrer ring)，如圖 5 所示。環上每個點即為產生繞射的平面 (hkl)，且環越完整代表 X-ray 繞射至到

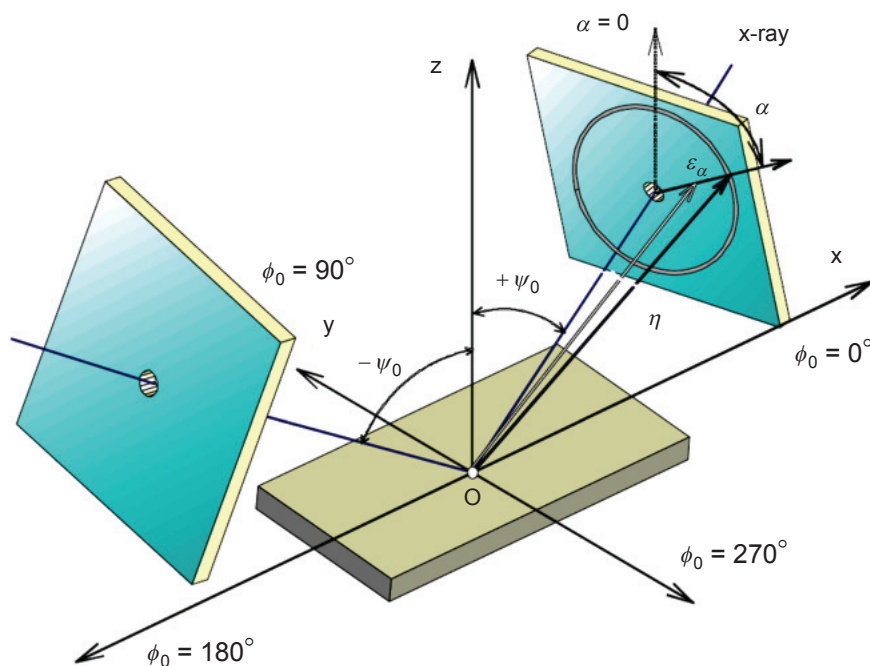


圖 5. 德拜-謝樂環示意圖。

不同方向的晶粒越多，殘留應力誤差值越小。不同半徑的環即為某一晶粒方向上之 (hkl) 面，不同晶面呈現不同半徑之德拜-謝樂環，且訊號越強則代表該方向的晶粒數越多，另外可藉此判斷試片之結構等特性。受到殘留應力影響的扭曲晶格越多將會使繞射強度變弱。當採用合適的 X-ray 波長，眾多結晶方向不同的晶粒中，能滿足布拉格定律產生繞射的 (hkl) 面不只一個，因此如圖 6，一般因 (hkl) 面不同，可出現好幾個不同的德拜-謝樂環之繞射圓錐。

圖 7 為每轉一 α 角度後算出在該角度晶粒的四種應變量，代入下式 (1) 得到一常數 ε_m 值：

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

ε_α 、 $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $\varepsilon_{-\alpha}$ 、 $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ 為在 α 角度範圍下的應變量，以此類推可得 $\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{m90}$ ，(即 ε_{m1} 旋轉 1° ， ε_{m90} 即旋轉 90°)。對 $\cos 1^\circ - \cos 90^\circ$ 作圖，圖中並經由線性回歸，可得其直線斜率，即 $\frac{\delta \varepsilon_m}{\delta \cos \alpha}$ ，

μ 、 ω 與 α 三者角度位置如圖 7，E 為材料彈性係數，而 ν 為材料浦松比，將所有參數帶入下式 (2) 即可得正向殘留應力值 σ_x ，此方向應力值方向與儀器設備 X-ray 入射同方向：

$$\sigma_x = - \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \frac{1}{\sin 2\mu} \frac{1}{\sin 2\omega} \left(\frac{\partial \varepsilon_m}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (2)$$

4. 實物現場 X-ray 殘留應力量測優勢

顛覆舊有對殘留應力的認知，以前普遍認為殘留應力是無形的、無法量測並把數值量化，傳統的量測應力法盲孔法是利用破壞性的方法，將所要量測的工件鑽孔，進而計算材料所釋放出來的能量去推算，這樣不僅破壞工件本身且量測到的應力值只是相對地釋放量，而目前最新的非破壞 X-ray 量測殘留應力設備，不在需要破壞所要量測的工件，可以更直接、更快速的去量測並量化工件的殘留應力值及半高寬，能在工件不被破壞的情況下，得知目前工件的殘留應力狀態及疲勞階段。目前已經有實際幫一些客戶做相關的應力量測服務，準確且快

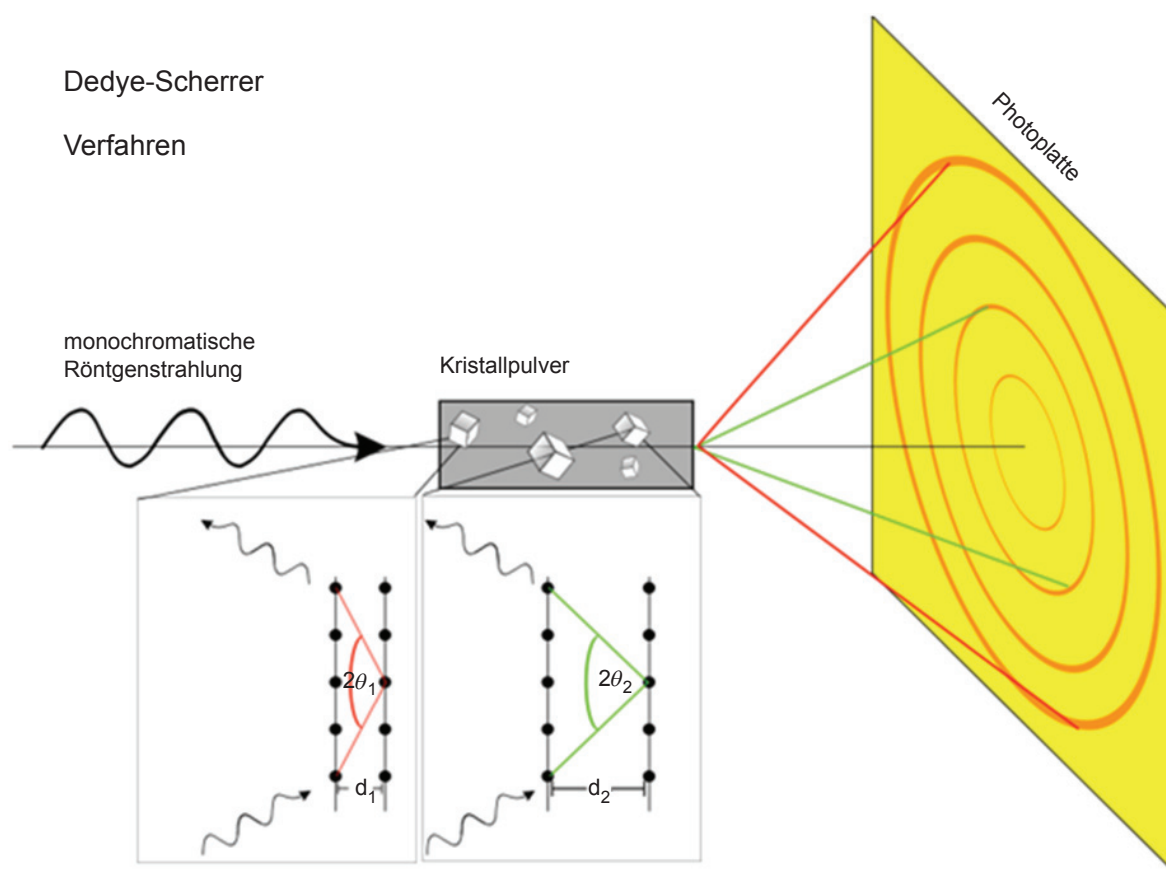


圖 6. 不同晶面呈現不同半徑之德拜-謝樂環。

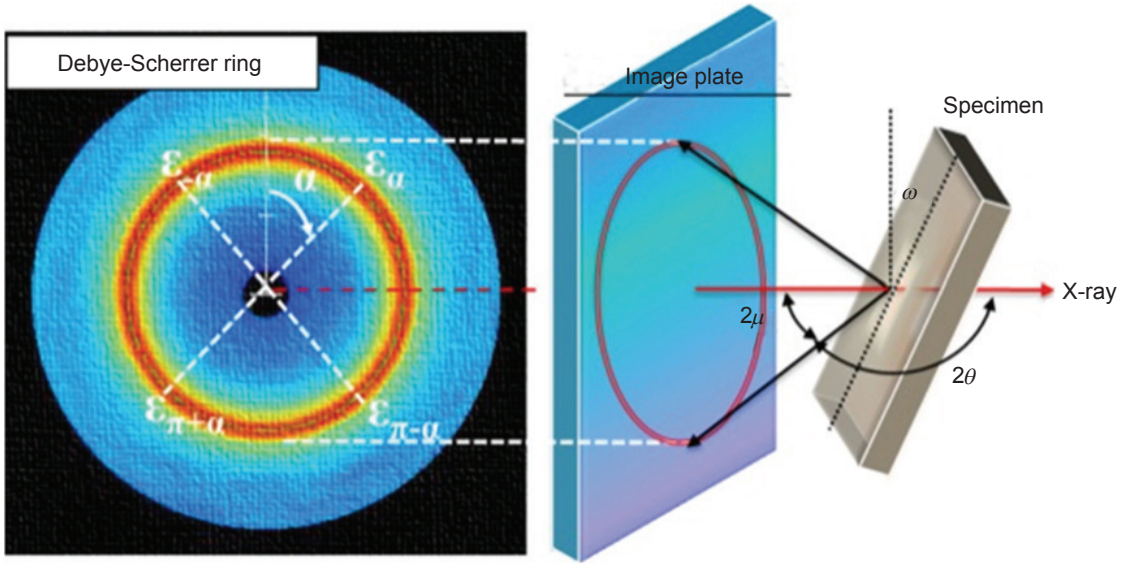


圖 7. 德拜-謝樂環 (Debye-Scherrer ring) 示意圖。

速的量測出工件的應力狀態，讓他們能立即了解工件經過加工後，工件所殘留的應力值。

三、振動消除殘留應力

振動消除殘留應力的原理為利用剪切應力推動差排使其能夠移動，如圖 8 所示，而扭曲的晶格經由差排的移動移回至正常晶格的狀態，進而達到消除殘留應力的效果。而最能產生交變剪切應力的方式即為波動。波長越短、振幅越大，則剪切應力越大、能量密度越高，效果越好。

1. 振動鬆弛殘留應力原理

在 VSR 的參數中，以波形最為關鍵。以振動學角度來看，考慮一剛體材料如圖 9，各方向受力的情況，考慮此為單自由度無阻尼簡諧激振系

統， $-y$ 方向為重力 mg 、簡諧振動力 $f(t)$ 與彈簧壓縮應力 kx ， $+y$ 方向為正向力 N 與彈簧壓縮應力 kx ，假設一剛體材料可假設成多條彈簧並聯，應力應變曲線也遵循虎克定律，且彈簧並聯只是將 k 值相加，就成為剛體材料的彈性模數，而應力應變與虎克定律的關係為 $F = kx = \sigma A = \epsilon EA = \epsilon ELW = (EW)(\epsilon L) = kx$ ，故 k 值為材料彈性模數與寬度的乘積。整體系統方向為 $-y$ 方向加速度為 x'' ，故可整理成下列為微分方程式：

$$\begin{aligned}
 mx'' &= f(t) + kx + mg - kx - N \quad (N = mg + kx) \\
 mx'' + kx &= f(t) = F_0 \cos \omega t \\
 x'' + \omega_n^2 x &= (F_0/m) \cos \omega t \\
 \omega_n &\text{ 為剛體材料的自然振動頻率} \\
 mx'' + kx &= f(t) = F_0 \cos \omega t = 0 \\
 &\text{此為假設外力簡諧振動之力為 } 0
 \end{aligned}$$

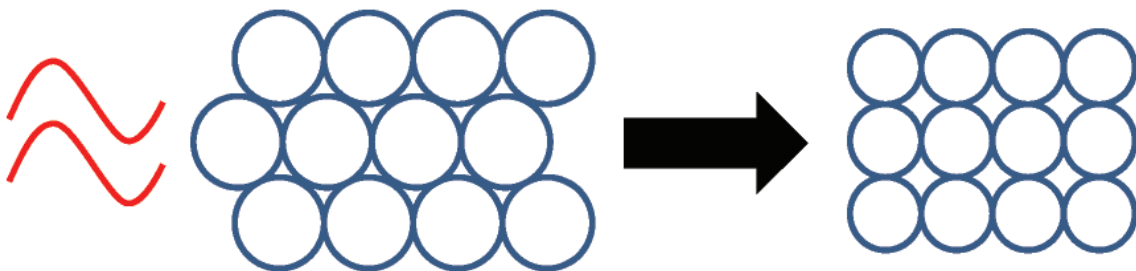


圖 8. 剪切應力推動差排移動之示意圖。

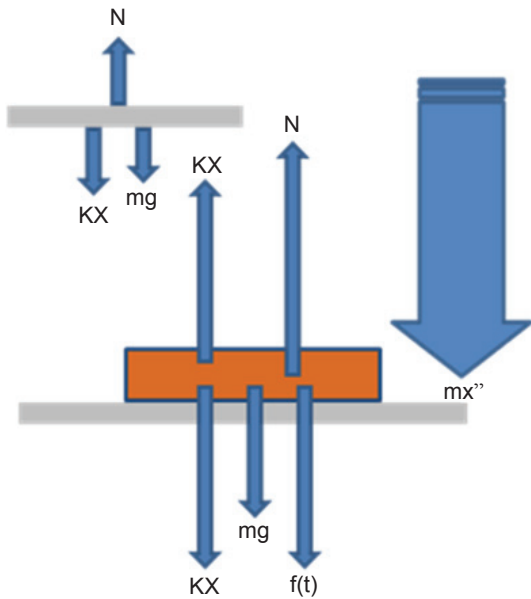
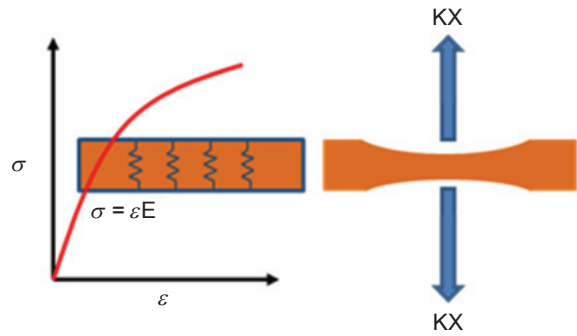


圖 9. 剛體材料受振動之力學分析。



齊性解 $x_H(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t$
 假設特解 $x_p(t) = A_0 \cos \omega t$ 帶回原方程式
 $x(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t + F_0/m(\omega_n^2 - \omega^2) \cos \omega t$
 若初始條件為 $x(0) = x_0, \dot{x}(0) = v_0$
 $A_1 = x_0 - F_0/m(\omega_n^2 - \omega^2)$
 $A_2 = v_0/\omega_n$
 $x(t) = \{x_0 - F_0/m(\omega_n^2 - \omega^2)\} \cos \omega_n t + (v_0/\omega_n) \sin \omega_n t + F_0/m(\omega_n^2 - \omega^2) \cos \omega t$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{A_2}{A_1}$$

$x_H(t)$: 齊性解，為剛體材料自由振動所造成的位移方程式

$x_p(t)$: 特解，為簡諧振動力所造成的位移方程式

此方程式波形畫出如圖10，當 $\omega > \omega_n$ ，較大的波為簡諧振動力所造成的位移方程式，顯示此情況為簡諧振動力主導；當 $\omega < \omega_n$ ，較大的波為剛體材料自由振動所造成的位移方程式，顯示此情況為剛體材料自由振動主導，而材料內部殘留應力消除的情況屬於此類，在低頻的情況下，剛體材料的自然振動頻率將產生振幅大小的主導性。

(1) 假設 $\omega_n \neq \omega$ (剛體材料的自然頻率 \neq 外力的振動頻率)

則微分方程式的解可整理成

$$x(t) = A \cos(\omega t - \theta) + \{F_0/m(\omega_n^2 - \omega^2)\} \cos \omega t$$

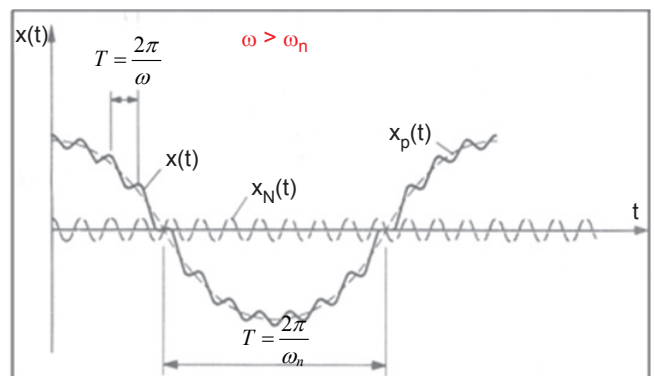
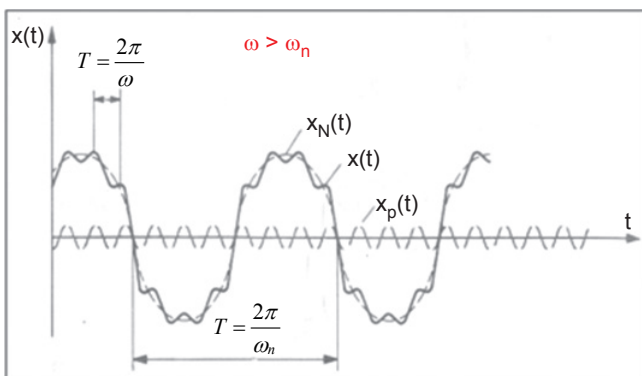


圖 10. 振動學理論 $\omega_n \neq \omega$ 波形圖。

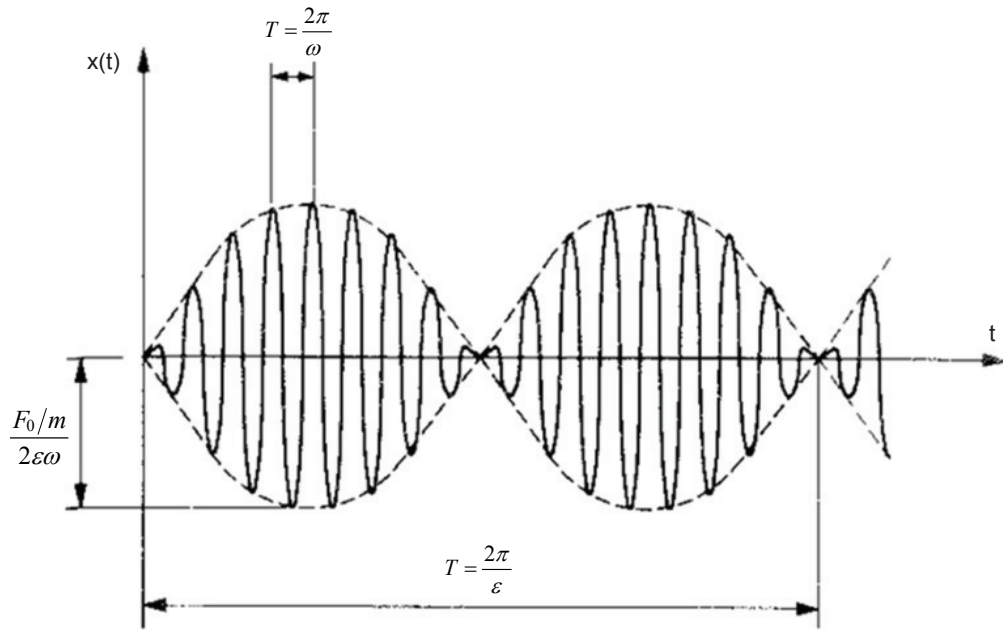


圖 11. 振動學理論高頻波形圖。

本研究已經初步驗證振動學上的波形圖會產生共振、次共振以及高頻波三類，這三類波形均屬於 $\omega < \omega_n$ 的情況，而高頻波的殘留應力消除效果最佳，因大波與小波互為消長的關係，以 ω_n 分界， $\omega < \omega_n$ 時，大波為剛體材料自由振動所造成，隨著 ω 逐漸加大，大波振幅逐漸變小，當 $\omega \approx \omega_n$ 時，如圖 11，則兩波振幅將會相同，形成高頻波，實驗上亦找出高頻波形如圖 12， ω 若再繼續加大，則大波轉變成簡諧振動力所造成。本研究先前研究的殘留應力消除數據如表一，高頻波最優異的波形，殘留應力消除效果最佳，達到 38.8%。我們可知這種高頻波的齊性解，為次波的方程式，可解釋為金屬材料自由振動所造成的位移方程式，此為在材料內部自發性拉伸與壓縮交變的現象。

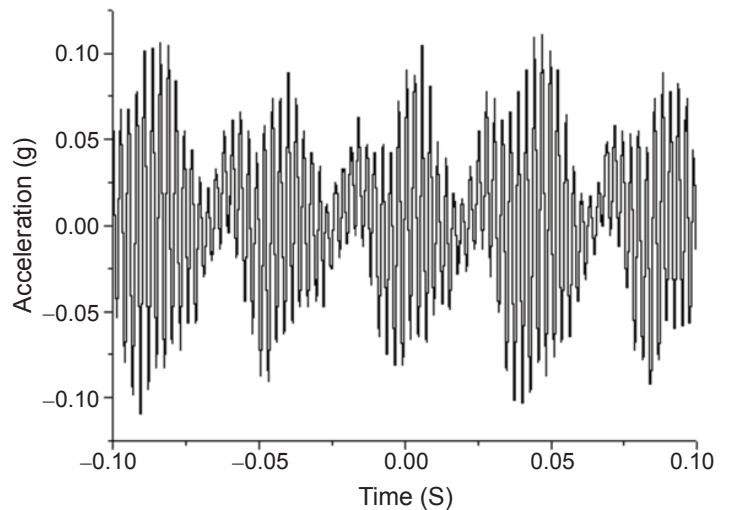


圖 12. 實驗上高頻波形圖。

表 1. 共振頻、次共振頻與高頻波殘留應力消除比例%

Frequency\stress	P0	P1	P2	P3	P4	Reduction Percentage*1	Improvement
resonant	25.8	327.4	226.9	234.1	222.0	28.5%	0%
Sub-resonant	30.0	350.9	215.4	230.6	270.9	34.2%	20%
wavelet	29.6	343.2	185.7	209.9	190.8	38.8%	36.1%

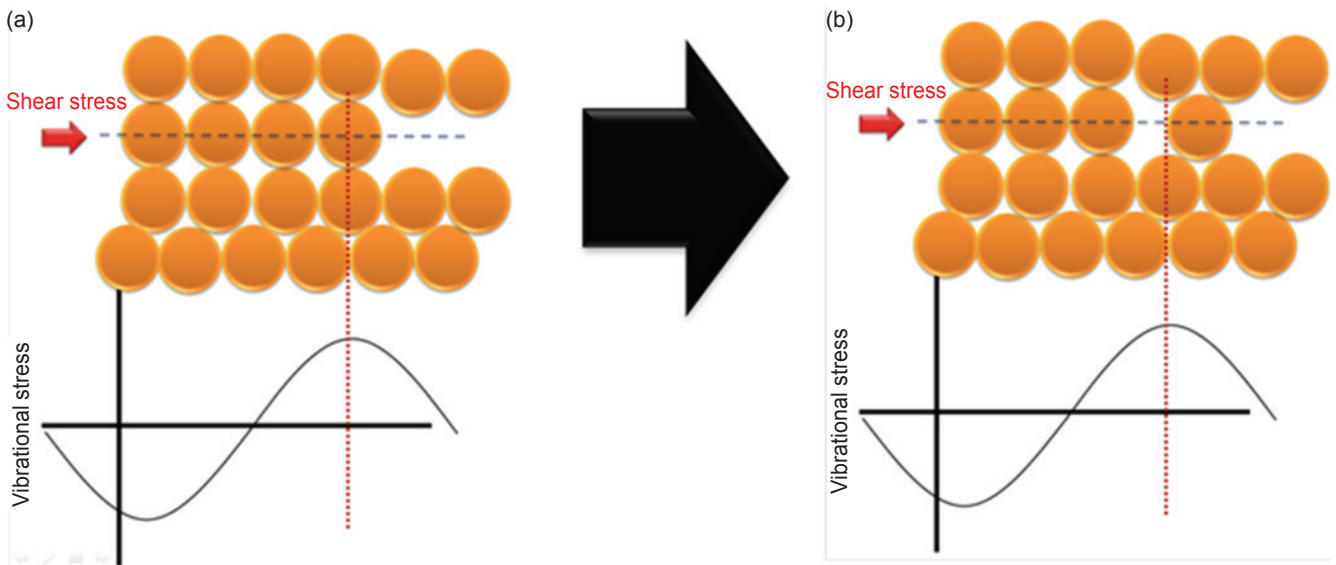


圖 13. 振動消除殘留應力機構原子觀點 (a) 波長較長，頻率較低的波形，波長較長頻率較短只能推動 1 顆原子 (b) 波長較短，頻率較高的波形，波長較長頻率較短一次推動 3 顆原子。

本文介紹是以振動學為基礎理論，考慮最原始波的本質“波形”作參數，由振動應力消除殘留應力機構的波形觀點來看，示波器量測出來的三種波形（共振波、次共振、高頻波），經過快速傅立葉轉換 (FFT)，將可分解成主波（頻率較低）與次波（頻率較高），主波所代表的物理意義為外力（馬達）所造成的振動波，而次波所代表的物理意義為材料自發性所產生的波動，即為高頻波的齊性解的波形之振幅值，即利用低頻振動激發出次波的最大振幅。可得三種波形中高頻波之次波的頻率最高 (1666 Hz) 且振幅最大 (1.12 G)，根將可大略得知選取高頻波為具有最佳消除殘留應力效果。

2. 高頻波振動技術

高頻波主要為一主波以及一高頻波組合而成，此兩波來源均由振動馬達提供。將共振、次共振、高頻波三種頻率之高頻波比較之，發現在高頻波時，其振幅值為最高；次共振之高頻波次之；共振頻之高頻波之振幅值為最低。因此，運用高頻波對殘留應力之消除效果最佳，歸因於高頻波之振幅達到最高。

本研究以高頻波 (wavelet) 為效果最佳狀態之波形，此為金屬材料自由振動所造成的位移最大值，材料內部自發性拉伸與壓縮交變的現象達到最

大，如此就可使金屬材料能夠達到最大應力消除效果，且能夠採用較小尺寸工件進行實驗，增加很大的便利性。

由圖 13 可知，振幅越大時，才能產生較大的剪應力，剪應力在越大情況下，原子（高應變能）才能降回原子平衡狀態（低應變能），殘留應力消除效果越佳。另外頻率越高時，波長越短，最大振幅的點數量越多，推動原子（高應變態）的機率增大，殘留應力消除效果越佳。並且此種波動是一種“拉伸—壓縮”的循環應力製程，如圖 14 所示，如同低應力的循環拉伸—壓縮試驗，將會不斷鬆弛材料內部的殘留應力，最後達到應力釋放的效果！所以一般市面上之共振頻的振動系統產生材料“跳動”較大，而波動較少，跳動會有敲擊到地面的風險，且只是純粹的剛體位能的上下移動，能量無法被工件吸收，故殘留應力釋放效果較差。反之，高頻波所產生的頻率能夠產生的材料內部“波動”成分較大，跳動較少，殘留應力釋放效果較佳。

3. 與傳統熱處理消除應力之比較

熱處理與振動法皆能達到消除殘留應力的目的，目前產業界（鋼鐵業、工具機、模具、鑄造業、航太業等）使用大部分製程皆運用高成本的熱處理來進行殘留應力的消除，不僅成本高（耗費電

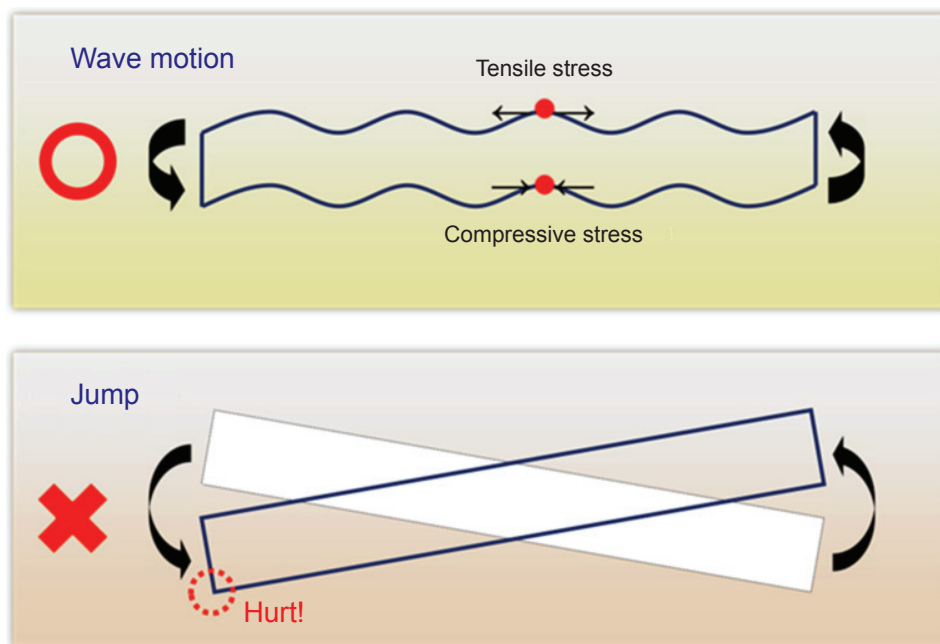


圖 14. 工件之波動與跳動的差異性。

力、時間成本、設備所需空間、材料變形、機械性質下降等) 且因熱處理需加熱至高溫導致二氧化碳排放量遽增將對環境造成莫大的危害。而對於較大型的工件，熱處理所能加工的工件有尺寸上的限制，導致材料無法順利的進行殘留應力的消除。為實現永續經營的理念，因此本研究開發出利用高頻波來進行消除殘留應力的技術，且開發出來的設備除了不再受到工件尺寸的限制，設備本身所佔有的空間量也不大，且最重要的是此設備是為可攜帶式，組裝容易操作簡單，故以振動消除殘留應力將成為未來應力消除的主流。

四、結論

殘留應力無時無刻地在金屬加工時出現，如：建築機械、交通工具…等。既然無法避免，如何減少並降低所產生之應力造成損失是目前產業必須考慮的層面。振動鬆弛是一種可以有效地降低殘留應力之技術，且所花費的成本相對少於其它種類的消除殘留應力之製程，同時利用最新的非破壞 x-ray 檢測儀器機動性大且不受限制，近年來，隨著環保意識的抬頭，利用純機械能來進行消除殘留應力的相關技術也越來越備受重視，利用振盪的力量與殘

比較項目	熱處理	振動法
成本	昂貴	便宜
操作	複雜	簡易
變形	有	無
氧化	需克服	不產生
機械性質	變軟	不改變
工地現場	受限制	不影響
工件尺寸	受限制	不影響
設備儀器	不可移動	可攜式

表 2.
熱處理與振動法之比較。

留應力相疊加使材料的內應力超過降服點而造成材料微小的塑性變形 (micro strain)，藉著反覆振盪使晶粒滑移而降低材料內部的應變能。

雖然 VSR 是能明確的消除殘留應力，但遺憾的是這項技術實在是太新穎，缺乏證據去證實他的機制為何，話雖如此，以目前的產業界以及時事新聞來看，工具使用的耐久度、房子經地震倒塌等等的，若是經由消除殘留應力的製程，說不定就可以降低這些社會事件的產生，而這無汙染、低成本、設備攜帶方便等多項特點，以振動法消除殘留應力在未來必定會是工業上不可或缺的一份子。

參考文獻

1. P.J. Withers and H.K.D.H. Bhadeshia, *Materials Science and Technology*, **17**, 355 (2001). Dumovic, *Welding Innovation*, **20**, 1 (2003).
2. M.E. Hilley, J.A. Larson, C.F. Jatzcak and R.E. Richlefs, *SAE Information Report*, 19 (1971).
3. T. Sasaki and Y. Hirose, *Journal of the Society of Materials Science Japan*, **44**, 1138 (1995).
4. 陳宏志, 銲接結構強度學, 復文書局, 民國 84 年.
5. B.D. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction*, 1st Ed., Addison Wesley, London, 435(1956). D. J. Kotecki and J.S. Ogborn, *Welding Journal*, **74**, 269 (1995).
6. K. Hiratsuka, T. Sasaki, K. Seki, and Y. Hirose, *Advances in X-ray Analysis*, **46**, 61(2003).
7. 張錠全, 何嘉文, 材料中殘留應力 X 射線衍射分析和作用, 中國陝西, 西安交通大學出版社, 西元 1991 年。
8. 王家祥, 振動對 FCC、BCC 與 HCP 金屬材料的影響 The Effects of Vibration on FCC, BCC and HCP Metals, 國立中興大學材料科學與工程研究所博士論文, 民國 104 年.
9. 賴建宏, AISI 304 不銹鋼在不同頻率下震動銲接之研究, 01 年.
10. 王鵬舜, 偏心與磁性振動元件對 AISI 304 不銹鋼同步震動銲接之影響, 國立中興大學材料科學與工程研究所碩士論文, 民國 99 年.



陳尚青先生為國立中興大學材料科學與工程學系碩士班學生。

Shang-Ching Chen is currently a master student in the Department of Materials Science and Engineering, National

Chung Hsing University.



許道生先生為國立中興大學材料科學與工程學系碩士班學生。

Tao-Sheng Hsu is currently a master student in the Department of Materials Science and Engineering, National

Chung Hsing University.



吳威德先生為美國伊利諾大學材料博士，目前為國立中興大學材料科學與工程學系榮譽特聘教授。

Weite Wu received his Ph.D. in Materials Science from the University

of Illinois at Chicago. He currently is a distinguished professor in the Department of Materials Science and Engineering, National Chung Hsing University.