

出國報告（出國類別：考察）

## 氣渦輪機葉片鑄造及殘留 應力量測技術之研究

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李日輝 機械研究專員

派赴國家：芬蘭、義大利

出國日期：100年10月09日至10月22日

報告日期：100年12月21日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：氣渦輪機葉片鑄造及殘留應力量測技術之研究		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
李日輝	機械研究專員	台灣電力公司綜合研究所
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他_____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：100年10月09日至100年10月22日		報告繳交日期：100年12月21日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 4.內容充實完備. <input checked="" type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9..本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input checked="" type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他_____ <input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式:	

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報告人		審核人		單位主管		主管處主管		總經理 副總經理
-----	---	-----	---	------	---	-------	--	-------------

QP-08-00 F06

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：氣渦輪機葉片鑄造及殘留應力量測技術之研究

頁數 49 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李日輝/台灣電力公司/綜合研究所/機械研究專員/(02) 8078-2217

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：100 年 10 月 09 日至 10 月 22 日 出國地區：芬蘭、義大利

報告日期：100 年 12 月 21 日

分類號/目

關鍵詞：氣渦輪機，精密鑄造，熱段組件，動葉片，靜葉片，殘留應力

內容摘要：(二百至三百字)

本公司有超過 60 部之氣渦輪機組，其熱段組件在高達 1200°C 的溫度下運轉，按原廠建議有些組件在運轉 5 萬小時甚至更短的時數下須更新，少部分可達 10 萬小時進行更新工作，因此公司以往需花費數十億的維護費用向原廠購置熱段組件備品。

為建立自有維修技術，本所陸續完成葉片及熱傳導件再生技術開發，近年也著手部分空壓段葉片自製工作，為擴大自製範圍至氣機段動、靜葉片，減少公司購置熱段組件備品之龐大支出，有必要藉由研習以吸收國外之精密鑄造技術及經驗。另外，藉由研習國外之 X 光繞射分析殘留應力量測技術，可以建立非破壞分析組件殘留應力量測的能力，輔助再生及新製製程，並應用於機組壽命評估工作。

本研習參訪芬蘭 Stresstech 公司，了解殘留應力量測技術之發展，評估汽機轉子高溫段以 X 光繞射分析法測殘留應力之可行性，以期輔助汽機組件壽命評估及轉子校直工作，經評估以 X 光繞射分析法輔助汽機壽命評估及轉子校直工作非常可行；參訪義大利 Microfusione Stellite 公司，了解其在氣渦輪機組件精密鑄造之技術及經驗，以提昇本公司之葉片精密鑄造及製造技術，經評估 Microfusione Stellite 公司合作之技術及經驗豐富，合作是可行的。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

# 目 錄

出國報告審核表 .....	I
出國報告書提要 .....	II
目 錄 .....	III
表 目 錄 .....	IV
圖 目 錄 .....	IV
一、出國緣由、行程及主要任務.....	1
1、1 出國緣由.....	1
1、2 出國行程及主要任務.....	2
二、Stresstech 公司研習內容.....	3
2、1 盲孔法測殘留應力.....	3
2、2 X 光繞射分析法測殘留應力.....	7
2、2、1 相關理論.....	7
2、2、2 量測實務.....	11
2、3 Stresstech 公司其他技術.....	21
三、Microfusione Stellite 公司研習.....	27
3、1 精密鑄造流程介紹.....	27
3、1、1 製作臘模.....	28
3、1、2 製作陶瓷殼模.....	32
3、1、3 工件澆鑄.....	34
3、1、3 後續處理及檢測.....	36
3、2 Micrifusione Stellite 公司業務狀況.....	39

3、3 本公司氣渦輪機氣機段葉片精密鑄造討論·····	41
四、心得及建議·····	46
五、參考文獻·····	47

## 表 目 錄

表 1 肥粒鐵及沃斯田鐵繞射晶格面及繞射角·····	25
表 2 各種鑄造用葉片材料所適合之鑄造凝固程序·····	42

## 圖 目 錄

圖 1 盲孔法測殘留應力裝置照片·····	5
圖 2 雷射光顯像技術輔助盲孔法測殘留應力·····	6
圖 3 X 光的材料繞射光譜及繞射光與晶格距離之關係圖·····	9
圖 4 常見的材料內部原子排列方式及晶格面的表示方法·····	10
圖 5 材料內部晶粒組織與表面及 X 光入射角出射角關係圖·····	10
圖 6 Stresstech 公司之 Xtress Robot 設備簡圖·····	12
圖 7 X 光測頭及偵測器傾斜模式·····	13
圖 8 X 光測頭及偵測器偏擺方向與所量測應力方向·····	16

圖 9 多點或連續量測殘留應力之圖例 .....	17
圖 10 以三點彎曲試片驗證 Modified $\phi$ 法之照片 .....	20
圖 11 高/中壓轉子簡圖及照片 .....	21
圖 12 高/中壓轉子高溫區複製模照片 .....	22
圖 13 雙機械手臂執行大型工件殘留應力量測工作照片 .....	23
圖 14 量測殘留沃斯田鐵測頭、滑軌及偵測器安置情形 .....	25
圖 15 Stresstech 公司 Barkhausen 雜訊偵測情形 .....	26
圖 16 脫蠟精密鑄造流程 .....	29
圖 17 Microfusione Stellite 公司組立蠟樹的情形 .....	30
圖 18 Microfusione Stellite 公司葉片與砂心照片 .....	31
圖 19 Microfusione Stellite 公司沾漿及淋砂情形 .....	33
圖 20 Microfusione Stellite 公司澆鑄情形 .....	35
圖 21 Microfusione Stellite 公司鑄件澆鑄後續工作 .....	37
圖 22 Micrifusione Stellite 公司精密鑄造產品 .....	39
圖 23 西門子公司 V84.2 葉片照片 .....	43
圖 24 三菱公司 M501F 葉片照片 .....	44
圖 25 多晶、方向性凝固及單晶之凝固過程 .....	45

# 一、出國緣由、行程及主要任務

## 1、1 出國緣由

公司有超過60部之氣渦輪機組，其熱段組件在高達1200°C的溫度下運轉，按原廠建議有些組件在運轉5萬小時甚至更短的時數下須更新，少部分可達10萬小時進行更新工作，因此公司以往需花費數十億的維護費用向原廠購置熱段組件備品。

為建立自有維修技術，本所陸續完成葉片及熱傳導件再生技術開發，近年也著手部分空壓段葉片自製工作，為擴大自製範圍至氣機段動、靜葉片，減少公司購置熱段組件備品之龐大支出，有必要藉由研習以吸收國外之精密鑄造技術及經驗。另外，藉由研習國外之X光繞射分析殘留應力量測技術，可以建立非破壞分析組件殘留應力量測的能力，輔助再生及新製製程，並應用於機組壽命評估工作。

本研習參訪芬蘭 Stresstech 公司，了解殘留應力量測技術之發展，並吸收其技術及經驗、評估汽機轉子高溫段以X光繞射分析法測殘留應力之可行性，以期輔助汽機組件壽命評估及轉子校直工作；參訪義大利 Microfusione Stellite 公司，了解並學習其在氣渦輪機組件精密鑄造之技術及經驗，以提昇本公司之葉片精密鑄造及製造技術，並評估合作之可行性。

## 1、2 出國行程及主要任務

本次出國實習期間為100.10.9~100.10.22，共計14天。10月9日搭乘華航班機，於10日抵達德國法蘭克福機場旋即轉機前往芬蘭赫爾辛基市，11日至14日參訪STRESSTECH公司，研習殘留應力量測技術並了解其輔助汽機組件壽命評估及轉子校直工作的可行性；10月15日自赫爾辛基市搭乘華航聯營之荷蘭航空班機前往義大利米蘭市，16日及20日於米蘭市參訪Microfusione Stellite公司，研習氣渦輪機葉片鑄造技術，了解其在氣渦輪機組件精密鑄造之技術及經驗，並評估與Microfusione Stellite 公司合作之可行性。10月21日及22日為返程，返程自米蘭Linate機場搭乘華航聯營之德航班機至法蘭克福機場轉華航班機返抵台北，詳細行程如下：

10/09~10	往程(台北→法蘭克福→赫爾辛基)
10/11~14	STRESSTECH 公司(赫爾辛基) 研習殘留應力量測技術
10/15	赫爾辛基→米蘭
10/16~20	MICROFUSIONE STELLITE 公司(米蘭) 研習氣渦輪機葉片鑄造
10/21~22	返程(米蘭→法蘭克福→台北)



## 二、Stresstech 公司研習內容

參訪Stresstech公司主要目的在於研習殘留應力量測技術，工件常因以下原因導致殘留應力；鑄件或銲接件因為各部位之厚度不均或凝固過程的相變化而導致殘留應力<sup>(1~3)</sup>；工件的加工也會導致殘留應力，例如發電機的轉子扣環殘留應力可以高達降幅強度的10%，甚至運轉時所受應力高達降幅強度的80%<sup>(4)</sup>，以上這些殘留應力導致機組組件更易損壞進而導致嚴重損失，因此對於重要組件量測應力集中部位的殘留應力很重要。殘留應力量測方式有破壞方式，如切片法，半破壞方式，如盲孔法，非破壞方式，如X光繞射分析法及中子繞射分析法<sup>(1)</sup>，這些方法中以盲孔法測殘留應力及X光繞射分析法測殘留應力最常被使用。茲介紹盲孔法測殘留應力與X光繞射分析法測殘留應力之量測原理及最新發展以及Stresstech公司之其他技術。

### 2、1 盲孔法測殘留應力

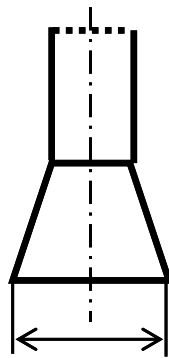
盲孔法量測殘留應力的程序乃是在待測試片上黏貼一片專用的三瓣應變規，在三瓣應變規所圍對稱的中心點有一個規劃為即將鑽除的圓孔，當鑽除該孔位之試片材料時，部分的試片殘留應力將會被釋放，藉由應變規所量測到的應變值，經過計算就可以得到試片的殘留應力<sup>(5~7)</sup>。在大多數的情形下，盲孔法所鑽的孔並不影響工件的正常使用，故此法被歸類為半破壞方式，此法適用於均質性、等向性且具有線彈性的材料，當試片厚度大於應變規規圓的1.2倍時適合使用本法<sup>(5)</sup>。

圖1為盲孔法測殘留應力裝置照片<sup>(6,7)</sup>，圖1(a)為應變規及鑽頭的的照片，在其規圓範圍內有三瓣應變規，一般而言其三瓣應變規之相對角度有 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 及 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 兩種，圖中為第一種相對角度之盲孔法應變規，圖1(b)為鑽孔設備的照片，該設備有三個固定點，圖中右下角箭頭所指為其中之一，此三個固定點作用在將設備黏貼於試片上，使同一位置的鑽孔不致移位。

使用盲孔法測試片殘留應力除了有前述的厚度限制，鑽孔孔徑及孔深亦因試片厚度及應變規而有所限制；另外，孔位偏差也有一定的限制。以上這些限制目的在於減少實驗誤差，即便如此，鑽頭所導致的殘留應力仍無可避免，因此有以放電加工鑽孔取代鑽頭或銑刀的嘗試，並且得到一定的成效<sup>(5)</sup>。

當選定了應變規的規格且黏貼於試片時，則所量測的範圍受應變規規圓範圍所限，只能反映該範圍的應力釋放，且最大殘留應力的方向與所黏貼的應變規方向不一定一致，每一角度的應變值均是經由計算而來，為此 Stresstech公司使用雷射光顯像技術來量測鑽孔後的應力變化<sup>(8,9)</sup>。圖2(a)為雷射光顯像技術輔助盲孔法測殘留應力之裝置照片，圖中箭號所指為鑽孔之機構，其下方之位移計用以顯示鑽孔深度，位於鑽孔機構上方乃是雷射光源及其接收器，接收器將所收得的訊號由電腦分析，以得到全平面任一角度之應力值。此方式可以改善鑽孔時孔位偏差損及應變規的顧慮；也可以不受應變規黏貼方向限制，因而可以得到全平面任一角度之應力值，圖2(b)、(c)即為接收器所接受到的訊號圖形範例，基本上黑色弧形即表示應力的存在，顏色愈黑表示應力愈大，經由電腦分析可以得到任一角度之應力值。

(a)



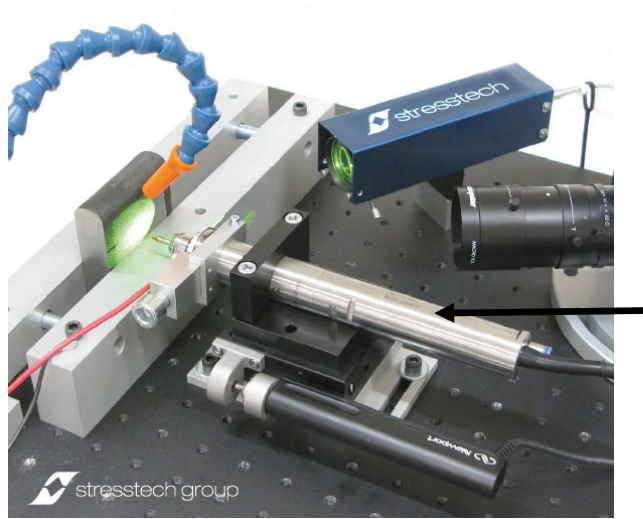
1.6 mm

(b)

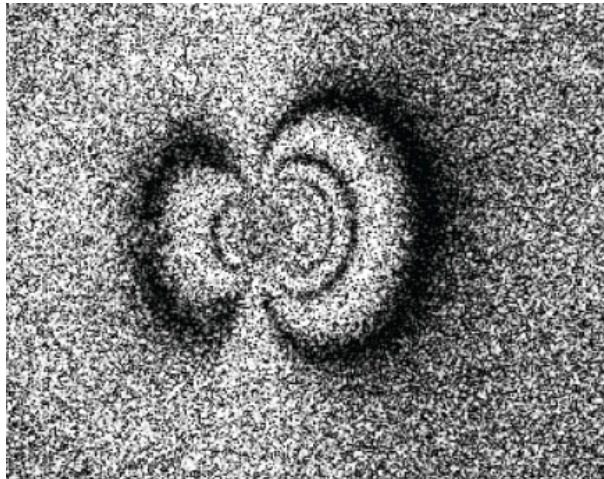


圖 1 盲孔法測殘留應力裝置照片<sup>(6,7)</sup> (a) 應變規及鑽頭 (b) 鑽孔設備

(a)



(b)



(c)

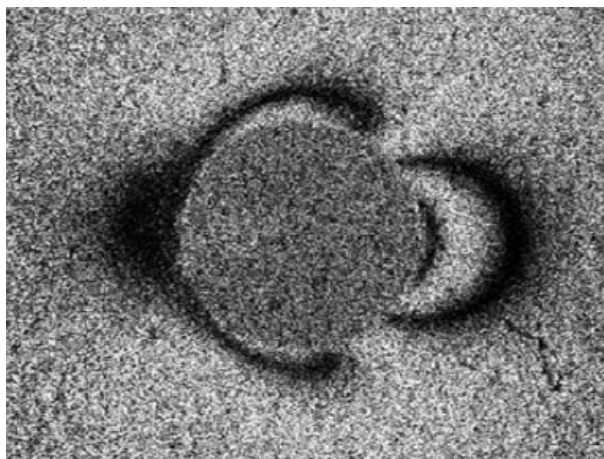


圖 2 雷射光顯像技術輔助盲孔法測殘留應力<sup>(8,9)</sup> (a) 設備照片  
(b)、(c) 雷射光顯像技術顯示之殘留應力分布

## 2、2 X光繞射分析法測殘留應力

有別於盲孔法之半破壞方式，X光繞射分析法測殘留應力屬於非破壞方式之一，並且可以量測表面以下1~30  $\mu\text{m}$ 的殘留應力，運用電解腐蝕法，可以量測至0.5mm深度材料的殘留應力，相較之下，盲孔法雖可以量測至1.5mm的深度，對於最重要的試片表面（ $\leq 20 \mu\text{m}$ ）殘留應力卻無法量測<sup>(1)</sup>，由於X光繞射分析法測殘留應力為精確且最有效的方法，因此在先進國家成為品質檢驗的重要一環<sup>(1,3)</sup>。對於本公司而言，許多重要的組件連盲孔法的半破壞方式也不適合使用，因此X光繞射分析法測殘留應力更顯得重要，Stresstech公司開發的X光繞射分析設備，功率約為300W便能執行量測工作，且在其發出X光的測頭旁邊所測得的輻射值便與背景值無異，如果架設於機械手臂前端使用可以得到0.02mm以下的重複量測位置誤差，因此可以成為功能極強的現場量測工具並輔助汽機機組壽命評估。

### 2、2、1 相關理論

X光繞射分析法測殘留應力的基本理論，乃是當施以X光照射待測物時，會在特定的入射角與繞射夾角出現特別強的繞射光譜，此與特定系列晶格面之間的繞射有關；也就是當X光波長大小與晶格距離符合特定數學關係時，會出現特別強的繞射光譜，因此當材料受力而在特定方向伸長或縮短時，經由X光繞射分析之入射光與繞射光夾角所產生的變化，即反映某些晶格被拉長或縮短，所以X光繞射分析法可以藉此測定材料之殘留應力<sup>(10,11)</sup>。

圖3為典型 X光的材料繞射光譜以及繞射光與晶格距離之關係圖示，圖3(a)顯示 $K_\alpha$ 及 $K_\beta$ 為低角度之可能的繞射光角度，此應為(1, 0, 0)面及(1, 1, 0)面，這兩個繞射角為一般實驗室設備進行低角度繞射時重要的繞射波峰，其實材料在高繞射角，例如鋁在 $139^\circ$ 附近及肥粒鐵組織的鋼材在 $156^\circ$ 附近也有適合於量測的繞射光譜<sup>(10, 11)</sup>，並且以這樣角度的繞射光譜在量測實務上較不受工件形狀及空間的限制。

圖3(b)顯示當材料的晶面晶格距離(d值)與繞射角( $2\theta$ )及X光波長( $\lambda$ )符合Bragg's law時，繞射光譜即出現相對的高繞射光譜。如前所述當材料受力而在特定方向伸長或縮短時，晶格便被依照該方向拉長或縮短，所以X光繞射分析法可以經由X光繞射角所產生的變化，進一步根據材料的晶格常數及X光波長去推算晶格常數變化。

材料晶格變化量與所受的應力成正比，乃是建立於材料處在彈性範圍，亦即符合虎克定律的彈性理論，另外，當材料於某一軸向被拉伸時，在材料其他兩個軸向會被收縮，因為材料物質不增也不減，因此材料所受的應力及所產生的應變遵守以下關係：

$$e_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$e_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$e_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

E為材料的楊氏系數； $\nu$ 則為材料的Poisson's Ratio

由楊氏系數、Poisson's Ratio以及材料晶格常數變化便可推算殘留應力。圖4為常見的材料原子排列方式及晶格面的表示方法<sup>(10, 11)</sup>，圖4(a)左半為面心立方組織，也就是鋼鐵材料常見的沃斯田鐵組織

晶格 ( $\gamma$ )，除晶格的八個角落有原子之外，六個面的中心也有6個原子排列；右半則為體心立方組織，也就是鋼鐵材料常見的肥粒鐵組織晶格 ( $\alpha$ )，除晶格的八個角落有原子之外，晶格的中心也有1個原子排列，以上兩種晶格三軸向的晶格距離是相等的，當材料受力使各方向晶格距離不等或者材料屬於正方結構時，圖4 (a) 中的a、b、c長度便不相同，圖4 (b) 為各種平面的表示方法，當平面垂直於x軸時，以其法線向量 (1, 0, 0) 表示該系列平面，同理當該平面的垂直向量為 (1, 1, 0) 時，便以其法線向量 (1, 1, 0) 表示該系列平面<sup>(10, 11)</sup>。

圖5 為材料內部晶粒組織與表面及X光入射角繞射角關係圖<sup>(10, 11)</sup>，如圖5 (a) 所示，如果有一些晶粒存在與表面平行的晶格面，則其繞射光的出射角與表面的夾角和入射光與表面的夾角相同，相加等於 $2\theta$ ，如果相同晶格面的晶粒與表面不平行，則繞射光的角度與晶格面的夾角和入射光與晶格面的夾角相同，相加仍等於 $2\theta$ ，但對於材料表面而言，該入射角與出射角便有不同，如圖5 (b) 所示，因此對於任一角度入射於多晶材料內部的X光，其相同晶格指數的繞射光譜，在與入射光夾相同角度的圓錐平面上均可以測量得到。

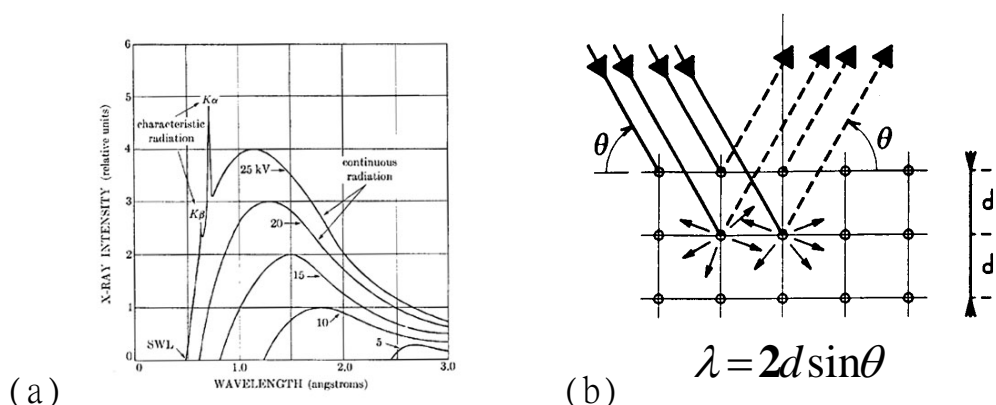


圖3 X光的材料繞射光譜及繞射光與晶格距離之關係圖<sup>(10)</sup>

(a) 典型之繞射光譜 (b) 繞射光與晶格距離之關係

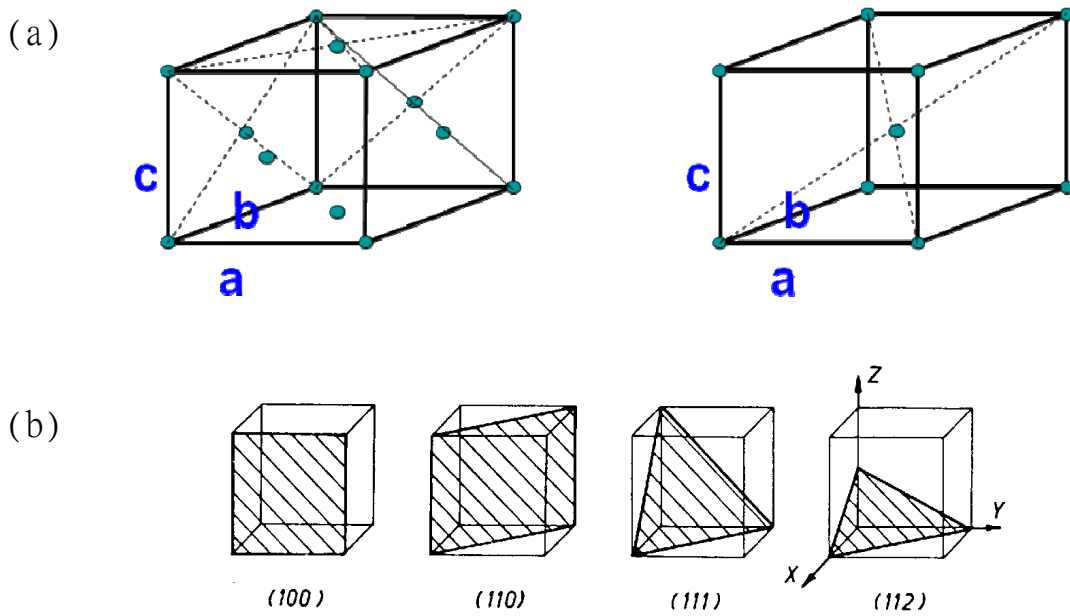


圖4 常見的材料內部原子排列方式及晶格面的表示方法<sup>(10, 11)</sup>  
 (a) 面心及體心立方堆積方式 (b) 平面的表示方法

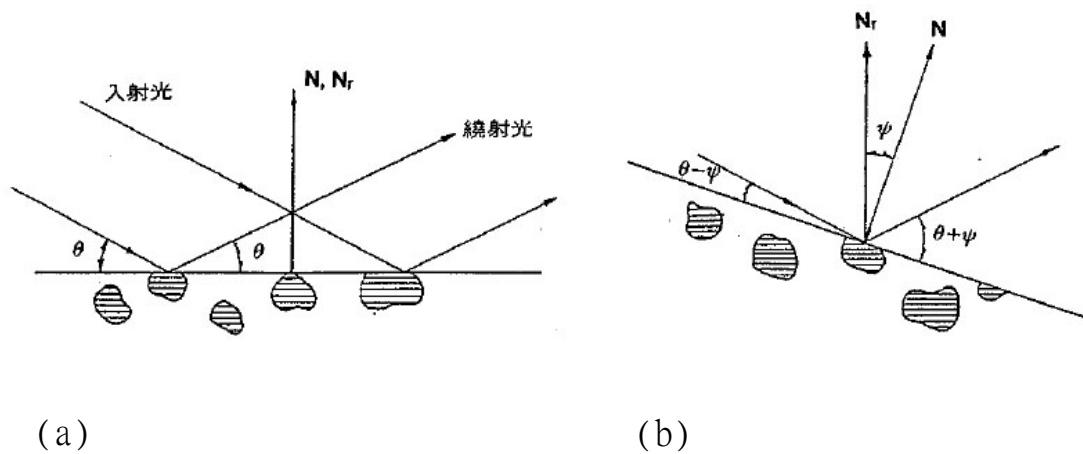


圖5 材料內部晶粒組織與表面及X光入射角繞射角關係圖<sup>(10, 11)</sup> (a)  
 X光入射角與表面平行 (b) X光入射角與表面未平行



## 2、2、2 量測實務

正如圖5所示，材料內部有許多不同晶格方向的晶粒，另外，在現場組件因形狀及相對空間而使量測受限，因此量測實務上仍有許多待克服之事。Stresstech 公司設計了Xstress Robot 的X光繞射分析設備，以提高量測的效率、降低繞射光譜受材料表面狀況及晶粒大小等因素的干擾，並且提高量測的精確度。圖6為 Stresstech公司之Xtress Robot設備簡圖<sup>(12)</sup>，圖6 (a) 顯示Xtress Robot結合了X光繞射分析設備及小型機械手臂的功能，將微型X光管、導引X光的測頭及一組偵測X光的精密CCD偵測器架設於機械手臂的前緣，透過機械手臂6軸的靈活移動及轉動，可以配合工件在各種位置及角度的量測需求，並且可以在量測中配合量測需要擺動或轉動整組X光測頭與偵測器，使量測工作不受工件尺寸及空間限制；圖6 (b) 及 (c) 顯示該設備裝置有兩個對稱的偵測器，偵測器在滑軌上可因應量測需要事先調整位置使能偵測到所需量測角度的繞射光，為了配合量測之空間限制，整組X光測頭、滑軌及偵測器可以平行或垂直於微型X光管<sup>(12)</sup>。

圖7為 Xstress Robot 的X光繞射分析設備在量測時，兩種X光測頭及偵測器傾斜模式，一種為較傳統的方式稱為 $\omega$ 法，如圖7 (a) 所示，另一種則為較新的方式稱為Modified  $\phi$ 法，如圖7 (b) 所示，茲先以圖7 (a) 之上圖為例說明圖中所代表物件，中央之方塊代表待測工作物，右側較大的方塊代表發射X光之X光管，另一最小的方塊代表偵測器，因此由圖7 (a) 之兩個示意圖可以清楚了解兩件事，一是傳統 $\omega$ 法只用一個偵測器，二是使用 $\omega$ 法量測殘留應力的時，X光管、偵測器以及傾斜方向均在同一平面，由圖7 (b) 之兩個示意圖也可以清楚

了解兩件事，一是Modified  $\phi$  法量測殘留應力時使用兩個偵測器，二是使用Modified  $\phi$  法量測時，X光管及偵測器所在的平面與傾斜方向所形成的平面是相垂直的。除了以上的兩種傾斜方向以執行X光繞射分析之外，整組X光測頭與偵測器尚可以由機械手臂控制以入射光為中心轉動若干角度，所以藉此兩種方式可以靈活地按照空間的限制測得材料不同方向的殘留應力<sup>(10)</sup>。

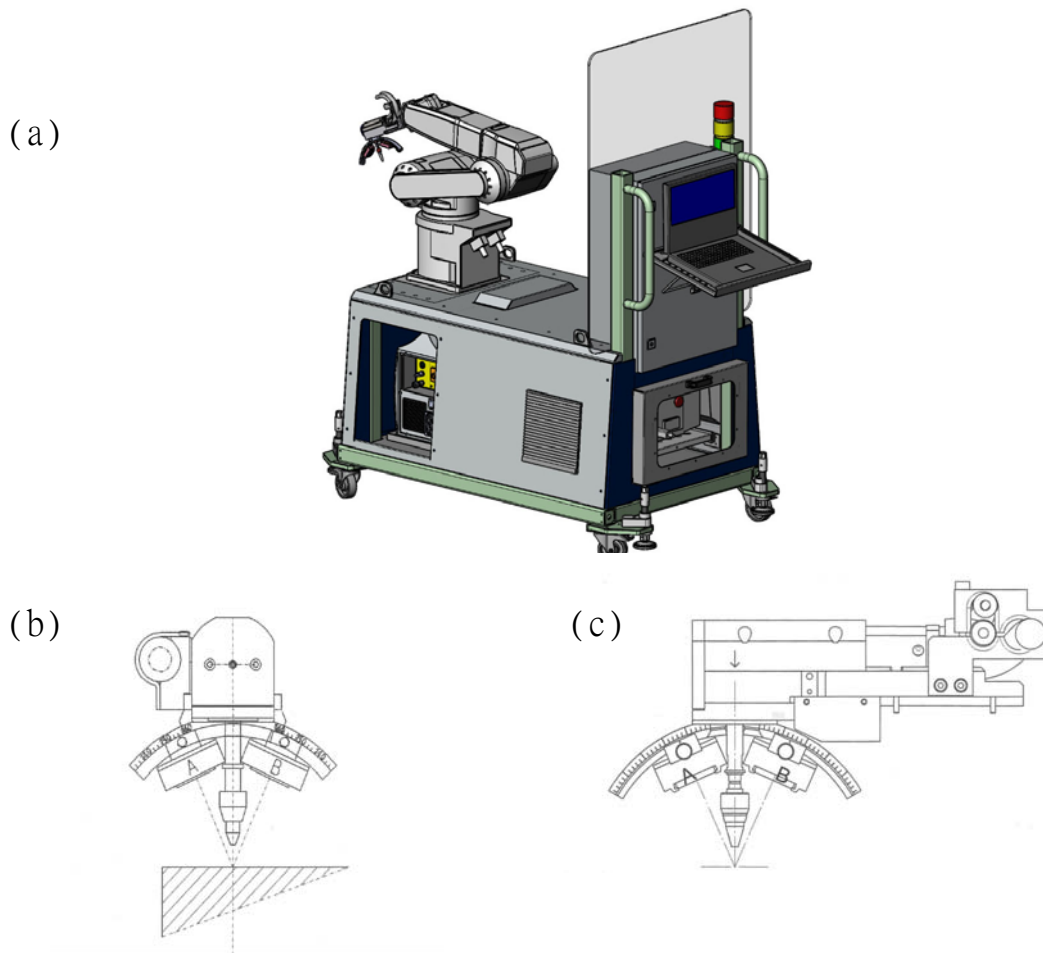
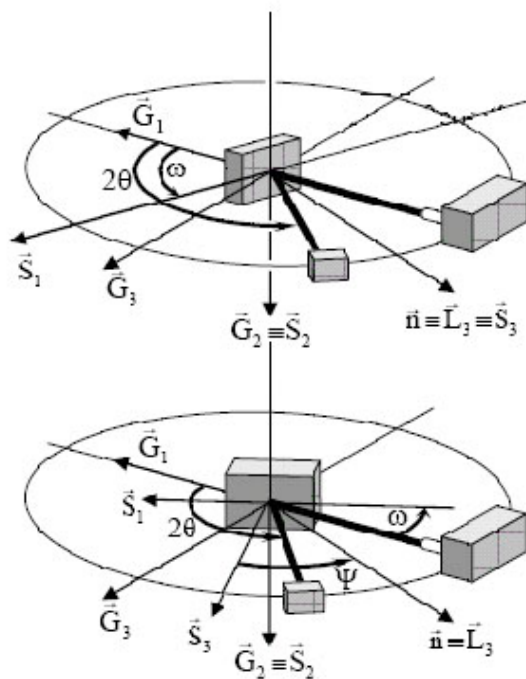


圖 6 Stresstech 公司之 Xtress Robot 設備簡圖<sup>(12)</sup> (a) 設備全貌  
(b) 測頭及偵測器

(a)



(b)

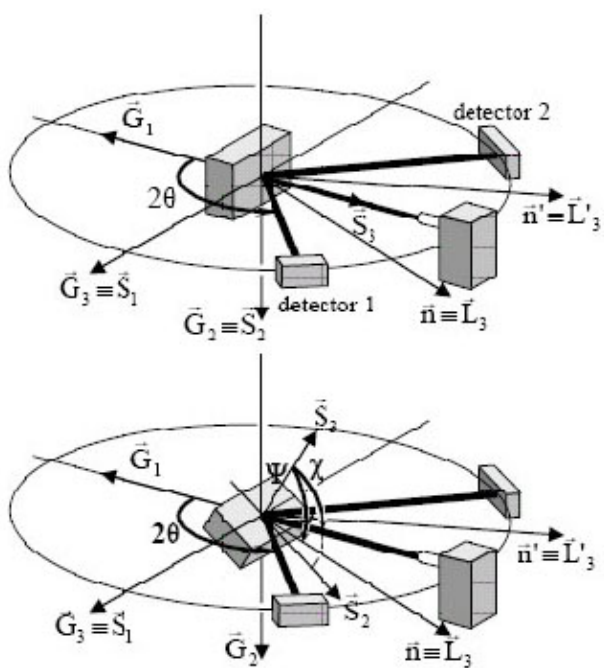


圖7 X光測頭及偵測器傾斜模式<sup>(10)</sup> (a)  $\omega$ 法 (b) Modified  $\phi$ 法

由於材料內部有許多不同晶格方向的晶粒，因此量測上如何得到正確的晶格距離變化，據以計算殘留應力，而不因晶格方向與試片表面偏斜而導致誤差呢？以上介紹的 $\omega$ 法及Modified  $\phi$ 法均是藉由圖7中的傾斜來量測，以圖7(a)的 $\omega$ 法為例，先以X光測頭與試片平面的法線平行（即測頭與該法線夾角 $\phi=0^\circ$ ）量測得到繞射角（ $2\theta$ ），再將X光測頭傾斜若干角度（ $\phi$ ）量測得到新的繞射角（ $2\theta'$ ），此時便可由繞射角變化（ $\Delta\theta$ ）、 $\sin^2\phi$ 、E（材料的楊氏係數）、 $\nu$ （材料的Poisson's Ratio）等計算出圖7(a)中試片表面 $S_1$ 方向的殘留應力（ $\sigma$ ）<sup>(10)</sup>，根據X光繞射分析殘留應力基本理論<sup>(3)</sup>，此計算式為：

$$\sigma = (E \cdot \cot \theta \cdot \Delta \theta) / ((1 + \nu) \cdot \sin^2 \phi)$$

上述的測試方法及計算式被稱為兩點式的測試<sup>(3)</sup>，相同的道理，圖7(b)的Modified  $\phi$ 法也可以以傾斜角 $\phi=0^\circ$ 及傾斜角 $\phi$ 所得到的 $\Delta\theta$ 、 $\sin^2\phi$ 、E、 $\nu$ 等計算出圖7(b)中試片表面 $S_2$ 方向的殘留應力（ $\sigma$ ）<sup>(10)</sup>，與 $\omega$ 法不同的是， $\omega$ 法的偵測器位於傾斜所呈弧線的路徑上，而Modified  $\phi$ 法的偵測器則位於兩側，此正如前面敘述的，任一角度入射於多晶材料內部的X光，其相同晶格指數的繞射光譜，在與入射光夾相同角度的圓錐平面上均可以測量得到。

以上兩種方法均可得到所要量測方向的殘留應力，而所量測到的殘留應力與傾斜方向有關。由圖8(a)的簡圖說明，欲量測的殘留應力方向如圖中所標示，通常命名為 $\phi$ 方向，此時若以Modified  $\phi$ 法量測，則X光測頭及偵測器偏擺路徑如圖中箭頭所指；若欲以 $\omega$ 法量測，則圖中的X光測頭、偵測器須轉動 $90^\circ$ ，且其偏擺路徑亦須如圖中箭頭所指<sup>(10)</sup>。實務上Stresstech公司的Xstress Robot在量測時除了藉傾

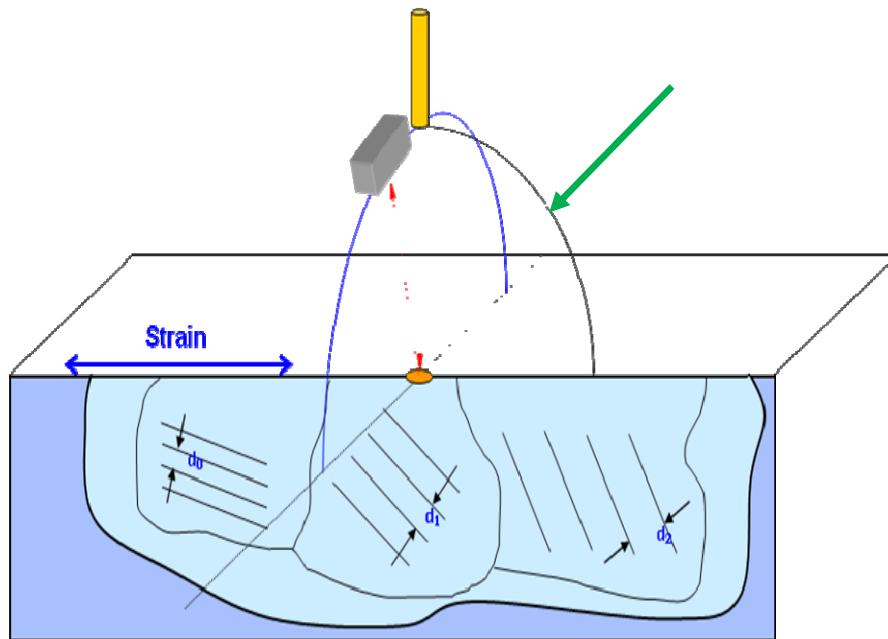
斜而進行兩點式的測試之外，並且可以在測試傾斜角  $\phi$  時沿著傾斜方向擺動  $\pm 6^\circ$ ，以增加量測的精度；另外，藉著機械手臂將整組X光測頭及偵測器轉動  $\phi$  角後進行相同的測試，此時可以測得多種角度之應力，進一步計算得到平面之最大應力及其方向，效果如同盲孔法的三瓣應變規。圖8 (b) 說明了整組X光測頭及偵測器轉動、傾斜及擺動所對應的移動路徑、相關角度標示及所測得的應力方向。X、Y兩軸在平面上，Z軸則為前述的平面法線，原點為待測點，第一個測試點X光測頭是沿著Z軸指著原點，第二個測試點X光測頭是沿著  $(\phi, \phi)$  方向指著原點，此時整組測頭及偵測器傾斜及小幅擺動的方向都在Z軸及  $(\phi, \phi)$  方向所成的平面上，此時以兩點式的計算式所得的應力在  $(\phi, \phi)$  方向投影在試片平面的方向，亦即圖中與X軸夾  $\phi$  角之方向。

當測試材料為鋁合金或者材料晶粒較大時，兩點式的測試可能數據的精確程度較不足，Stresstech 公司比較建議以Xstress Robot進行多點甚至連續傾斜角的方式測試，亦即於圖8 (b) 中X光測頭沿著Z軸方向至  $(\phi, \phi)$  方向多點或連續傾斜施測。圖9 (a) 及 (b) 為  $\phi$  角在  $-21.8^\circ$  與  $-40^\circ$  時之繞射圖譜，圖中標示的位置為  $\phi = 0^\circ$  時的繞射角，圖中顯示傾斜角  $\phi$  愈大繞射角  $2\theta$  的偏移愈大，由於使用Xstress Robot設備並使用Modified  $\phi$  法，因此A、B兩個偵測器的測試值可以相互補正，以減少試片表面粗度或材質所造成的誤差。

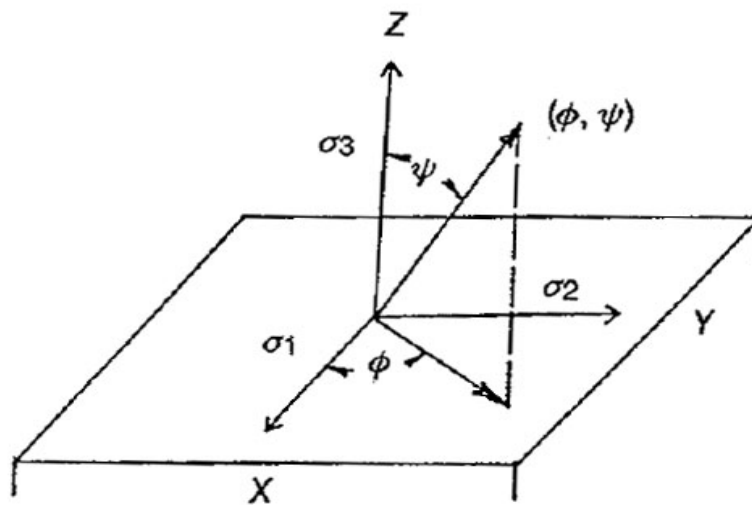
進一步以所有數據的  $\Delta 2\theta$  (或  $\Delta \theta$ ) 與  $\sin^2 \phi$  作圖，可以得到線性關係，如圖9 (c) 所示<sup>(3,10)</sup>。此一直線的斜率與E、 $\nu$ 、 $\cot \theta$  及殘留應力  $\sigma_\phi$  有關，根據X光繞射分析殘留應力基本理論<sup>(3)</sup>，此斜率為：

$$2 \left( (1+\nu) * \sigma_\phi \right) / (E * \cot \theta) \quad (3)$$

(a)



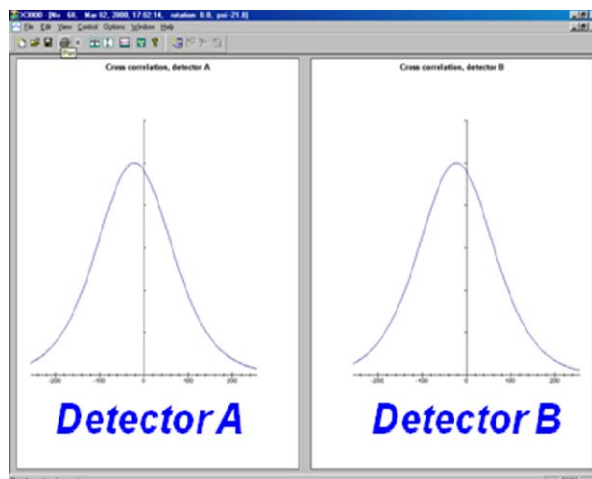
(b)



$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{1 + \nu} \frac{\cot \theta \Delta \theta}{\sin^2 \phi}$$

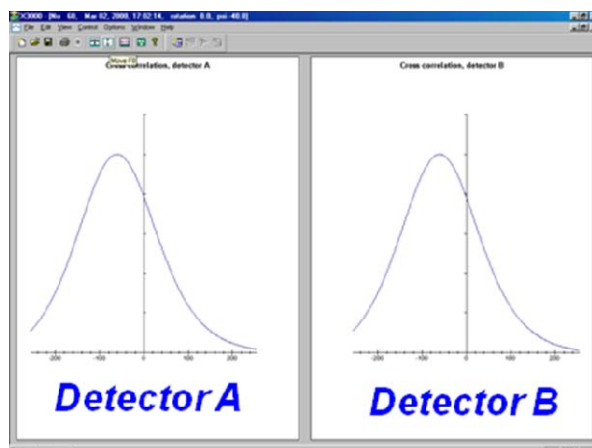
圖8 X光測頭及偵測器偏擺方向與所量測應力方向<sup>(10)</sup> (a)簡圖(b)方向轉動及測頭與偵測器偏擺方向

(a)



$$\psi = -21.8$$

(b)



$$\psi = -40.0$$

(c)

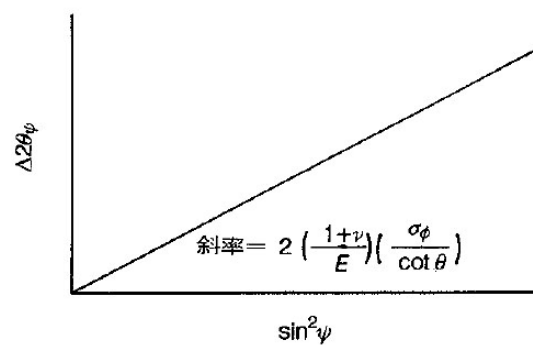


圖9 多點或連續量測殘留應力之圖例<sup>(3, 10)</sup> (a) X光測頭傾斜 $21.8^\circ$ 之數據 (b) X光測頭傾斜 $40^\circ$ 之數據 (c)  $\Delta 2\theta$  與  $\sin^2 \psi$  之線性關係圖

由前述的實務方法可以知道欲計算材料殘留應力，必須先知道材料的楊氏系數 (E) 及Poisson's Ratio ( $\nu$ ) 等常數，對於無法自文獻或參考書籍查閱到這些常數的材料，Stresstech 公司乃是以圖10的三點彎曲裝置實地測試而得到。圖 (a) 中箭頭所指為水平方向放置的試片，其兩端被固定，其中央部分因下方的螺栓推動一個錐形物上頂而受力，試片因此於長度方向受力而於寬度方向不受力，由試片上方以量規測得變形量，由Xstress Robot可以測得長度方向及寬度方向的應變，由這些數據便可以計算出所需要的常數值。

為了更直接說明上述Modified  $\phi$ 法的傾斜方式可以同樣得到與傳統 $\omega$ 法相同的測試結果，Stresstech 公司以前述的三點彎曲裝置實地測試，將螺栓往上旋轉使錐形物向上頂，使試片於長度方向受力，於寬度方向不受力，分別以 $\omega$ 法及Modified  $\phi$ 法量測試片在此兩個方向的受力，結果以 $\omega$ 法測得長度方向的應力及寬度方向的應力分別為 $379.7 \pm 10.9 \text{ Mpa}$ 、 $40.5 \pm 33.9 \text{ Mpa}$ ，以Modified  $\phi$ 法測得的應力值分別為 $340.6 \pm 14.6 \text{ Mpa}$ 、 $-23.7 \pm 24.0 \text{ Mpa}$ ，證實兩者所測得的長度方向應力確實非常相近，而寬度方向的應力基本上接近於0。

汽機高/中壓轉子為重要組件，了解其劣化情形及應力狀況為重要之工作，除了可以輔助機組壽命評估工作，轉子校直後也可以藉以了解殘留應力當作工作結果的指標。圖11 (a) 為高/中壓轉子簡圖，其中以高溫段所標示的5個位置較容易應力集中，圖11 (b) 為轉子高溫段照片，顯示個別區域的實際樣貌，為了解此5個位置在量測上是否可行，因此製作複製模提供Stresstech 公司工程師，以便了解量測是否可行，複製模如圖12所示，Stresstech 公司工程師表示位置2須使用



細小的X光測頭，但欲提高精度須經由測試得到較佳的測試方式，位置5量測時機械手臂動作可能受限，但基本上均可行，至於高壓段或中壓段各級動葉之間凹槽的量測，因空間窄小目前較不可行。

還有一些因素會影響量測的準確度，例如材料的晶粒大小、紋理(Texture)組織以及試片表面的粗糙度<sup>(13)</sup>。一般而言，材料的晶粒大小在10~100  $\mu\text{m}$ ，對於X光繞射分析殘留應力是適宜的，但當晶粒太大時，符合Bragg's law繞射光的晶粒便相對變少，有可能使得繞射波峰相對降低，此時晶粒界面的微應變也會產生影響，這使得波峰的位置不易確認，應力分析的準確度也會減低；Texture組織則會在傾斜角度測試時影響繞射光譜，因此也會影響量測的準確度，要降低上述因素的影響，以Stresstech公司的經驗，在傾斜角度測試時可以增加測試點的數量，或者依照傾斜角度的範圍連續測試。至於試片表面因打磨或研磨導致的粗糙或殘留應力，同樣也會影響X光繞射光譜，因此粒度較細的拋光及切削力較低的研磨比較適宜。另外，使用電解拋光作為試片表面處理的程序，也可以減少此一問題。

汽機高/中壓轉子長期在高溫下運轉，其表面有緻密的氧化層，一般會先將其噴砂，再進行研磨及拋光的程序，以便進行複製膜取樣。若要以X光繞射分析殘留應力作為壽命評估及轉子校直的參考，有必要驗證研磨及拋光的程序與電解拋光的差異，以便在效率及精度間取捨。

整體而言，Xstress Robot確實可以符合絕大部份的量測需要，但是仍免不了受限於機械手臂大小，例如大型工件超出機械手臂動作範圍，或工作空間太小而有一定的深度，因此使得機械手臂無法到達，或可以到達卻無法執行所需的動作。因應窄小空間的量測工作，可能

需要選購更小型的X光管，或加長機械手臂上的X光管承載機構，以適度解決窄小空間的量測問題；可能有一些工件空間窄小或大型工件的量測，有賴於如圖13的雙機械手臂來進行量測工作，圖中右側之機械手臂附有X光源，左側之機械手臂則附有偵測器，兩者協同動作下的定位技術及動作控制相信更為複雜<sup>(14, 15)</sup>。

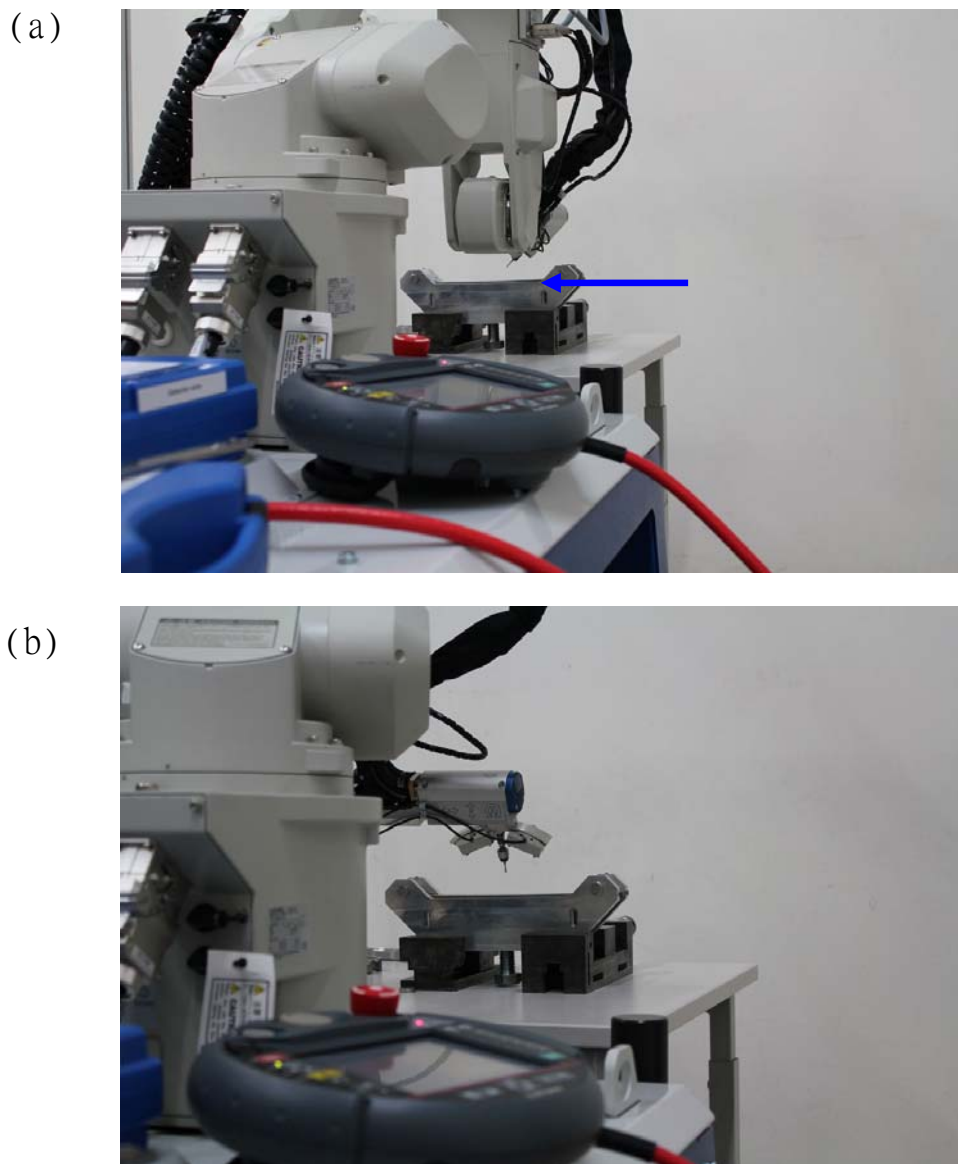
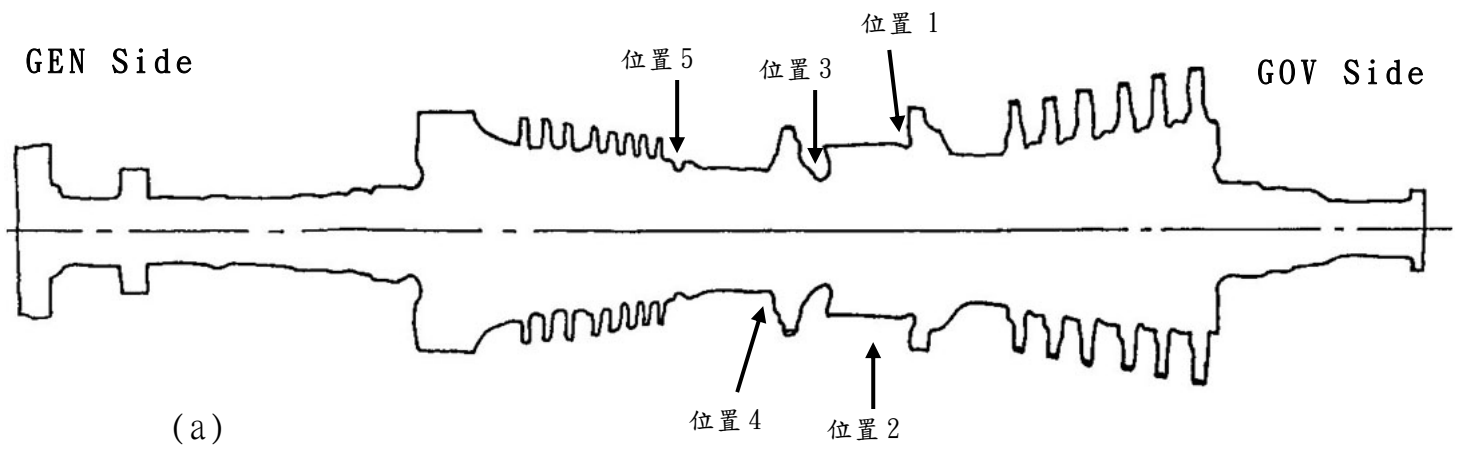


圖 10 以三點彎曲試片驗證 Modified  $\phi$  法之照片 (a) 長軸方向力量量測 (b) 寬度方向力量量測



(b)



圖11 高/中壓轉子簡圖及照片 (a) 全部簡圖 (b) 高溫段照片

(a)



(b)



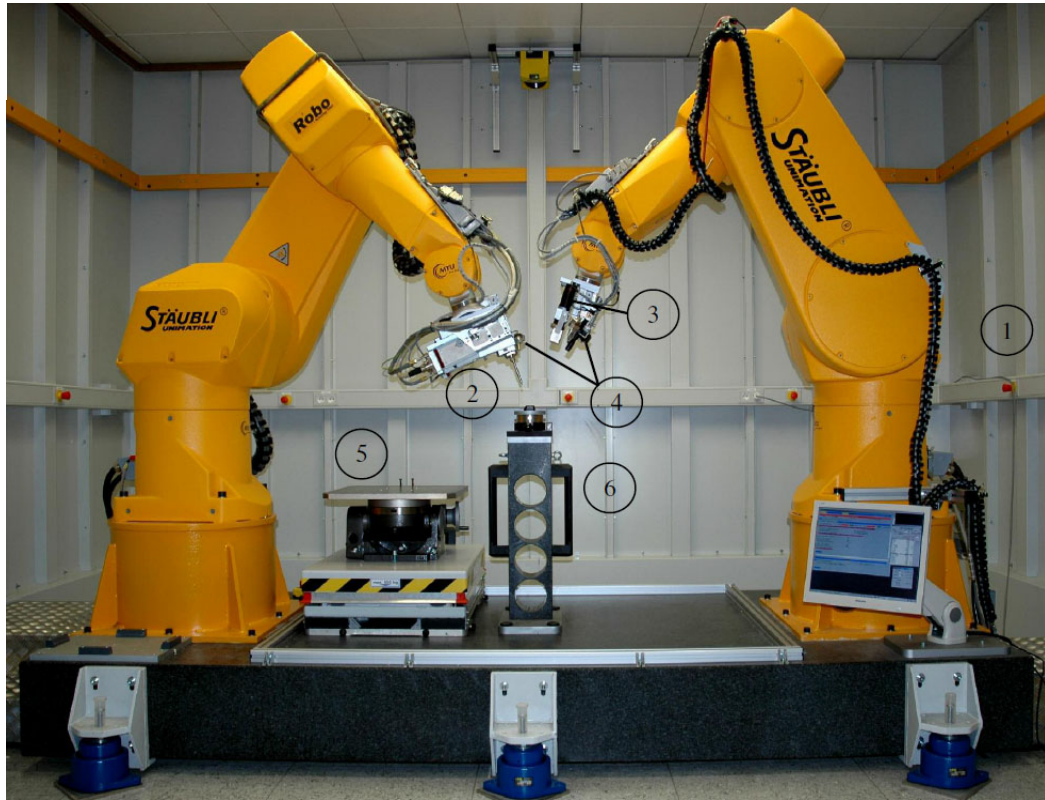
(c)



圖12 高/中壓轉子高溫區複製模照片 (a) 兩汽封環之間及汽封環凹槽 (b) 衝擊段葉片底部近中壓#1級動葉 (c) 衝擊段葉片底部近高壓段及高壓#1級動葉前凹槽



(a)



(b)

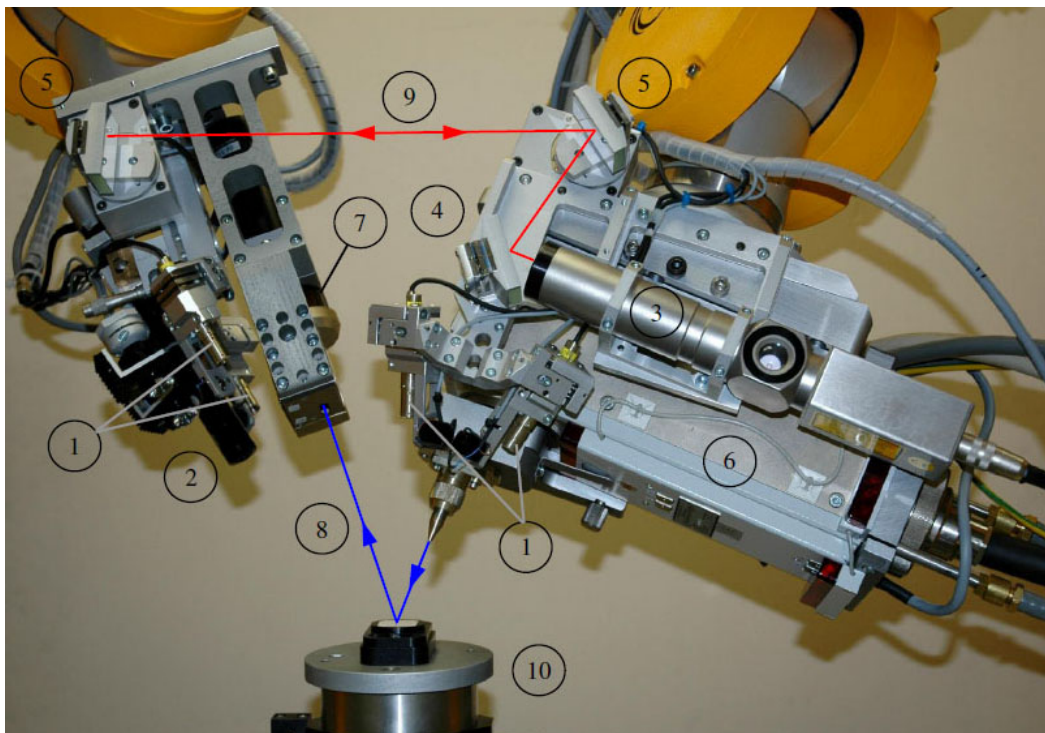


圖13 雙機械手臂執行大型工件殘留應力量測工作照片<sup>(14,15)</sup>

## 2、3 Stresstech 公司其他技術

許多的合金鋼都是靠著淬火處理，來達到所需要的機械性質，亦即自高溫的沃斯田鐵組織，藉由急冷使之成為強度較高的麻田散鐵組織，以達到較佳的機械性質，相對的殘留沃斯田鐵相可能造成後續的相變化，導致內應力或者產生裂紋，因此沃斯田鐵組織轉變成麻田散鐵組織的百分比愈大愈好。而當這些鋼材殘留沃斯田鐵相或者產生缺陷或硬度過高時將如何檢測並預防呢？

Stresstech公司運用X光繞射分析設備，加上特別製作的偵測器滑軌以及計算軟體，可以測得沃斯田鐵組織以及麻田散鐵組織的繞射波峯強度，藉由此兩者的波峯強度與標準強度的比對及計算，便可以得知殘留沃斯田鐵相的量，據以修正製程或熱處理程序<sup>(16)</sup>。表1為鋼材麻田散鐵及沃斯田鐵組織的繞射角資訊<sup>(16)</sup>，由表1可得知：麻田散鐵組織在 $2\theta$ 為 $106.1^\circ$ 及 $156.4^\circ$ 有繞射光譜可做為檢測用；而沃斯田鐵組織在 $2\theta$ 為 $79.1^\circ$ 及 $128.3^\circ$ 有繞射光譜可做為檢測用。圖14顯示X光繞射分析設備如何達到光譜之偵測，圖中顯示其特別製作的偵測器滑軌為偏單邊固定，而兩個偵測器也未對稱置放，圖14 (a) 的裝置方式可以同時測得麻田散鐵組織在 $106.1^\circ$ 及 $156.4^\circ$ 的繞射光譜<sup>(16)</sup>；而圖14 (b) 的裝置方式則可以同時測得麻田散鐵組織在 $156.4^\circ$ 的繞射光譜及沃斯田鐵組織在 $128.3^\circ$ 的繞射光譜<sup>(16)</sup>。

對於硬度過高或產生缺陷的鋼材，Stresstech公司則是以材料的鐵磁特性開發Barkhausen Noise的品質管控設備，原理是當這些材料產生缺陷或者硬度過高，其Barkhausen Noise也會相對偏異常升高，因此Barkhausen Noise的設備可以做為品質管制之用<sup>(17)</sup>。Stresstech

公司自行研發各種適合客戶使用的測頭，可以接受客製化定製。圖14為Barkhausen雜訊偵測情形，圖15 (a)、(b) 為量測齒輪的情形，圖15 (c) 為各種硬度之Barkhausen Noise規塊，圖15 (d) 則為其量測汽車曲柄軸的情形<sup>(17)</sup>。

表 1 鋼材麻田散鐵及沃斯田鐵組織的繞射角資訊<sup>(16)</sup>

	hkl	$2\theta$	R
麻田散鐵	200	106.1	18.92
	211	156.4	183.13
沃斯田鐵	200	79.1	26.42
	220	128.3	51.54

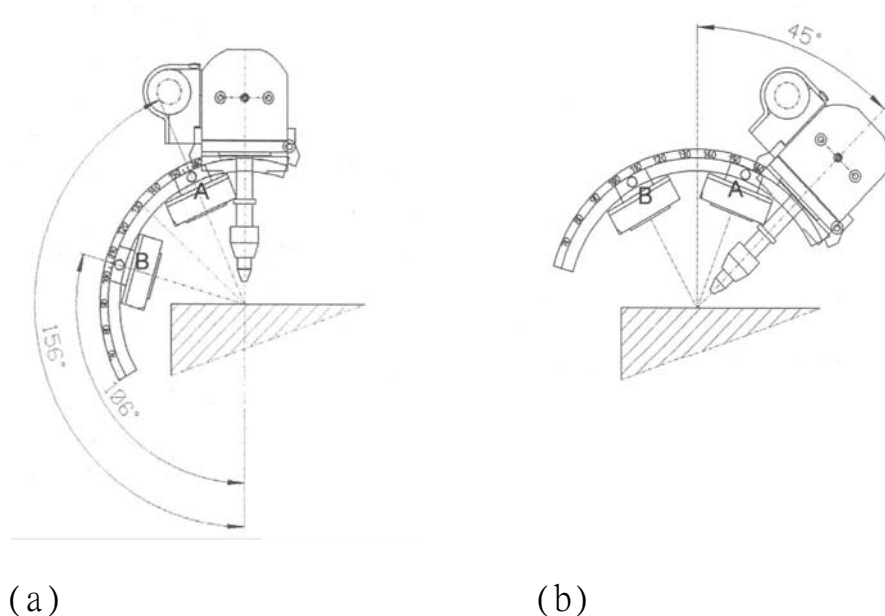
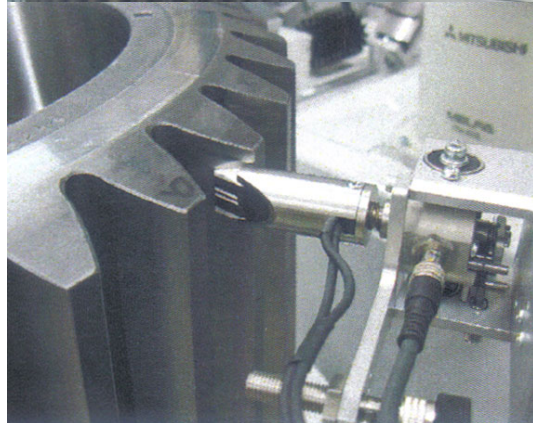


圖14 量測殘留沃斯田鐵測頭、滑軌及偵測器安置情形<sup>(16)</sup>  
 (a) 量測肥粒鐵時 (b) 量測殘留沃斯田鐵時

(a)



(b)



(c)



(d)



圖15 Stresstech公司Barkhausen雜訊偵測情形<sup>(17)</sup> (a)、(b) 量測齒輪 (c) 硬度規塊 (d) 量測汽車曲柄軸



## 三、Microfusione Stellite 公司研習

至義大利 Microfusione Stellite 公司研習的主要目的，在於參訪其氣渦輪機氣機段葉片脫蠟精密鑄造技術及經驗，以提昇本公司對葉片精密鑄造技術之瞭解，並評估將來與 Microfusione Stellite 公司合作之可行性。以下就精密鑄造流程及 Microfusione Stellite 公司實際製作程序介紹，再介紹 Microfusione Stellite 公司現況以及參訪所討論的實務工作。

### 3、1 精密鑄造流程介紹

最廣泛用於氣渦輪機熱段組件的精密鑄造技術是為脫蠟精密鑄造（或被稱為包模鑄造），可分為實體陶模法（或被稱為實心模法）與陶瓷殼模法，實體陶模法是在蠟模組成的蠟樹外圍先套上一個型框，將泥漿直接注入型框中，完全充滿模框，將蠟樹包圍，型成一個實體鑄模，待其自硬性凝固後，然後經脫蠟、燒結後便可以進行澆鑄，陶瓷殼模法則是將蠟樹反覆沾漿及淋砂，使其表層經由反覆式的沾漿及淋砂作業而形成一層適當厚度耐火材料的殼模包覆在蠟樹外面，利用加熱使蠟模脫模，將陶瓷殼模燒結後，便可以鑄入金屬溶液，等鑄件凝固後，將陶瓷殼模敲碎便可以獲得的鑄件<sup>(18~20)</sup>，以上程序如圖 16 所示<sup>(18)</sup>，分別為灌蠟模、組蠟樹、沾漿、淋砂、脫模及澆鑄。

脫蠟精密鑄造法具有許多特色：1. 可鑄造無法切削和具放射性的金屬。2. 可獲得精度良好且沒有分離線的極光滑表面。3. 可鑄造出外

形複雜、壁薄、花紋精細的製品。4. 尺寸精確度極高。5. 可適用於零星生產，也可以配合機械手臂進行自動化大量生產<sup>(18~20)</sup>。脫蠟精密鑄件廣泛應用於噴射引擎、燃氣渦輪、飛機零件、蒸汽渦輪、車輛、閥件及武器等零件<sup>(20)</sup>。

### 3、1、1 製作臘模

製作臘模前必須先製作主模型，主模型的外形與最終製品的近似，但製作時須考慮到蠟的冷凝收縮，鑄模的加熱膨脹與鑄造金屬的冷凝收縮，以便得到尺寸符合要求的鑄件。例如蠟型的冷縮率是 1.2%，鑄模的熱脹率是 0.7%，鑄造金屬的冷縮率是 1.7%時，則主模型的尺寸增加率則為 2.2%<sup>(20)</sup>。

灌製臘模時，將加熱的蠟灌入主模型，一定時間後取出臘模並持續冷卻一段時間使臘模定型，若干個臘模依照設計的方案與澆道及臘模頭藉著電烙鐵及接合蠟接合成一株蠟樹，以上如圖 16 (a)、(b) 所示<sup>(18)</sup>。氣渦輪機氣機段動、靜葉片由於內部形狀複雜而塗覆漿無法附著，因此必須使用心型，實務上心型固定於主模型內並與主模型保持應有的相對位置，在澆鑄臘模並取出後，絕大部分心型被臘模包覆僅剩部分外露，製作陶瓷殼模後，殼模與心型外露部分連結在一起，脫臘後殼模與心型之間的空間便是所需澆鑄的葉片形狀了。心型的種類有金屬心型，可溶蠟心型和陶心型，氣渦輪機氣機段動、靜葉片，尤其是動葉片由於中空部份細長，因此大多使用氧化鋁粉，尖晶石粉、鈦酸鋇粉等與矽酸乙酯、膠矽土或樹脂等粘結劑混合作成陶心型，於成品澆注，凝固後，再以溶劑將陶心型溶出<sup>(18)</sup>。

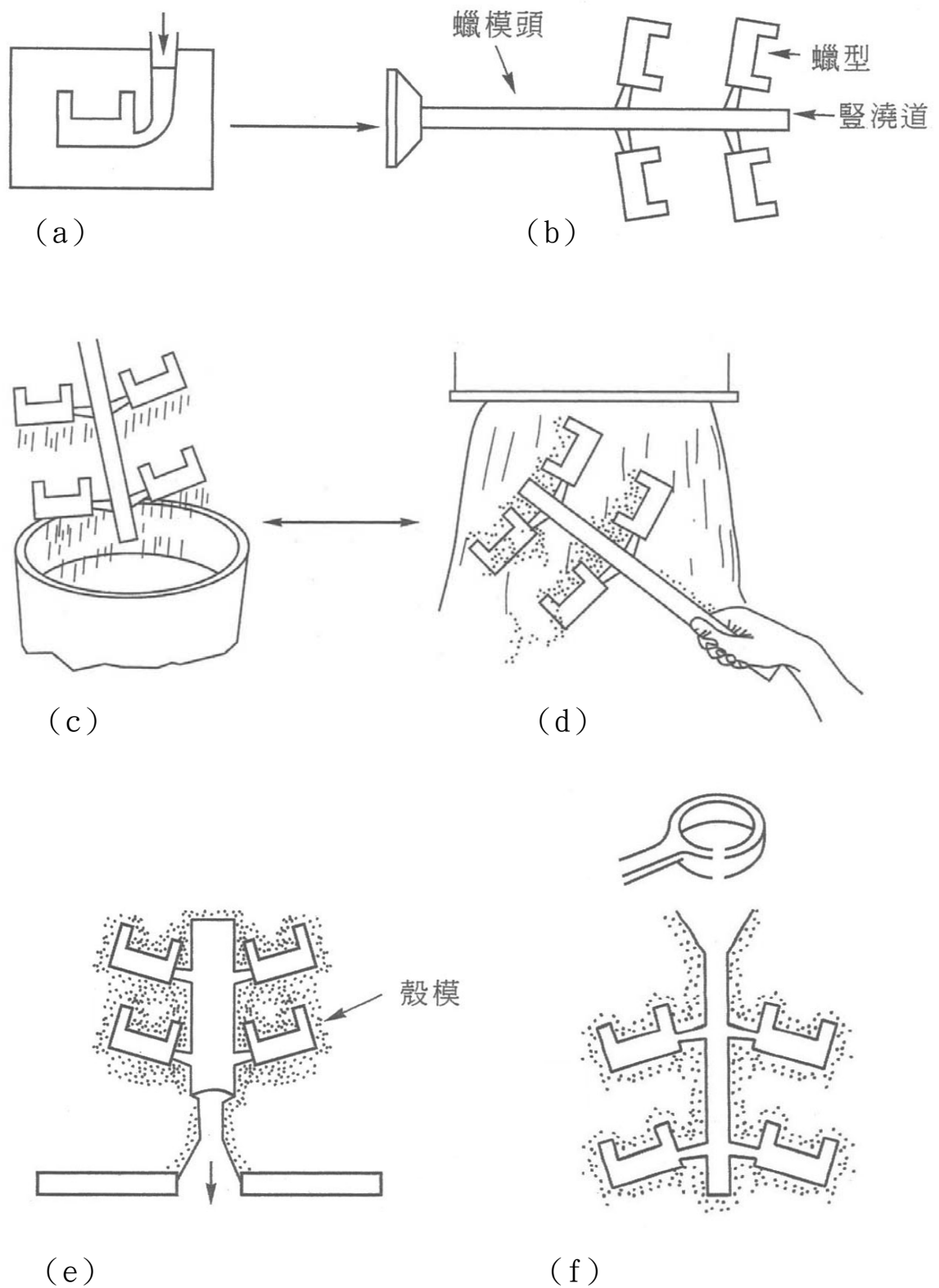
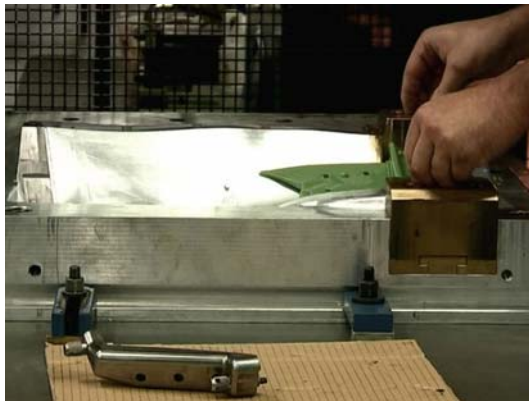


圖16 脫蠟精密鑄造流程<sup>(18)</sup> (a) 灌蠟模 (b) 組蠟樹 (c) 沾漿 (d) 淋砂 (e) 脫模 (f) 澆鑄

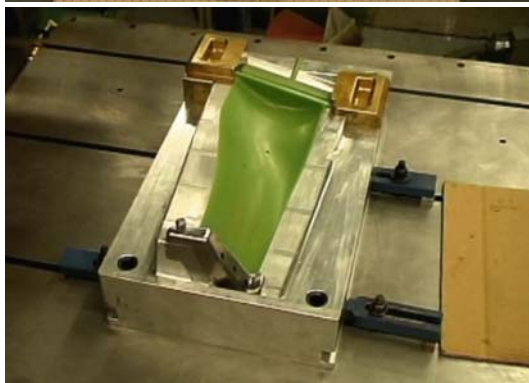
圖 17 為 Microfusione Stellite 公司組立蠟樹的情形<sup>(21)</sup>，圖 17 (a)、(b) 為 Siemens V94.2 第三級動葉片澆鑄蠟模的情形，該公司在澆鑄蠟模模具內預先放置了一個小型的蠟模，這是因為 V94.2 第三級動葉片的根部厚實且各部位厚度差異很大，為避免蠟模於冷卻階段變形，該公司因此預先澆鑄該蠟模小型，將其放置在模具內，如此一來第二階段澆鑄的蠟模，在各部位的厚度變得較為相近，冷卻階段的變形將可以避免，圖 17 (c) 為參考自其他文獻的葉片組立成蠟樹的照片<sup>(22)</sup>，對於 V94.2 第三級動葉片，Stellite 公司乃是將 6 支葉片組立成一支蠟樹，圖 17 (d) 為蠟模頭澆鑄口端固定吊掛頭的照片<sup>(21)</sup>。

圖 18 為 Stellite 公司葉片與砂心照片，圖中箭號所指的砂心一端對應於另一箭號所指的葉片端，砂心在該位置長度較長，在澆鑄蠟模後會外露，該部分在後續程序中將與陶瓷殼模接合。包覆砂心的蠟模冷卻足夠的時間後，該公司會以 X 光檢測驗證其是否接合良好<sup>(21)</sup>。

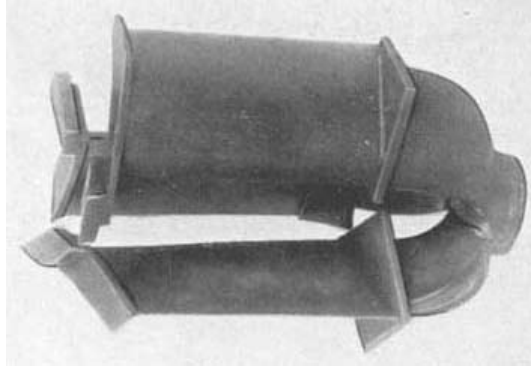
(a)



(b)



(c)



(d)



圖17 Microfusione Stellite公司組立蠟樹的情形<sup>(21)</sup> (a) 置放蠟心 (b) 取出蠟模 (c) 組樹一例<sup>(22)</sup> (d) 澆鑄頭固定吊掛頭

(a)



(b)

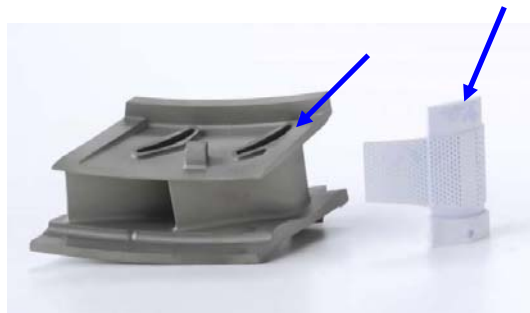


圖18 Microfusione Stellite公司葉片與砂心照片<sup>(21)</sup>  
(a) 一級靜葉 (b) 二級靜葉

### 3、1、2 製作陶瓷殼模

沾漿及淋砂以製作陶瓷殼模，為包模鑄造製程中極重要的關鍵作業，為了在蠟模外形成一定厚度的陶瓷殼模，蠟模必須反覆浸入陶瓷泥漿及撒上耐火材料的動作直到陶瓷殼模殼模達到一定厚度，根據資料顯示至少要有 5 層以上的厚度，過程也需要配合自然乾燥<sup>(18)</sup>。

沾漿作業視需要可以採用手工沾漿也可以採用機械手臂進行自動沾漿；淋砂可以採用手工淋砂也可以採用機械手臂進行，淋砂時通常是將陶模耐火砂粒由上而下灑在蠟樹上，此方式對於深孔凹槽產品較有利，可製造出精美成品，因此通常在第一道陶模製作均使用此一方式，其他道可以視需要採用不同的淋砂法；不同道的沾漿及淋砂之後通常需要置於乾燥室 3 或 4 小時以上，同時要管制乾燥室內溫濕度條件是否在標準規範內。沾漿完成之陶模乾燥後再沾最後一道漿液然後不再淋砂，然後直接掛於臺車上，再放置於乾燥室中 24 小時，進一步將含蠟模的陶瓷殼模倒置於加熱爐中，加熱使熔融的蠟滴出回收再用，將陶瓷殼模包上一層保溫材料並加熱燒結後，陶瓷殼模便可以準備做澆鑄用，以上如圖 16 (c)、(d)、(e) 所示<sup>(18)</sup>。

圖 19 為 Stellite 公司沾漿及淋砂過程照片，基本上 Stellite 公司採用人工以及機械手臂進行沾漿及淋砂的工作，該公司認為熟練且細心的技術人員，比機械手臂更能夠確保蠟模的每一個角落均勻且完全沾附泥漿及耐火砂粒。圖 19 (a) 為人工沾漿作業照片，圖 19 (b) 為機械手臂淋砂作業照片，圖 19 (c) 為常溫乾操作業照片，圖 19 (d) 則顯示陶瓷殼模倒置於加熱爐中，加熱至 150°C 以除去蠟模<sup>(21)</sup>。

(a)



(b)



(c)



(d)

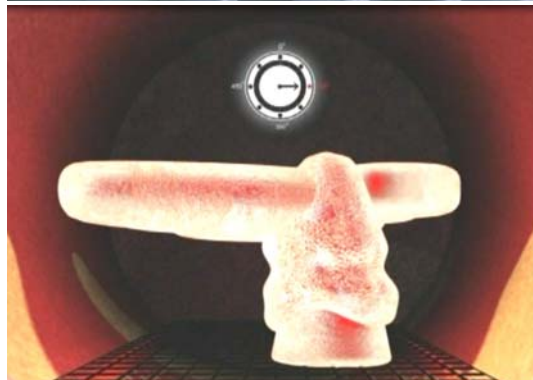


圖19 Microfusione Stellite公司沾漿及淋砂情形<sup>(21)</sup> (a) 沾漿  
(b) 淋砂 (c) 淋砂後靜置 (d) 脫模

### 3、1、3 工件澆鑄

部份氣渦輪機熱段組件材料(例如 UDIMET 500、HESTELLOY 等)，並不需要在真空中澆鑄，只在大氣中澆鑄即可，某些超合金(例如 INCONEL 738、INCONEL 939、GTD 111、MAR 247、MGA 1400 及 CMSX-3 等)，由於含有特定的活性元素(如鈦、鋁等)，如果在大氣中熔解這些元素很容易形成氧化物、氮化物等介在物，如此一來不但無法正確控制成份，且會影響合金澆鑄的成型性及澆鑄後的機械性質。為解決此一問題，這類合金的熔解、澆鑄都在真空爐內進行。真空鑄造法除了避免前述鑄件與空氣之氧化作用之外，也可以減少內部氣孔、縮孔等缺陷，表面及內部晶粒組織也會更細緻，並且鑄件強度高於傳統鑄造，此一方法也更適合細小零件大量生產，並縮短交期<sup>(18)</sup>。不論是在大氣或真空中澆鑄產品，陶瓷殼模都需先包覆一層保溫材料，再燒結成形後，經由預熱及保溫才可以進行澆鑄。

Microfusione Stellite 公司有一些熱段組件由 HESTELLOY 材料鑄造而成，該類鑄件於大氣中澆鑄沒有氧化的顧慮，因此採用大氣澆鑄的設備及器材，另外也有真空自動熔鍊及澆鑄設備，一次可以澆鑄 200 公斤重的鑄件，圖 20 (a) 為預熱及保溫的陶瓷殼模<sup>(21)</sup>，圖 20 (b) 為真空自動熔鍊及澆鑄設備示意圖<sup>(18)</sup>，圖中右上方為合金材料添加室，當閥門打開時合金材料可以送入真空鎗，圖中下上方為真空陶模室，當閥門打開時陶瓷殼模可以送入真空鎗進行真空澆鑄<sup>(18)</sup>。



(a)



(b)

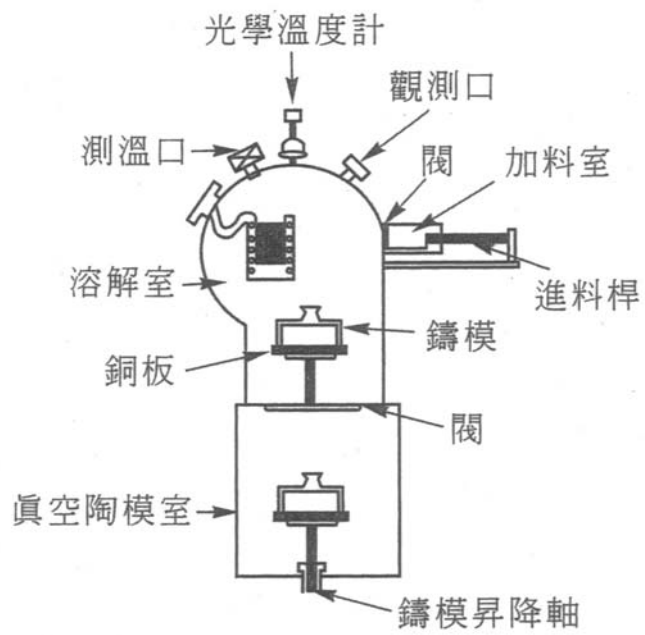


圖20 Microfusione Stellite公司澆鑄情形<sup>(18)</sup> (a) 陶瓷殼模預熱 (b) 真空澆鑄

### 3、1、4 後續處理及檢測

Microfusione Stellite 公司自敲碎的陶瓷殼模取出樹狀的鑄物後，會先切割取下單一的鑄造組件並去除毛邊，如圖 21 (a) 所示，然後將鑄件送進真空熱處理爐中進行固熔處理，必要時同時進行析出硬化熱處理，以得到較佳的機械性質，如圖 21 (b) 所示。有些鑄件依照客戶的要求並且需要進行熱均壓處理，以降低空孔的存在<sup>(21)</sup>。

真空熱處理後的鑄件，需要以非破壞檢驗進行品質管制，主要是針對鑄件中某一部位，做一詳細的外觀與內部缺陷的檢測，以符合客戶要求，通常可以考慮的方法有：液滲檢測、磁粉探傷、螢光檢測、X 光檢測、超音波檢測<sup>(18)</sup>。Microfusione Stellite 公司採用的是螢光檢測及 X 光檢測。前者乃是將鑄件浸泡於螢光性滲透劑並保持一段時間，然後將鑄件表面多餘的滲透劑除去，再把鑄件置於黑暗空間之中，利用紫外線檢視鑄件是否有表面瑕疵或線性指示，如圖 21 (c) 所示；後者則是在鑄件完成鑄造或熱處理後，利用強度足以穿透鑄件的 X 光執行放射線照相檢測，以檢驗鑄件內部是否有氣孔、夾渣、縮孔、裂縫及嵌入物等缺陷，如圖 21 (d) 所示。

參訪 Microfusione Stellite 公司時，該公司正在產製 Siemens 公司 V94.2 型氣渦輪機氣機段第三級動葉片，為了確保鑄件的尺寸確實符合要求，該公司會將每一支葉片根部的配合面、導翼面、尾翼面等區域的某一部位以 ZEISS 接觸式三次元量測驗證尺寸，如圖 21 (e) 所示。另外為了瞭解葉片材質是否符合要求，Stellite 公司會抽檢 1 % 的葉片，將其切片觀察金相組織是否符合要求。並且基於品質管制的目的，Stellite 公司於澆鑄時會同時灌鑄一批試棒，如圖 21 (f)

所示，以便進行高溫拉伸及試驗潛變試驗，前述兩項機械性質測試是航太業及氣渦輪機熱段組件常使用的進料檢驗程序。





圖21 Microfusione Stellite公司鑄件澆鑄後續工作<sup>(21)</sup>  
(a) 去邊 (b) 真空熱處理 (c) 螢檢 (d) X光檢查  
(e) 三次元量測 (f) 真空澆鑄之拉伸試棒

## 3、2 Micrifusione Stellite 公司業務狀況

Micrifusione Stellite公司主要生產精密鑄造件，其隸屬 Deloro Stellite集團，總部設於英國奧克森。Micrifusione Stellite公司員工200人以上；年營業額超過3仟萬歐元；每年售出鑄造產品達300噸，主要接受GE、Siemens、Alstom、Ansaldo等公司的OEM訂單，85%業務為氣渦輪機組件；15 %業務為間接供應義大利客戶航天組件<sup>(21)</sup>。

Micrifusione Stellite公司自1948年成立至今，於1965年獲得 Misco Monsanto公司大量技術轉移，其自1972年投入氣渦輪機組件生產，至1984年陸續成為Fiat、ABB、GE公司之供應商。該公司總計通過美國NADCAP(航太認證)及7個客戶的認證。圖22為其生產的組件照片，圖(a)為航天組件，圖中箭號所指為操縱桿，圖(b)為動、靜葉片，圖中多為GE公司葉片，該公司近期大多產製Siemens V94.之組件，圖(c)為熱段組件，圖中箭號所指為Alstom GT11機型噴油嘴<sup>(21)</sup>。

(a)



(b)



(c)



圖22 Micrifusione Stellite公司精密鑄造產品<sup>(21)</sup> (a) 航天組件  
(b) 動、靜葉片 (c) 其他熱段組件



### 3、3 本公司氣渦輪機氣機段葉片精密鑄造討論

本公司目前的氣渦輪機機組以Siemens V84.2機型以及Mitsubishi M501F機型為主，V84.2機型與新近Microfusione Stellite公司正在生產的V94.2機型鑄件非常相近，因此以其中鑄造難度較高的第一、二級動葉片的鑄造問題與Microfusione Stellite公司人員討論，此兩級動葉片都是以Inconel 738材料經精密鑄造而成，兩者也都有許多冷卻孔在葉片內部，如圖23西門子公司V84.2動葉片照片<sup>(23)</sup>所示，圖23(a)顯示V84.2機型氣機段第一級動葉片內部的冷卻流道非常複雜，甚至有許多肋骨狀及柱狀結構連結壓力側及背壓側葉面結構，可見其鑄造用砂心形狀非常複雜；至於第二級動葉片內部的冷卻流道相對較筆直單純。Microfusione Stellite公司人員認為V84.2機型葉片與V94.2機型葉片非常相近，前者幾乎是後者的縮小版，因此鑄造V84.2機型各級動、靜葉片對於Microfusione Stellite公司並非難事，根據該公司的經驗，第一級動葉片鑄造需製作砂心；至於第二級動葉片則只須在鑄造後以放電加工方式鑽孔即可。根據Microfusione Stellite公司人員的估計：設計及製作第一級動、靜葉片精密鑄造所需模具及砂心，需花費約20萬歐元，其餘各級的開模費用則相對較低<sup>(21)</sup>。

圖24為Mitsubishi M501F機型第一級動、靜葉片照片<sup>(24)</sup>，顯示兩者均有非常多的冷卻孔，Microfusione Stellite公司人員認為這些細小的冷卻孔應是應用鑽孔技術製作而成，其精密鑄造無太大困難。經審視葉片材料規格<sup>(24)</sup>，第一級動葉片乃是使用MGA 1400DS(Directional Solidification)材料；第二級動葉片是使用一般冷卻方式的MGA 1400材料；第三、四級動葉片均使用Inconel 738材料。因此，以Microfusione

Stellite公司現有的技術經驗，Mitsubishi M501F機型除了第一級動葉片的鑄造需待開發方向性凝固技術的葉片之外，其餘各級動葉片 Microfusione Stellite公司均可以執行鑄造工作；至於各級靜葉片的材料規格，第一、二、三級靜葉片均是使用一般冷卻方式的MGA 2400材料<sup>(24)</sup>；第四級動葉片則是使用一般冷卻方式的X-45材料<sup>(24)</sup>，其鑄造對Microfusione Stellite公司並不困難。

對於鑄造時因不同凝固方式而得到方向性凝固葉片或單晶葉片，Microfusione Stellite 公司人員表示各種的材料只適合部分的製程，不過材料之取得並不困難。表 2 說明了幾種葉片鑄造常用材料所適合之鑄造凝固程序<sup>(21)</sup>，例如廣為使用且先進的 Mar-247 材料適合鑄造一般葉片及方向性凝固葉片<sup>(24)</sup>，但無法用來開發單晶葉片，其他材料如 GTD-111 及 MGA 1400 材料也類似，而 CMSX-4 材料則只做為單晶葉片用。

開發單晶及方向性凝固葉片關鍵製程不在鑄造方案，而在冷卻過程之控制，為使葉片材料成為如圖 25 (a)、(b) 之方向性凝固葉片或單晶葉片，需設計並建立類似圖 25 (c) 中的特殊加熱或保溫設備<sup>(25)</sup>，使葉片只在單方向成長晶粒，甚至只長成一個晶粒。由於需投入的資金、人力及時間甚巨，Microfusione Stellite 公司尚未有此規劃。

表 2 各種鑄造用葉片材料所適合之鑄造凝固程序<sup>(21)</sup>

	Mar-247	GTD-111	MGA 1400	CMSX-4
一般凝固方式	M 247 LC	O. K.	O. K.	×
方向性凝固	M 247 DS	O. K.	O. K.	×
單 晶	×	×	×	O. K.



(a)



(b)

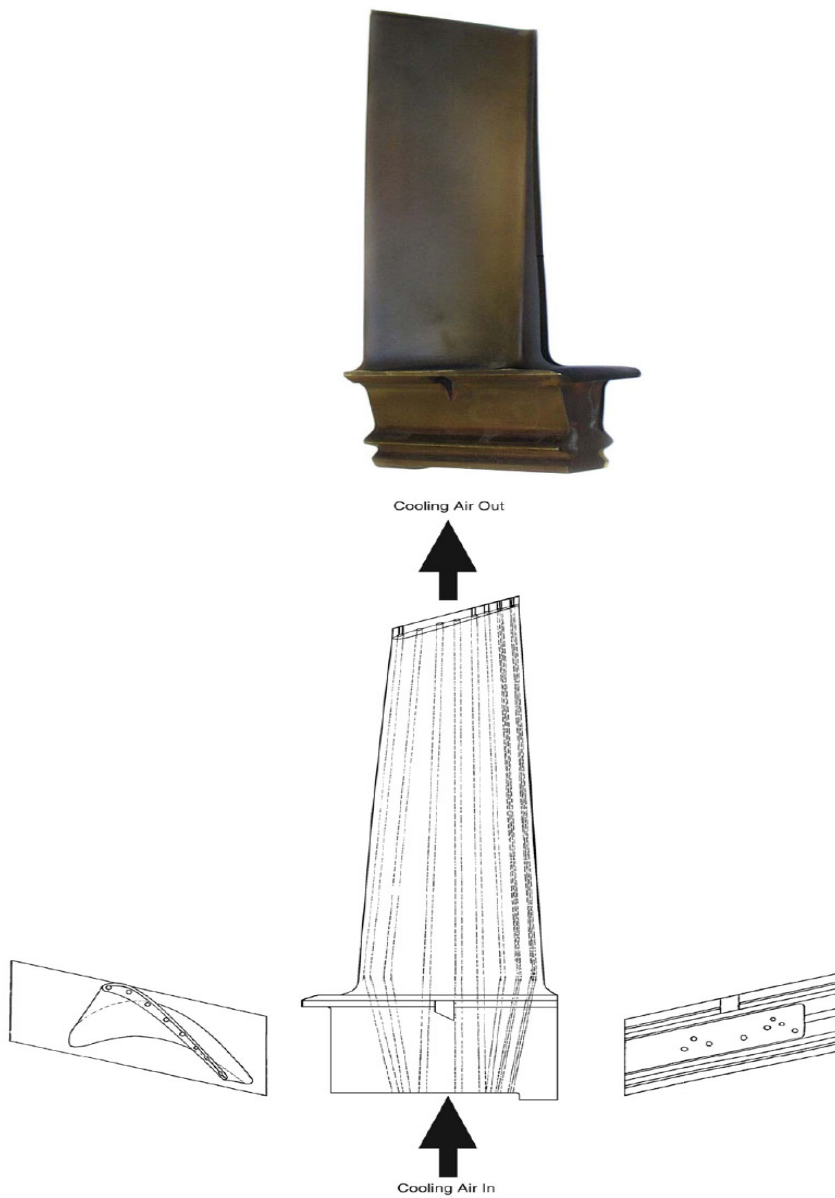
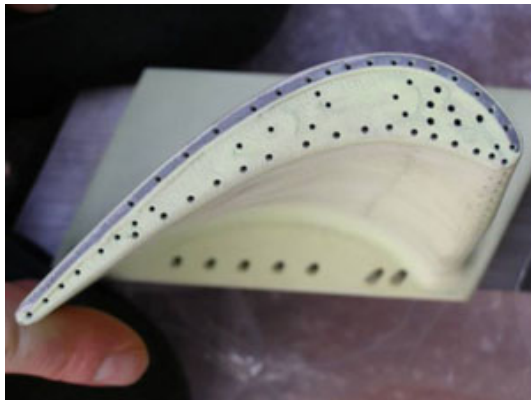


圖23 西門子公司V84.2葉片照片<sup>(23)</sup> (a) 第一級動葉片 (b) 第二級動葉片

(a)



(b)



(c)

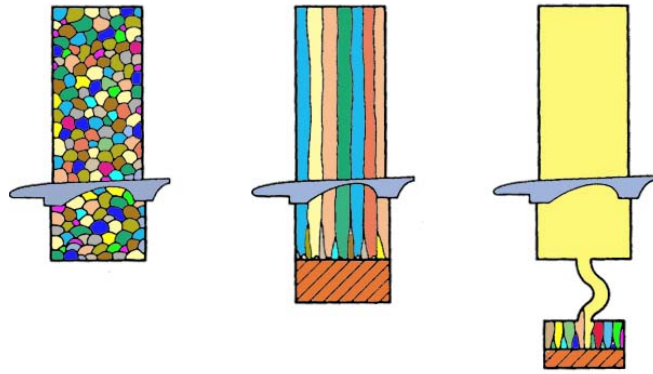


(d)

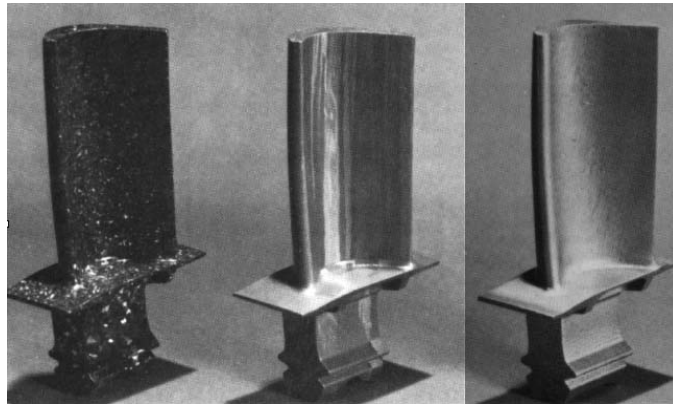


圖24 三菱公司M501F葉片照片<sup>(24)</sup> (a)、(b) 第一級動葉片 (c)、(d) 第一級靜葉片

(a)



(b)



(c)

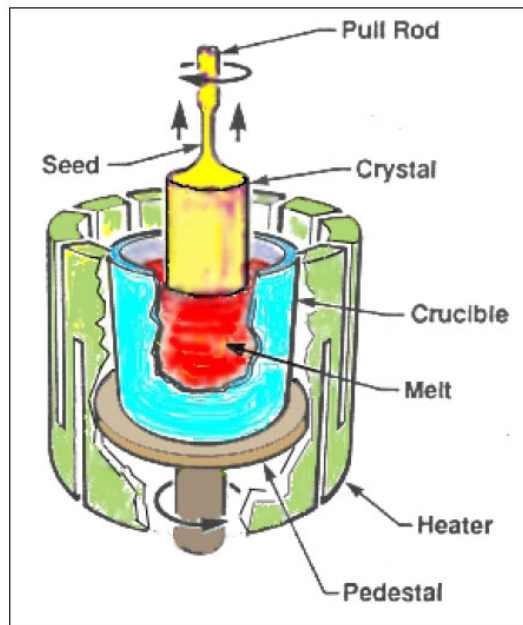


圖25 多晶、方向性凝固及單晶之凝固過程<sup>(25)</sup> (a) 示意圖 (b) 葉片表面紋理及色澤 (c) 單晶凝固過程示意圖

## 四、心得及建議

- 1、X 光繞射分析法可以輔助汽機壽命評估及轉子校直工作，也可以應用該技術量測再生之葉片絕熱塗層及陶瓷層。
- 2、運用電解腐蝕法，可以增加殘留應力量測深度，也可以降低打磨或拋光導致的量測誤差。
- 3、Microfusione Stellite 公司對於 Siemens V84.2 機型葉片的鑄造經驗豐富，其估計第一級動、靜葉片的開模費均為 20 萬歐元。
- 4、Mitsubishi M501F 機型第一級動葉片的鑄造需開發方向性凝固技術，其餘葉片的鑄造，Microfusione Stellite 公司均能勝任。
- 5、經評估 Microfusione Stellite 公司合作之技術及經驗豐富，合作是可行的。

## 五、參考資料

- 1、Stresstech 公司，“Stress Measuring”，簡報資料。
- 2、賴耿陽譯著，“鑄造技術的基礎”，復漢出版社印行。
- 3、“殘餘應力分析”，自網路下載之文章。
- 4、H. Feichtinger, G. Stein, I. Huchlenbroich, “SCC Case History of A 18Mn18Cr Retaining Ring Affected by Stress Corrosion Cracks”，EPRI-107770，Generator Retaining Ring Workshop, December 8~9, 1997, Miami, Florida.
- 5、劉全, 李鐸登, “EDM 應變規鑽孔法測量殘留應力之最佳化流程設計”，國立成功大學博士論文, 2008.
- 6、Stresstech 公司，“Hole drilling”，簡報資料。
- 7、HBM公司設備照片，取材自其網站。
- 8、Stresstech 公司資料 “Residual stress measurement based on hole-drilling and ESPI”
- 9、Theo Rickert “Comparison of Residual Stress Measurements Using X-Ray Diffraction and PRISM – Electronic Speckle Pattern Interferometry and Hole-Drilling” American Stress Technologies, Inc., a member of the Stresstech Group
- 10、Stresstech 公司 “X-ray Diffraction”，簡報資料
- 11、Paul S. Prev y, “X-RAY DIFFRACTION RESIDUAL STRESS

- TECHNIQUES” , Lambda Research, Inc.
- 12、Stresstech 公司 “Xstress Robot” 型錄資料
  - 13、M.E. Fitzpatrick, A.T. Fry, P. Holdway, F.A. Kandil, J. Shackleton and L. Suominen “Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction - Issue 2” Measurement Good Practice Guide No. 52
  - 14、R. Hessert, W. Satzger, A. Haase, A. Schafmeister “A New Type of X-ray Diffractometer with Cooperating Robots for Residual Stress Analysis on Large Components” , Technologic Report of “MTU Aero Engines GmbH” & “GE Inspection Technologies GmbH” .
  - 15、Roland Hessert, Wilhelm Satzger, Alfried Haase, Achim Schafmeister “Cooperating twin robots form a new X-ray diffractometer for stress analysis” , Int. J. Mat. Res., formerly Z. Metallkd, 97 (2006) 10
  - 16、Stresstech 公司 , “X-ray Diffraction -Retained austenite measurement.” , 簡報資料。
  - 17、Stresstech 公司 , “Barkhausen Noise as a Quality Control Tool.” , 簡報資料。
  - 18、林宗獻 “精密鑄造學” , 全華圖書股份有限公司印行.
  - 19、“現代鑄造方法” , 自網路下載之文章。
  - 20、郭翰融 “精密鑄造脫蠟法” , 學校專題報告.

- 21、Microfusione Stellite 公司型錄及簡報資料。
- 22、R. G. NICHOLAS. “PRECISION CASTING BY THE ‘LOST WAX’ PROCESS” , Presented to the Manchester Graduate Section of the Institution, 9th November, 1955.
- 23、D. Gandy, Combustion Turbine Guidelines: Conventional and Advanced Machines, Volume 9: Siemens V84.2, 1010476, EPRI Final Report, November 2005。
- 24、Rich Curtis, John Scheibel, “M501F/701F Project Meeting Repair Guideline Review” , EPRI Presentation Materials。
- 25、“Single Crystal Casting and Rapid Solidification” , 自網路下載之文章。