

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

實習「電廠配件劣化監測修護及陶金材料製程技術」

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：十等五級

姓名：王家瓚

出國地區：歐洲

出國日期：91年7月17日

報告日期：91年9月26日

93/
C09105808

行政院及所屬各機關出國報告提要

頁數 33 含附件：口是■否

出國報告名稱：實習「電廠配件劣化監測修護及陶金材料製程技術」

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

王家瓚/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/(02)26815424 ext 321

出國類別：口 1 考察口 2 進修口 3 研究■ 4 實習口 5 其他

出國地區：歐洲

出國期間：91 年 7 月 17 日~91 年 7 月 31 日

報告日期：91 年 9 月 25 日

分類/號目

關鍵詞：監測技術、材料保固、陶瓷燒結、複合材料

內容摘要：(二百至三百字)

義大利國家電力綜合研究院在電力系統領域中貢獻卓越，目前已成爲世界三大電力研發機構之一，整合最新的技術，配合電廠的實際需求，將理論基礎化爲實際可應用且商業化之系統，從輸配電網路架構、定型試驗、環境影響評估到如何有效的降低營運成本提昇電廠之效能均有良好的實績，而在材料科學領域的研發，雖然是以電廠運用爲出發點，但在工業界的應用亦相當廣泛，且技術成熟，未來將成爲此一領域的領導者。近年來已開發出許多具有實際應用價值的軟硬體技術，列爲本次出國主要研習內容。

研習高溫自行燃燒合成法,SHS 是一種相當新穎且具發展潛力的合成方式,其中由陶瓷金屬複合而成的陶金材料,由於具備優異的性能,包括高機械強度、高溫穩定性、耐腐蝕、耐磨耗及化學侵蝕;甚至更有某些陶瓷材料具有的電氣絕緣性、壓電性、光學性質或生物親和性等其它材料所無法比擬的特性;因此,近年來已廣爲學術及工業界所重視,並投入大量研發人力,獲得許多重要的成果與突破,其未來發展受到矚目,對其製程方法、產品特性等目前本所掌握有限,藉由實地與該技術領先學術機構或代表性廠家交流討論,有助於本所對該領域研究方向的規劃。

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

目 錄

	頁次
壹、緣由	1
貳、出國行程	2
參、電廠設備監測及診斷技術	3
肆、陶瓷金屬複合材料合成技術介紹	26
伍、感想與建議	33

壹、緣由

發電系統中之電廠運轉特別強調高發電效率及高可用率，但隨著本公司大多數機組已逐漸邁入高齡化階段，且愈來愈強調營運成本的同時，想要繼續維持這兩項高標，將會面臨更嚴峻的挑戰。電廠中許多重要設備諸如汽機、鍋爐、氣渦輪機葉片、幫閥等、由於長時間在高溫、高壓，甚至在具有高腐蝕、高沖蝕的環境下運轉，均會面臨無可避免的劣化問題。如何提升這些設備的效率，或如何藉由可靠、有效的監測評估技術，選擇最經濟的時間點，對這些設備進行維修或更新，並有效延長使用壽命等均是值得重視與研發的重要課題之一。

義大利國家電力綜合研究院(CESI, Centro Elettrotecnico Sperimente Italiano)原本為 ENEL 之研發單位，其角色相當於台電公司綜合研究所。自六年前義大利電業法開放後，ENEL 為義大利目前最主要之電力供應者，而 CESI 也從 ENEL 獨立出來，成為一獨立營業機構。累積四十餘年之經驗，CESI 致力於電力系統之效能提昇與改善以及再生能源之開發與利用，目前 CESI 已成為世界知名的電力系統技術研究發展中心。尤其在發電系統監測及診斷技術上，開發出許多具有實際應用價值的軟、硬體技術，因此列為本次出國主要研習項目。

另外，鑑於電廠配件維修更換佔整體營運成本比例甚高，因此對新材料的開發與應用一直是本所致力研究的課題之一。在眾多的高性能材料中，由於精密陶瓷具有許多優異的性質，因而使得此種材料受到各國材料研究團體的重視，並史進一步的投入許多人力、物力研究開發性質更優異，應用範圍更廣泛且更具經濟效益的高性能精密陶瓷。精密陶瓷材料(Fine Ceramic Material)的優異性能包含了高機械強度、高溫穩定性、耐腐蝕、而于磨耗及化學侵蝕；甚至更有某些陶瓷材料具有良好的電氣絕緣性、壓電性、光學性質或生物親和性等其他材料所無法比擬的特性。陶瓷材料除了本身所具有的優異性質外，其原料的取得也非常容易，通常可由礦土提煉或經由合成得到。在應用上，目前已廣泛的用於航太、機械、化學、半導體、汽車及生醫[1]各方面。基於以上所述之優點可以知道精密陶瓷材料的附加價值非常高，其未來的市場發展是眾所矚目的焦點，本次出國研習高溫自行燃燒合成法(Self-propagating High-temperature Synthesis ;SHS)簡稱自燃法,SHS 是一種相

當新穎且具發展潛力的合成方式,其中由陶瓷金屬複合而成的陶金材料,由於具備優異的性能,包括高機械強度、高溫穩定性、耐腐蝕、耐磨耗及化學侵蝕;甚至更有某些陶瓷材料具有的電氣絕緣性、壓電性、光學性質或生物親和性等其它材料所無法比擬的特性;因此,近年來已廣為學術及工業界所重視,並投入大量研發人力,獲得許多重要的成果與突破,其未來發展受到矚目,對其製程方法、產品特性等目前本所掌握有限,藉由實地與該技術領先學術機構或代表性廠家交流討論,有助於本所對該領域研究方向的規劃。

貳、出國行程

本此出國期間自 91 年 7 月 17 日起至 91 年 7 月 31 日止,共計 15 天,實習行程安排如下表。

項次	起 始 日	迄 止 日	機 構 名 稱
1	910717	910718	去程(台北→布魯塞爾)
2	910719	910720	Hoganas 公司實習粉體陶金材料製程技術
3	910721	910721	布魯塞爾→米蘭
4	910722	910730	義大利國家綜合研究院實習電廠配件劣化監測及修護技術
5	910730	910731	返程(米蘭→台北)

參、電廠設備監測及診斷技術



I. 義大利國家電力綜合研究院簡介

義大利國家電力綜合研究院主要由七個事業群(BUSINESS UNIT)所構成：

- ◇ 認證部門(CERTIFICATION)
- ◇ 測試部門(TESTS and COMPONENTS)
- ◇ 環境部門(ENVIROMENT)
- ◇ 再生能源部門(RENEWABLE ENERGY)
- ◇ 輸配電部門(TRANSIMSION and DISTRIBUTION NETWORK)
- ◇ 自動化部門(AUTOMATION)
- ◇ 發電部門(POWER GENERATION)

各部門之服務範圍將簡述如下，而發電部門的技術項目則在本報告中詳細介紹。

1. 認證部門

認證部門主要提供產品品質認證的服務，以使這些產品供應商的產品在市場上更具競爭力！認證種類包含以下數種：

- ◇ Certification of Quality and Environmental Management System-依據 ISO9000,ISO14001,OHSAS18001, EN46000 以及 QS9000
- ◇ Certification of type conformity-確保產品符合規範的要求
- ◇ Certification with surveillance and issuing of marks-主要針對導線、乾式變壓器、礙子等提供防電磁影響之認證
- ◇ Certification of EX apparatus-針對有潛在性爆炸危險之環境提供安全性檢驗
- ◇ Life extension evolution of pressure equipment-根據 ISPEL15/92
- ◇ CESI 亦可以第三認證機構之身分參與測試
- ◇ 協助建立各種等級之實驗室

2. 測試部門

此部門主要針對製造商或終端用戶提供測試服務，包含各等級變壓器之定型試驗、短路試驗、斷路器測試等，CESI 擁有設備齊全之實驗室，可進行機械試驗、電磁干擾試驗、電力試驗、絕緣試驗以及各種材料試驗等。

3. 環境部門

環境部門除了大氣現象之研究外，另一個主要研究領域為環境影響評估：包括電磁場強度、空氣污染程度、廢棄物處理、防止爐管結垢以及水處理。

4. 再生能源部門

致力於再生能源的開發與利用，著重於太陽發電與風力發電之技術研究。

5. 輸配電部門

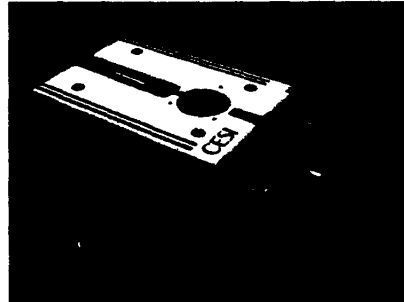
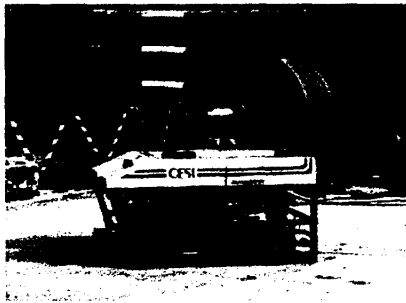
致力於提昇輸配電系統之可靠度，降低整體之營運成本。此部門主要涵蓋的範圍包括電力系統分析、電力系統之操作以及控制。

6. 自動化部門

此部門延攬自動控制、電子及資訊軟體等各領域的專家，致力於自動化系統的

整合、通訊及資料傳輸、動態分析、自動控制及各種機器人。由 CESI 所研究開發的遙控操作車(Remotely Operated Vehicles,以下簡稱 ROVs)可應用的範圍相當廣，特別是針對電廠水下結構的操作與維護以及經由水中管路輸送燃料和電力上有相當顯著的成效。ROVs 具有以下特性：

- 即使在狹窄的範圍也能操作自如
- 涵蓋範圍廣：同軸電纜的使用可涵蓋 2000 公尺長、600 公尺深的範圍
- 模組化且具有彈性的儀控設備，更能滿足使用者的需求
- 高度的系統整合能力
- 可針對使用者需求設計



II. 義大利國家電力綜合研究院研究領域

隨著電力市場的競爭日益激烈，如何能以最低的營運成本創造最高的利潤就成了每個電力供應商要考慮的課題。在此環境下，CESI 的發電部門也因應市場的需求，以降低電廠之運轉及維護成本、提高電廠相關設備之可靠度以及可用率並且在安全無虞的條件下延長各設備及元件的壽命為前提，致力於各項技術之研究與應用。目前在 CESI 發電部門大致可分為數個重點研究領域：

- 超超臨界蒸氣循環
- 高效率、低污染之氣渦輪機(gas turbine)
- 直接能源轉換及除氫裝置
- 提昇現有電廠之效能、可靠度及可用率之監測及診斷技術
- 元件表面處理及材料科學相關之應用

1. 超超臨界蒸氣循環

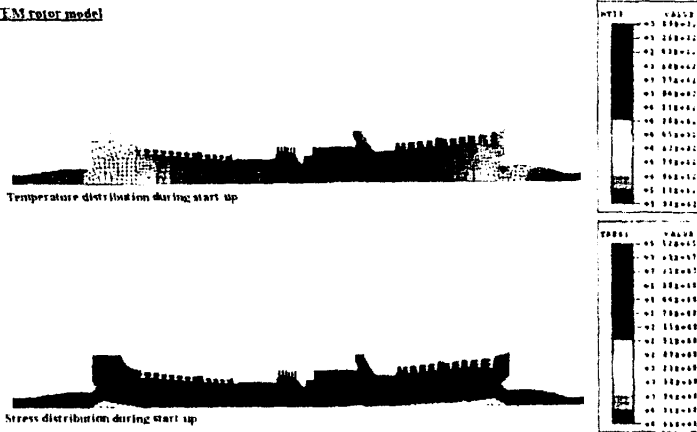
傳統鍋爐的操作壓力約為 175Bar，最高溫度約為五、六百度，但整體效率卻只有 35%。近幾年來在歐美普遍被使用的超臨界鍋爐有著較傳統鍋爐高的效能，故超臨界鍋爐的使用已逐漸成為市場的主流。目前已在運轉的超臨界鍋爐的蒸氣溫度可達 625°C，但若將操作溫度提昇至七百度以上甚至八百度(超超臨界蒸氣循環，Ultra/super Critical Steam Cycle)，電廠整體的效能可達 50%，更能有效的將導致溫室效應的氣體降低 40%。為了能充分了解材料在超超臨界蒸氣循環中的特性、耐腐蝕及抗氧化的能力，以改良現有的材料或發展其它的材料以適應超超臨界鍋爐如此高溫高壓的惡劣環境，CESI 設計規劃了一個實驗室，以創造高溫高壓的環境進行材料試驗，用以了解材料在此環境中的機械特性、水質的影響以及熱傳效率等。

除了超超臨界蒸氣循環實驗室外，針對目前已在商轉的超臨界鍋爐，CESI 也發展了相關的線上監測及診斷系統，協助使用了解整個超臨界鍋爐的使用情況，進行適當的調整以使系統達到最佳化。

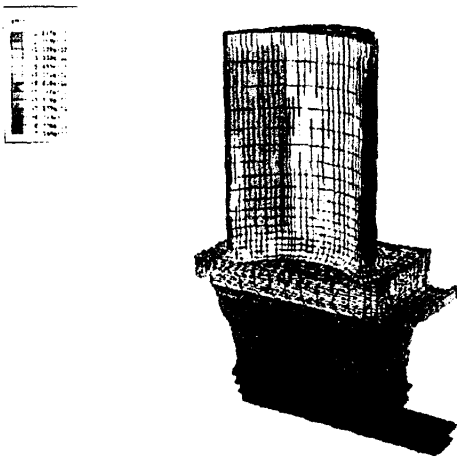
2. 高效率低污染之氣渦輪機

為了使汽機有更好的效率，CESI 除了致力於改良超合金的結構、發展相關的塗層技術以保護汽機熱段之元件外，亦利用有限元素法(Finite Element Method, FEM)以分析了解葉片受到熱應力的情形。除此之外，CESI 也開發出線上即時監測及診斷系統，用以了解發電機與渦輪機的效能及相關的運轉參數。

FEM rotor model



根據元件的殘餘應力、缺陷的大小及位置以及實際的操作狀況，配合有限元素法，即可估算出材料的剩餘壽命。



利用有限元素法可計算出材料所受的應力以及溫度分佈的情況

3. 直接能源轉換研究

在此領域中 CESI 主要致力於儲氫材料的研發、PEM 燃料電池以及直接能源轉換技術。

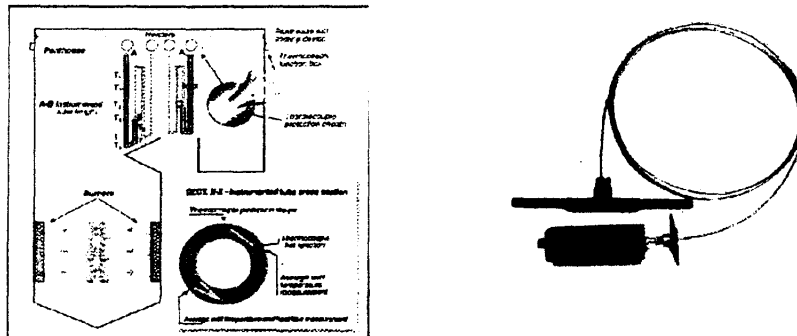
4. 提昇現有電廠之效能、可靠度及可用率之監測及診斷技術

若能有效的提昇電廠之效能、可靠度並增加所有元件的可用率，就能立即降低電廠的運轉以及維護成本，這種效果是非常明顯的。為了能達到此目的，CESI 在這個領域投入了相當多的研究，希望能夠將先進的技術引入電力系統中，盡其所能的將設備自動化，減少人員的工作負擔。而為了不要增加電廠的成本，CESI 所研發的所有系統都是以需要最少甚至不用維護為原則。以下將針對幾個監測系統作簡單的說明：

4.1. 鍋爐爐管洩漏偵測以及溫度監測系統(On-line Leakage and Thermal Monitoring System,以下簡稱 LTMSystem[®])

鍋爐爐管洩漏偵測以及溫度監測系統主要的目的是希望能在洩漏發生初期就及早發現，避免裂縫擴大，波及周邊其它元件。洩漏偵測的部分主要是利用兩種不同的感測器：音頻感測器(Acoustic Sensor)以及微振動感測器(Microvibration Sensor)。若爐管或其它的受高壓元件有裂縫產生，當高壓流體流經此縫隙時就會產生高頻的噪音，而音頻感測器馬上會偵測到此噪音值的變化，而對使用發出警告。微振動感測器通常是安裝在集管箱(Header)或預熱器上，當爐管或元件有裂縫形成時，高壓流體流經此裂縫時即會使金屬產生高頻的振動，此高頻之金屬振動會沿著金屬表面傳遞至感測器，當感測器接收到此異常的金屬振動時即會對使用者發出警告。利用這種方式可以連續監測爐內的情況，

包括吹灰器的使用狀況、吹灰器是否完全關閉等狀況，都可由系統中看出。



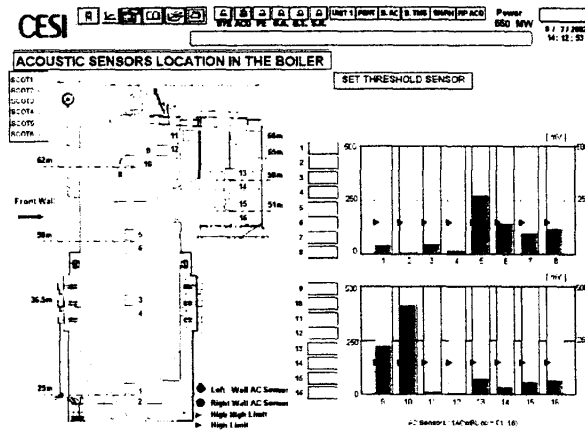
爐管洩漏偵測的重要性在於能在裂縫還很小時及早發現，讓使用者能有充足的反應時間，進行電力的調度或安排檢修計劃，同時因為感測器安裝的範圍涵蓋整個爐體區域，故能在很短的時間內判斷洩漏發生的位置，減少停機修復的時間。

爐管溫度監測主要是將熱電偶植入管壁中，利用二十四小時連續且即時的監測爐內的溫度分佈情形。溫度監測可分為兩個部分：水牆管的溫度監測以及過熱器和再熱器之溫度監測。在水牆管溫度監測的部分，依照爐體的大小安裝數個裝有熱電偶的量測管，每個量測管中都有三隻熱電偶，分別用來量測靠火側的管內壁溫度、管外壁溫度以及管內的流體溫度，並且可利用這些量測到的數值計算出爐管的平均溫度以及熱流量。而在過熱器與再熱器的部分，所安裝的量測管可有二至三個截面安裝熱電偶，可量測爐管內外壁的溫度並計算熱流量以及平均溫度。爐管平均溫度的變化曲線則是用來判斷管內壁積垢情況的重要依據。而連續監視爐管的金屬溫度也可以避免爐管長期處在過高的溫度下，而導致金屬的機械結構破壞並加速爐管的老化以及增加破管的機率。

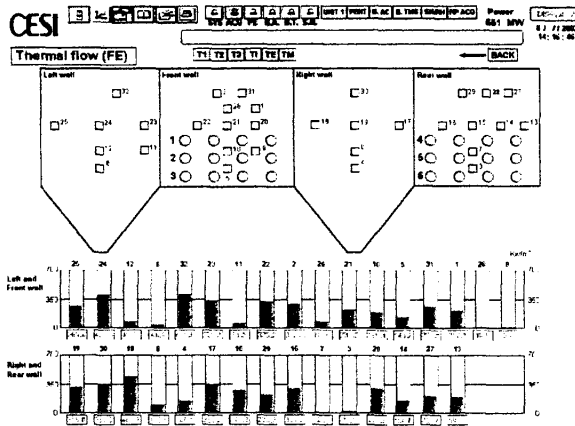
上述所提到的所安裝的感測器以及熱電偶所收集到的訊號，會先送到安裝於現場的訊號收集箱，再利用一條 FIELDBUS 串連所有的訊號收集箱，將各不同種類的訊號送至控制室中的個人電腦做資料擷取、資料後處理以及人機界面的呈現。並提供警告接點輸出至電廠控制室的控制盤，若有洩漏或爐管有溫度過高的情形發生，系統就會馬上發出警告，提醒使用者應做相關的處理。

此系統為一永久安裝系統，並不需要特別的系統維護，亦不須要定期的人員檢查，系統本身會定期作自我檢查，若有任何的感測器失效或訊號傳異常，系統也會對使用者發出警告，提醒使用者處理。

“鍋爐爐管洩漏以及溫度監測系統”已經使用超過十五年的時間了，在歐洲各國使用都有良好的成效，且感測器及系統的故障率低，一旦整個系統安裝完成並且穩定後，幾乎不須要任何維護，且能正確的偵測出洩漏的產生。



左圖為 LTMSYSTEM® 之人機介面。畫面中顯示為音頻感測器所偵測到之訊號



左圖為 LTMSYSTEM® 系統根據熱電偶量測到之溫度所計算出水牆管之熱通量分佈情形

4.2 爐膛燃燒狀況監測系統(T-SONIC®)

由義大利國家電力綜合研究院(CESI)所研發出的 T-SONIC 為量測爐膛或排氣管內溫度分佈之最佳工具。

若能了解燃燒室中的真實情況以及溫度分佈的情形，可幫助使用者適時的調整燃燒過程，避免煤灰堆積而降低熱交換的效率；此外，了解爐膛內溫度分佈最大的優點在於可防止元件因長時間暴露在高溫的環境下而加速材料的劣化。

在燃燒室上方所欲量測截面之爐壁四周安裝多個感測器，每個感測器都具有傳送與接收的功能，因為聲音在空氣中的行進速率會受到溫度的影響，故可繪出某一截面的溫度分佈情形。

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

c : 聲速

γ : 等壓比熱與等容比熱之比值

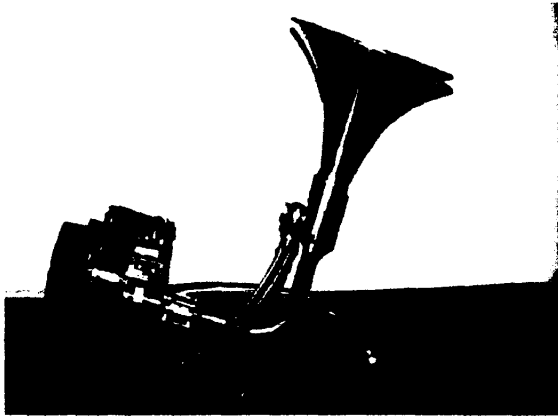
R : 氣體常數

T : 絕對溫度(K)

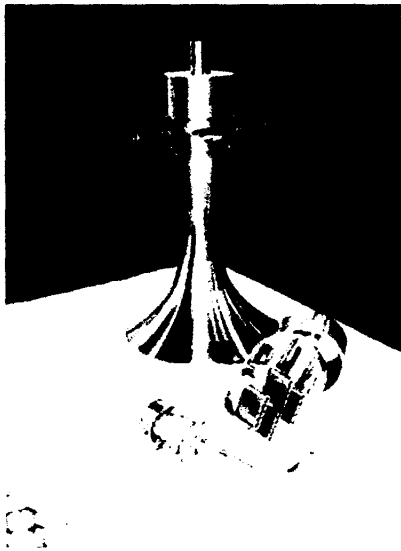
M : 分子量

在資料擷取的部分，此裝置也是利用 FIELDBUS 連接現場所有的感測器後再將訊號送至控制室中的個人電腦做資料後處理並呈現於人機介面上。

經過實際的運用以及長時間不斷的改良，新一代的 T-SONIC 除了採用雙層導波管的設計外，為了方便安裝而更新設計，不用像過去一樣為了要安裝一個感測器而彎曲很多隻水牆管，新的 T-SONIC 不用彎曲爐管即可直接安裝在水牆管上，如此的設計可大幅減少安裝的成本以及安裝時間。



T-SONIC[®]訊號傳送接收器



左圖為新一代 T-SONIC[®]之導波裝置，安裝方便，不用彎曲水牆管即可安裝導波管，不用擔心水牆管之強度與應力問題。而此導波裝置採用雙層設計，加強其散熱能力



左圖為 T-SONIC[®]量測並計算出的爐腔溫度分佈情形

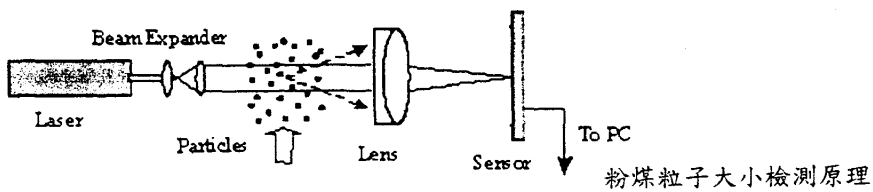
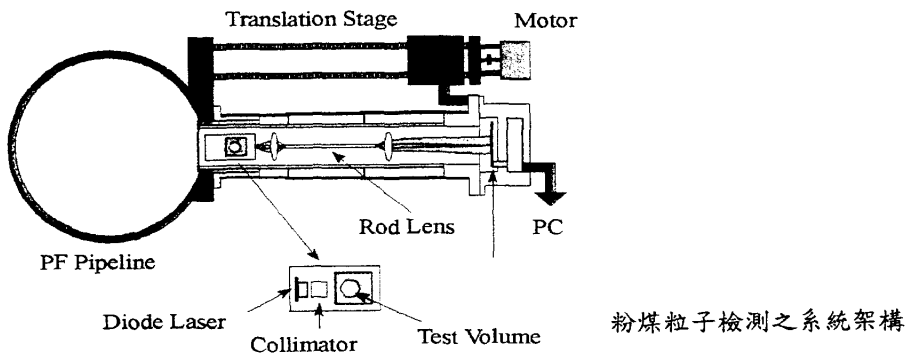
4.3 粉煤粒子檢測系統(COPS[®])

粉煤粒子的大小關係著鍋爐的效能以及環境影響評估的結果，可作為維護人員診斷粉煤機效能的依據。此外，在量測輸送管中所傳送的粉煤濃度有助於檢測不同燃燒器間燃氣比的差異。

目前普遍的作法是以人工取樣，不但耗時費力亦無法提供即時的資訊，幫助控制室的操作人員採取立即的對策。

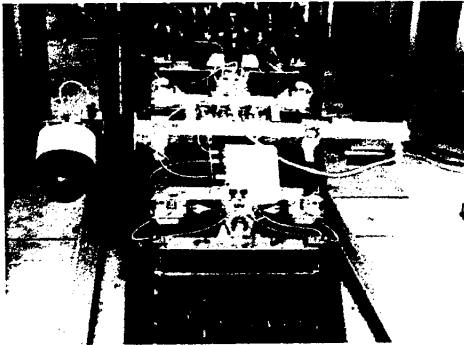
CESI 所發展出的 COPS(Coal Optical Particle Sizer)為一全自動的粉煤粒子監測系統，可即時量測粉煤的粒子大小以及濃度。

COPS 的基本原理為利用受測粒子光線散射所造成波長的伸展，量測散射角度的改變與分佈情形以計算粉煤粒子的大小與濃度。



4.4 爐內檢查機器人(SISPER[®])

爐內檢查機器人可用來檢查爐膛內水牆管以及燃燒器的使用狀況。使用機器人的優點在於它可承受較高的溫度，不須等到爐內冷卻即可進行探視的工作。此機器人為遙控操作，利用電纜線一方面可做電源供給另一方面亦有懸吊支撐的功能。此機器人配有彩色監視器，以及照明裝置，可在照度不足的時候補充光源。操作人員可在爐內利用遙控器操作機器人的移動並且同步看到爐內的影像。



上圖為 SISPER[®]外觀



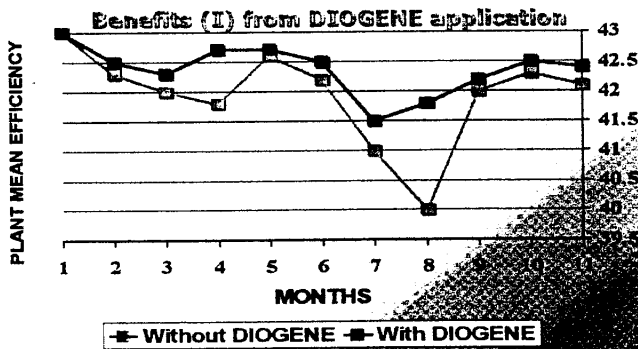
上圖為 SISPER[®]之遙控器以及監視器



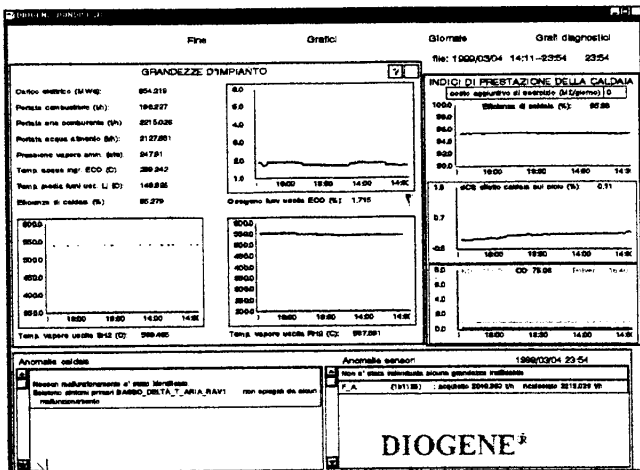
上兩張圖為 SISPER[®]所拍到爐膛內燃燒器的情況

4.5 其它線上即時診斷裝置

除了利用各種裝置監測電廠各設備的運轉情況外，CESI 也開發許多監測軟體系統工具，可直接與電廠系統做連結，做一即時的效能監測與診斷，可有效的增加電廠各設備的可用性及效率、降低污染物、延長使用壽命，並可明顯的降低運轉與維護成本並且減少人員的負擔。這些線上監測系統涵蓋了整個鍋爐本體及其附屬設備；PRECON[®]為一即時的線上監測系統，可隨時記錄冷凝器的效率以及冷卻水的循環過程，若有任何導致系統無法最佳化的因素，PRECON[®]都會及時告知使用者，方便使用者進行調整。PERTUR[®]為一即時監測汽機效率之軟體工具，可評估汽機的效能並找出導致汽機效能降低的原因，此設備的優點在於可即時偵測到任何異常的狀況，方便使用者快速的發現問題所在並做出因應對策。DIOGENE[®]整合電廠中一些重要的參數，針對電廠的整體效能做一即時計算與評估，並找出導致效能降低的原因，經由此系統可將電廠整體平均效能保持在一最佳的狀態，並且將對環境的衝擊降至最低。



左圖為使用 DIOGENE[®]後之情形，圖中顯示出在使用此診斷系統後，電廠的整體平均效能都往上提昇



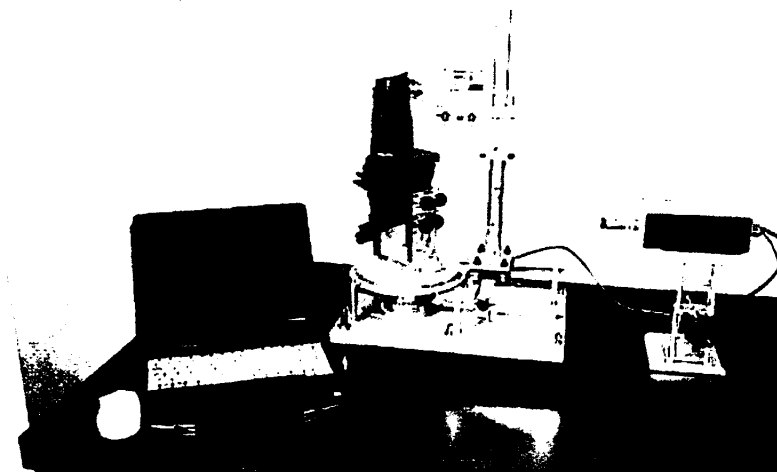
左圖為 DIOGENE[®]系統之人機介面，在操作使用上非常方便

5. 元件表面處理及材料科學相關之應用

在元件表面加一保護塗層已被廣泛的接受，只要塗層的材料與方法適當，保護塗層可以有效的防止基材的氧化、侵蝕以及磨耗。品質優良的塗層可延長元件的操作壽命並且確保基材發揮最大的功用。從塗料的研發、塗佈的方式到塗層的更換與修復，CESI 在各領域均有涉獵且有相當卓越的成效，CESI 在規劃這些塗料或程序時，都會考慮到材料本身的特性以及其使用環境的限制，以期能達到最好的功效。以下將針對 CESI 在此領域所發展出的一些系統及技術做簡短的介绍。

5.1 量測塗層的厚度並評估塗層耗損的情形(F-SECT[®])

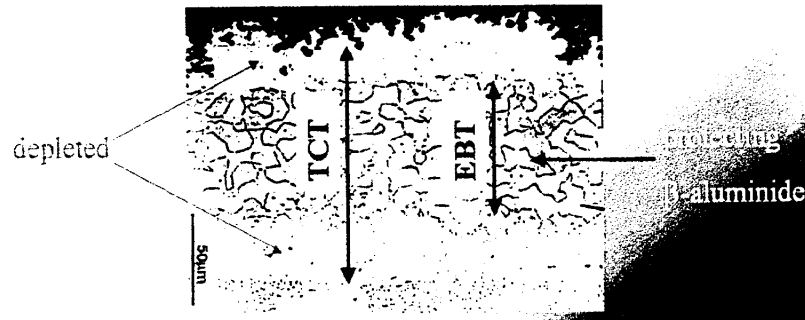
根據統計，以複循環的機組(combine cycle unit)而言，幾乎所有導致被迫停機的原因都是來自於汽渦輪機的熱段元件(hot section component)，特別是汽機的葉片因為長期處在惡劣的環境中，特別容易加速材料的劣化！為了要使葉片免於氧化、侵蝕與熱應力的破壞，通常都會在材料表面做一保護塗層，但這些塗層會因為長時間的使用劣化而失去其功能。



F-SECT[®]系統利用非破壞性的方式，對全新或已使用過的葉片進行狀態評估，量測與塗層有關的參數：

塗層厚度(thickness)

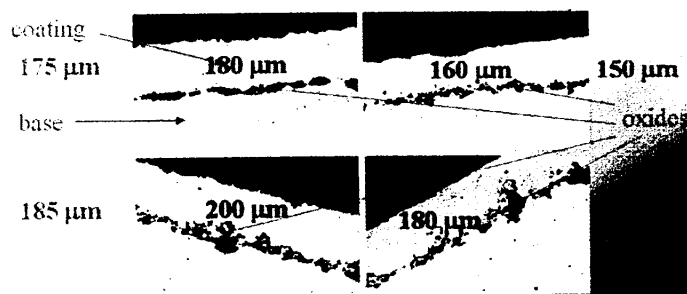
β -phase 之耗損



上圖為 $MgAlY$ 之 β -phase 成分。

其中，TCT 為總塗層厚度(Total Coating Thickness)

EBT 則為換算後之 β 厚度(Equilibrium Beta Thickness)

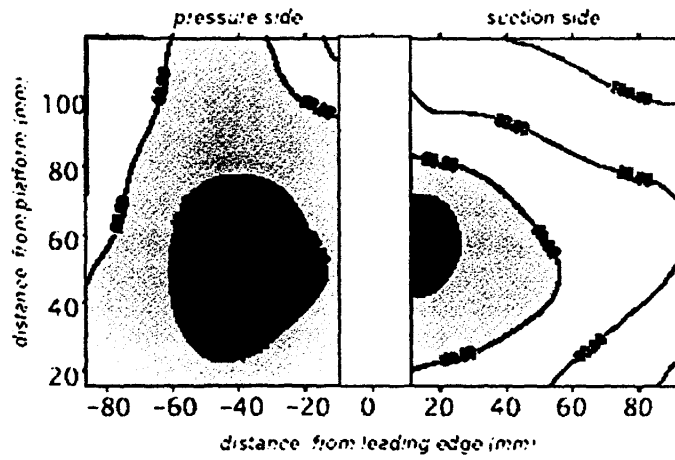


左圖為用 F-SECT 方式所測得之塗層厚度

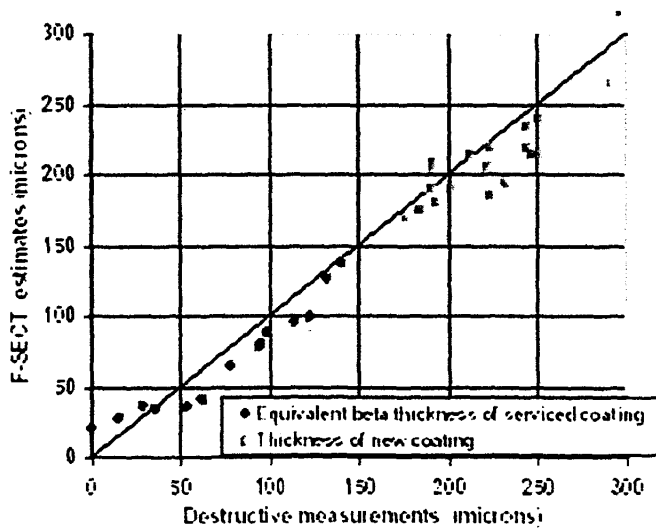
此系統主要利用頻率掃描渦電流(Frequency Scanning Eddy Current)的技術，利用塗層與基材不同的材料特性，以量測塗層的厚度。

一般來說，為了有效的涵蓋整個塗層範圍並得到正確的數據，每個葉片通常會取 18 個採樣點，每個點的取樣時間約為 3 分鐘。系統會將所量測到的數據利用軟體及數學模型進行分析，計算塗層的厚度並評估塗層的耗損情形。

此系統適用於實驗室分析，亦可直接在現場進行檢測。



F-SECT 量測到之殘餘 β -phase 百分比值。被測物為 Amdry995/Udimet520，第一階段葉片，運轉時間約為 15,000 小時。



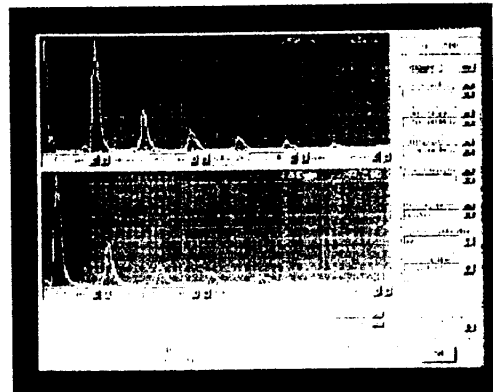
F-SECT 所量測到之新的塗層厚度，以及預估運轉一段時間後 β -phase 之厚度。

5.2 非接觸式量測爐管厚度(ECOMAT[®])

ECOMAT[®]主要利用非接觸式的探針進行非破壞性的檢測，此方法可量測爐管的厚度、評估爐管的殘餘應力、偵測缺陷以及缺陷所在的位置，具有相當好的解析度以及準確度。

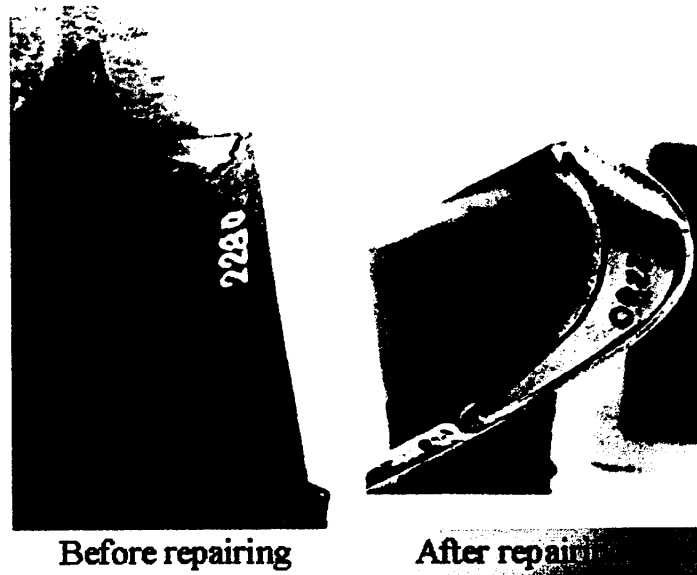
傳統利用超音波做檢測是使用壓電元件，此種感測器的缺點在於為了有效的傳送與接收超音波訊號，必須要在感測器與待測物間使用一介質(coupling)確保訊號的傳遞，但若待測物為移動式、待測物處於高溫的環境、或材料表面有保護塗層或氧化層，此類型的壓電元件就無法得到很好的結果！除此之外，此介質本身亦有可能影響訊號的穩定性以及再現性。

為了要克服此缺點，CESI 發展了 ECOMAT[®]，主要利用電磁音頻轉換器(EMAT, ElectroMagnetic Acoustic Transducer)，此種感測器利用電與磁間的交互作用而產生超音波，故不須在感測器與待測物間添加介質，用此方式產生的超音波有時會因為爐管表面有氧化層的關係而得到更好的效果，也因為這個緣故，利用此方式偵測爐管厚度不須清除管壁的氧化層即可進行。此系統有不同種類的探針，可根據使用者不同的需求搭配使用。



5.3 葉片塗層修復與葉片修復

就如先前所提到的，為了要使葉片表面免於氧化、侵蝕、熱應力作用以及磨耗等，通常都會在葉片表面做一保護塗層，但因為長時間暴露在惡劣的環境之中，保護塗層亦會因為劣化而失去其應有的功能。但是因為更換一新葉片的成本相當高，故 CESI 運用在材料科學領域累積二十餘年的經驗以及技術，致力於研究發展，在不傷害葉片本體的前提下，修復葉片表面的保護塗層，而經由此技術的發展，即使是葉片本身有損壞或缺口，CESI 目前已有能力利用再生的方式重建(rebuild)葉片，而不用更換新的葉片。



CESI 目前是以雷射塗佈(Laser Cladding)的方式做葉片修復；利用此技術可在葉片表面做一 1~2mm 厚之保護塗層，若葉片有缺口的話，雷射修復可再生約 15mm 之厚度。此技術最大的優點在於加工過程中，因為熱影響區域(Heat effected zone)小($<0.5\text{mm}$)，故基材所受的熱應力較少，且塗層與基材間的晶界不會有脆化的現象產生。

除了雷射塗佈，CESI 亦使用 HVOF 技術做材料表面處理，此法主要用來防止材料表面的腐蝕並且防止表面受到微粒子的侵蝕而減低其機械強度。

HVOF 塗層的特性如下：

空孔度低： $< 1\%$

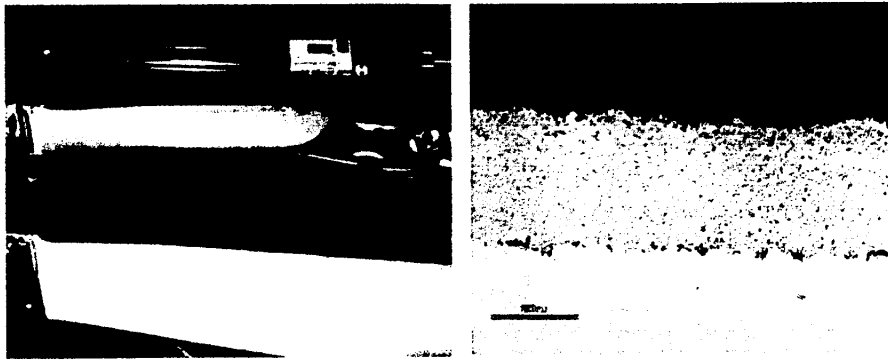
完工後的塗層厚度約為 $0.1\sim 0.2\text{mm}$

完工後的表面粗糙度： $< 0.8R_a$

與基材間的結合力： $> 40\text{MPa}$

表面處理與無表面處理之區域間為一平順之界面，不會有落差存在

整個加工為一低溫過程，元件不會受到熱應力的影響



– HVOF chromium carbide coatings of
26" steam turbine blades

5.4 塗層品質、塗層與基材間聚合力評估

在保護塗層技術被廣泛應用的今天，如何檢查塗層的品質並且確保塗層有基材間有足夠的聚合力(adhesion)即成為元件使用者非常重視的課題；若塗層的品質不良，塗層與基材間沒有足夠的聚合力而導致塗層脫落，就會使基材直接暴露於惡劣的環境中而導致基材受損。

為了要能有效的檢驗塗層的品質，並了解塗層的耗損情況，CESI 發展了兩種非破壞性的檢驗技術：熱影像法(Video Pulsed Thermography Technology, VPT)以及紅外線放射法(Time Resolved Infrared Radiometry, TRIR)。VPT 可用來偵測塗層與基材之間是否有缺陷存在。這種方法之理論基礎以及實際應用方式簡述如下。

VPT-Video Pulsed Thermography

一般而言，若要檢查晶界的缺陷，通常都是利用一熱源先加熱，再觀察降溫過程中元件的溫度分佈情況以及溫度變化隨時間的關係。元件的溫度分佈情況會受到缺陷的影響，若以紅外線照像機記錄整個降溫過程，缺陷的部分會呈現一明顯的熱點。溫度隨時間的變化可用以下之方程式計算：

$$T\delta(0,t) = \frac{2Q}{\varepsilon\sqrt{\pi}\sqrt{t}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[(R_{1A}^n - R_{12}^n) e^{-\frac{n^2 L^2}{\alpha}} - R_{1A}^n e^{-\frac{[(2n-1)L + \sqrt{L^2 + R^2}]^2}{4\alpha}} \right]$$

其中， $\varepsilon = \sqrt{\rho C k}$ 塗料之熱消散係數

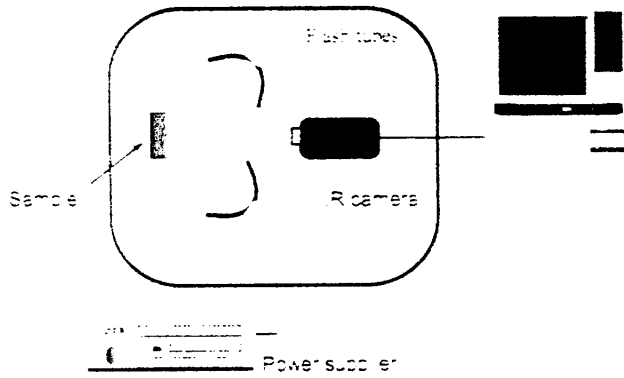
$\alpha = \frac{k}{\rho C}$ 塗料之熱擴散係數

R 為元件中之缺陷半徑

L 為缺陷的深度、Q 為熱源能量密度

$R_{12} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ ， $R_{1A} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_A}{\varepsilon_1 + \varepsilon_A}$ 下標 1,2,A 分別代表塗料、基材以及空氣

量測設備包含兩具閃光燈、一具紅外線攝影機與個人電腦連線，可即時將影像傳送至電腦做資料儲存以及處理。



上圖為 VPT 之設備架構



上圖為 VPT 所呈現之三維影像，圖中顯示出六個塗層與基材間界面的缺陷，缺陷尺寸為 1mm 至 6mm 不等。此樣本基材為 AISI316，塗料為 ZrO_2 7wt% Y_2O_3 。



左圖為 VPT 所觀察到一直徑 5mm、右圖為一直徑 10mm 之環狀缺陷。使用真空電漿塗佈(Vacuum Plasma Sprayed)方式將 NiCoCrAlY 塗料置於 AISI316 上。

5.5 陶瓷管接點結合力評估

為了能在非常高溫的環境下運作，如超高溫熱交換器(Ultra High Temperature Heat Exchanger)，以陶瓷複合材料(Ceramic Matrix Composite)為基礎的管材開始被不斷的發展與應用。在此同時，如何有效的連接兩段陶瓷管並且確保接著的強度即成為一重要的課題。而兩管間的接著強度關係到材料的可靠度與可用性，故非破壞性的接合強度檢測方式應孕而生。而由 CESI 所發展出的紅外線熱影像法(Infrared Thermography)為最有效的方式。此檢測法最大的優點在於此法為非接觸式量測、可呈現大面積的影像區域並可在現場做檢測。利用熱阻抗判斷兩管的接合品質，若熱阻抗越高表示接合的強度越差。

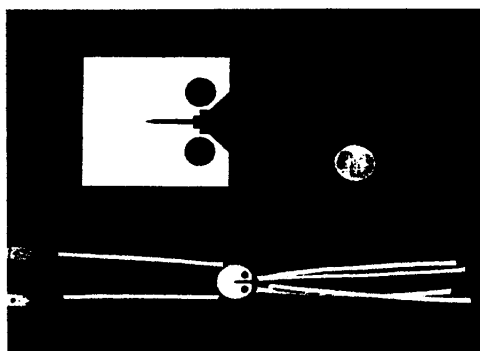
系統包含一紅外線照像機以及 900W 之日光燈。用一計時器設定加熱時間為 1.5 秒。將此熱源置於兩管銜接處，當供給熱源時，熱會同時沿著軸向與徑向傳遞，而熱擴散的速率與接合處的擴散係數有關；隨著表面溫度的不同，擴散的速率亦會有極大的差異。若兩管的接合度不佳，熱擴散通常都發生在軸向，反之，若兩管的接合很好的話，在徑向亦會觀察到很明顯的熱擴散。



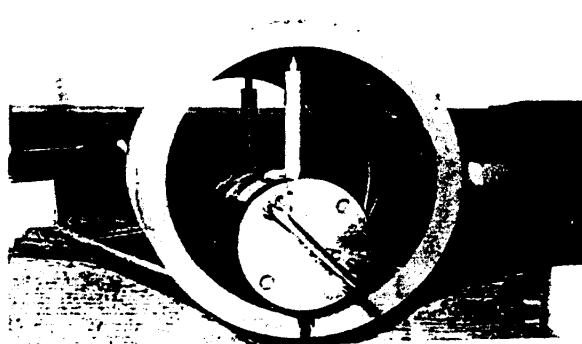
上圖為用紅外線熱影像法觀察兩陶瓷管接合處附近之熱擴散現象。左圖為兩接合品質不佳的管材所呈現出的影像；高溫區明顯集中在接合處附近，主要的原因在於接合不良而使得熱能無法有效的傳遞。反之，右圖為一接合品質良好之管材，故溫度的分佈較均勻。

5.6 非破壞性微小試件採樣及分析系統(SMALL PUNCH[®])

為了有效評估電廠中重要設備元件如汽鼓、鍋爐之蒸氣集管處以及渦輪機等之剩餘使用壽命，在不破壞元件主體結構強度及機械性質的前提下，本系統利用非破壞性取樣方式檢測元件材料所受之應力、破壞韌性(fracture toughness)以及其它相關參數。

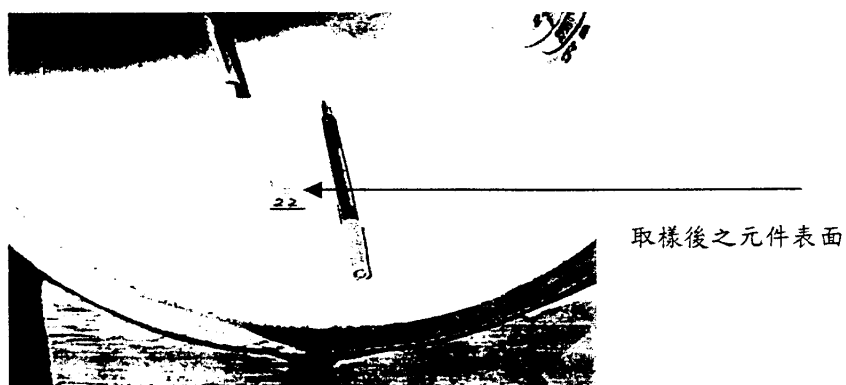


利用取樣器所取得之微試件



SMALL PUNCH[®]可取管內壁之樣本作分析

SMALL PUNCH[®]根據放電侵蝕的原理，配合電腦控制供應至電極之電源大小，以純化循環的去離子水為介質，兩電極間的電壓會因為介質與電極間距大小的改變而產生放電，經由放電而形成的微融合(micro-fusion)現象即會侵蝕材料本身，而取得欲作試驗的樣品。此系統須能準確的推算材料的 50%脆-韌轉換溫度 FATT (Fracture Appearance Transition Temperature)以及破壞韌性 KIC(Fracture Toughness)，且能隨時更新資料庫中的內容。

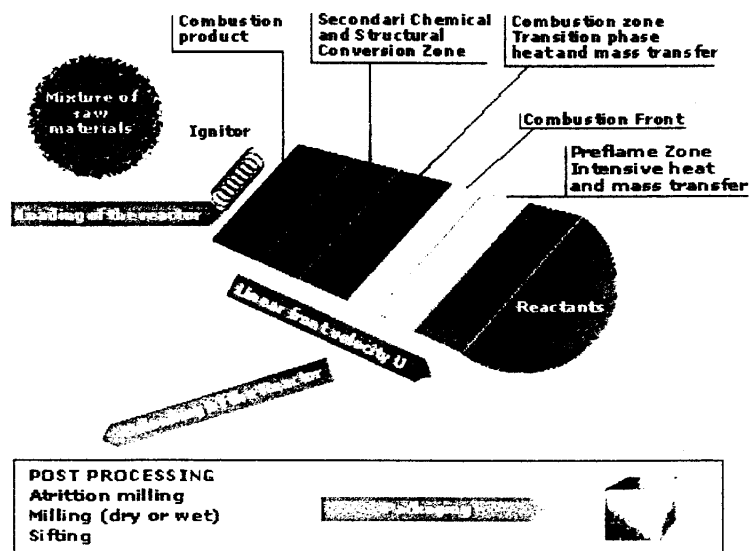


取樣後之元件表面

肆、陶瓷金屬複合材料合成技術介紹

1. 高溫自行燃燒合成法介紹

高溫自行燃燒合成法(Self-propagating High-temperature Synthesis ;SHS) 簡稱自燃法, SHS 是一種相當新穎且具發展潛力的合成方式, 為 1960 年代冷戰時期前蘇聯於研究飛彈固態過程中, 由 Merzharlov、Borovinskaya 及 Shkiro 為首的研究小組所發現的一種新現象, 至今亦不過三十多年, 其關鍵在於大多數精密陶瓷材料合成之初始反應物在反應過程中所具有的高溫高放熱特性。因此在以 SHS 合成精密陶瓷材料時, 可利用此特性, 只需於反應物粉末所壓製成的生胚(green peliet) 一端施予高溫熱源, 如鎢絲力口熱線圈、乙烘-氧焰、石墨加熱片、紅外線、雷射或微波等。當外界所提供之能量克服反應之活化能後, 反應燃燒波即由受熱端向未反應端傳遞, 如下圖所示。

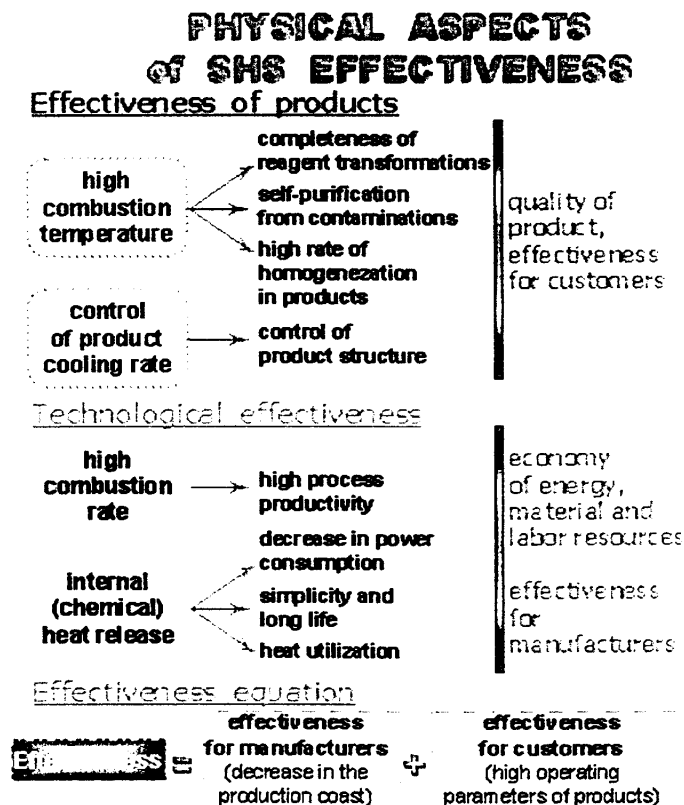


此時可立刻停止外界能量的供應, 因為藉由受熱端反應時所放出之巨大反應熱可提供作為下一層反應物克服活化能之用並繼續反應, 使燃燒波得以連鎖反應的方式傳遞至另一端, 將反應物轉化成產物。燃燒波傳遞的速度極快, 隨著反應系統的不同, 其燃燒波傳遞速度通常介於 0.1~25cm/s 之間, 因此整個反應過程所需時間極短。

SHS 相較於其他的合成法,除了上述的反應時間短外,還具有以下的優點:

- (1)製程簡易,因此設備所需成本很低。
- (2)反應僅需提供克服活化能所需之能量,能量消耗少。
- (3)反應過程中產生的高溫放熱可將反應物內的雜質揮發逸出,得到高純度產物。
- (4)反應過程中溫度升降的速度非常快,使得反應物內部的溫度梯度極大,因而可藉此得到介穩態相(metastable phase)和中間相(intermediate phase)。
- (5)用途廣泛,合成產物除了非氧化性結構陶瓷(carbides、nitrides、silicides等),亦包括合金及介金屬材料,若調配適當的反應物,則可製備功能性梯度材料(Functional gradient materials,FGM)。
- (6)若於反應過程中結合其他加壓成型技術,則可同時進行合成及燒結成型,得到緻密的精密陶瓷產物,如此可簡化製程,進一步的節省設備成本。

SHS 反應特性綜合分析如下圖所示

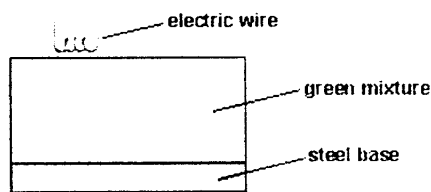


2. 高溫自行燃燒合成之應用

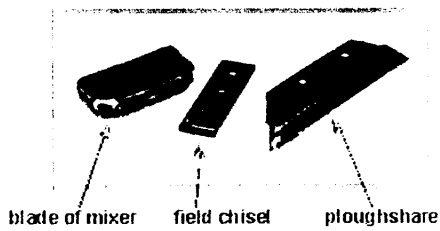
以 SHS 法配合外加應力可以得到完全緻密的複合材料，因為具有高強度、化學穩定性優良、耐磨、耐高溫、韌性好、導熱性和導電性好等性能，在許多工業領域如機械工業、汽車工業、化學工業建築領域以及航空航太領域等應用範圍廣泛，未來發展遠景頗受重視。

PROTECTIVE COATINGS by SHS SURFACING

Scheme of experiment

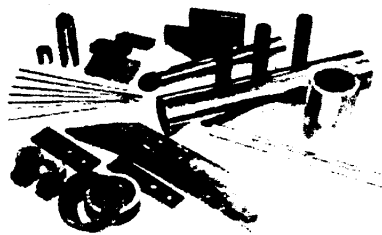


Parts with SHS coatings



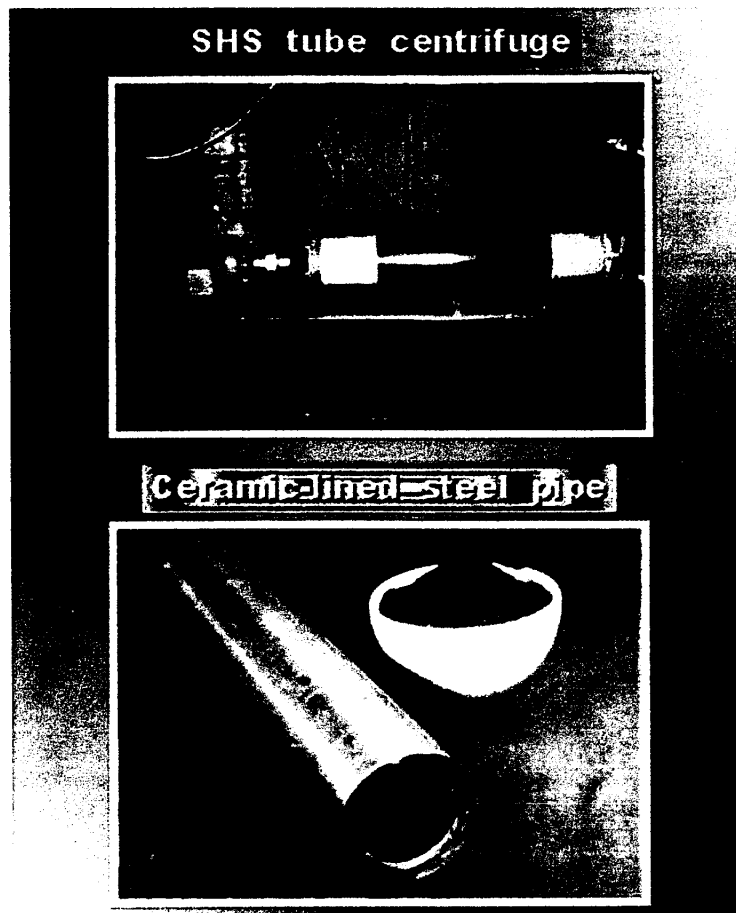
利用 SHS 技術在鋼材表面製作高耐磨陶瓷層

ITEMS OBTAINED BY SHS TECHNIQUE



- ✦ Blade of mixer
- ✦ Part of soil cultivating machines
- ✦ Military and cermet tubes
- ✦ Abrasive tools
- ✦ Electrodes

SHS 製作之各種產品



SHS 結合離心鑄造技術生產氧化鋁複合陶瓷管

3. 緻密化加壓方式

SHS 的合成方法可以與各種不同的施壓方式合併使用,進而對於我們所需的緻密化產物進行緻密化的動作。緻密化的施壓方式雖然非常多,但並不是每種反應系統都適用,必須針對各種反應系統的特性選擇適合的施壓方式,如此才能達到提昇緻密度的效果。下文將對一般常用的緻密化加壓方式及相關文獻做一簡介。

3.1 單向加壓法(Single-Axial Pressing ,SAP)

單向加壓法裝置是採用單向彈簧加壓成型的方式進行緻密化。操作時先將裝有反應物料的模具和加壓用彈簧放置在萬能材料試驗機上,抽真空後先進行預壓,而後在給定之壓力下引燃反應物。隨著反應的進行,彈簧的壓力會對具有可塑性的產物部分進行施壓。在施壓的過程中,隨著反應產物體積逐漸收縮,彈簧長度會隨著伸長而減少壓力,如此可以避免合成產物因為受到過大的應力而發生破裂。

單向加壓法的優點在於可以在反應過程中隨著反應物的收縮來加壓,加壓方向與燃燒波傳遞方向一致,如此可使得反應合成區得到有效的緻密化。但是由於彈簧的壓力有限,因此只適合用於小尺寸的產物合成,適用範圍不大。此法成功案例是以鈦、硼與鎳粉在 25MPa 壓力下合成了 TiB₂-TiNi 的緻密複合材料。材料密度與 NiTi 化合物所佔比例有關,對於 TiB₂-NiTi 系統而言,當 NiTi 含量為 80% mol 時,相對密度可達 98%。

3.2 熱均壓法(Hot Isostatic Pressing ,HIP)

熱均壓法是利用高壓惰性氣體作為加壓介質,在產物受熱具可塑性的同時對其施以各方向的壓力,壓力約為 100~200 Mpa,因為此法之加壓方式為均勻加壓的模式,所以可用以複雜形狀物件之製造。以熱均壓法製造的產物性質雖然非常均勻,但是由於需要可承受氣體高壓的裝置,所以在設備的設計製造與安全性的考量必須相當注意。

以此法合成 Fe₃Al 及 Fe₃Al+Cr 的緻密材料為例,合成方法為將欲反應的粉末先以 210 MPa 的壓力預壓,製成相對密度約 70%的反應生胚,並將反應生胚放入鎳管中,抽真空後密封。反應過程中先將溫度控制在 400°C,壓力為 140 MPa,之後再以 20°C/min 的升溫速度將溫度升至 1000°C,升溫的過程中壓力保持一定。生胚反應溫度約在 600°C,待反應完成後以機械方式將鎳管取出,所得最終產物相對密度高於 99%,幾乎完全緻密。

3.3 擬熱均壓法(Pseudo-Hot Isostatic Pressing 'P-HIP)

擬-熱均壓法裝置及方法之原理與熱均壓法相似,但是其施壓介質則是以鑄砂代替熱均壓法中的高壓氣體,優點是沒有熱均壓法中安全上嚴格的考量,且鑄砂的可壓縮性小,不易變形,壓力容易傳遞。此外更因鑄砂的保溫性良好,更可延長產物的塑性時間。缺點是產物的形狀不能如熱均壓法中的產物得到良好的外型控制。一般只用於製備大尺寸製品和高放熱反應系統

3.4 等靜壓法(Isostatic Pressing 'IP)

等靜壓法之原理與熱均壓法及擬熱均壓法類似,但是其施壓介質則是以高壓液體代替。缺點與熱均壓法同為需要較複雜的耐高壓裝置,但是此法的成本較熱均壓法低,僅需熱均壓法的 1/10。

採用此法合成 TiB_2 . $TiNi$ 的複合材料,其過程是將反應物料先在 50 MPa 的壓力下預壓,再以 200 MPa 的壓力冷壓成形。之後將反應生胚裝入一金屬包套中,在高壓反應器中於 45 MPa 液體壓力下引燃反應物,反應完成後所得產物密度可達 98%。

3.5 熱爆-加壓法

熱爆-加壓法是將反應生胚整體加熱直至 SHS 反應發生後進行加壓,使之達到緻密的效果。加熱方法有對反應生胚直接通電和間接加熱兩種,當整個反應生胚達到點燃溫度時,整個生胚會整體發生 SHS 反應,即所謂的熱爆反應。

目前有以熱爆-加壓法成功的製備了相對密度達 95%的 TiC 實例。其過程為將裝有鈦與碳混合粉末的石墨模具迅速加熱至點燃溫度 $1600^{\circ}C$ 發生熱爆反應,使其溫度達到 $2800^{\circ}C$,此時迅速加壓得到緻密的材料。此外,也利用此法製備了相對密度高達 98%的 TiB_2 。

3.6 氣壓燃燒燒結法

氣壓燃燒燒結法是在一高壓設備中設置一個裝有高放熱混合粉末的坩堝，將反應生胚以真空玻璃封裝後埋入上述粉末中，在高壓裝置充滿惰性氣體後點燃混合粉料，混合粉料反應自守所產生的高溫引燃反應生胚發生反應，如此便可在較低的氣壓下(約 100MPa)使材料達到幾乎完全緻密。反應進行前必須先將反應生胚加熱至 700 °C，使玻璃包套軟化，此法可直接合成所需形狀的產物，但必須製造形狀複雜的玻璃包套是其缺點。

3.7 動態施壓法(Dynamic Compaction ,DC)

動態施壓法有多種不同加載形式，其中以爆炸衝擊施壓法(Explosive Compaction)較著名。爆炸衝擊施壓法原理是利用炸藥爆炸時所產生的動能驅動施壓衝頭，對點燃後發生燃燒合成反應的產物施加壓力，快速地将產物緻密化。

Hoganaus 公司以爆炸衝擊施壓法成功的合成了相對密度分別為 99%與 96.8%的 TiB₂ 與 TiC 材料。此外，也有其他研究同樣的利用此種合成法合成了相對密度達 95%的 TiC-Al₂O₃ 材料。爆炸衝擊法除了可以用於合成陶瓷材料外，亦可用於合成金屬間化合物，如 NiAl, TiAl 等。

伍、感想與建議

1. 義大利國家電力綜合研究院能夠在民營化後仍活躍於歐洲，並在電力系統領域中佔有一席之地，成為世界三大電力研發機構之一，主要原因除了具有健全的組織架構外，成功整合了最新的技術，配合電廠的實際需求，將理論基礎化為實際可應用且商業化之系統也是關鍵因素。從輸配電網路架構、定型試驗、環境影響評估到如何有效的降低營運成本，提昇電廠之效能均有良好的實績，而在材料科學領域的研發，雖然是以電廠運用為出發點，但在工業界的應用亦相當廣泛，且技術成熟，未來亦將成為此一領域的領導者，不論技術面或管理面，可供本公司借鏡之處甚多。
2. 結構陶瓷材料已在 3C 產業應用廣泛，未來在新一代熱機引擎或渦輪機上的應用已是必然趨勢。自蔓延高溫合成技術(SHS)具有耗能少、效率高、產物純和工藝相對簡單等優點，日益受到了各國科研人員的高度關注。利用 SHS 技術不僅可以合成碳化物、硼化物、矽化物、氮化物及金屬間化合物等 500 多種化合物，而且也是製備陶瓷/金屬複合材料的重要方法之一。但採用 SHS 直接合成的材料往往是多孔的、疏鬆狀的，不能作為結構件用。近年來，發展 SHS 同時緻密化技術成為研究的熱點，目前雖然已經有部分商用產品問世，但均尚未進入市場規模，後續發展仍值得密切注意及仔細評估。