

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

計畫類別：個別型計畫

執行期間：89年8月1日至90年7月31日

執行單位：國立台灣大學生物產業機電工程系所

一、中英文摘要

本計劃旨在開發一種逆向工程法。其根據「統合設計理論」為基礎，整合LESA-KO脈沖式雷射機型進行試片的發散光譜偵測與統計採樣分析，並利用電子顯微鏡對穴坑內外微觀結構的空間變異性進行形像解析，再利用化學元素測微儀對微量成分的空間變異性作輔助偵測，用於航太引擎葉片之超合金與鈮氧化鋯保護被覆材料成分與微觀結構質量及其製程之合格性檢測。結果顯示本工法具有3D檢測能力，高靈敏度，切實可行。然實驗技法與系統「噪音」尚可改善。所得資訊的後處理模組的運算推演基礎理論與運算架構錯綜複雜，在循序建立。

關鍵詞：雷射，氣化，鈮氧化鋯，超合金，合格性，航太引擎，葉片，保護被覆。

Abstract

The aim of this project is to development a reverse engineering scheme suitable for qualifying aviation engine blade of super alloy materials and its YSZ (yttrium stabilized zirconia) protective coating. On the base of Unified Design Theory, it integrates LESA-KO for pulsed laser emission spectroscopy, augmented by SEM and EPMA techniques. Spatial variation in micro composition and micro morphological changes of ablated cavities and affected zones can be extracted for further examination. Results shown that our methodology is sensitive and viable for 3-D probing. Elaboration on testing techniques as well as system "noise" reduction is proposed. Involved fundamental theories as well as computation schemes for the subject inquiry is under development.

Keywords: laser, ablation, YSZ, super alloy, qualification, aviation engine, blade, protective coating.

二、緣由與目的

高溫材料科技、特殊製程、複合材料與介面性質分析與測試，係航太學門八十八年度規劃書中所列的重點研發的項目。航太引擎構件表面技術，特別是渦輪引擎的高溫壓縮葉片的表面技術，包括防止高溫氧化、抗剝蝕、抗耗、抗熱疲勞破壞的材料系統分析設計與製造能力，更一向屬於關鍵性產品技術。不同材質系統間的結構與熱穩定性問題遠比半導體薄膜技術嚴苛。本研究目的在建構以LESA-KO型雷射發散光譜(LES)材質檢測分析系統為主，SEM, EPMA等國科會貴儀中心的配備為輔，根據筆者開發的「統合設計理論」為基礎整合而成的，一種高功能的高溫引擎構件表面被覆層的3-D檢測系統與逆向工程統合技術。本期研究範圍在於開發此一整合型檢測系統的基本理論、工法，了解、掌握設計參數並建立運算模組架構。

三、結果與討論

產業發展情勢研究：

1. 市場面：Heimann(1996, p. 2)指出，精密陶瓷材料在1995年的銷售額約為\$4.1BUSD，與1986年比較表，2000年的銷售額應達\$3.0BUSD，其中引擎被覆材料的年成長率達28%，而汽、機車使用陶瓷引擎和表面被覆材料的發展，從銷售額度看來，亞洲遠低於西歐或美國，具有廣大的市場潛力。

2. 技術面：國內的航太研發工作已先後進行了鋁、鈦、超合金的塑性成形與固態接合、淨形鍛造，包括壓鍛、迴旋鍛、契橫扎等技術體系的引進與自力開發。機車業並已開發了「陶瓷引擎」

的生產技術。高速鋼粉末冶金的四面鍛，生產與成形技術亦已植基。刀具、模具、表面硬化及熱處理技術亦臻完備。對航太與能源工業所使用的渦輪機葉片的OEM與其品質驗證，漢翔公司(AIDC)業已累積了相當的經驗與產業技術。故台灣的高溫引擎葉片的技術市場開發條件實已成熟。LESA-KO機型係經筆者與GPI自1995年合作開發(歐陽又新, 2001)，本研究續作改進擴充已敷應用。

3. 策略面：如何整合國內有限的資源與技術體系，從小型商業引擎構件的材料與製造產業著手，藉策略聯盟切入產品市場應該是努力的方向。燃燒室高溫引擎葉片表面被覆技術系為此類產品上市前的最後一道加工環結，為成敗的關鍵，卻尚未受到重視。此問題的內涵複雜，包括日新月異的材料、製造、測試外，驗證面向的問題難以突破。如何提綱契領的解決關鍵問題。提昇自主性設計與檢測技術，拋磚引玉，期迎頭趕上，是本研究的興趣與目的。

4. 研究結果：利用與LESA-KO類同的LES方式進行鋁合金廢料之環保分類回收與再利用已見報導(Rosenfelt et. al, 1995)。本案針對研究需求，首先對SEM、EPMA等相關精密儀器的原理、功能(葉明勳, 1996)與LESA-KO整合使用的特性進行研究。根據筆者開發的「統合設計理論」設計了一個分為三區段的基本工法 - Waltz工法。其流程概示於圖1。對LESA-KO系統的靈敏度與可靠度進行環境測試與實驗參數評估與校訂的結果顯示，試片基地溫度的變化，試片表面因子包括瑕疵、雜質與幾何變異性等，對解析光譜的影響，尤其是對鈮氧化鎢影響相當顯著Ouyang (2001)。表1係LESA-KO的基本規格。選用脈沖式雷射式發散光譜分析法最大的優點在於試片的應用方便，幾乎不需要做前處理。利用LESA-KO進行試片測試的情況，與對

LESA-KO得到的發散光譜的討論，可參見Ouyang (2001)。在PICAST4數百篇論文中僅有美方的Zien從流力的角度介紹超音速氣流造成的固液氣相之質能變化問題，俄方的Kovalev論及氧化鋁固態燃料及團粒氣化原理與條件問題，但均僅具一般參考性。SEM+EDX、EPMA實驗係利用台大工材所設置的國科會貴儀配備。圖2、3顯示鈮氧化鎢試片在低能量密度氣化後所呈現的海棉結構；大小坑穴的基地孔隙組織無顯著差異。圖5與圖6顯示鈮氧化鎢受高能量密度氣化後其受熱衝擊龜裂的情況。圖4顯示超合金試片受高能量密度氣化後的穴坑及流變與融結狀態。實驗所得資訊的後處理模組的基礎理論與運算架構已在循序建立。精儀與零組件的發展更是一日千里。相關產業需求與應用廣泛，商業價值高。進一步改善並控制實驗條件以提昇精儀系統作業的堅實性(robust)並符合工業應用環境，尚待擴充。新世代的LESA-KO機型續在研究開發中，歡迎業界參與合作。

根據這些成分與結構性變化數據與雷射-試片質能變化與互動性以至於氣化(ablation)問題所涉及的繁複的基礎理論進行逆向工法，在有效時間、空間、與能量因素考量下一併解析，可合成(synthesize)微結構反應機制為基礎的運算軟體模組。能量束氣化固態物質的機制與介面條件的互動問題的本身為現今國際熱烈研究的課題，成果豐碩，科技精進(見參考文獻)。主題研究已經確立了此一適用於高溫引擎構件材料、製程的逆向工程架構。目前掌握了基本實驗設計參數。其涉及包括固態物理化學、量子力學、雷射電漿物理學與金相學等，至少十餘種主要反應機制與二十餘種重要參數之理論體系與邊界條件問題續待釐清。

四、成果評估與建議

本研究提出了一種運用工程設計方法，特別是依據筆者開發的「統合設計理論」來整合量子力學、固態物理化學、雷射電漿物理等基礎科學與材料科技、製造科技所形成的精密工法的理論，涉及跨產業、跨科技的系統整合設計開發與應用，著眼在精密機電材料與製造產業的前瞻性市場開發的需求上，對理論與實用上的發展與創新均具價值。初步成果已在國科會委辦的第四屆亞太航太科技會議 (PICAST4) 中發表，後續成果亦將循序披露。研究所所得映證了一些國際上近期的發表，而國內對本主題尚未見相關論著，顯見本計畫的原創與前瞻性。遺憾的是本主題後續的區區研究計畫案卻遭刪除，喪失先機，質疑航太學門前期規劃雖美，現今執行上的評審作業卻缺乏一致性、長期性的考量與專業性，於公於私損失慘重，值得檢討。

國內雷射研究在半導體工業與眼科手術應用的範疇甚為投入。生物醫技方面也在急起直追，經費較為充裕。唯獨在航太硬體製造領域則甚為落後，怪異如常。國科會貴儀中心的雷射精儀配備(清大)早經建立，現已相當侷限，亦應改善。

五、謝誌

漢翔公司(AIDC)廖思仁博士等協助提供試片使本研究得以順利開展特此致謝。

六、參考文獻

- [1] Antolovich S.D., R.W. Stusrud, R. A. Mackay, D. L. Anton, T. Khan, R. D. Kissinger, D. L. Klarstrom, Eds., 1992, Superalloys, MMM Society.
- [2] Askelund D. R., 1994, The Sci. and Eng. of Mat., PWS, Boston.
- [3] Rosenfeld, A., A Gesing and B. Farabakhsh, 1995, Sorting of Aluminium

by Laser Induced Optical Emission Spectroscopy, Proc. 3rd Symp. On Recycling of Metals and Engineered Materials Edited by P. E. Queneau and R. D. Peterson, MMM.

- [4] Heimann R. B., 1996, Plasma Spectroscopy - Laser Fields, Springer-Verlag.
- [5] Kelley R. and A. Miotello, 1999, Materials Science Forum, Vol.301, Trans.Tech. Publ., Switzerland, 145-190.
- [6] Ouyang Y. S., 2001, Influence of Substrate Heating on Laser Spectroscopy for Engine Materials, Proc. PICAST4, NCKU, Kaohsiung.
- [7] Ruele M., A. G. Evans, M. F. Ashbey, J. P. Hirth, 1990, Metal-Ceramic Interfaces, Pergamon Press.
- [8] Tarashanko Y. P., 1996, Peculiarities of Formation of Multifunctional Coatings by Ion-plasma Methods, Int. Conf. on Conversion and Technology Cooperation, CIER, Taipei, 391-406.
- [9] Vincenzini P., Ed., 1991, High Perform. Cera. Films and Coatings, 7th CIMTEC - World Cera. Cong., Elsevier.
- [10] Williams J. S. et al., Eds., 1996, 9th Conf. on Ion Beam Modification of Materials, Elsevier, 1093-1097.
- [11] Yen W. W., Ed., 1995, Laser Spectroscopy of Solids, Springer-Verlag.
- [12] 歐陽又新, 2001年俄羅斯經技市場之研析--從中俄經技合作業務看台灣產業昇級的新契機, 經濟部國合處。
- [13] 葉明勳, 1996, 英高鍊718超合金之接合技術與超塑性成形複合加工研究, 台大材研所博士論文。(莊東漢教授指導)

七、圖表

表 1 LESA-KO 規格

Laser	Wavelength	Power	Pulse	Cycle	Grating	Pixel
Nd-YAG	1064nm	200mJ	10ns	10Hz	3000	1012
Q switched,					/mm	

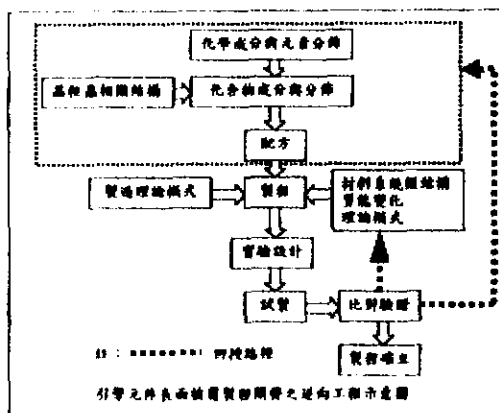


圖1 高溫引擎零件表面被覆製程合格化及逆向工法之基本流程設計。



圖2 鈮氧化鋯試片在低能量雷射氧化後呈現的海棉組織結構 - 大穴坑部位。(2000X)

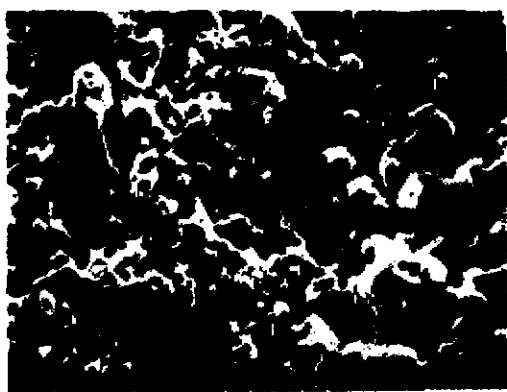


圖3 同上圖，顯現小穴坑之部位。一般孔隙結構的變異情況不顯著。(2000X)



圖4 鈮氧化鋯被覆層受高能量熱衝擊形成穴孔壁之脆裂情狀。(2000X)



圖5 上圖穴緣熱影響區嚴重龜裂的情狀。(2000X)



圖6 超合金在測試後的穴坑融結狀態。(100X)