

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

表面鍍層非破壞檢測技術研發

The detection of coating quality using laser ultrasonics

計畫編號：NSC89-2212-E-002-009

執行期間：88年8月1日至89年7月31日

主持人：吳政忠 台灣大學應用力學研究所

一、中文摘要

雷射超音波由於能產生寬頻彈性波源，佐以光學波動量測系統，可應用於幾何形狀複雜結構或高溫複雜環境，故於非破壞檢測領域具有極大潛力。本計畫成果提供一系列非破壞檢測方法來評估表面鍍層物體之品質與缺陷，並將此雷射超音波非破壞檢測系統進行組裝與測試。本年度計畫為三年度計畫之最後一年，第一年為非接觸式雷射超音波實驗技術的建立，包含表面鍍層彈性波頻散理論分析，再經由表面鍍層雷射超音波波源配合雷射光學干涉波動量測，反算表面鍍層厚度及性質。第二年為表面鍍層品質與缺陷非破壞檢測，先進行雷射波源光學光路設計，以提升訊號訊雜比，再來以相位頻譜分析法及小波轉換法分析雷射超音波訊號。本年度為研究表面鍍層非破壞檢測系統組裝與測試，首先提升雷射光學波動量測儀量測頻率，以改善薄鍍層量測解析能力，再來以程式整合表面鍍層雷射超音波非破壞評估自動化量測系統，以建立表層厚度均勻程度量測程序，提供為檢測鍍層磨耗之重要參考。計畫成果對於引擎葉片表面鍍層、纖維加強型複合材、航太複材之蒙皮等工業產品之品質與製程檢測應有極大應用潛力。

關鍵詞：表面鍍層、雷射超音波、頻散曲線、雷射都卜勒干涉

Abstract

In this report, the dispersion of laser generated surface wave in surface bonded specimen was studied. The precision of the

laser interferometric system (AVID) was confirmed that the system preserves the accuracy down to nm. The automotive nondestructive evaluation system in thin bonding layered specimen was constructed and tested. The measurement of the bonding thickness and quality were also experimented automatically by the same technique. The results are promising, however, to apply this technique to fine surface coating structure.

Keywords: Surface coating, Laser ultrasonics, Dispersion curve, Laser interferometer

二、計畫緣由與目的

於工業化國家中，表面鍍層已被大量應用於各種工業產品，以提升產品耐高溫、耐磨、抗腐蝕性等機械性質，如飛機渦輪引擎葉片、電廠或煉油廠各式轉動軸桿等。藉由雷射超音波波源與接收實驗，可經由頻散關係偵測表面鍍層介質黏著層厚度與缺陷。經過幾十年的發展，超音波已成為一很有效的非破壞材料評估方法，可用來檢測內部及表面的缺陷或量測材料性質，為工業化國家在品管上一主要的方法。至於自動化表面鍍層非破壞檢測系統之研發，由提升雷射光學波動量測薄鍍層量測解析能力，配合程式整合表面鍍層雷射超音波非破壞評估自動化量測系統，經由建立表層厚度均勻程度量測程序，提供為檢測鍍層磨耗之重要參考。

三、研究方法與成果

本研究的理論部份，乃根據Braga所提出之非等向多層板波動理論[1]，推導層狀物體之頻散方程式，作為數值模擬計算的

基礎。此外、實驗為利用Nd :YAG脈衝雷射模擬脈衝函數，並由雷射光學波動干涉儀(AVID)於試體表面接收波傳訊號[2,3]，如圖一。

(1). 提升雷射光學波動干涉儀量測頻率

目前光學波動干涉儀量測儀內部A/D數位卡取樣頻率為10MHz(AVID)，若需將實驗量測應用於高頻頻率，以測定較薄鍍層物體波動訊號，則訊號之取樣頻率會因高頻訊號之需求而不足，因此，為提高光學干涉儀頻率解析度，將AVID系統中之相位訊號接出，以高頻數位示波器儲存並進行後續訊號處理，提高量測頻率改善薄鍍層量測解析能力。

一般以10MHz取樣頻率測定暫態彈性波時，最高可確信頻率極限為2.5MHz，因一個訊號週期最少需要四個點才能描述最粗略的輪廓，而一般於訊號處理中，通常將訊號的最高取樣頻率除以二十倍，為完整訊號的可信頻率，因此由訊號處理的觀點可知，本實驗振動位移雷射干涉儀量測系統，其量測訊號最高頻率不會超過此範圍。因此，本實驗使用5MHz超音波縱波探頭，以波形產生器激發同頻率正弦電壓訊號，經由外接示波器，以取樣頻率為100MHz接收超音波探頭表面振動位移結果。

以雷射干涉儀量測絕對振動位移時，以線偏光氦氖(He-Ne laser 632.8nm)雷射激發，激發之雷射以分光鏡分為兩路，其中一路作內部反射回光電感測器當作參考光，此參考光可消除系統於量測中之局部振動；另一束光則向外傳導並以聚焦鏡聚焦於試體表面，兩束回光為線性且互相正交。為增加雷射干涉儀之精密度，將線偏極光轉換為圓偏極光，其中一束為左旋、另一為右旋偏極光，此兩束圓偏極光結合為正交訊號，將兩正交訊號輸入於類比/數位轉換器中並畫於呂薩加圓(Lissajous circle)裡，當訊號移動一個完整之呂薩加圓時，為對應於氦氖雷射半波長($\lambda/2=632.8\text{nm}/2$)位移，因此計算訊號於呂

薩加圓中之移動角度，可將密量測振動位移於微米級[4]。理論上、當兩雷射偏極光為等強度時，呂薩加圓為正圓形，但是實際上很難保持正圓，如兩道回光之強度振幅不等，或是製作時的誤差，因此使實際量測時呂薩加圓常為斜橢圓，在解相位時會有誤差。為使計算相位角時，所對應之位移量為正確的，故採用一個數學運算，將原始橢圓上之正交信號對映對到正圓上，以消除解相位誤差，提高量測精度。

圖二為以AVID干涉儀量測系統內部所得5MHz超音波縱波探頭位移訊號，由圖中可知，雖然於結果中可觀察探頭上下振動，但其實際位移大小則因取樣頻率之不足而無法求得。因此，將實驗訊號外接示波器，以100MHz取樣頻率擷取PQ訊號，再由呂薩加圓之計算將位移量修正後，可得位移結果如圖三。由圖三可觀察，位移訊號因取樣頻率提升因此解析度大幅增加，因而增加頻率域中之解析度。而於接收訊號中，於AVID量測系統具有頻率27.5MHz電磁雜訊，因此於提升頻率域中解析度，有其上限限制，若需克服此問題，則需從電路設計方面解決。

(2). 以脈衝雷射系統量測表面鍍層試體

以脈衝雷射系統量測表面鍍層試體，實驗架設如圖一，本表面鍍層材質為鋁-矽合金、以高溫噴鍍而成，厚度0.79mm；基底材質為碳鋼，厚度2.97mm。因表面鍍層是以高溫噴塗而成，故材質較為鬆散、且表面粗糙。以傳統超音波量測鍍層材質與厚度，因介面反射狀態不良，故難以估計其表面鍍層厚度。若以波傳理論分析[5-7]，其兩層波傳音阻抗相差極大，以數值模擬表面波頻散關係亦發現，不同厚度之表面鍍層因音阻抗之差異影響頻散關係甚大，如圖四，六條頻散曲線表示不同表面鍍層厚度數值計算結果，由圖中可知，表面鍍層厚度影響頻散關係，因此可藉由不同之頻散關係建立資料庫，作為反推表面鍍層厚度之依據。

由雷射激發彈性波以頻譜分析法分析頻散關係，得到實驗結果如圖四中空心方

點[8]，由實驗中發現，脈衝雷射激發點波源會產生表面鍍層之薄板藍姆波，此頻散關係可得知此絕熱表面鍍層試體之鍍層厚度與0.8mm頻散相近，由頻散關係可作為反推表面鍍層厚度之依據[9]。

(3). 整合表面鍍層雷射超音波非破壞評估自動化量測系統

本計劃最後以整合表面鍍層雷射超音波非破壞評估自動化量測系統為目標，自動化控制是以 MATLAB 程式中，有關工具箱(toolbox)中具有自動計算程式功能部分製作，程式面板如圖五。程式首先為計算絕熱表面鍍層試體鍍層厚度，故先進行雷射超音波實驗求取暫態彈性波訊號，經由點選選項(Load Traces)將實驗訊號帶入頻譜分析法計算彈性波頻散關係，如圖四，由獲得之頻散結果在點選選項(Inversion Evaluation)，經由 Simplex 反算程式計算表面鍍層厚度，程式中途皆可以點選(Close)結束程式。經由此自動化程式流程，可由雷射超音波所激發之頻散關係得到表面鍍層試體其鍍層厚度。若將試體放置於精密 xy 雙軸平台上，藉由機械化手臂將試體於平台上雙向移動，可掃描表面鍍層試體其鍍層之厚度是否平均與鍍材之均勻度。

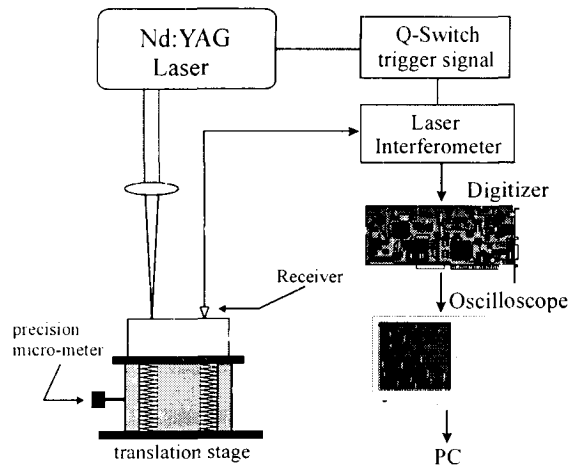
四、計畫成果自評

本計畫的研究內容均依原先訂定的進度順利完成，成果具學術與應用價值，除於國內外研討會發表外[4,10,11]，亦已投稿於國外著名期刊[5-7]。本研究成果顯示雷射超音波對於表面鍍層結構與缺陷分析，層狀複合結構如纖維加強型複合材、航太複材之蒙皮等工業產品之品質與製程檢測有極大的應用潛力。此外、以程式整合表面鍍層雷射超音波非破壞評估自動化量測系統，以建立表層厚度均勻程度量測程序，提供為檢測鍍層磨耗之重要參考。

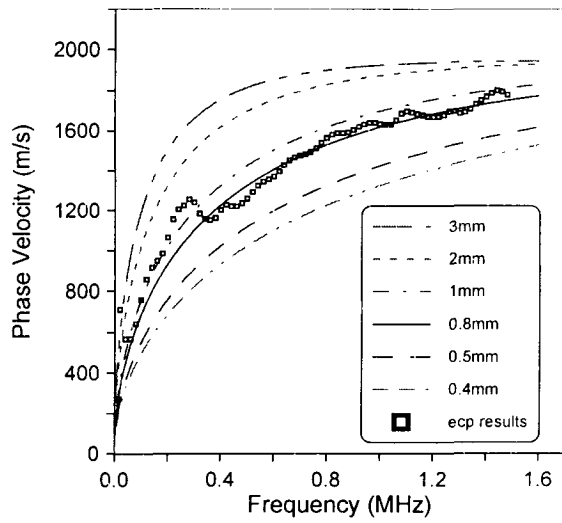
五、參考文獻

1. M. B. Braga, "Wave Propagation in Anisotropic Layered Composites",

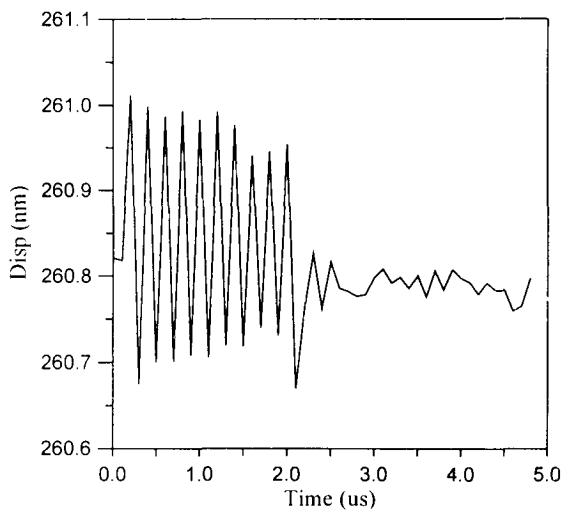
- Ph.D. dissertation, Stanford Univ. (1990).
2. B. M. Watrasiewicz and M. J. Rudd, (1976) *Laser Doppler Measurements*, Butterworths, London, pp.19
 3. C. K. Lee, and T. W. Wu, (1995) *Differential Laser Interferometer for Nanometer Displacement Measurements*, AIAA Journal, Vol.33, No.9, pp.1675-1680.
 4. Liu, Y.-H. Wu, T.-T. and Lee, C.-K. "On the calibration of piezoelectric transducers using laser interferometer." *Far East Conference on NDT*. (1999)
 5. Wu, T.-T. and Liu, Y.-H. "Inverse Analyses of thickness and elastic properties of a bonding layer using Laser Generated Surface Waves ." *Ultrasonics*, **37**, 23-30. (1999)
 6. Wu, T.-T. and Chen, Y.-Y. "Analyses of laser generated surface waves in delaminated layered structures using wavelet transform ," *J. Appl. Mech.*, ASME, **66** (2), 514. (1999)
 7. Wu, T.-T. and Liu, Y.-H. "On the measurement of anisotropic elastic constants of fiber reinforced composite plate using ultrasonic bulk wave and laser generated Lamb wave." *Ultrasonics*, accepted. (1999)
 8. S. Nazarian and M. R. Desai, "Automated Surface Wave Method: Field Testing," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119(7), 1094-1111(1992).
 9. Nelder, J. A. and R. Mead "A Simplex Method for Function Minimization," *Computer Journal*, **7**, 308-313 (1965).
 10. 吳政忠,徐彰志,劉永慧, "以雷射超音波偵測異向性層板結構及脫層現象," 第十六屆中國機械工程學會. (1999)
 11. Liu, Y.-H. Wu, T.-T. and Lee, C.-K. "Application of Narrowband Laser Ultrasonics to the Nondestructive Evaluation of Thin Bonding Layers." *28th Annual Review Of Progress in QNDT*. (2000)



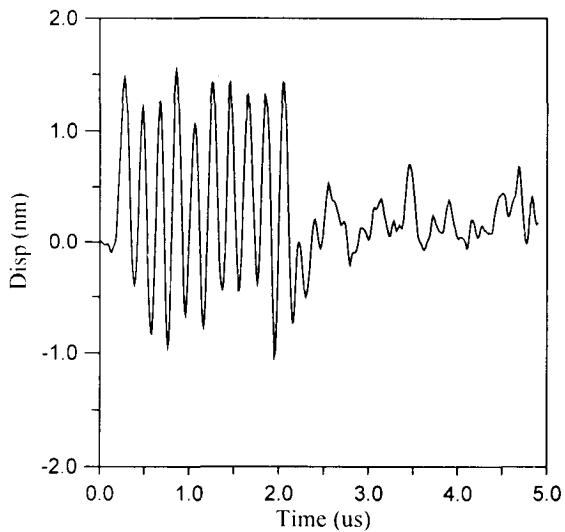
圖一 雷射超音波實驗配置圖



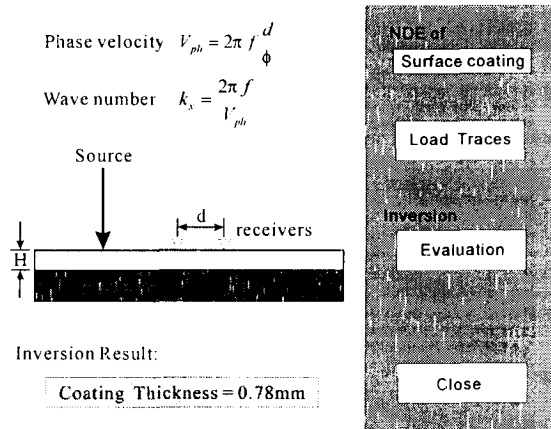
圖四 絕熱鍍層試件之頻散關係



圖二 以 AVID 干涉儀量測系統內部所得 5MHz 超音波縱波探頭位移訊號



圖三 以外接示波器測得 5MHz 超音波縱波探頭位移訊號



圖五 MATLAB 自動化程式面板