

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

引擎葉片高溫絕熱塗層之雷射超音波非破壞檢測

Nondestructive evaluation of thermal barrier coating using laser ultrasonics

計畫編號：NSC89-2218-E-002-106

執行期間：89年8月1日至90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

表面鍍層已被大量應用於各種工業產品中，以提升產品耐高溫、耐磨、抗腐蝕性等機械特性，如飛機渦輪引擎葉片、電廠或煉油廠各式轉動軸桿等。表層與基底接合狀況及表面鍍層厚度皆會影響結構之使用壽命及其安全性。本計劃首先介紹雷射光柵產生高頻彈性波原理，並進一步將雷射高頻波源應用於半無線域與層狀半無限域中，最後藉由激發雷射光柵實驗偵測表面鍍層介質黏著層厚度與缺陷，測試薄黏著層與表面鍍層之頻散關係。

點聚焦式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。然而、點波源之雷射超音波其能量密度集中於表面微小面積因而破壞待測物表面，及其頻寬為固定於有限範圍內之特性，因而限制此方法對於微小物體之量測。雷射光柵引致之彈性波，大幅減小集中於待測物表面能量密度，並有效提高脈衝雷射點波源超音波頻率。本計畫成果提供一系列從理論至實驗之非破壞檢測方法來評估表面鍍層物體之品質與缺陷。計畫內容首先為脈衝雷射光柵波源 (LIG) 之架設、訊號校正與改良；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。最後針對引擎葉片高溫絕熱塗層進行雷射超音波檢測之探討。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、雷射引致光柵、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 laser induced grating (LIG) was generated and modified. 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 Induced Grating, 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。本計畫擬探討雷射光柵法在高溫絕熱鍍層與薄鍍層結構之非破壞檢測技術。計畫內容涵括傳統雷射光柵波源產生法之改

良、雷射光學奈米級波動訊號接收裝置之校正，訊號分析及材料性質反算，為提供薄鍍層非破壞檢測之重要參考依據。

三、研究方法與成果

以雷射超音波光柵技術檢測表面鍍層，理論部份乃根據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 脈衝雷射加以分光干涉形成光柵窄頻波源，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]。

1. 雷射光柵波源之激發

1.1 傳統 LIG 實驗架構

傳統之雷射光柵實驗架構以 50/50 分光鏡將雷射光束分為兩強度相同之光源，如圖(一)。其中百分之五十雷射光 (I_1) 由分光鏡反射至試體表面，另外百分之五十 (I_2) 能量光束穿透分光鏡至反射鏡，再由反射鏡傳遞至試體表面。由兩光束 (I_1, I_2) 干涉夾角 2θ 產生光柵條紋。

當 θ 為微小角度時，

$$\sin\theta \approx \frac{d/2}{S} = \frac{d}{2S}$$

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \approx \frac{\lambda}{2 \times (d/2S)} = \frac{S\lambda}{d}$$

其中 d 為兩分光鏡及反射鏡距離， S 為光干涉所走之長度， λ 為雷射光波長， Λ 為光柵寬度。

若設計實驗架設光干涉長度 $S=50\text{cm}$ ，兩分光鏡及反射鏡距離 $d=1\text{cm}$ ，可得干涉光柵寬度 $\Lambda=0.0266\text{mm}$ ，此波源產生之表面波於雷利波波速 3000m/s 表面上傳遞時，所引致之頻率為 $f=112.8\text{MHz}$ 。此頻率趨近於本脈衝雷射頻寬極限，可用於需極高頻率試體，或應用於厚度極薄物體之彈性波波傳。

因高頻彈性波於物體傳遞時其衰減較快，故一般高頻波源較不易於量測。雷射

光柵引致之表面波可大幅增加表面波振幅能量，為窄頻波源，且可有效降低激發於物體表面之能量密度。相較於脈衝雷射點波源，一方面降低試體表面傷害，另一方面也大幅提高彈性波波源頻率。

1.2 修正之 LIG 實驗架構

傳統光柵實驗架設所形成之彈性波源頻率極高，若為量測數百微米級 μm 甚至於毫米級 mm 厚度物體時，則傳統光柵架設實驗並不符合波源要求。為降低表面波傳遞頻率，一般皆以放大雷射干涉長度 S ，但需增加長度至數米甚至於數十米。因而於實際實驗架設上，需以反射鏡來回反射以增加長度或是加大光學鏡片架設空間。為改進傳統架設空間上及光學鏡片上之限制，並達到降低頻率之需求，研究中將光路架構作修正。由一組分光鏡與反射鏡之組合，將兩光束移至很近之距離，如此可大幅降低分光鏡與反射鏡之距離 d ，使干涉角 2θ 度變小，加大光柵之干涉條紋 Λ 週期，以降低實驗頻率。

圖(二)為修正之雷射光柵實驗架構圖。同樣以 50/50 分光鏡將雷射光束分為兩強度相同之光源，其中百分之五十雷射光 ($I_1=I_0/2$) 由分光鏡反射至試體表面，另外百分之五十 (I_2) 能量光束穿透分光鏡至反射鏡，再經由反射鏡反射回分光鏡，由分光鏡反射之光波再次分為 25% 之光 ($I_2=I_0/4$)，由分光鏡穿透回試體表面。由兩光束 (I_1, I_2) 干涉夾角 2θ 產生光柵條紋。

由圖(二)中可知，當 θ 為微小角度時，正弦函數可用干涉長度與分光鏡反射鏡距離化簡成：

$$\sin\theta \approx \frac{\sqrt{2}d/2}{S} = \frac{d}{\sqrt{2}S}$$

產生光柵條紋寬度為：

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \approx \frac{\lambda}{2 \times (d/\sqrt{2}S)} = \frac{S\lambda}{\sqrt{2}d}$$

其中 $\sqrt{2}d$ 為兩分光鏡及反射鏡距離， S

為光干涉所走之長度， λ 為雷射光波長， Λ 為光柵寬度。

當同樣設計實驗架設光干涉長度 $S=50\text{cm}$ ，兩分光鏡及反射鏡距離可大幅降低至 $d=0.1\text{cm}$ ，得到干涉光柵條紋寬度 $\Lambda=0.188\text{mm}$ 。此波源產生之表面波於雷利波波速 3000m/s 表面上傳遞時，所引致之頻率為 $f=15.96\text{MHz}$ 。若將鏡片距離再縮小至 $d=0.02\text{cm}$ ，可得干涉光柵寬度 $\Lambda=0.094\text{mm}$ ，所引致之頻率為 $f=3.19\text{MHz}$ ，此頻率遠高於雷射點波源所形成彈性波源頻率。本修正之LIG實驗架構，可大幅降低分光鏡與反射鏡之距離 d ，適用於需較高頻率範圍之量測。實驗架設中只需將反射鏡置於雙軸平台上，以調整與分光鏡之距離與角度，可得不同光柵條紋寬度並引致不同頻率表面波。

2. 提升光學干涉儀量測系統之頻寬

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。

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 10MHz 範圍。Nd:YAG脈衝雷射激發點波源之彈性波源，於金屬中傳遞時為高寬頻，且能量集中於 2MHz 以內。但若需以本脈衝雷射檢測較薄試體時，一方面脈衝雷射聚焦於試體表面時，於極小面積內激發之雷射能量密度極高，於小面積中溫度升高產生熱膨脹，因此雷射表面接觸點會因局部加熱使試體表面產生融蝕現象。於薄厚度層狀試體中，表面融蝕現象會影響波源產生機制，使頻寬降低，甚至破壞薄物體表面。此外，薄層物體需要高頻波源進行測試，若波源為高頻時，彈性波傳播距離較短，因此不利於高頻、且寬頻寬具頻散現象彈

性波傳遞。綜合以上數個原因，當彈性波有高頻需求時，需設計一窄頻、且高頻之彈性波源，而雷射引致光柵波源十分符合此需求。

首先將雷射引致光柵波源激發於鋁材半無限域中，圖(三)為兩雷射光柵波源相距 10.0mm 所激發之表面波振動位移結果，因雷射引致光柵波源不需聚焦，波源直徑大小約為 8mm 至 9mm ，由圖中可知雷射引致光柵表面波形成一組波包，此波包內有12個波峰，將兩點激發之波源經過濾波，並將低頻振動及高頻雜訊濾除，經由計算兩波包到達時間差，可獲得此頻率表面波傳播速度。圖(三)中之位移訊號，中心頻率為 9.6MHz ，兩波包到達時間差為 $\Delta t=1.026\mu\text{sec}$ ，已知兩波源相距 3.0mm ，因此本實驗表面波波傳相位速度為 2924.0m/s 。

改變雷射引致光柵線寬大小，可得不同頻率表面波波速。為測試雷射引致光柵波源與雷射干涉儀接收位移極限，因此改變不同雷射光柵夾角，改變不同頻率表面波速度結果，使雷射光柵波源激發於金屬鋁材頻率從 1.9MHz 至 13.0MHz 。實驗中表面波因傳播於半無限域中，故波速為非頻散，雷射引致光柵實驗量測結果平均值為 2926.8m/s ，其標準差為 0.33% 。

3. 以雷射光柵測定層狀半無限域黏結層

本計劃以探討薄環氧樹脂(epoxy)黏著層對於表面波頻散關係之應響，並將其應用於雷射超音波非破壞檢測中。雷射超音波之表面波訊號產生為採用雷射引致光柵實驗(LIG)技術，利用脈衝雷射加上光柵實驗產生窄頻彈性波，配合非接觸雷射干涉儀位移量測，獲得表面波基本模態的頻散曲線。配合數值計算及反算層狀介質之波傳頻散效應，發展出一系列偵測薄黏著層厚度與材料性質之方法，可做為以窄頻雷射超音波配合反算進行薄黏著層非破壞評估之基礎。

實驗之層狀半無限域試體表層為薄銅片，厚度為 $100\mu\text{m}$ ，半無限域為鋁材，兩

物體以環氧樹脂黏結。由層狀半無限域表層試體厚度可知，由傳統雷射脈衝聚焦形成點波源進行雷射超波實驗，因點波源頻寬不足，無法獲得完整薄黏著層頻散曲線，因此，需進一步以雷射引致光柵激發之彈性波源，測定薄層層狀半無限域頻散關係。雷射引致光柵實驗架構圖如圖(二)，固定振動位移接收點，以雷射干涉儀接收振動位移，將干涉訊號外接至取樣頻率為 250MHz 之示波器，提高振動位移之頻率解析度，以測定較高頻率頻散關係，經由示波器取得訊號再經過解相位計算位移量。波源部分，以 Nd:YAG 脈衝雷射激發，經由雷射光柵技術形成窄頻且高頻雷射超音波波源，移動精密平台雷射光柵波源位置改變兩訊號距離。

圖(四)為不同位置激發雷射光柵實驗振動位移結果圖，圖中上曲線訊號為波源與接收點相距 10mm 實驗結果，下訊號結果為波源與接收點相距 15mm 實驗結果，因雷射引致光柵波源頻寬很窄，因此，由實驗結果中可清楚將雷射引致光柵表面波訊號分出，至於訊號之中心頻率，則可用頻譜分析進行分析。由實驗結果觀察可知，實驗訊號存在一低頻訊號，而此訊號並非本雷射光柵實驗所希望產生的，而是當雷射激發於表面時，兩干涉光源強度不同，造成於相消性干涉區域中，雷射光並非完全為暗紋，而存在一微小亮度，因此存在一低頻訊號，但因波傳具頻散現象，因此此低頻訊號與雷射引致光柵訊號會分開。

若需將光柵以外訊號移除，本實驗利用帶通(band pass)濾波器將不需要之高頻及低頻雜訊濾除，經由濾波之結果如圖(五)，訊號中具有高頻電磁雜訊及低頻雷射波源激發結果，經過濾波後，將不需要之訊號移除。由濾波後實驗結果帶入交互函數(cross-correlation function)中計算兩訊號到達時間差，本實驗雷射中心頻率為 3.5MHz，兩訊號到達時間差為 2.988 μ s，因兩訊號位置相距 5mm，因此得到表面波波速為 1673.4m/s。

經由改變雷射光柵分光鏡與反射鏡之間間距，可獲得不同雷射引致柵間距 Λ ，因此也改變雷射光柵引致之波源頻率，經由改變不同頻率波源實驗，圖(六)為層狀半無限域相位速度頻散結果，由圖中可知，實驗結果為方點，每一個方點代表一組實驗數據，而雷射光柵引致表面波最高頻率到達 10MHz，此頻寬遠高於脈衝雷射點波源頻率。

圖(六)中，不同曲線表示不同黏著層厚度層狀半無限域頻散曲線，黏著層厚度為介於 0H 至 0.2H，其中 H 為層狀半無限域表層銅片厚度。由頻散結果可知，黏著層厚度影響頻散關係甚劇，由數值計算層狀半無限域頻散關係發現，表面波頻散速度大小與黏著層厚度有關，由頻散實驗結果圖(六)並加以反算。首先量測環氧樹脂黏著層材料性質，將實驗所得之環氧樹脂材料特性帶入反算程式中計算黏著層厚度，當初始猜測黏著層厚度介於 0.0H 至 1.0H 之間，反算結果依舊收斂之同一黏著層厚度。反算之黏著層厚度為 0.136H，因表層銅片厚度為 100mm，因此黏著層厚度為 13.6mm，此厚度非常小，因此雷射引致光柵實驗可適用於極薄黏著層物體之頻散測試。

4. 以雷射光柵測定高溫絕熱塗層試體

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，如圖七。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。

由雷射引致光柵波源分析表面鍍層頻

散關係，得到實驗結果如圖(七)中實心圓點。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，且由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。由圖(七)實驗結果可知，雷射光柵頻率介於1MHz至3MHz之間。雖然雷射引致光柵波源之結果與聚焦點波源結果相近，但雷射引致光柵波源應更適合表面鍍層厚度小於0.1mm甚至於毫米級表面度層之試體。

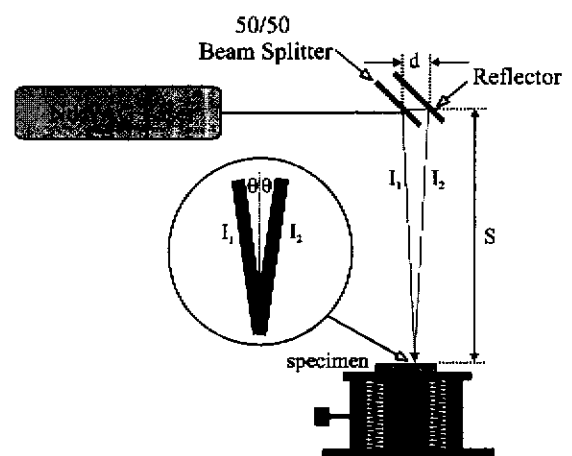
四、計畫成果自評

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]。本研究結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。

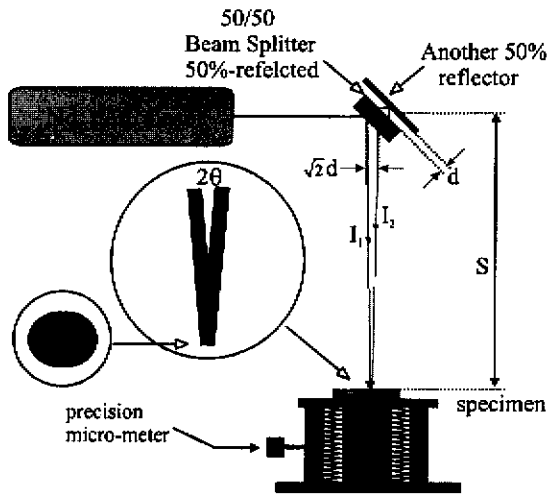
五、參考文獻

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)

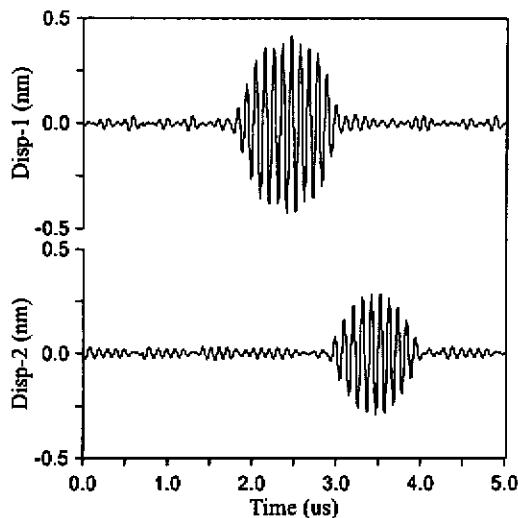
6. Wu, T.-T. and Chen, Y.-Y. "Analyses of laser generated surface waves in delaminated layered structures using wavelet transform," *J. Appl. Mech., ASME*, 66 (2), 514. (1999)
7. Wu, T.-T. and Liu, Y.-H. "On the measurement of anisotropic elastic constants of fiber reinforced composite plate using ultrasonic 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)



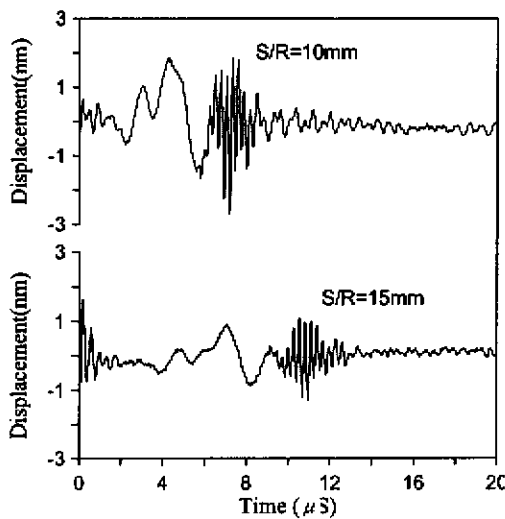
圖一 傳統 LIG 實驗架構



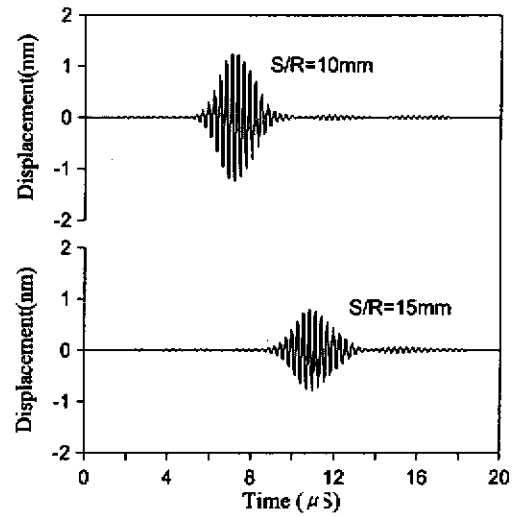
圖二 修正之 LIG 實驗架構



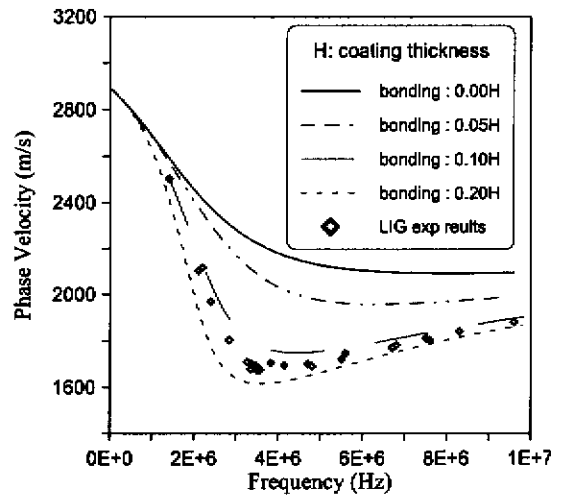
圖三 雷射引致光柵波源激發於鋁材半無限域中(中心頻率 9.6MHz)



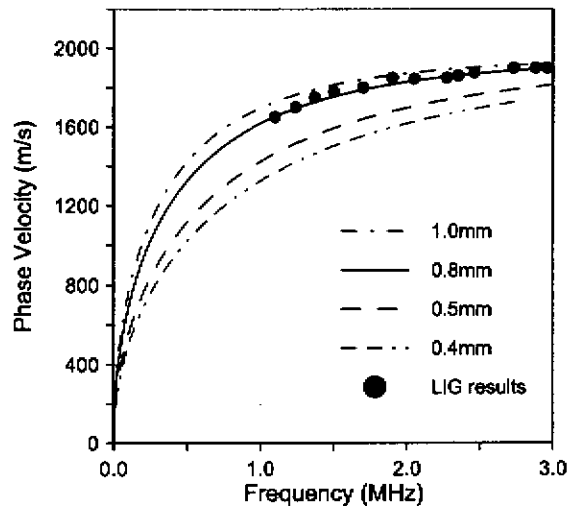
圖四 不同位置激發雷射光柵實驗於層狀半無限域之振動位移結果



圖五 濾波後不同位置激發雷射光柵實驗於層狀半無限域之振動位移結果



圖六 層狀半無限域相位速度頻散結果



圖七 以 LIG 波源測試絕熱鍍層試件之頻散關係