

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

複合材料壓力容器的可靠性研究—子計畫三

軸對稱複合材料薄殼的異向性波傳與非破壞性評估(III)

Anisotropic Wave Propagation and Nondestructive Evaluation of Axisymmetric Composite Shell Structures (III)

計畫編號：NSC 87-2218-E-009-023

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：尹慶中副教授 國立交通大學機械系

E-mail: ccyin@cc.nctu.edu.tw

一、中文摘要

本研究分析纏繞式複合材料圓管的導波波傳，建立複材圓管材料係數反算及音洩源定位的方法，並將之整合為可供複材圓管品質檢測及音洩偵測分析的獨立程式。本研究以點聚焦脈衝雷射超音波檢測技術及小波轉換之時頻域訊號處理技巧，精確地計算出複材圓管之縱向波及撓性波的群速度及音洩波抵達探頭的波程時間。利用有限元素法數值計算所得之頻散曲線及實驗數據建立最小平方差之目標函數，以簡單體法尋求目標函數的極小值，反算獲得複材圓管的材料係數及音洩源發生之時間與位置。

關鍵詞：音洩、異向性波傳、纏繞式複材圓管、雷射超音波、小波轉換

Abstract

An integrated nondestructive evaluation method is presented to determine the material constants and locations of acoustic emission (AE) sources in laminated composite circular tubes. The group velocities of longitudinal waves and flexural waves in experiments are accurately determined by wavelet transform technique. Calculation of dispersion curves of the guided waves propagating in filament wound composite tubes are carried out by solving the eigenvalues of a global matrix which is composed of the transfer matrices of 3-D elastic waves in the laminae. Maximum likelihood estimation of the elastic material

constants and AE source position is carried out by simplex method. The objective functions are nonlinear and defined by the arrival time differences, theoretical group velocities and also sensor positions.

Keywords: Acoustic Emission, Anisotropic wave propagation, Filament wound composite tubes, Laser ultrasound, Wavelet transform

二、緣由與目的

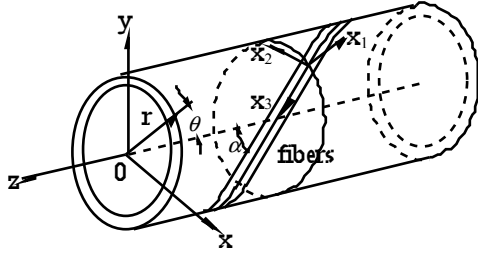
纏繞式複材構件具有一體成型，製程適合自動化生產，逐漸發展為工業級產品。但是不可諱言，在製程、設計、檢測上仍有許多問題有待進一步研究。纏繞式複材壓力容器的品質可靠性及結構安全度，都企需有效的非破壞檢測方法予以評估。

纏繞式複材為纖維編織型材料，超音波或音洩波受到明顯的彈性波散射影響，浸水式超音波 C 掃描可以檢測得知製造品質的良窳，但卻無法評估成品結構的剛性係數。本研究以單點聚焦脈衝雷射在複材圓管上產生超音波，其頻率範圍大約在 1 MHz 以下，受到纖維束散射而致訊號衰減的影響較小。由圓管導波的群速度，可以反算出複材圓管的勁度係數。

複材壓力容器破損時所釋放的音洩訊號為暫態之頻散訊號，其波傳特性與雷射超音波近似，因此本研究以雷射超音波模擬音洩波傳，並以反算獲得的圓管材料係數與音洩波抵達探頭位置的波程時間，計算音洩源發生的位置。

三、研究方法與成果

圖一為一複材圓管及其參考座標系統，假設各層的纖維纏繞方向與圓管的軸向夾角為 α 。因為各層都具有單一的纖維排列方向，故假設各層材料為相同的橫向等向性 (transversely isotropic)，但各層對稱軸與圓管軸向夾角為 $\pm\alpha$ 。



圖一 複材圓管及參考座標系

橫向等向性材料(以 x_3 為對稱軸)的本構方程式為

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{33} \\ 2e_{23} \\ 2e_{13} \\ 2e_{12} \end{pmatrix}$$

其中 $C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$ 。

若將纖維纏繞層局部的卡式座標系統座標軸 r (或 x_1 軸)旋轉至全域的柱面座標系，則上列之本構方程式將轉換成下式，

$$\begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{13} & C'_{14} & 0 & 0 \\ C'_{12} & C'_{22} & C'_{23} & C'_{24} & 0 & 0 \\ C'_{13} & C'_{23} & C'_{33} & C'_{34} & 0 & 0 \\ C'_{14} & C'_{24} & C'_{34} & C'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{55} & C'_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C'_{56} & C'_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_r \\ e_\theta \\ e_z \\ 2e_{\theta z} \\ 2e_{rz} \\ 2e_{r\theta} \end{pmatrix}$$

若考慮纖維排列角度為 $\pm\alpha$ 的層數相等，則圓管之等效本構方程式中的勁度係數 C'_{14} ， C'_{24} ， C'_{34} ， C'_{56} 將會消失為零。

複材圓管上的位移分量依其波傳擾動的對稱性質，可以分別假設成

$$u_r = \sum_{n=0}^{\infty} U_r(n, r) \cos(n\theta) e^{i(k_z z - \omega t)},$$

$$u_\theta = \sum_{n=0}^{\infty} U_\theta(n, r) \sin(n\theta) e^{i(k_z z - \omega t)},$$

$$u_z = \sum_{n=0}^{\infty} U_z(n, r) \cos(n\theta) e^{i(k_z z - \omega t)},$$

此處 k_z 為波傳的軸向波數， ω 為角頻率。因為圓管周角 θ 的週期為 2π ，故周向匝數 n 必須為整數。

複材圓管的導波波傳因纖維纏繞角度的改變而變化，較不適宜解析分析。為了理論推導的一般性，本研究選擇以有限元素分析方法，探討軸向傳遞之撓性波頻散曲線，將複材圓管的管壁分割成數層徑向元素，不同角度的纏繞層亦可分割成數個分層(sublayers)。則圓管徑向上各點的位移可以表成

$$\{u\} = [N] \{q\}$$

其中

$$\{q\} = [u_r^a \ u_\theta^a \ u_z^a \ u_r^b \ u_\theta^b \ u_z^b \ u_r^c \ u_\theta^c \ u_z^c]^T$$

$$[N] = \begin{bmatrix} \eta_1 & 0 & 0 & \eta_2 & 0 & 0 & \eta_3 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_1 & 0 & 0 & \eta_2 & 0 & 0 & \eta_3 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_1 & 0 & 0 & \eta_2 & 0 & 0 & \eta_3 \end{bmatrix}$$

此處上標 a, b, c 分別代表各層元素的內徑、中平面、外徑上的節點。每個分層元素的內差函數(或形狀函數)均為二次函數，

$$\eta_1 = 1 - 3\xi + 2\xi^2, \quad \eta_2 = 4\xi - 4\xi^2,$$

$$\eta_3 = -\xi + 2\xi^2, \quad \xi = \frac{r - r_a}{r_c - r_a}.$$

根據應變與位移的關係，每層元素內的應變可以表成

$$\{\varepsilon\} = [a] \{q\} + [b] \frac{\partial \{q\}}{\partial z}$$

此處 $[a]$ 與 $[b]$ 為 n 及 r 的實數矩陣。

有關動態平衡方程式的推導藉助於漢彌頓原理[1-4]，考慮波動在一個週期內的全能量為 L ，則

$$L = \frac{1}{2} \int \int \int (\rho \{u\}^H \{u\} - \{\varepsilon\}^H [C] \{\varepsilon\}) r d\theta dr dz$$

此處 ρ 為材料密度，上標 H 代表反置矩陣的共軛複數。經過進一步的推導，可以獲致如下之廣義的固有值問題。

$$[A] \{q\} = -i k_z [B] \{q\}$$

利用 QZ 演算法[5]，將可獲得複材圓管上的導波相速度及固有向量。

複材圓管的導波不僅為頻率的函數，亦與波傳方向相關。音洩波與雷射超音波所引致的導波波速都為群速度(或稱能量波速) c_g ，可由通過管壁厚度之複數波印亭向量(complex Poynting vector)的平均值 $\langle \mathbf{P} \rangle$ 與動能平均值 u_{AV} 的比值計算獲得。

$$c_g = \langle \mathbf{P} \rangle / u_{AV}$$

有關雷射超音波的群速度及音洩波抵達探頭之時間差的實驗值，都是以小波轉換(wavelet transform)分析計算獲得。小波轉換具有正交性(orthogonality)，適於能量有限之非穩態(non-stationary)連續訊號的展開，並具有祛除雜訊之濾波功能。

小波轉換係將暫態訊號與母小波作廣義的交互相關運算(cross-correlation)，自訊號中析出與母小波相似的成分。在不同的時頻域下，小波轉換可以獲得不同的解析度(resolution)。若 $f \in L^2(R)$ ，則連續小波轉換(continuous wavelet transform, CWT)可表示為

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_t f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt$$

其中 $f(t)$ 表示非穩態訊號，參數 b 代表時間平移(time shift)，參數 a 為尺度(scaling)參數， $\psi(t)$ 為母小波函數。當 a 減少時，母小波的週期會隨之縮小；反之，當 a 增加時，母小波的週期會增加，觀測的時窗亦增長。所以 a 可作為時域解析度和頻域解析度的交易(trade-off)參數，小波轉換即藉參數 a 、 b 將訊號映射至時頻域。

本文採用高斯函數(Gaussian function)作為母小波，其數學式為

$$\psi(t) = \exp(i \omega_0 t) \exp(-\frac{t^2}{2})$$

其中 ω_0 設為 5.3 rad/sec[9]。若複材圓管導波的中心頻率為 f ，則尺度參數 a 與頻率 f 的關係為 $a = \omega_0 / 2\pi f$ 。

音洩波傳不僅在軸向傳遞，在圓管的周向亦會傳遞，亦即螺旋路徑(helical paths)前進。螺旋波的波向量(wave vector)可以表成 $\mathbf{k} = k_\theta \mathbf{e}_\theta + k_z \mathbf{e}_z$ ，其中 $k_\theta = n/a$ 。

複材圓管結構的材料係數與製造時的烘焙溫度、纖維纏繞的張力大小及纖維與樹脂的體積比有關，因此有必要應用非破壞檢測方法評估成品的材料係數。本研究先建立一個群速度測量值與計算值之最小平方差的目標函數 Q_1 ，定義如下：

$$Q_1 = \sum_{k=1}^M \{c_g(C_{ij}, f_k, n) - v_g(f_k, n)\}^2$$

此處， C_{ij} 為材料勁度係數， f_k 為頻率值。

音洩的波源定位精度取決於音洩事件抵達探頭的時間差，本研究應用連續小波轉換計算板波抵達探頭的波程時間(time-of-flight)，即小波轉換係數峰值所對應的 b 值差。波程時間與群速度的關係為

$$t_i = \sqrt{r^2(\theta - \theta_i)^2 + (z - z_i)^2} / c_g(k_\theta, k_z)$$

此處 (r, θ, z) 為音洩源發生的位置座標， (r, θ_i, z_i) 為第 i 個探頭的位置座標。設目標函數 Q 為

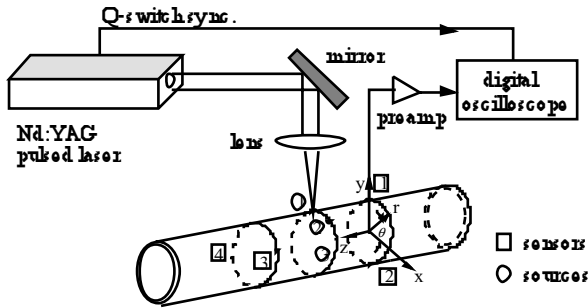
$$Q_2 = \sum_{i=1}^N \left\{ t_i - \left(\frac{\sqrt{r^2(\theta - \theta_i)^2 + (z - z_i)^2}}{c_g(k_\theta, k_z)} + t_o \right) \right\}^2$$

有關材料性質及音洩源定位計算的反算採用簡單體法[6]，分別搜尋滿足 Q_1 及 Q_2 的極小值，簡單體法的計算較省時，過去曾應用於一些反算問題上[7-9]，都有不錯的結果。

實驗裝置如圖二所示，以脈衝 Nd:YAG 為波源，錐形探頭為換能器。複材圓管的材料為石墨纖維/環氧樹脂 AS4/3501-6，纖維纏繞角度為 $\pm 26^\circ$ ，內徑 100.5mm，厚度為 1mm，材料係數如表一所列。

表一 石墨纖維/環氧樹脂圓管的材料係數

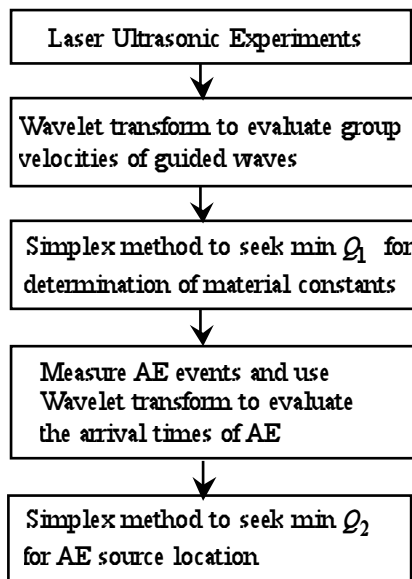
Mass density (g/m^3)	C_{11}	C_{13}	C_{33} (GPa)	C_{12}	C_{55}
1.578	13.92	6.44	160.73	6.92	7.07



圖二 實驗裝置之示意圖

雷射超音波實驗顯示複材圓管之軸向縱波(longitudinal waves)的振幅較小，波速較快，而撓性波的振幅較大，速度較慢。

音洩偵測程序中，先要調校一些檢測參數，如：增益值(gain)、門檻值(threshold)、前觸發(pre-trigger)、音洩波速測定等，在複材板殼結構中，波速係波傳方向的函數，且板殼之導波為頻散波，音洩波波速的逐一測定不如改先行反算材料係數，再進行音洩波群速度的計算。故本研究將材料係數反算及音洩定位計算整合在一起，提供作為音洩偵測分析之一個完整的軟體，其分析流程如圖三所示。



圖三 音洩定位分析流程圖

四、結果與討論

複合材料壓力容器的結構安全要求很高，本計畫以纖維纏繞之複材圓管為階段性研究對象，建立雷射超音波與音洩檢測的實驗及分析方法，以供日後纏繞式複材壓力容器品保及安全檢驗的基礎。

材料的非等向性質使得複材圓管的音洩分析較為複雜，本研究先由雷射超音波的群速度量測，反算材料彈性係數，再應用於音洩源的定位計算，實驗分析的精確度已接近探頭的進場範圍。

本研究所發展的材料性質反算及音洩源定位計算方法的計算量較大，目前仍無法發展成為即時分析軟體。未來可將三維波傳的理論推導架構予以簡化，在音洩應用之低頻範圍內改以板殼理論的推導方式。

五、參考文獻

- [1] Huang, K.H., and Dong, S.B., *J. Sound and Vibration*, **96** (1984) 363.
- [2] Glandier, C.Y., Berthelot, Y.H., and Jarzynski, J., *J. Acoust. Soc. Am.*, **92** (1992) 1985.
- [3] Kohl, T., Datta, S.K., and Shah, A.H., *AIAA Journal*, **30** (1992) 1617.
- [4] Ziola, S.M., and Gorman, M.R., *J. Acoust. Soc. Am.*, **90** (1991) 2551.
- [5] Moler, C.B., and Stewart, G.W., *SIAM J. Numerical Analysis*, **10** (1973) 241.
- [6] Caceci, M.S., and Cacheris, W.P., *Byte*, **9** (1984) 339.
- [7] Karim, M.R., and Mal, A.K., *J. Acoust. Soc. Am.*, **88** (1990) 482.
- [8] Chai, J.-F., and Wu, T.-T., *J. Acoust. Soc. Am.*, **95** (1994) 3232.
- [9] C.-C. Yin, L.-C. Shieh, and F.-T. Lin (1996), "Source location of acoustic emission in a filament wound composite tube through wavelet transform," *Progress in Acoustic Emission VIII*, 157-162, JSNDI.
- [10] C.-C. Yin, S.-C. Hsu and Y.-H. Wu (1998), "Acousto-Ultrasonic Study of Adhesive Bond Quality at Interfaces of Rubber-Metal Plates," *The 9-th Asia-Pacific Conference on Nondestructive Testing*, Anaheim, California, U.S.A., 109-112.