

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

多孔質吸音材之吸音特性研究

A study on the acoustic absorption characteristics of the porous materials

計劃編號：NSC 89-2611-E-002-004

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

國立台灣大學造船與海洋工程學系

主持人：王昭男

摘要

本文之主要目的是對目前在台灣市面上使用之多孔質纖維材之吸音特性作一探討。對材料之吸音係數而言，流動阻力是最重要之影響參數，在本研究中測得之玻璃棉與岩棉之流動阻力與國外之研究比較，似乎較為分散，利用這些量測數據配合 Allard 之理論模式，則材料之特徵阻抗以及吸音係數可以計算得到，與實驗之比較亦相當吻合。

關鍵詞：聲波，多孔質材料，流動阻力，吸音係數

Abstract

The sound absorption characteristic of the porous fibrous material used in Taiwan is studied in this paper. Flow resistance is the most important parameter for the sound absorption coefficient of the material. The measured flow resistance of the glass and rock wool seems to be scattered in a wider range and higher than that of reported in the literature. With the measured data and Allard's model, the characteristic impedance of the porous material is estimated and consequently the normal impedance and sound absorption coefficient can also be obtained.

Keywords: sound, porous material, flow resistivity, absorption

1. 簡介

由於多孔質吸音材之用途廣泛，因此，對於其音響性能之探討就顯得非常重要，然而，多孔質材之結構複雜，因此，解析解不太容易求得，最早之研究[1]

皆假設孔洞之結構為均勻截面，此顯然與實際構造差異頗大，其後 Stinson 與 Champoux[2,3]將圓形截面之結果修正，使其更易使用，此方法需要將圓形截面解之某些參數加以調整以適用較複雜之形狀，Wilson[4,5]則發展了 Relaxation 模式，此方法所需之參數較少且對所有之多孔質材料皆可獲致相當程度之準確度。除了這些理論分析外，Delany 與 Bazleg[6]也發表了特徵阻抗與傳波常數之經驗公式，此公式由於簡便，因此常被使用於纖維材質之聲波傳播上，但需注意的是，此公式在非常低頻與高頻皆不適用。

在本研究中，首先蒐集目前台灣常用之纖維吸音材，並量測其流動阻力且與文獻中之數據做比較，最後則分析各種材質之吸音係數並與實驗之結果做比較驗證。

2. 實驗設備

流體阻力之量測裝置如圖 1 所示，量測通過材料之壓力差 ΔP 與通過材料時之平均流速 V ，則可利用下列式子求得流動阻力

$$R = \frac{\Delta P}{VL} \quad (1)$$

其中 L 為材料之厚度，至於開孔率之量測則在燒杯中進行，首先量取欲測材料之總體積 V_t ，其後將材料浸入水中並使材料充滿液體，量取其體積差以得到纖

維材質之體積 V_g ，因此孔隙率 ϕ 可由下式算得

$$\phi = \frac{V_i - V_g}{V_i} \quad (2)$$

3. 特徵阻抗與吸音係數

根據 Johnson[7] 之理論，有效密度可表示為

$$\tilde{\rho}(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left[1 + \frac{\Re \phi}{i \alpha_\infty \rho_0 \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \mu \rho_0 \omega}{\Re^2 \ell^2 \phi^2} \right)^{1/2} \right] \quad (3)$$

式中之參數 ℓ 為特徵長度，可表示為

$$\ell = s \left(\frac{8 \mu \alpha_q}{R \phi} \right)^{1/2} \quad (4)$$

另一個重要物理量為動態體積模數，此物理量主要與較大孔洞間之熱交換有關，與流體之粘滯性效應無關。依據 Allard[8,9] 之理論，多孔材質中之空氣其動態體積模數可表示為

$$K(\omega) = \gamma P_0$$

$$\left(\gamma - \frac{\gamma - 1}{1 + \frac{\Re' \phi}{i \alpha_\infty \rho_0 N_{pr} \omega} \left(1 + \frac{4 i \alpha_\infty^2 \mu \rho_0 N_{pr} \omega}{\Re'^2 \ell'^2 \phi^2} \right)^{1/2}} \right)^{-1} \quad (5)$$

式中之特徵長度改變為 ℓ' ，因動態體積模數主要是受大孔洞之熱交換影響，而非粘滯作用，在文中取 $\ell' = 2\ell$ 。

當有效密度與動態體積模數得到之後，利用此兩式即可求得多孔質材料之傳播常數與特徵阻抗，分別表示為

$$\hat{k}(\omega) = \omega \left[\frac{\tilde{\rho}(\omega)}{K(\omega)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$Z_c(\omega) = [K(\omega) \tilde{\rho}(\omega)]^{1/2} \quad (7)$$

假設此材料厚度為 L ，直接置放於剛性壁面上，則在材料表面之垂直方向阻抗可表示為

$$Z = -j \frac{Z_c}{\phi} \cot[\hat{k}(\omega)L] \quad (8)$$

利用此一阻抗值亦可得到該材料之吸音係數 α

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} \right|^2 \quad (9)$$

在文中之計算係考慮於常溫及大氣壓之下進行，計算所需各參數值分列如下[9]

$$\mu = 1.84 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}, P_0 = 101320 \text{ N/m}^2,$$

$$P_0 = 101320 \text{ N/m}^2, \rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3, N_{pr} = 0.702,$$

$$\gamma = 1.4, S = 1, \Re' = \Re/4, \alpha_\infty = 1, \ell' = 2\ell$$

4. 結果與討論

4-1. 流動阻力

文中所考慮之纖維材質分別為玻璃棉與岩棉，共收集了四家公司之材料進行量測，結果分別置於圖 2 與圖 3，整體之分佈與文獻[10]之比較，顯得較為分散，顯示製作與品質控制仍有改善空間。孔隙率之量測結果則分列於表一與表二，所有結果皆位於 0.92 道 0.99 之間，與一般認知之孔隙率接近 1 頗為接近。

4-2. 特徵阻抗與吸音係數

利用 Allard 理論可求得不同密度之玻璃棉特徵阻抗與傳播常數，如圖 4 與圖 5 所示，特徵阻抗值隨著材料密度增加而增加，但在較高頻率時，似乎有收斂到單一值之趨勢。而能量衰減係數(傳播常數之虛部)則隨頻率增加而增加。為驗證此模式之正確性，分別計算了體積密度 24 kg/m^3 與 32 kg/m^3 厚度 2.5 公分之玻璃棉的吸音率，並與實驗量測作比較，如圖 6 與圖 7 所示，由圖中可看出

結果相當一致，說明文中所使用之理論分析模式有其可信度。之後，以理論方式估算 2.5 公分與 5 公分之不同密度玻璃棉吸音係數如圖 8 與圖 9，可明顯看出 5 公分之玻璃棉在低頻區有較高之吸音能力。對岩棉所分析之特徵阻抗與吸音係數則分別表示於圖 10 與圖 11，可看出其與玻璃棉之結果大致相當，並無明顯之差異。

5. 結論

本計劃進行了目前在台灣常用之玻璃棉與岩棉之特性量測，由量測之結果顯示，流動阻力之分佈與外國之結果比較，顯得較為分散。至於吸音係數之量測比較，則驗證了 Allard 模式之正確性，利用 Allard 模式，可算得材料之特徵阻抗，同時亦可得到吸音係數，由計算所得到之吸音係數顯示，不同密度之吸音材料其性能差異並不明顯，但增加其厚度，則可明顯改善吸音性能，尤其是在低頻部分。

Reference

1. M. A. Biot, Theory of elastic waves in a fluid saturated porous solid. II. Higher frequency range, J. Acoust. Soc. Am., 28, 179-191, 1956.
2. M. R. Stinson, The propagation of plane sound waves in narrow and wide circular tubes, and generalization to uniform tubes of arbitrary cross-section shape, J. Acoust. Soc. Am., 89, 550-558, 1991.
3. M. R. Stinson and Y. Champoux, Propagation of sound and the assignment of shape factors in model porous materials having simple pore geometries, J. Acoust. Soc. Am., 91, 685-695, 1992.
4. D. K. Wilson, Relaxation-matched modeling of propagation through porous media, including fractal pore structure, J. Acoust. Soc. Am., 94, Pt. 1, 1136-1145, 1993.
5. D. K. Wilson, Simple, Relaxational

models for the acoustical properties of porous media, Applied Acoustics, 50, 171-188, 1997.

6. M. E. Delany and E. N. Bazley, Acoustical properties of fibrous materials, Applied Acoustics, 3, 105-116, 1970.
7. D. L. Johnson, J. Koplik and R. Dashen, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid saturated porous media, J. Fluid Mech. 176, 379-402, 1987.
8. J. F. Allard and Y. Champoux, New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, J. Acoust. Soc. Am., 91, 3346-3353, 1992.
9. Y. Champoux and J. F. Allard, Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media, J. Appl. Phys., 70(4), 1975-1979, 1991.
10. D. A. Bies and C. H. Hansen, Flow resistance information for acoustical design, Applied Acoustics, 13, 357-391, 1980.

Table 1. The porosity of glass wool

Bulk density(kg/m ³)	Porosity ϕ (%)
16	98.18
20	97.86
24	97.90
32	97.00
48	95.78
100	93.63
112	92.27

Table 2. The porosity of rock wool

Bulk density(kg/m ³)	Porosity ϕ (%)
40	96.56
60	94.83
80	93.13
100	92.66

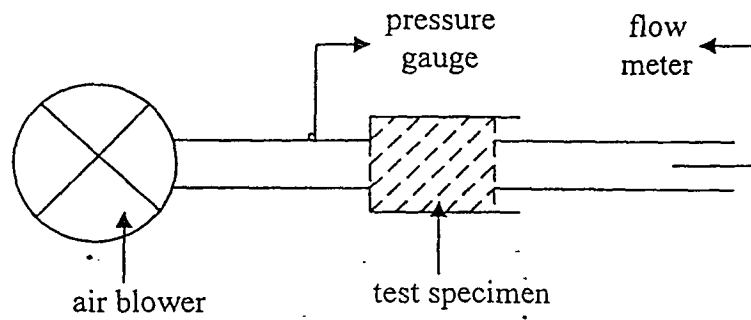


Figure 1. The experiment setup for the flow resistivity measurement.

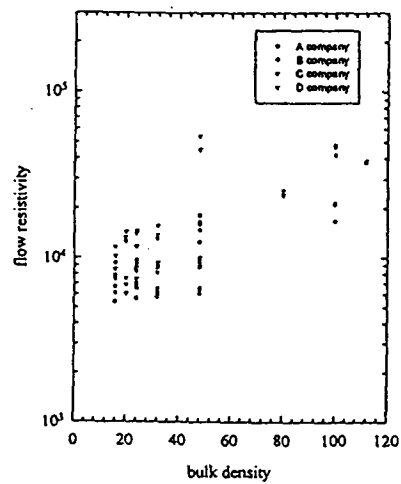


Fig. 2. The measured flow resistivity of glass fibrous wool of different bulk densities.

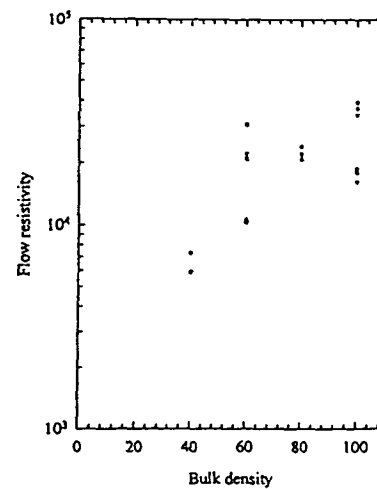


Fig. 3. The measured flow resistivity of rock fibrous wool of different bulk densities.

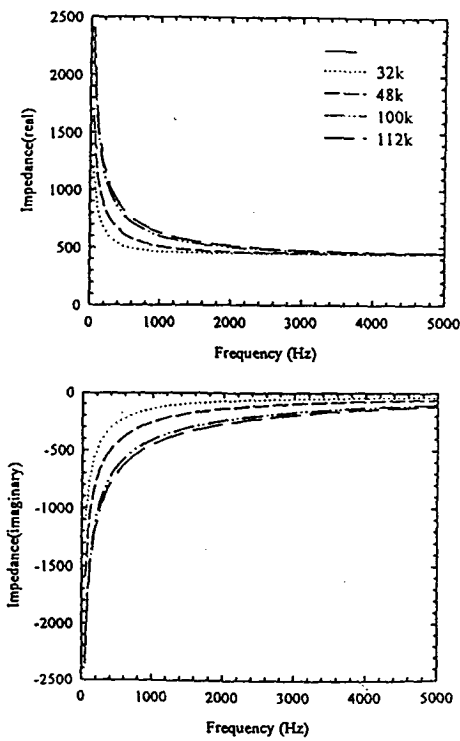


Fig. 4. The calculated mean characteristic impedance of glass wool for different bulk densities.

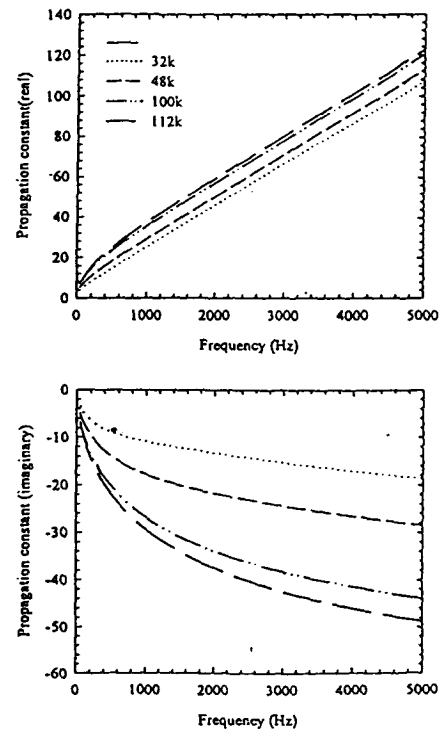


Fig. 5. The calculated mean complex propagation constant of glass wool for different bulk densities.

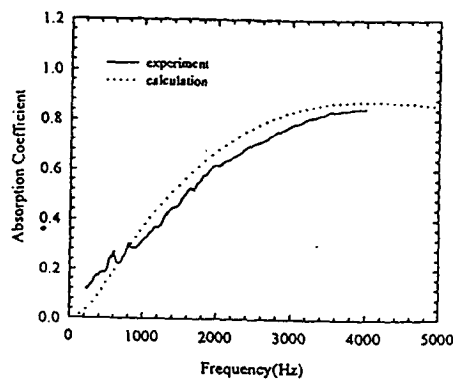


Fig. 6. The comparison of the calculated and experimental absorption coefficient for 24 K, 2.5 cm panel of glass fibrous wool.

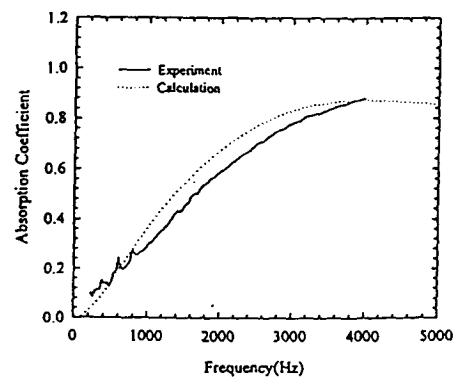


Fig. 7. The comparison of the calculated and experimental absorption coefficient for 32 K, 2.5 cm panel of glass fibrous wool.

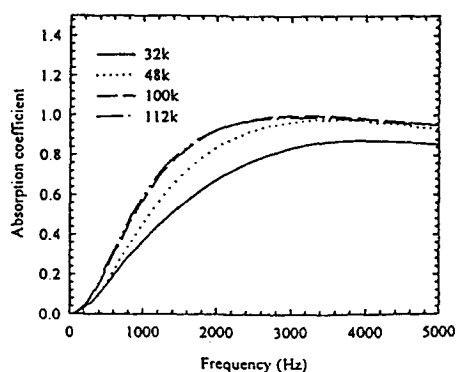


Fig. 8. The calculated absorption coefficient for 2.5 cm panel of glass fibrous wool back with rigid wall.

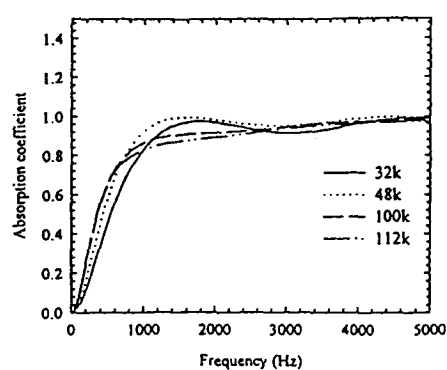


Fig. 9. The calculated absorption coefficient for 5 cm panel of glass fibrous wool back with rigid wall.

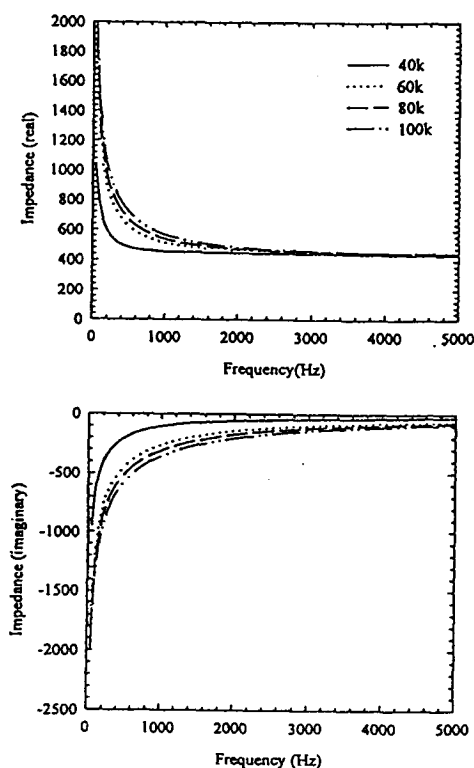


Fig. 10. The calculated characteristic impedance of the rock wool panel for different bulk densities.

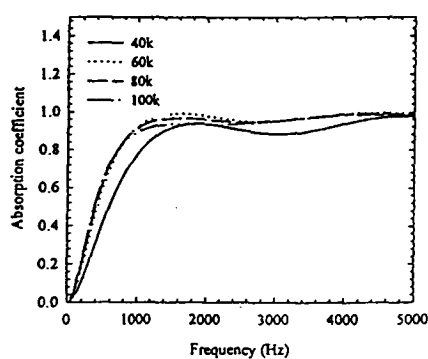


Fig. 11. The calculated absorption coefficient for 5 cm panel of the rock fibrous wool back with rigid wall.