

應用智能演算技術優化多孔隙泡沫鋼之吸聲性能

葉宥盛*¹ 陳冠宇** 曾有志** 何俊葦*** 張智傑***

*國防大學理工學院 造船及海洋工程碩士班

**國防大學理工學院 動力及系統工程學系

***海軍造船發展中心

關鍵詞: 多孔隙泡沫鋼、阻抗管、吸音係數、實驗設計法、田口法、智能演算

摘要

本研究採用316L不銹鋼粉為基體，應用「無壓漿料多孔隙材料燒結成型技術」成功製備具有不同孔隙率(48%-61%)和平均孔徑大小(1.15mm-4.4mm)的多孔隙泡沫鋼。實驗使用聲學阻抗管量測頻段100-6300 Hz之吸音係數，並利用3因子、2水準全因子實驗設計法研究探討孔隙率、孔徑及厚度大小對吸音性能的影響，經變異數分析結果顯示，不同頻率範圍皆以孔隙率對吸音係數的影響最為顯著，孔隙率越高，吸音性能越好。低頻段平均吸音係數(100-500 Hz)約0.22、中頻段(630-3150 Hz)約0.41、高頻段(4000-6300 Hz)約0.65；然孔徑大小及厚度對於吸音係數的影響不大。接續應用田口方法L₉直交表探討孔隙率、孔徑大小和厚度對於吸音係數是否存在非線性關係，並進一步運用智能演算針對不同頻段建構吸音係數代理模型，可加速開發具優異吸聲性能之泡沫鋼。

¹ 聯絡作者 葉宥盛 (soos43210@gmail.com.tw)

前言

金屬多孔隙泡沫材料在聲學方面具有優異的聲學性能，又以泡沫鋁為優，已有實際應用的案例，如音樂廳周圍降噪結構及餐廳天花板的吸音結構[1]。另有研究指出不同基材的多孔隙泡沫材料也具有出色的吸音效果，如鎳鉻鐵合金及銅基多孔隙泡沫材料[2]。

總聲能可視聲波經反射、吸收及透射的能量總和，聲波經過多孔隙泡沫材料會產生這些現象。多孔隙泡沫材料以吸音效果為優，故以量化之吸音係數做為評估方式，吸音係數為吸收聲能與總聲能的比值。而其具有優異的吸音性能主要與其孔洞形式、數量有關，孔隙須達到相當數量、為利聲波傳遞，孔洞以連通形式為優、亦與孔洞大小相關。然會產生優異的吸音效果，主要透過以下機制：(1) 多孔吸聲材料中的空氣分子振動並與孔壁發生摩擦產生黏滯損耗，使聲能轉化為熱能耗散；(2) 聲波穿透多孔材料時，孔隙中的空氣週期性壓縮和釋放，導致能量轉換過程中的能量消耗；(3) 聲能通過孔壁共振轉化為機械能和熱能[3]。

研究指出不同的孔洞形式對於吸音性能有相當大的影響，回顧多孔隙泡沫金屬設計對於吸音性能的影響。泡沫金屬結構中，對於閉孔而言，聲能無法有效穿透金屬材料，無法有效利用聲波在孔洞結構中摩擦產生的能量損失，降低噪音能量，達到降噪效果，在車輛吸音材料運用中，厚度增加對於中、低頻區域吸音性能有明顯提升[4]。然開孔形式與閉孔形式之多孔隙泡沫材料，吸音係數具有相當明顯的差異：Navacerrada等人亦透過滲透工藝製造開孔泡沫鋁，與商售閉孔泡沫鋁(Alpora)比較，數據指出開孔泡沫鋁有較好的吸音係數；另比較孔徑0.5-2mm之間，最小孔徑0.5mm之試片整體吸音效果較好 [5]。Lu等人以閉孔泡沫鋁(Alporas)為研究對象，為使孔洞具有開孔或半開孔結構，以軋製或鑽孔進行，結果證實具有通孔形式多孔隙泡沫材料對於吸音能有效提升，其原因亦與孔徑減小、及孔隙率齊聲有關 [6]。不同的研究數據顯示，小孔徑也具有較高的吸音係數：Han等人透過滲透法製造開孔泡沫鋁，其研究數據即指出孔徑較小，吸音效果較好，另厚度較厚也能有效提高其吸音效果[7]。另不同基材的多孔隙泡沫材料亦顯示較小的孔徑及較大的厚度有效提高其吸音係數，如Zhai等人採用PU泡沫作為模板，製作開孔鎳鉻鐵泡沫，另又以模擬方式證明與實驗具有一致的結果 [8]。近期MADVARI等人，採用Lu泡沫鋁模型，以試片厚度5~40mm之間模擬出最佳化吸音係數參數範圍，頻率在250~8000Hz，調整孔隙率及孔徑分別為50~95%、0.1~4.5mm之間可以得到優化的吸音係數[11]，其設定之孔洞形式參數與前述多篇文獻探討之參數設計相當吻合，且均具備有效的吸音效果，證實孔洞多寡與形式對於吸音係數有相當大的影響。然在316L基材之多孔隙泡沫材料中尚未得到證實具備吸音效果，本研究將透過獨有的製備方式調整孔洞形式參數：孔徑大小、孔隙率大小、厚度大小等，探討參數條件對316L基材之多孔隙泡沫材吸音係數之影響。並以實驗設計法、智能演算法等方式優化最佳吸音係數參數條件。

理論方法

實驗主要包含：多孔隙316L泡沫鋼製備、聲學阻抗管量測及吸音係數分析、實驗設計法、智能演算技術等，分述如下。

1. 多孔隙316L泡沫鋼製備

採用「無壓漿料鐵基多孔隙材料燒結成型技術」，以粉末燒結法進行多孔隙泡沫鋼的製備，材料製作製程主要分為(1)粉末混料、(2)漿料定型、(3)生胚烘乾及(4)燒結成型等四個步驟，概述如下(製成程序圖如圖 1 所示)。

本研究材料以市售保麗龍球坐為造孔劑，並與國內知名粉末冶金大廠「台灣保來得(Porite)股份有限公司」合作採購金屬原型粉末，製備泡沫鋼需先將316L不銹鋼粉末與黏結劑、水及中空球依實驗經驗比例混合，黏結劑及水添加量依粉末重量調整，約為13-15%，水於混合過程中需緩慢加入且低速攪拌，避免中途發生粉末結塊或滲入空氣狀況，當粉末呈現金屬光澤或有些微彈性狀態即可進行模具定型，經由添加不同比例保麗龍球及316L不銹鋼粉末，以烘乾及燒結製備不同孔隙率之泡沫鋼，上述製備法為「無壓漿料燒結法」。此外需注意的是，在烘乾過程中採遞增升溫，以溫度60°C持續6小時、80°C持續18小時執行，確保水分蒸發，提高脫模後半成品完整度，在燒結時以5°C/min升到400°C進行持溫2小時，使黏結劑揮發乾淨，再升溫至1300°C進行高溫燒結成型。

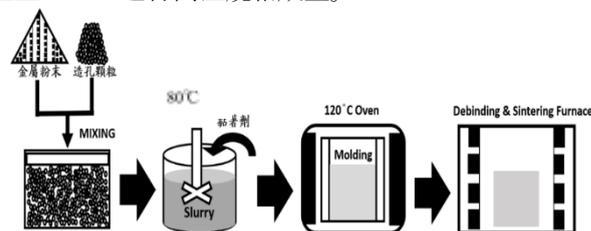


圖 1 燒結成型技術流程概要圖[12]。

2. 聲學阻抗管量測

採用ASTM E1050[13] / ISO 10534-2[14]規範轉移函數法的阻抗管設計(如圖2所示)：阻抗管應由剛性、光滑、無孔壁製成，壁應有足夠重量和具有一定厚度，以確保不會被聲音信號激發振動，並且在工作頻率範圍內不會出現共振。

2.1 阻抗管設計

阻抗管的直徑(d)和所量測到頻寬有很大的關係，其主要工作頻率範圍乃取決於管的直徑與麥克風之間的距離(管徑越大，可量測頻率越低；管徑越小，可量測頻率越高)，一般定義阻抗管工作頻率範圍如下：

$$f_l < f < f_u \quad (1)$$

其中 f 表示工作頻率(operating frequency)， f_l 表示工作頻率下限(lower working frequency)， f_u 表示工作頻率上限(upper working frequency)。而工作頻率下限是

決定麥克風的間距 s 與分析系統的準確性，定義如下：

$$f_l > 0.05 \frac{c}{s} \quad (2)$$

其中 c 為管內聲速 (m/s)

為了符合量測條件，管內聲波須保持為平面波，須滿足下列3個條件：工作頻率上限不得大高於阻抗管最低截止頻率、管子必須足夠長，為聲源和最靠近的麥克風最短距離須大於阻抗管直徑的3倍，公式如(3)、(4)、(5)：

$$d < K \frac{c}{f_u} \quad (3)$$

$$l - s - x_2 > 3d \quad (4)$$

$$x_2 > 2d \quad (5)$$

其中 d 為阻抗管直徑， c 為管內聲速 (m/s)。 $K = 0.58$ (方形管為0.5)

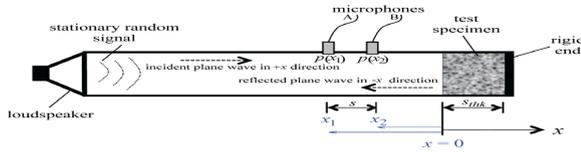


圖2 聲學阻抗管示意圖[15]

2.2 轉移函數法理論

管中的聲場由入射聲壓 $p_I(x)$ 和試片反聲壓 $p_R(x)$ 所組成，任意點的總聲壓 $p(x)$ 為：

$$p(x) = p_I(x) + p_R(x) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} \quad (6)$$

其中 A 、 B 分別為入射波及反射波的振幅，而麥克風 A、B 之聲壓分別為：

$$p_1(x) = Ae^{-ikx_1} + Be^{ikx_1} \quad (7)$$

$$p_2(x) = Ae^{-ikx_2} + Be^{ikx_2} \quad (8)$$

麥克風 A、B 之聲壓 $p_1(x)$ 及 $p_2(x)$ 經傅立葉轉換， $P(x_2, \omega)$ 與 $P(x_1, \omega)$ 之比值為轉移函數：

$$H_{12} = \frac{p_2(x_2, \omega)}{p_1(x_1, \omega)} = \frac{e^{-ikx_2} + re^{ikx_2}}{e^{-ikx_1} + re^{ikx_1}} \quad (9)$$

其中 r 為試片反射係數、 k 為波數。

進一步整理得到反射係數 r ：

$$r = \frac{H_{12}e^{-ikx_1} - e^{-ikx_2}}{e^{ikx_2} - H_{12}e^{ikx_1}} = \frac{H_{12}e^{-iks} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}e^{-iks}} e^{i2k(1+s)} \quad (10)$$

吸音係數 α 為無因次，介於 0~1 之間：

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (11)$$

特徵阻抗

$$z = \rho c \frac{1+r}{1-r} \quad (12)$$

3. 實驗設計法

實驗設計法 (Design of Experiments, DOE) 是一種統計方法，用於系統性地設計、分析和解釋實驗。透過 DOE，可以有效地識別關鍵因子，並了解因子對實驗結果的影響，DOE 主要目標之一是在最少的實驗次數下獲取最多的信息。通過使用正交設計方式，可減少實驗次數，同時獲得各個因子和因子交互作用間的豐富信息。進而節省時間和資源，同時確保實驗結果的可靠性和解釋性[16]。影響多孔隙金屬品質特性 (聲學性能) 之控制因子眾多，本研究針對孔徑、孔隙率及厚度進行探討。

本研究實驗初期採用全因子實驗法 (Full-Factorial Experiments) 之 Yates 法進行篩選實驗，第二階段採用田口法進行部分因子實驗，兩階段皆以變異數分析 (Analysis of Variance, ANOVA)，分析各因子的重要性，並觀察誤差大小，確保重要因子均已納入實驗。

3.1 篩選實驗

篩選實驗為實驗初期作為篩選因子的方法，在全因子實驗中，二水準因子實驗易於分析，且因其建構出之實驗次數最少，進而可減省實驗成本，故是在檢視一產品或流程時，最常作為篩選實驗的方法。通過評估分析後，可識別所選之潛在影響因子是否確實具有顯著影響，後續實驗可針對顯著因子取多水準，以探討因子非線性的影響。

本次研究使用二水準全因子設計，為 2^k 因子實驗設計；製備泡沫鋼之控制因子選定為孔徑、空隙率及厚度共 3 個，則 $k = 3$ ，故以 2^3 設計進行實驗 (變動水準如表 1)，分析各控制因子間對於品質特性 (吸音係數) 的主效果及因子間交互作用效果。

表 1 篩選實驗水準組合

控制因子		Level 1	Level 2
A	平均孔徑	1.15mm	4.4mm
B	孔隙率	48%	60%
C	厚度	10mm	30mm

3.2 田口方法

田口法以「品質損失函數」概念發展而來，其具有 2 大特點，其一是以特殊的正交設計創造之直交表；其二是信號雜訊比 (S/N) 當做衡量品質的指標。其中 S/N 是將平均數 (Mean) 作為「信號」，變異數作為「雜訊」，用最大 S/N 來決定最適化參數水準。S/N 的定義可表示為：

$$\frac{S}{N} = 10 \times \left(\frac{\text{訊號強度}}{\text{雜訊強度}} \right) \quad (13)$$

單位是分貝 (Decibel, dB)。不同型態品質特性，估算 S/N 的數學式不同，本研究採用望大特性類型 ((Larger-the-better, LTB))，公式如后：

$$\frac{S}{N} = -10 \log \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \approx -10 \log \log \left[\quad \right] \quad (14)$$

以本次實驗選用 $L_9(3^4)$ 直交表為例 (表 2)，行數為 4 代表最多可容納 4 個 3 水準因子，列數為 9 等於共有 9

組實驗，故實驗編號由1至9，且實驗順序採隨機方式執行。為求精簡，通常 $L_9(3^4)$ 直交表被稱為 L_9 直交表。使用直交表具有較少實驗次數、所獲得結論在實驗範圍裡均成立、具有良好再現性、資料分析簡單、可用於查核加法模式(Additive Model)是否成立等優勢。

表 2 L_9 直交表

Exp.	Column			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3.3 變異數分析

ANOVA主要目的有二，第一是評估實驗誤差，藉由「F檢定」進行檢測，F值是表示因子效果與誤差變異之間的關係，因子的F值越大，就表示因子效果對系統的影響越顯著，通常設定在95%信心水準下，如果F值大於設定之檢定臨界值，表示該因子對系統相對重要，反之則可將其視為實驗中的誤差，而誤差比例依經驗小於15%即表示已將重要因子納入實驗。第二為顯著性評估，可從ANOVA分析中得知個別因子及因子間交互作用的貢獻度，可說明因子效果在總變異中所佔的比例成分，並可取影響顯著之因子預測實驗模式。

4. 智能演算技術

智能演算法是一類模仿自然系統或使用數學模型來解決問題的算法。這些算法通常受到生物學、生態學、物理學、化學、社會學等領域的啟發，並且具有一定程度的自適應、學習或優化能力。智能演算法的目標是通過模擬自然系統的行為或者利用數學模型來優化問題的求解過程，比如基因演算法。

本研究採用前饋式網路(Feedforward Neural Net, FFNN)之倒傳遞神經網路，是一種由多層神經元組成的架構，區分為輸入層、隱藏層及輸出層，到傳遞網路演算法屬梯度下降(Gradient Descent)演算法，具有偏權值，隱藏層使用雙彎曲轉移函數，輸出層使用線性函數，每一層輸出為下一層之輸入。在設定隱藏層中，須避免加入過多或過少的神經元個數，才能有效顯示輸入與輸出值之關係，神經元個數常使用試誤法決定，使輸入與輸出值達到收斂小於預設條件[20]。

為避免類神經網路訓練過程中過度適配或學習不足問題，需給予合適之隱藏層神經元個數，隱藏層個數參考Yang[21]提出之方程式(如式(15))，計算第一層神經元個數；另第二層神經元個數依經驗法則為輸出值之兩倍。

$$\frac{\text{Number of input nodes} + \text{Number of output nodes}}{2} + \sqrt{N_1} \quad (15)$$

結果與討論

1. 多孔隙316L泡沫鋼聲學試片

經由「無壓漿料鐵基多孔隙材料燒結成型技術」製備之多孔隙316L泡沫鋼，能透過現有保麗龍球尺寸調整孔徑大小，藉保麗龍球於模具之佔比調整孔隙率，燒結後成品以線切割方式調整試片厚度及圓面直徑大小，以利執行不同因子水準組合的實驗試片聲學特性量測。依阻抗管設計，試片圓面直徑影響聲學阻抗管量測吸音係數的頻率範圍，直徑40 mm可量測頻率範圍為100-4000 Hz，直徑20 mm可量測頻率範圍為3150-6300 Hz(如圖 3)。

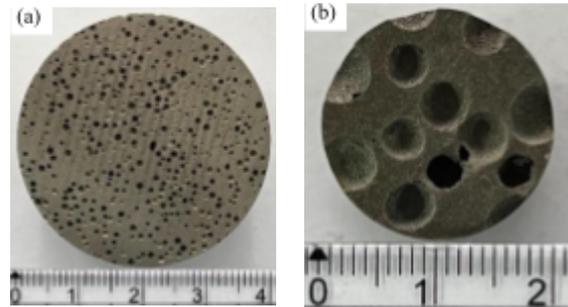


圖 3 聲學試片成品 (a) 40 mm, (b) 20 mm

2. 吸音係數分析

吸音係數分析分三階段進行，第一階段以篩選實驗確認3因子(孔徑、孔隙率、厚度)2水準對於吸音係數影響，第二階段以田口法 L_9 直交表，進行相同之3因子，另增加至3水準，以更準確了解各因子對於吸音係數的影響程度。第三階段以9組實驗數據，及27組線性回歸預測數據，帶入類神經網路並運用智能演算技術，建立不同頻段之非線性模型。

2.1 篩選實驗

本階段實驗採3因子2水準全因子實驗，即 2^3 設計進行8種不同水準組合之實驗，利用阻抗管重複量測吸音係數2次，取平均值(如表 3)繪製1/3倍頻之吸音係數頻譜圖，如圖 4，結果顯示頻率越高，吸音係數越大。

本研究為探討不同頻段的吸音特性，將頻率分為低頻(100-500 Hz)、中頻(630-3150 Hz)及高頻(4000-6000 Hz)等三個頻段，取各頻段之吸音係數平均值，先以Yates法計算各因子效果及平方和，透過Yates法估算之平方和在ANOVA進行分析。

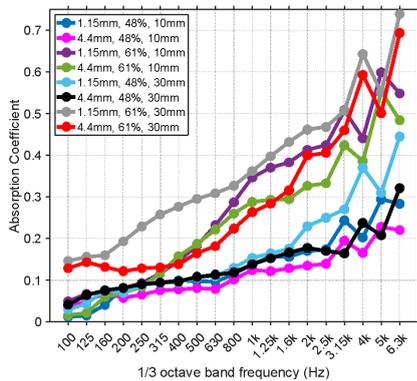


圖 4 吸音係數頻譜

表 3 3因子2水準實驗數據

實驗組合 NO.	控制因子			觀測值																		
	A	B	C	100Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
1	-1	-1	-1	0.012	0.015	0.040	0.081	0.088	0.094	0.099	0.097	0.096	0.114	0.138	0.156	0.155	0.170	0.174	0.243	0.202	0.294	0.283
2	1	-1	-1	0.037	0.048	0.069	0.057	0.065	0.075	0.077	0.080	0.078	0.101	0.124	0.121	0.128	0.135	0.139	0.194	0.165	0.228	0.220
3	-1	1	-1	0.049	0.066	0.070	0.081	0.093	0.115	0.147	0.182	0.232	0.287	0.346	0.370	0.383	0.412	0.424	0.508	0.441	0.599	0.548
4	1	1	-1	0.015	0.021	0.059	0.069	0.083	0.116	0.157	0.187	0.221	0.260	0.287	0.293	0.294	0.326	0.333	0.424	0.386	0.553	0.484
5	-1	-1	1	0.029	0.043	0.076	0.069	0.087	0.092	0.095	0.106	0.109	0.129	0.153	0.164	0.175	0.229	0.250	0.270	0.370	0.310	0.445
6	1	-1	1	0.041	0.064	0.075	0.081	0.090	0.094	0.097	0.108	0.113	0.118	0.138	0.152	0.166	0.177	0.170	0.164	0.237	0.208	0.321
7	-1	1	1	0.146	0.156	0.159	0.193	0.229	0.257	0.276	0.295	0.309	0.327	0.362	0.397	0.432	0.462	0.468	0.507	0.643	0.550	0.739
8	1	1	1	0.128	0.143	0.132	0.121	0.128	0.130	0.138	0.164	0.181	0.224	0.263	0.283	0.315	0.400	0.406	0.460	0.593	0.501	0.693

2.1.1 低頻分析

低頻(100-500 Hz)吸音係數平均之ANOVA分析結果(如表 4), 僅孔徑1.15 mm、孔隙率61%、厚度30mm(灰線)之試片吸音係數平均值大於0.2, 具有吸音效果; 由ANOVA分析, 在信心水準83%下, F檢定值為2.97, 個因子及因子交互作用F值大於2.97為B因子(孔隙率)、C因子(厚度)及BC因子交互作用(孔隙率與厚度交互作用), 貢獻度分別為40.61%、20.09%及8.28%, 其餘各因子F值低於2.97以下, 對吸音率無顯著性貢獻, 故納入誤差, 總殘差為31.03%。誤差貢獻度較高即表示可能有其他重要因子未納入評估, 另由頻譜圖(圖 4)可看出低頻隨著孔徑及厚度增加, 吸音係數沒有增加, 緊隨孔隙率增加具有較大的上升趨勢, 惟僅灰色曲線於250Hz以上時具有吸音效果, 其餘實驗組合於低頻時均不具吸音效果, 因此下一階段實驗, 低頻段分析將不納入評估討論。

2.1.2 中頻分析

中頻(630-3150 Hz) 取實驗數據之平均值進行ANOVA分析結果如表 5, 顯著水準為0.05時的F檢定值為10.13, B因子(孔隙率)最為重要, 貢獻度89.81%; A因子(孔徑)次之, 貢獻度7.05%; C因子(厚度)貢獻度1.43%; AB因子交互作用(孔徑及孔隙率的交互作用)貢獻度1.22%, 為弱交互作用, 其餘各因子F值低於10.13, 對吸音率無顯著性貢獻, 故納入誤差, 總殘差為0.49%。

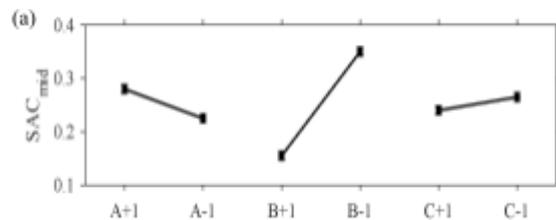
由因子主效果圖(圖5(a))顯示較佳的吸音效果組合為孔徑小、孔隙率大、厚度大。另由孔徑與孔隙率交互作用(圖5(b))亦可判定小孔徑、大孔隙率具有較佳

的吸音效果, 即孔徑1.15 mm、孔隙率61%、厚度30mm之實驗組合具有最高的平均吸音係數, 值為0.41。

2.1.2 高頻分析

4000-6300 Hz頻段以吸音係數平均值執行ANOVA分析(如表 6)顯示, 顯著水準為0.05時的F檢定值為7.71, 因子主效果及交互作用之F值大於7.71之顯著因子為B因子(孔隙率), 貢獻度83.41%, C因子(厚度)貢獻度9.95%, A因子(孔徑)貢獻度4.60%。餘各因子F值低於7.71, 對吸音率無顯著性貢獻, 故納入誤差, 總殘差為2.04%。

由因子主效果圖(圖6)得吸音效果最佳的組合為小孔徑、大孔隙率、大厚度之試片具有最佳吸音率, 值為0.64。



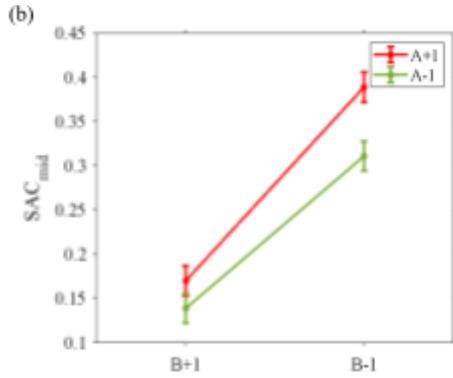


圖5 (a)因子主效果、(b)AB因子交互作用圖

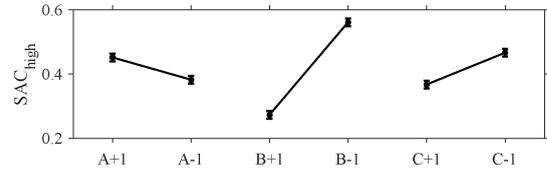


圖6 因子主效果圖

表 4 變異數分析表(100-500 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.17}	P-value	SS'	貢獻率 (%)
A	(9.16E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
B	8.01E-03	1	0.01	10.16	2.79	0.033	0.007	40.61%
AB	(1.11E-03)	(1)	—	—	—	—	—	—
C	4.36E-03	1	0.00	5.53	2.79	0.078	0.004	20.09%
AC	(4.16E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
BC	2.26E-03	1	0.00	2.87	2.79	0.166	0.001	8.28%
ABC	(7.06E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
誤差	0.00	4	7.88E-04				0.01	31.03%
總和	0.02	7					0.02	100.00%

*At least 83% confidence level

表 5 變異數分析表(630-3150 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.05}	P-value	SS'	貢獻率 (%)
A	6.04E-03	1	6.04E-03	101.73	10.13	0.00208	5.98E-03	7.05%
B	7.63E-02	1	7.63E-02	1283.88	10.13	4.8E-05	7.62E-02	89.81%
AB	1.09E-03	1	1.09E-03	18.39	10.13	0.0233	1.03E-03	1.22%
C	1.27E-03	1	1.27E-03	21.36	10.13	0.01907	1.21E-03	1.43%
AC	(1.34E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
BC	(6.78E-07)	(1)	—	—	—	—	—	—
ABC	(4.34E-05)	(1)	—	—	—	—	—	—
誤差	1.78E-04	3	5.94E-05				4.16E-04	0.49%
總和	8.49E-02	7					8.49E-02	100.00%

*At least 95% confidence

表 6 變異數分析表(4000-6300 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.05}	P-value	SS'	貢獻率 (%)
A	9.66E-03	1	9.66E-03	16.77	7.71	0.01491	0.009	4.60%
B	1.65E-01	1	1.65E-01	286.87	7.71	7.1E-05	0.165	83.41%
AB	(6.42E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
C	2.02E-02	1	2.02E-02	35.09	7.71	0.00407	0.020	9.95%
AC	(4.13E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
BC	(6.19E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
ABC	(6.30E-04)	(1)	—	—	—	—	—	—
誤差	0.00	4	5.76E-04				0.004	2.04%
總和	0.20	7					0.20	100.00%

*At least 95% confidence

2.2 L₉直交表實驗

由3因子2水準篩選實驗中得知, A因子(孔徑)、B因子(孔隙率)、C因子(厚度)大小對於多孔隙泡沫鋼之吸音性能具有影響, 為了瞭解各因子間是否存在非線性作用, 將A、B、C三種因子區分為3水準(如表 4), 採田口L₉直交表進行第二階段部分因子實驗, 本階段

以阻抗管重複量測吸音係數3次, 取平均值之實驗數據如表 11, 1/3倍頻之吸音係數頻譜圖(如圖 7)。

表 4 因子水準表

控制因子		Level 1	Level 2	Level 2
A	平均孔徑	1.15mm	2.4mm	4.4mm
B	孔隙率	48%	55%	61%

C	厚度	10mm	20mm	30mm
---	----	------	------	------

2.2.1 中頻(630-3150 Hz)

取實驗數據之平均值並估算S/N值經ANOVA分析結果分別如表 9、表 10, S/N值顯著水準為0.05時的F臨界值為19, B因子(孔隙率)最為重要, 貢獻度94.42%; A因子(孔径)次之, 貢獻度3.09%; C因子(厚度)貢獻度2.19%, 總殘差為0.31%。平均值顯著水準為0.05時的F臨界值為19, B因子(孔隙率)最為重要, 貢獻度93.22%; A因子(孔径)次之, 貢獻度3.47%; C因子(厚度)貢獻度2.79%, 總殘差為0.52%。

由因子主效果圖(圖8 (a),(b))均顯示較佳的吸音效果水準組合為A₁B₃C₃, 即孔径1.15 mm、孔隙率61%、厚度30 mm, 有最高的吸音係數, 值為0.38、S/N值為-8.25。

由因子主效果圖(圖9 (a),(b))得吸音效果最佳的組合為A₃B₃C₃之試片具有最佳吸音率, 吸音係數為0.61、S/N值為-4.29。

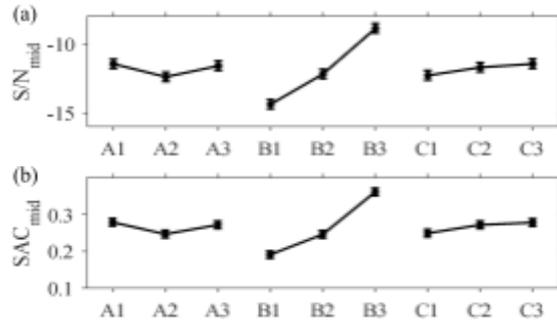


圖8 (a)S/N效果、(b)平均值效果

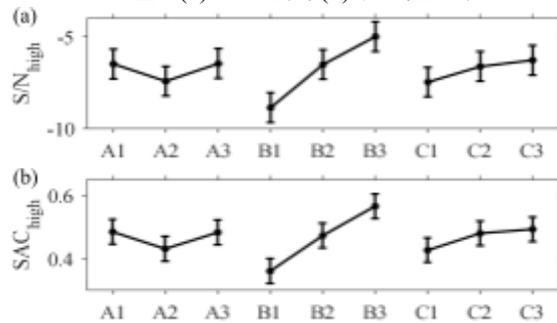


圖9 (a)S/N效果、(b)平均值效果

2.2.2 高頻分析(4000-6300 Hz)

4000-6300 Hz頻段的吸音係數平均值及S/N值, 經ANOVA分析(如表 11、表 12)分別顯示, S/N值信心水準設定89%時的F檢定值為8.09, 因子效果之F值均大於8.09, 顯著程度依序為B因子(孔隙率), 貢獻度83.50%, C因子(厚度)貢獻度7.52%, A因子(孔径)貢獻度5.86%, 總殘差為3.11%。平均值信心水準設定85%時的F檢定值為5.67, 因子效果之F值均大於8.09, 顯著程度依序為B因子(孔隙率), 貢獻度80.36%, C因子(厚度)貢獻度8.34%, A因子(孔径)貢獻度6.09%, 總殘差為5.21%。

表 8 3 因子3水準實驗組合數據

實驗組合 NO.	觀測值																		
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz
1	0.058	0.063	0.069	0.080	0.092	0.094	0.099	0.103	0.111	0.125	0.149	0.164	0.186	0.222	0.241	0.316	0.269	0.386	0.407
2	0.074	0.078	0.087	0.100	0.108	0.114	0.119	0.130	0.144	0.166	0.194	0.216	0.251	0.328	0.355	0.434	0.483	0.503	0.494
3	0.103	0.122	0.175	0.187	0.206	0.220	0.235	0.254	0.273	0.299	0.341	0.378	0.415	0.444	0.454	0.489	0.604	0.516	0.705
4	0.054	0.064	0.084	0.081	0.081	0.087	0.091	0.099	0.107	0.123	0.147	0.159	0.174	0.215	0.220	0.288	0.327	0.343	0.341
5	0.088	0.097	0.103	0.106	0.106	0.112	0.123	0.137	0.152	0.175	0.198	0.228	0.248	0.291	0.337	0.466	0.393	0.393	0.573
6	0.047	0.059	0.066	0.083	0.088	0.110	0.146	0.197	0.235	0.279	0.298	0.305	0.323	0.334	0.367	0.424	0.412	0.484	0.540
7	0.040	0.048	0.062	0.080	0.089	0.099	0.107	0.120	0.129	0.152	0.176	0.195	0.212	0.244	0.253	0.281	0.363	0.320	0.496
8	0.050	0.059	0.075	0.082	0.109	0.118	0.131	0.139	0.147	0.167	0.185	0.204	0.233	0.267	0.311	0.375	0.383	0.465	0.494
9	0.077	0.087	0.133	0.147	0.168	0.186	0.200	0.218	0.237	0.272	0.318	0.350	0.392	0.418	0.455	0.558	0.625	0.540	0.665

表 9 S/N變異數分析(630-3150 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.05}	P-value	SS'	貢獻率(%)
變異來源	1.5375	27	0.5688	40.80	19.00	0.0000	1.4998	97.47%
A	1.5375	3	0.5125	36.86	19.00	0.0000	1.4998	97.47%
B	4.49E-02	2	2.25E-02	1.63	19.00	0.0074	0.0448	3.19%
C	1.08E-03	2	5.4E-04	0.39	19.00	0.0429	0.0013	0.09%
誤差	(6.09E-05)	(2)	0.0188	—	—	—	0.1507	0.31%
總和	4.81E-02	8	3.15E-05	—	—	—	48.6098	100.00%

表 10 平均變異數分析(630-3150 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.11}	P-value	SS'	貢獻率(%)
變異來源	1.5375	27	0.5688	40.80	19.00	0.0000	1.4998	97.47%
A	1.5375	3	0.5125	36.86	19.00	0.0000	1.4998	97.47%
B	4.49E-02	2	2.25E-02	1.63	19.00	0.0074	0.0448	3.19%
C	1.08E-03	2	5.4E-04	0.39	19.00	0.0429	0.0013	0.09%
誤差	(6.09E-05)	(2)	0.0188	—	—	—	0.1507	0.31%
總和	4.81E-02	8	3.15E-05	—	—	—	48.6098	100.00%

表 11 S/N變異數分析表(4000-6300 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.11}	P-value	SS'	貢獻率(%)
變異來源	1.5375	27	0.5688	40.80	19.00	0.0000	1.4998	97.47%
A	1.5375	3	0.5125	36.86	19.00	0.0000	1.4998	97.47%
B	4.49E-02	2	2.25E-02	1.63	19.00	0.0074	0.0448	3.19%
C	1.08E-03	2	5.4E-04	0.39	19.00	0.0429	0.0013	0.09%
誤差	(6.09E-05)	(2)	0.0188	—	—	—	0.1507	0.31%
總和	4.81E-02	8	3.15E-05	—	—	—	48.6098	100.00%

A	1.7849	2	0.8925	8.54	8.09	0.1048	1.5759	5.86%
B	22.6544	2	11.3272	108.39	8.09	0.0091	22.4454	83.50%
C	2.2317	2	1.1159	10.68	8.09	0.0856	2.0227	7.52%
e	(0.2090)	(2)	—	—	—	—	—	—
誤差 總和	0.2090 26.8801	2 8	0.1045	*At least 89% confidence			0.8361 26.8801	3.11% 100.00%

表 12 平均值變異數分析表(4000-6300 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.15}	P-value	SS'	貢獻率 (%)
A	5.69E-03	2	2.84E-03	5.68	5.67	0.1497	0.0047	6.09%
B	6.28E-02	2	3.14E-02	62.70	5.67	0.0157	0.0618	80.36%
C	7.42E-03	2	3.71E-03	7.40	5.67	0.1190	0.0064	8.34%
e	(1.00E-03)	(2)	—	—	—	—	—	—
誤差 總和	1.00E-03 7.69E-02	2 8	5.01E-04	*At least 85% confidence			0.0040 0.0769	5.21% 100.00%

2.3 智能演算分析

完成第一階段篩選實驗及第二階段L₉表實驗，接續使用倒傳遞網路(BPN)進行非線性反應曲面建模，訓練函數使用trainbr，輸入參數為三個控制因子(孔徑、孔隙率及厚度)，隱藏層為兩層，輸出值為S/N值，依據相關係數R值、判定係數R²值、及均方根誤差RMSE判斷本模型是否屬於預測能力好之模型。

實驗數據訓練組為L₉吸音係數實驗數據之平均值共9組，驗證組經線性回歸預測共27組，第一二層隱藏層個數依前述 (15) 式及經驗法則計算，分別為5、2個，將數據帶入中頻及高頻分析結果如后。

中頻(630-3150 Hz)分析，透過網路建模之三維反應曲面(如圖9(a),(b))，從圖中得知，因子間不存在非線性關係，S/N相關係數R為0.985(如圖10)、判定係數R²為0.967，均方根誤差為0.526，由S/N預測模型與田口法因子圖，其趨勢一致(如圖11)，各因子間均不具有交互作用。另經由基因演算法尋優之該頻段最佳吸音係數組合為A₁B₃C₃，模型預測之S/N值為-8.7295，即孔徑1.15 mm、孔隙率61%、厚度30 mm之實驗組合具有最佳之吸音性能，與前兩階段分析之結果一致。

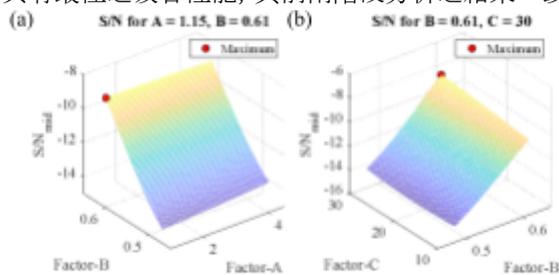


圖9 (a),(b)倒傳遞建模三維反應曲面圖

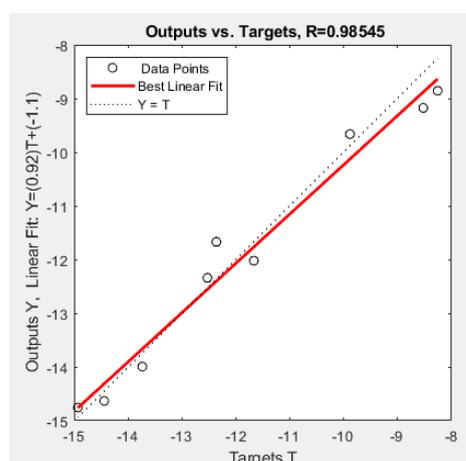


圖10 倒傳遞網路S/N建模之預測模型相關係數圖

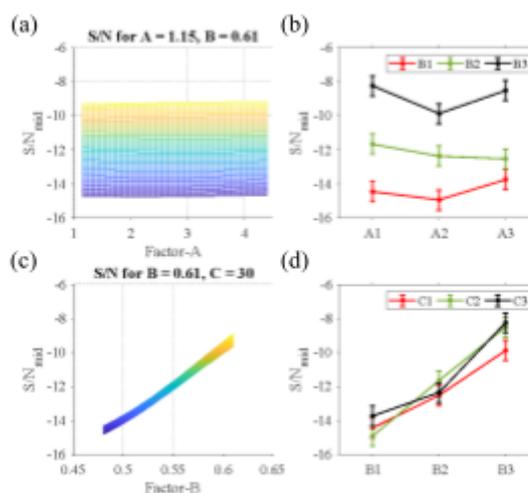


圖11 (a),(c)S/N反應曲面對照(b),(d)交互作用

高頻(4000-6300 Hz)分析，透過類神經建模之三維反應曲面(如圖14(a),(b))，從圖中得知，因子間不存在非線性關係，S/N相關係數R為0.964(如圖12)、判定

係數R2為0.925, 均方根誤差為0.482, 由S/N預測模型與田口法因子圖, 其趨勢一致(如圖13), 各因子間均不具有交互作用。以基因演算法尋優之該頻段最佳吸音係數組合為A₃B₃C₃, 模型預測之S/N值為-4.2909, 即孔徑4.4 mm、孔隙率61%、厚度30 mm之實驗組合具有最佳之吸音性能, 與第二階段分析之結果一致, 惟孔徑之影響與第一階段分析結果不同, 第一階段以最小孔徑為優, 第二階段則以最大孔徑為優, 孔徑於第二階段S/N及平均值效果圖中, 不同水準反應均於其他水準之誤差範圍內, 且經兩階段ANOVA分析之貢獻度均較低, 另以表實驗組合3之吸音係數為0.608比較最佳組合實驗組合9之吸音係數為0.610, 差異非常小, 為綜合中高頻段孔徑對於吸音係數之影響, 最後將中高頻段(630-6300 Hz) 平均吸音係數進行分析。

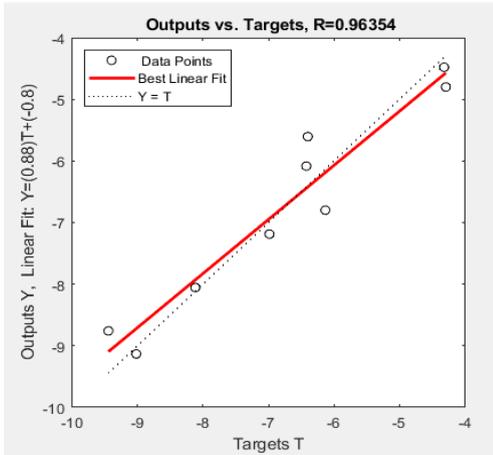


圖12 倒傳遞網路S/N建模之預測模型相關係數圖

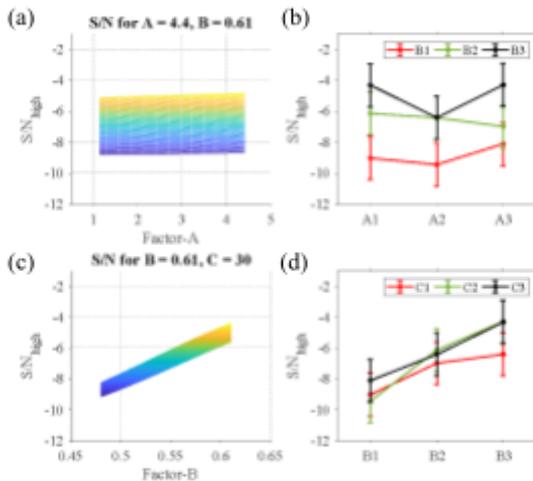


圖13 (a),(c)S/N反應曲面對照(b),(d)交互作用

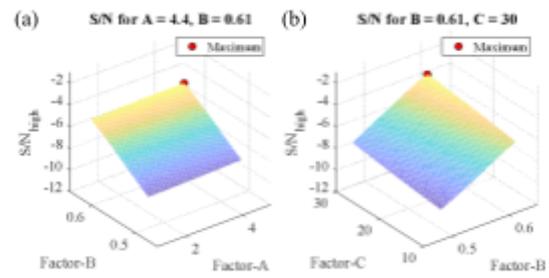


圖14 (a),(b)倒傳遞建模三維反應曲面圖

2.4 中高頻段分析及綜合研析

中高頻段(630-6300 Hz)分析, 由第二階段之實驗數據平均並估算S/N值, 進行ANOVA分析分別顯示(如表 13、表 14), S/N值信心水準設定94%時的F臨界值為15.67, 因子效果之F值均大於15.67, 顯著程度依序為B因子(孔隙率), 貢獻度89.10%, C因子(厚度)貢獻度4.97%, A因子(孔徑)貢獻度4.62%, 總殘差為1.31%。平均值信心水準設定90%時的F臨界值為9, 因子效果之F值均大於9, 顯著程度依序為B因子(孔隙率), 貢獻度86.76%, C因子(厚度)貢獻度5.72%, A因子(孔徑)貢獻度5.03%, 總殘差為2.49%。

由因子主效果圖(圖15 (a),(b))得吸音效果最佳的組合為A₁B₃C₃之試片具有最佳吸音率。吸音係數為0.498、S/N值為 -6.06。

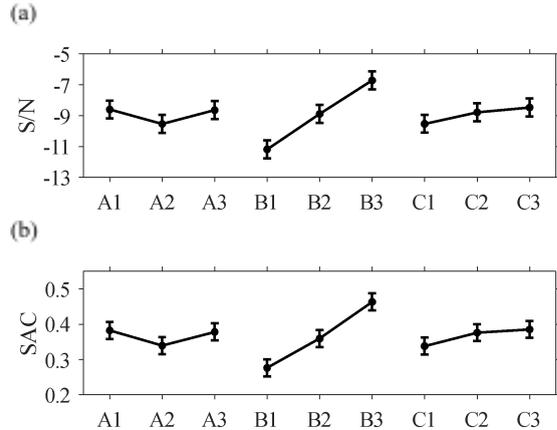


圖15 (a)S/N效果、(b)平均值效果

中高頻(630-6300 Hz)分析, S/N相關係數R為0.988(如圖16)、判定係數R2為0.971, 均方根誤差為0.558, 建模之三維反應曲面(如圖17(a),(b)), 從圖中得知, 因子間不存在非線性關係, 由S/N預測模型與田口法因子圖, 其趨勢一致(如圖18), 各因子間均不具有交互作用。以基因演算法尋優之該頻段最佳吸音係數組合為A₁B₃C₃, 模型預測之S/N值為-8.6173, 即孔徑1.15 mm、孔隙率61%、厚度30 mm之實驗組合具有最佳之吸音性能。

100 Hz~6.3 kHz之1/3倍頻帶之吸音率頻譜量測結果, 孔隙率最重要, 其次為孔徑及厚度。孔隙率48%、55%, 僅對於高頻的聲波有吸音效果(顯示頻率需達中高頻, 吸音係數大於0.2時)。於低頻實(100-500

Hz)吸音性能曲線趨於一致，表示孔隙率55%以下時無吸音效果，且不受孔徑及厚度影響。

孔隙率61%時，孔徑較小試片，在低頻段較具有吸音效果(如圖灰、紫線、及圖紫黑黃線)，均於較低頻段時吸音係數即大於0.2，且厚度較厚者具有吸音效果的頻段會較低。

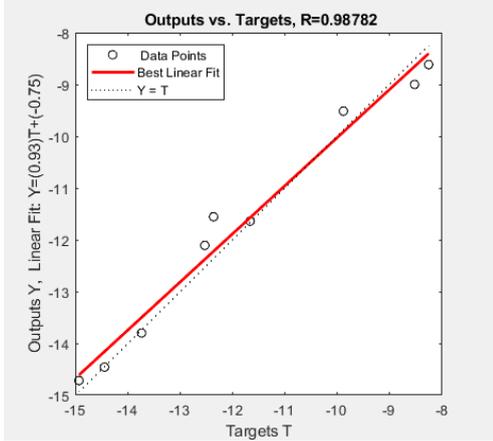


圖16 倒傳遞網路S/N建模之預測模型相關係數圖

圖17 (a),(b)倒傳遞建模三為反應曲面圖

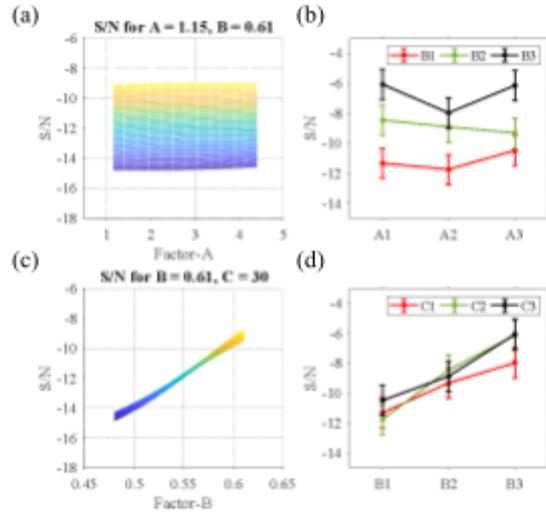


圖18 (a),(c)S/N反應曲面對照(b),(d)交互作用

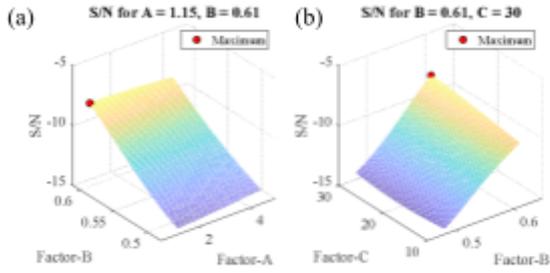


表 13 S/N變異數分析表(630-6300 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.06}	P-value	SS'	貢獻率 (%)
A	1.6512	2	0.8256	15.09	15.67	0.0621	1.5418	4.62%
B	29.8553	2	14.9276	272.90	15.67	0.0037	29.7459	89.10%
C	1.7675	2	0.8837	16.16	15.67	0.0583	1.6581	4.97%
e	(0.1094)	(2)	—	—	—	—	—	—
誤差	0.1094	2	0.0547				0.4376	1.31%
總和	33.3833	8					33.3833	100.00%

*At least 94% confidence

表 14 平均值變異數分析表(630-6300 Hz)

變異來源	SS	df	MS	F	F _{0.1}	P-value	SS'	貢獻率 (%)
A	3.40E-03	2	1.70E-03	9.06	9.00	0.0994	0.0030	5.03%
B	5.26E-02	2	2.63E-02	140.22	9.00	0.0071	0.0523	86.76%
C	3.82E-03	2	1.91E-03	10.17	9.00	0.0895	0.0034	5.72%
e	(3.75E-04)	(2)	—	—	—	—	—	—
Error	3.75E-04	2	1.88E-04				0.0015	2.49%

Total	6.02E-02	8	*At least 90% confidence	0.0602	100.00%
-------	----------	---	--------------------------	--------	---------

由圖可看出在630 Hz以上頻段，較具規律性，孔徑小、孔隙率大、厚度大者，吸音率較高，依序為灰、紅、紫、綠曲線。另圖因實驗組合關係，無法互相比較，透過ANOVA分析結果，中高頻(630-6300 Hz)最佳組合為 $A_1B_3C_3$ ，且經智能演算技術預測之最佳水準組合亦為 $A_1B_3C_3$ ，趨勢一致。

高頻音波長較短，聲能衰減較快(高頻音的振動速度較快，即在同樣時間內高頻聲波引起的空氣分子振動次數較多，與周圍的空氣分子有較多的摩擦，使聲能轉化為熱能更快，衰減就更快)，孔隙率大致使流阻率低，聲波容易進入泡沫鋼材孔隙，空氣反覆壓縮與膨脹，在複雜的結構中與孔壁交互作用，使聲能轉變成熱能。

而低頻音波長較長，聲能衰減較慢(低頻聲波振動速度較慢，與周圍空氣分子的摩擦較少)，即使入射孔隙率大表面，轉換成熱能的程度較中高頻音波低，故較難消除低頻音。增加厚度，進而增加聲波傳播路徑，

使聲波與孔壁摩擦次數增加，對低頻因吸音率提升會有較好的效果。

結論

本研究採自行製備多孔隙316L泡沫鋼，透過試片設計厚度10-30mm，孔隙率48~61%，平均孔徑1.15~4.4mm，探討各參數對聲學性能之影響，以吸音係數為品質特性，藉實驗設計法、田口法ANOVA分析及智能演算技術，尋求不同頻段因子水準最佳化吸音係數趨勢，分析結果歸納如下：

- (1) 高孔隙率於全頻段均具有增加吸音係數效果。
- (2) 孔徑大小對各頻段吸音係數影響效果不明顯，且呈現非線性影響。
- (3) 厚度增加僅對於低頻(小於500Hz)時增加吸音係數有較好的效果。

透過分析結果，可先行了解降噪需求頻段，並針對該頻段選擇對應之最佳參數設計泡沫鋼，達到降噪的效果。

參考文獻

1. Francisco Garcia-Moreno, "Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production," *Materials*, vol. 9, issue 2, pp. 85 (2016).
2. A. Arjunan, A. Baroutaji, A. S. Praveen, A. G. Olabi, C. J. Wang, "Acoustic Performance of Metallic Foams," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, (2019).
3. Leitao Cao, Qiuxi Fu, Yang Si, Bin Ding, Jianyong Yu, "Porous materials for sound absorption," *Composites Communications*, vol. 10, pp. 25-35 (2018).
4. 朱政崑, "不織布結構吸音降噪之研究", 財團法人紡織產業綜合研究所, 8頁。
5. M.A. Navacerrada, P. Fernández, C. Díaz, A. Pedrero, "Thermal and acoustic properties of aluminium foams manufactured by the infiltration process," *Applied Acoustics*, vol. 74, iss. 4, pp.496—501 (2012)
6. T. J. Lu, Audrey Hess, and M. F. Ashby, "Sound absorption in metallic foams," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, iss. 11, pp.7528—7539 (1999.)
7. Fusheng Han, Gary Seiffert, Yuyuan Zhao and Barry Gibbs, "Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam," *Journal of Physics D Applied Physics*, vol. 36 iss. 3 pp.294—302 (2003)
8. Wei Zhai et al, "Microstructure-based experimental and numerical investigations on the sound absorption property of open-cell metallic foams manufactured by a template replication technique," *Materials & Design*, vol. 137, pp.108—116 (2015)
9. Rohollah Fallah MADVARI et al. "Estimation of Metal Foam Microstructure Parameters for Maximum Sound Absorption Coefficient in Specified Frequency Band Using Particle Swarm Optimisation," *Archives of Acoustics*, Vol. 47, pp. 33-42, (2022)
10. 吳翊維, "陶瓷/泡沫鋼三層複合材料抗彈性能分析", 國防大學理工學院兵器系統工程研究所碩士論文, 85頁。
11. ASTM E1050-12. 2012. Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two- Microphone and A Digital Frequency Analysis System, ASTM International, West Conshohocken, PA.
12. ISO 10534-2, 1998, Acoustic – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.
13. Đuriš, R., and E. Labašová. "The design of an impedance tube and testing of sound absorption coefficient of selected materials." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1050. No. 1. IOP Publishing, (2021).
14. 蘇朝敦, 品質工程, 中華民國品質協會, 2008。
15. 李川田, "運用田口法與智慧型參數設計探討質子交換膜燃料電池堆多品質性能研究", 國防大學理工學院國防科學研究所博士論文, 119頁。
16. 羅華強, 類神經網路: MATLAB的應用, 台灣, 高立圖書館, 2011。
17. T. Yang, H.-C. Lin, and M.-L. Chen, "Metamodeling approach in solving the machine parameters optimization problem using neural network and genetic algorithms: A case study." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 22, no. 4, pp. 322-331, 2006.

Applying intelligent calculation technology to optimize the sound absorption performance of steel foam

Y. S. Yeh^{*1} *K.Y. Chen*^{**} *Y. C. Tzeng*^{**} *C.W. Ho*^{***} *C.C. Cheng*^{***}

* Department of Power Vehicle and Systems Engineering, CCIT, National Defense University

**Master Program of Power Vehicle and Systems Engineering, CCIT, National Defense University

***Naval Shipbuilding Development Center

Keywords: Porous foam steel, impedance tube, sound absorption coefficient, experimental design method, Taguchi method, intelligent calculation

ABSTRACT

This study uses 316L stainless steel powder as the matrix and applies "pressureless slurry porous material sintering molding technology" to successfully prepare porous foams with different porosity (48%-61%) and average pore size (1.15mm-4.4mm) steel. The experiment used an acoustic impedance tube to measure the sound absorption coefficient in the frequency band 100-6300 Hz, and used the 3-factor and 2-level full factorial experimental design methods to study the effects of porosity, pore size and thickness on the sound absorption performance. The results of variation analysis showed that, In different frequency ranges, porosity has the most significant impact on the sound absorption coefficient. The higher the porosity, the better the sound absorption performance. The average sound absorption coefficient in the low frequency band (100-500 Hz) is about 0.22, the mid-frequency band (630-3150 Hz) is about 0.41, and the high-frequency band (4000-6300 Hz) is about 0.65; however, the aperture size and thickness have little impact on the sound absorption coefficient. The Taguchi method L9 orthogonal table is then used to explore whether there is a non-linear relationship between porosity, pore size and thickness on the sound absorption coefficient. Intelligent calculations are further used to construct sound absorption coefficient proxy models for different frequency bands, which can accelerate the development of foam steel with excellent sound absorption properties.