

梯度式結構泡沫鋼之吸聲性能研究

李安真*¹ 陳冠宇** 曾有志** 陳春元*** 林文仁***

*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: 泡沫鋼、梯度式結構、聲學阻抗管

摘要

本研究基於「無壓漿料鐵基多孔材料燒結成型技術」，固定結構參數孔隙率和厚度，開發了孔徑大小作為梯度分層的梯度型316L不銹鋼泡沫鋼。研究中使用聲學阻抗管來量測梯度型泡沫鋼的吸音係數，結果顯示，當聲波入射正梯度（孔徑由小到大）泡沫鋼時，泡沫鋼的吸音性能優於入射負梯度的泡沫鋼。此外，與相同孔徑的泡沫鋼進行比較，正梯度泡沫鋼在整個頻段（100-6300 Hz）均表現出更優越的吸音能力，最大吸音係數由0.58提升至0.71。

¹ 聯絡作者李安真 (a0981992182@gmail.com)

前言

產品的品質通常受到材料性能的影響。材料的性能直接影響產品的功能、耐久性、安全性和可靠性。傳統上，單一均質材料僅能提供其特定功能，若要同時具有多功能性，必須結合多種單功能性材料，然而這往往伴隨高成本且可能對環境造成損害。隨著全球環保意識抬頭和科技的不斷進步，材料和製程的創新推動功能梯度材料(Functionally Graded Materials, FGM)的快速發展。功能梯度材料(FGM)在厚度方向上呈現巧妙的成分和結構變化，因而展現出不同的特性，能夠滿足單一材料所缺乏的性質。這不僅更有效地應對相關的工程問題，還有助於推動經濟發展、環保和節能減碳[1]。

1984年，日本科學家平井敏雄首次提出了功能材料的新概念和想法[2]。這種材料的特點是選擇兩種具有不同性能的材料，結合兩種材料的組成和結構，以消除其內部界面，使非均質材料的性能隨著組成和結構的變化而變化。這種設計的目的是為了減少或克服材料結合部位的性能不匹配問題。舉例來說，對於超音速飛機的燃燒衝壓式發動機之燃燒室壁的應用，調整在陶瓷和金屬材的組成和微結構的變化，使兩種材料之間無明顯的界面存在，因而賦予此材料能應用於溫度變化劇烈的環境，且增強機械強度。不同的梯度結構參數設計，如梯度孔徑、梯度壓縮比以及孔洞組成(梯度或均勻)，對泡沫材之聲學性能產生重要影響。2011年，Huang等人[3]透過熔融滲透法(melt infiltration method)製備了梯度孔徑的開孔泡沫鋁，以市售的氯化鈉(NaCl)作為造孔劑，製備了三種均勻孔徑的泡沫鋁，以及由小孔徑至大孔徑的梯度金屬(孔徑分布為0.8-2.2 mm)，平均孔隙率及厚度分別約為66%及20 mm，實驗結果顯示，孔徑較小的情況下，流阻率較高，這使得聲波在傳播過程中與孔洞能夠產生頻繁的摩擦，進而達到更佳的吸音效果。另梯度孔徑總體吸音性能較均勻孔徑泡沫金屬優異；頻率1000Hz以下及2000-3800 Hz，入射面為大孔徑時，吸音效果較佳，而頻率大於4000 Hz及1400-2000 Hz，入射面為小孔徑時，吸音效果較佳。2014年，Mosanenzadeh等人[4]透過顆粒浸出(particulate leaching)技術和壓縮成型方法，使用市售的氯化鈉(NaCl)作為造孔劑，製備不同孔徑分佈的聚乳酸(PLA)泡沫，包括小(200 μm)、中(380 μm)、大(600 μm)、隨機分布及梯度分佈，平均孔隙率及厚度分別約為88%及10 mm。阻抗管實驗結果顯示，均勻孔徑中，中孔徑吸音性能最佳。而與相同孔隙率的均勻孔徑泡沫相比，梯度泡沫結構表現出更強的吸音能力，最大吸音係數增加20%，平均吸音增加9%。對於梯度泡沫，當梯度泡沫的小孔徑端朝向聲源時，小於1900 Hz的頻帶，吸音率較佳；反之，當梯度泡沫的大孔徑端朝向聲源時，大於1900 Hz的頻帶，吸音效果較佳。2022年，Chua等人[5]以開孔聚氨酯(PU)泡沫作為模板，製作開孔鎳鉻鐵泡沫，實驗數據及模擬結

果顯示，較小的孔徑及較大的厚度能提高吸音係數，而梯度孔徑金屬泡沫相較於單一孔徑金屬泡沫具有較佳的吸音性能；另外梯度孔徑金屬泡沫在阻抗管試驗中，當入射聲波面向孔徑小的泡沫層，會產生類似共振效應而增加吸音率。2022年，Lomte等人[6]採用定向凝固發泡製程(directional solidification foaming process)技術，製造未壓縮和壓縮的開孔泡沫鋁，厚度為50.8mm，結果顯示當壓縮比增加，導致孔徑變小，相對密度增加，進而提升吸音性能；當壓縮比呈逐漸增加或逐漸減小時，相較於均勻壓縮比的泡沫鋁，吸音性能均提升。而對於逐步減少的壓縮比的配置，在較低頻率下呈現更佳的吸收性能。這顯示了分層結構的低頻聲吸收行為主要受到入射層的高氣流阻力的影響

有關泡沫金屬的研究，現有文獻主要聚焦於泡沫鋁，然而，泡沫鋼在力學性能及物理性能方面具有巨大的應用潛力。在力學性能方面，相對於泡沫鋁，泡沫鋼在相同孔隙率下，展現更卓越的抗壓強度和更優越的形變能力，同時具有更高的單位體積能量吸收值。在物理性能方面，也具備較佳的隔熱性能、耐火性[11]和聲學性能。此外，目前尚未有文獻探討梯度型316L泡沫鋼的聲學特性，因此在本研究中，我們以孔徑大小作為梯度分層，製備了梯度型316L泡沫鋼，並利用阻抗管探討其寬頻吸音性能。同時，我們將其與均勻的316L泡沫鋼進行比較。

理論方法

1. 梯度型316L泡沫鋼製備

本研究採用「無壓漿料鐵基多孔材料燒結成型技術」製備梯度型泡沫鋼。製程分為四個步驟，包括(1)粉末混料、(2)漿料定型、(3)生胚烘乾、(4)燒結成型。製作過程簡要概述如下(詳見製成程序圖，圖1)：

首先混合316L不銹鋼粉末、黏結劑、水和造孔劑(保麗龍球)，根據實驗經驗調整比例。混合過程需避免粉末結塊或空氣滲入。當粉末呈現金屬光澤或微彈性狀態時，即可進行模具定型。接著進行烘乾和燒結，這種製備方法稱為「無壓漿料燒結法」。在烘乾過程中，我們以遞增升溫的方式進行，溫度60°C 持續6小時，80°C 持續12-18小時。同時，為了使黏結劑和保麗龍球完全揮發，燒結時升溫速度為5°C/min，升溫至400°C 並持溫2小時。最後，為防止燒結成品完全熔化導致孔隙消失，我們控制溫度在熔點以下，前一步驟結束後繼續升溫至1300°C 進行燒結成型。

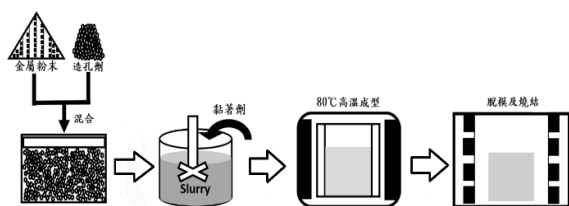


圖1 燒結成型流程[7]

2. 梯度型316L泡沫鋼聲學試片

透過「無壓漿料鐵基多孔材料燒結成型技術」製備的316L梯度型泡沫鋼，我們通過調整保麗龍球的粒徑，以達到孔徑大小的梯度分層效果。在模具中，我們調整保麗龍球的佔比，以確定最終的孔隙率。製成品經線切割方式加工，確定試片的厚度和圓面直徑大小，以便進行梯度孔徑試片的聲學特性量測。本研究所使用的市售保麗龍球，其平均粒徑分別為1.15 mm和4.4 mm，而316L不銹鋼金屬粉末則為60 μm。透過設定20%孔隙率製備的成品，其平均孔隙率為48%；同樣，設定52%孔隙率製備的成品，其平均孔隙率為60%。製成品的平均孔隙率高於預先設定的孔隙率，這與粉末的粗細度和燒結溫度有關。在粉末冶金製備過程中，由於金屬基體未完全熔融，形成微小孔隙，導致試片的平均孔隙率超出設定值。此外，為了比較梯度孔徑和均勻孔徑對吸音效果的影響，我們也製作了相同厚度的均勻孔徑試片，其孔隙率和厚度分別為60%和30 mm。

本研究所使用的聲學阻抗管直徑為20 mm及40 mm，可分別進行頻率範圍3150–6300 Hz和100–4000 Hz的吸音係數量測。圖2(a)為厚度30 mm，直徑20 mm，孔隙率52%之梯度孔徑試片，圖2(b)及圖2(c)分別表示梯度試片的小孔徑面及大孔徑面。圖3為厚度30 mm，直徑40 mm，孔隙率52%之梯度孔徑試片。圖4及圖5為厚度30 mm，孔隙率63%，直徑分別為20 mm及40 mm之梯度孔徑試片。

當小孔徑(1.15 mm)的泡沫層被置於面向阻抗管聲源的位置，此孔徑大小隨聲波傳播方向而呈現由小逐步變大的分佈，我們稱為正梯度試片。反之，當大孔徑(4.40 mm)的泡沫層被置於面向阻抗管聲源的位置，此孔徑大小隨聲波傳播方向而呈現由大漸漸變小的分佈，稱為負梯度試片。

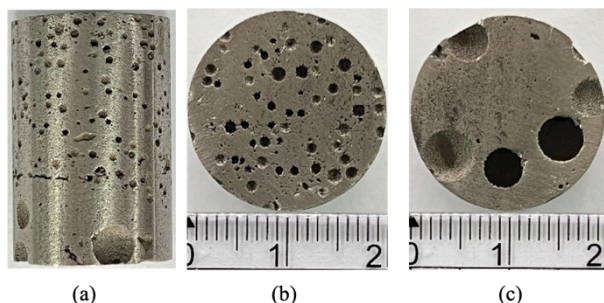


圖2(a)孔隙率52%，厚度30 mm，直徑20 mm之梯度孔徑試片(b) 聲波入射小孔徑面(1.15 mm) (c) 聲波入射大孔徑面(4.40 mm)

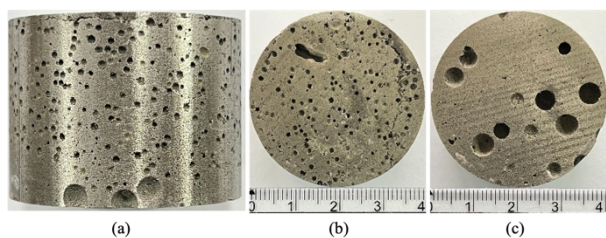


圖3(a) 孔隙率52%，厚度30 mm，直徑40 mm之梯度孔徑試片(b) 聲波入射小孔徑面(1.15 mm) (c) 聲波入射大孔徑面(4.40 mm)

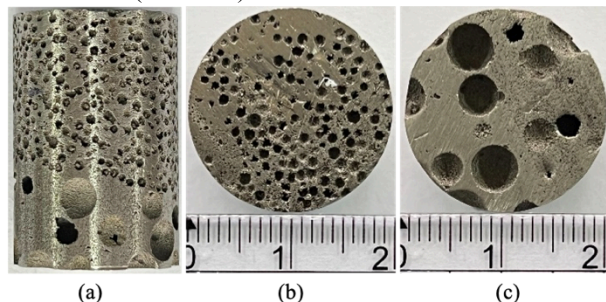


圖4(a) 孔隙率63%，厚度30 mm，直徑20 mm之梯度孔徑試片(b) 聲波入射小孔徑面(1.15 mm) (c) 聲波入射大孔徑面(4.40 mm)

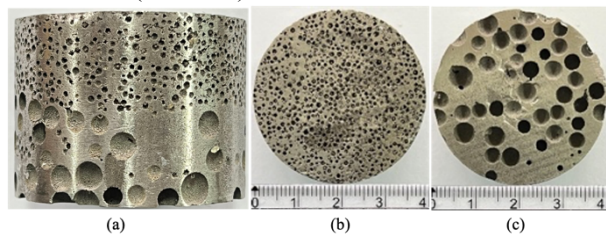


圖5(a) 孔隙率63%，厚度30 mm，直徑40 mm之梯度孔徑試片(b) 聲波入射小孔徑面(1.15 mm) (c) 聲波入射大孔徑面(4.40 mm)

3. 聲學阻抗管量測

阻抗管設計係根據ASTM E1050[8]/ ISO 10534-2[9]規範，並搭配雙麥克風轉移函數法(如圖 6)。阻抗管的壁面特徵包括剛性、表面光滑且無孔，同時確保足夠的重量和厚度，以防止在工作頻率範圍內發生共振現象。

3.1 阻抗管設計

阻抗管的工作頻率範圍取決於阻抗管的直徑和麥克風之間的距離。一般而言，阻抗管的直徑越大，可以測得的頻率範圍越低；而直徑越小，可測得的頻率範圍則越高。阻抗管的工作頻率範圍通常依以下方式定義：

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

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)。工作頻率的下限定義如下：

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

其中 c 為管內聲速(m/s), s 為麥克風間距。

管徑 d 及聲速決定了頻率上限 f_u 和對應的波長 λ_u 。為了符合測量標準,管內的聲波必須保持為平面波。工作頻率上限定義為：

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

其中 $K=0.58$ 。

阻抗管長度必須足夠長,以確保聲源和最近的麥克風之間的距離大於阻抗管直徑的三倍,

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

增加麥克風之間的距離有助於提高測量的準確性,但是麥克風之間的距離必須小於最短半波長,如式(5)所示：

$$s \ll c/2f_u \quad (5)$$

為避免聲場產生鄰近失真,試片與最近麥克風的距離必須大於阻抗管直徑的2倍,如式(6)所示：

$$x_2 > 2d \quad (6)$$

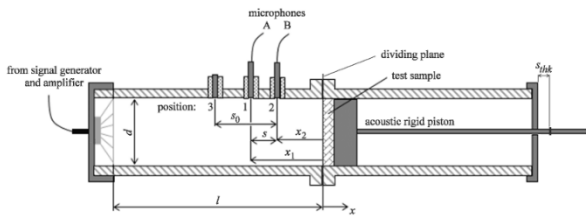


圖6 聲學阻抗管設計參數圖[10]

3.2 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：

$$p(x) = p_I(x) + p_R(x) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx} \quad (7)$$

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：

$$p_1(x) = Ae^{-ikx_1} + Be^{ikx_1} \quad (8)$$

$$p_2(x) = Ae^{-ikx_2} + Be^{ikx_2} \quad (9)$$

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：

$$H_{12} = \frac{p_2(x_1, \omega)}{p_1(x_2, \omega)} = \frac{e^{-ikx_2} + re^{ikx_2}}{e^{-ikx_1} + re^{ikx_1}} \quad (10)$$

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 ：

$$r = \frac{H_{12}e^{-ikx_1} - e^{-ikx_2}}{e^{ikx_2} - H_{12}e^{ikx_1}} = \frac{H_{12}e^{-ikx_1} - e^{-ikx_2}}{e^{ikx_2} - H_{12}e^{ikx_1}} e^{i2k(l+s)} \quad (11)$$

吸音係數 α 為無因次,介於0-1之間：

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (12)$$

特徵阻抗為

$$z = \rho c \frac{1+r}{1-r} \quad (13)$$

結果與討論

4. 吸音係數分析

圖7顯示了分層孔徑大小的泡沫鋼隨頻率變化的聲吸收係數。當聲波從具有小孔的表面入射時(正梯度),在相同厚度(30 mm)下,孔隙率較高的吸音性能(綠線)在所有頻率均優於孔隙率低的(粉紅線)。同樣地,當聲波從具有大孔的表面入射時(負梯度),孔隙率較高的試片(紫線)之吸音性能優於孔隙率低的試片(藍線)。這顯示在結構參數中,孔隙率主導吸音性能。在這些試片中,頻率在250 Hz以下之吸音係數均小於0.2,表示在這頻率以下幾乎沒有吸音效果。

孔隙率63%的正梯度試片(綠線),吸音性能表現最好。吸音係數隨頻率增加而增加,最大的吸音係數0.71出現在頻率6300 Hz。這是因為聲波的高傳播和低反射率導致氣流阻力的增加,聲能受粘滯效應而產生顯著損耗。而具相同孔隙率的負梯度試片(紫線),當聲波入射大孔徑(圖4(c)及圖5(c)),因聲波的高反射率導致吸音性能較差,其最大吸音係數為0.65。

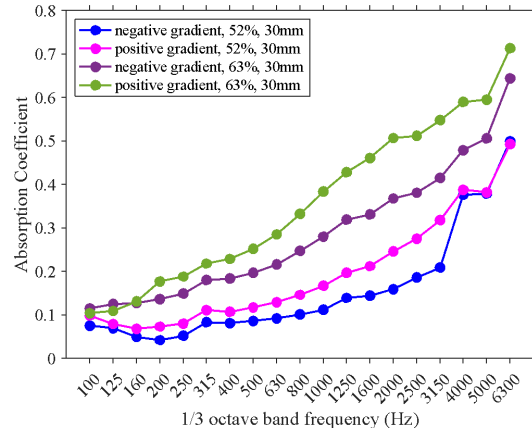


圖7 梯度泡沫鋼之吸音係數曲線

圖8比較了分層孔徑與均勻孔徑的泡沫鋼(孔隙率52%)的吸音係數。與均勻孔徑1.15 mm的試片(藍虛線)想比,當聲波從具有小孔的表面入射時(正梯度,藍實線),低頻受入射面之高粘滯效應而產生聲能損耗,而高頻聲波之氣流阻力隨著沿聲音傳播方向的孔徑增加而減小,導致聲波易進入孔隙,產生頻繁碰撞,故在全頻率的吸音性能表現較佳。此外,聲波入射小孔徑1.15 mm的梯度試片在頻率1250 Hz以上時,吸音

係數均大於0.2，而均與孔徑試片(藍虛線)之吸音係數高於0.2之頻率為2500 Hz以上。

與均與孔徑的試片(紅虛線)想比，當聲波從具有大孔的表面入射時(負梯度，紅實線)，聲波進入孔洞的有效面積較小，導致聲波在100-3150 Hz的傳遞不佳，故吸音率較低。而對於高頻段4000-6300 Hz的聲波，受到孔徑逐漸變小的影響，與周圍的孔壁有較多的摩擦，致吸音係數較高。

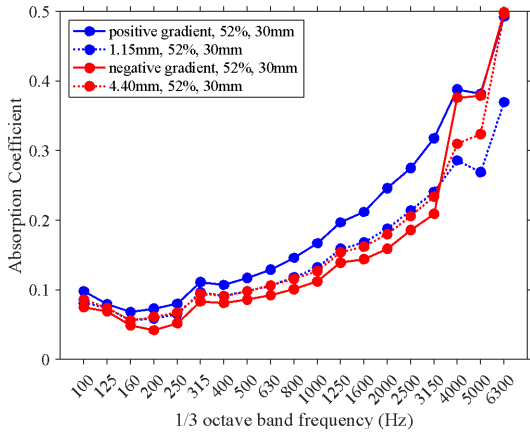


圖8厚度30mm，孔隙率52%的梯度孔徑和均與孔徑泡沫鋼之吸音係數比較。

梯度孔徑與均與孔徑的孔隙率63%泡沫鋼隨的聲吸收係數如圖9。同樣地，當聲波入射小孔的表面時(正梯度，紅實線)，整體的平均吸音係數高於均與孔徑(紅虛線)的平均吸音係數。當聲波從具有大孔的表面入射時(負梯度，藍實線)，聲波進入孔洞的有效面積較小，高反射率導致頻率100-3150 Hz聲波難以進入孔徑傳播，故吸音率較低。而對於高頻段4000-6300 Hz的聲波，受到孔徑逐漸變小的影響，與孔壁產生較多的摩擦，致吸音係數較高。

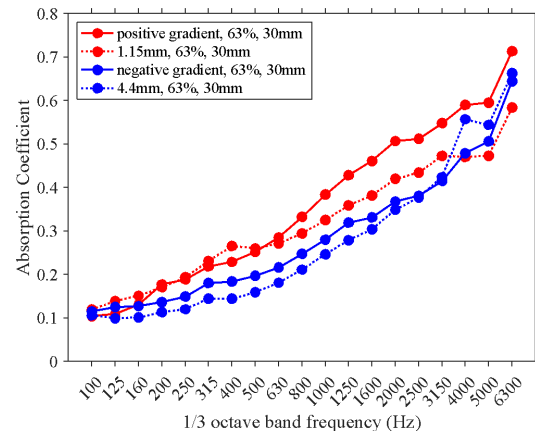


圖9厚度30mm，孔隙率63%的梯度孔徑和均與孔徑泡沫鋼之吸音係數比較。

結論

本研究利用無壓漿料鐵基多孔材料燒結成型技術成功製備梯度型泡沫鋼，分析梯度孔徑和均與孔徑的泡沫鋼之聲學吸收性能。實驗結果顯示梯度孔徑的泡沫鋼之吸音性能較均與孔徑的泡沫鋼為佳。當孔徑於入射波方向逐漸遞增時(正梯度)，孔隙率63%的正梯度試片之最大吸音係數0.71，出現在頻率6300 Hz。而均與孔徑1.15 mm的泡沫鋼，整個頻段的吸音係數較低，最大吸音係數僅0.58。另外，在梯度孔徑的試片中，孔隙率大者，吸音性能較佳。聲波入射正梯度(孔徑由小至大)試片，吸音性能較入射負梯度(孔徑由大至小)為佳。故，吸音性能最佳者為正梯度試片，入射孔徑率63%。

參考文獻

1. 王雲哲，“複合材料的創新與利用”，科學發展月刊，201504 (508期)，pp. 48-54 (2015)
2. 黃欽裕，“功能梯度陶瓷複合材料抗衝擊分析”，國防大學理工學院國防科學研究所博士學位論文，180頁。
3. Huang Ke, Yang Donghui, He Siyuan and He Deping, “Acoustic absorption properties of open-cell Al alloy foams with graded pore size,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, (2011).
4. Shahrzad Ghaffari Mosanenzadeh, Hani E. Naguib, Chul B. Park, Noureddine, “Design and development of novel bio-based functionally graded foams for enhanced acoustic capabilities,” *Journal of Materials Science*, vol. 50 (2014).
5. Jun Wei Chua, Xinwei Li, Tao Li, Beng Wah Chua, Xiang Yuc, and Wei Zhai, “Customisable sound absorption properties of functionally graded metallic foams,” *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 108, pp.196-207 (2022).
6. Amulya Lomte, Bhisham Sharma, Mary Drouin, Denver Schaffarzick, “Sound absorption and transmission loss properties of open-celled aluminum foams with stepwise relative density gradients,” *Applied Acoustics*, Vol. 193, (2022).
7. Rabiei, A., Karimpour, K., Basu, D., & Janssens, M. (2020). Steel-steel composite metal foam in simulated pool fire testing. *International Journal of Thermal Sciences*, 153, 106336.
8. 吳翊維，“陶瓷/泡沫鋼三明治複合材料抗彈性分析”，國防大學理工學院兵器系統工程研究所碩士學位論文，85頁。

9. 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.
10. ISO 10534-2, 1998, Acoustic – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.
11. Ďuriš, 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).
12. Rabiei, A., Karimpour, K., Basu, D., & Janssens, M. (2020). Steel-steel composite metal foam in simulated pool fire testing. International Journal of Thermal Sciences, 153, 106336.

Study on the Sound Absorption Performance of Gradient-Structured Steel Foam

*A.Z. Li^{*1} K.Y. Chen^{**} Y. C. Tzeng^{**} C. Y. Chen^{***} W. J. Lin^{***}*

* Master Program of Naval Architecture and Ocean Engineering, CCIT, National Defense University

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

*** Naval Shipbuilding Development Center

Keywords: steel foam, gradient structure, impedance tube

ABSTRACT

This study developed gradient foam steel using 316L stainless steel powder, employing pore size as the gradient layering method while fixing the porosity and thickness. Acoustic impedance tubes were utilized to measure the sound absorption coefficient of the gradient foam steel. The results indicated that the sound absorption performance of the foam steel was superior when sound waves were incident on the positive gradient (from small to large pore sizes) compared to the negative gradient foam steel. Additionally, compared with foam steel of the same pore size, positive gradient foam steel exhibited superior sound absorption capabilities across the entire frequency range (100-6300 Hz), with the maximum absorption coefficient increasing from 0.58 to 0.71. Furthermore, electron microscopy was employed to observe the impact of pore microstructure variations on acoustic performance.