

烧结金属纤维多孔材料的高温吸声性能

张波, 陈天宁, 冯凯, 陈花玲

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 以烧结金属纤维多孔材料为研究对象, 对其在不同温度($20 \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)和温度梯度($-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$, $+4.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)作用下的吸声性能进行了理论计算和分析. 应用双传声器传递函数法原理, 设计并搭建了多孔金属材料高温吸声性能实验的测试装置, 对材料在不同温度点下的吸声性能进行了实验测试, 初步验证了理论计算的正确性. 研究表明, 采用参考温度法能够较好地计算温度较低时的材料吸声性能, 温度的变化对多孔金属材料表面声阻抗率具有显著影响. 当存在温度梯度场作用时, 应重视温度梯度对多孔金属材料总体吸声性能的影响, 在一定条件下, 负温度梯度可以提高材料的吸声性能, 而正温度梯度可使材料吸声性能趋于降低.

关键词: 烧结金属纤维; 多孔金属材料; 温度梯度; 吸声

中图分类号: TB535; TB31 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1327-05

Sound Absorption Properties of Sintered Fibrous Metals under High Temperature Conditions

ZHANG Bo, CHEN Tianning, FENG Kai, CHEN Hualing

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing the attention on a sintered fibrous metal sample, the sound absorption properties under different temperatures (from $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) and temperature gradients ($-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ and $4.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) are theoretically evaluated. By adopting the two-microphone transfer-function method, a set for measuring the uniform high-temperature sound absorption properties of porous metal is developed, and the sound absorption properties of a sintered fibrous metal sample at different temperatures are measured to validate the theoretical results. It is found that reference-temperature method can be used to well evaluate the porous metal acoustic properties at relatively low temperatures. And the changes of temperature fields exert remarkable effects on the surface acoustic impedance at normal incidence of material. When the constant temperature gradient exists across the material cross-section, the effects of temperature gradient on overall sound absorption characteristics of porous metal ought to be regarded considerably. Under certain conditions, the minus temperature gradient may enhance the sound absorption of porous metal whereas the positive temperature brings an adverse effect.

Keywords: sintered fibrous metal; porous metallic material; temperature gradient; sound absorption

超轻多孔金属材料是近年来为适应航空航天技术的需求, 以及随着材料制备加工技术的进步而出现的一类新型多功能材料. 其中, 烧结金属纤维板是

一种典型的、具有良好吸声性能的纤维类多孔金属材料, 与传统吸声材料相比, 烧结金属纤维多孔材料同时具有耐腐蚀和耐高温等明显优势, 特别适合在

高温(大于 700 °C)、高声压级(小于 140 dB)及强气流(来流马赫数小于 0.1)等极端环境下应用,是一种具有良好发展前途的吸声材料。

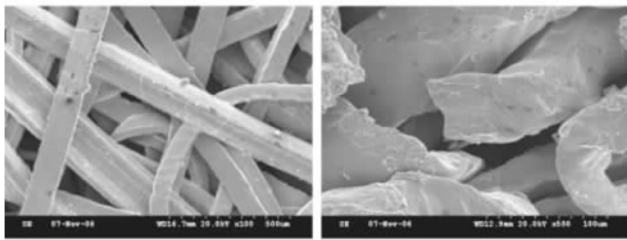
目前,针对轻质多孔金属材料的吸声性能研究,大都是在常温和常压条件下进行的^[1-5],而材料在高温条件下的吸声性能研究则非常匮乏。本文以烧结金属(316L)纤维多孔材料为研究对象,通过理论分析和实验测试,重点研究了温度场和温度梯度场对多孔金属材料吸声性能的影响,从而为多孔金属材料在极端环境下的工程应用提供了理论依据。

1 高温吸声性能的理论分析

1.1 控制方程

在对大多数开孔泡沫类及纤维类多孔材料进行吸声性能理论分析时,通常是将材料中的孔简化为圆柱孔处理^[6]后,再根据实际材料的孔结构相对等效圆柱孔的偏离程度进行各种修正,使得修正后的理论模型能够刻画实际多孔材料的吸声性能。

考虑到烧结金属纤维多孔材料微结构的复杂性(见图 1),本文仍沿用基于圆柱孔的分析方法,首先



(a)局部表面

(b)截面

图1 烧结金属纤维多孔材料的形貌

考虑无限长圆柱孔(由于轴对称,只考虑径向 r 和轴向 z 的变化),其孔壁刚性、热容及导热系数均高于空气(可认为是等温孔壁)。假定孔半径 R 远小于声波波长,远大于气体分子的平均自由程(满足 $R > 10^{-3}$ cm),声波为 z 向传播的平面波,则媒质点处的压力、质点速度、温度及密度可近似表示为

$$p'(z,t) = p_0(z) + \text{Re}(p(z)e^{i\omega t}) \quad (1)$$

$$\mathbf{u}(r,z,t) = \text{Re}((\mathbf{u}_r(r,z) + u_z(r,z)\mathbf{Z})e^{i\omega t}) \quad (2)$$

$$T'(r,z) = T_0(z) + \text{Re}(T(r,z)e^{i\omega t}) \quad (3)$$

$$\rho'(r,z,t) = \rho_0(z) + \text{Re}(\rho(r,z)e^{i\omega t}) \quad (4)$$

式中: $\rho_0(z)$ 、 $T_0(z)$ 、 $p_0(z)$ 分别表示平衡态密度、温度和压力; $\rho(r,z)$ 、 $T(r,z)$ 、 $p(z)$ 则表示相应的逾量变化; $\mathbf{u}_r(r,z)$ 及 $u_z(r,z)$ 分别为质点径向速度向量和轴向速度分量。

当考虑材料处于轴向温度梯度场的作用时, T_0 将沿 z 向变化,此时气体动力黏度 η 、密度 ρ 、绝热声速 c_0 及热膨胀系数 β 等均依赖于 z ,此时的气体运动方程、连续方程、状态方程及导热方程分别为

$$i\omega\rho_0 u_z(r,z) = -\frac{dp(z)}{dz} + \eta\nabla_r^2 u_z(r,z) \quad (5)$$

$$i\omega\rho(r,z) + \frac{\partial(\rho_0(r,z)u_z(r,z))}{\partial z} + \rho_0(z)\nabla_r \mathbf{u}_r(r,z) = 0 \quad (6)$$

$$\rho(r,z) = -\rho_0(z)\beta T(r,z) + (\gamma/c_0^2)p(z) \quad (7)$$

$$i\omega\rho_0(r,z)c_p T(r,z) + \rho_0(z)c_p u_z(r,z)(dT_0(z)/dz) = i\omega\beta T_0 p(z) + \kappa\nabla_r^2 T(r,z) \quad (8)$$

式中: c_p 为气体的定压比热容; γ 为比热比; κ 为导热系数。由式(8)可知,当考虑温度沿 z 向变化时,某一固定点处的气体温度变化取决于质点运动、膨胀及热传导。反之,若不考虑温度沿 z 向变化时,式(8)则因对流项的消失而退化为均匀温度场作用时的导热方程。

1.2 波动方程

结合孔壁无滑移及等温边界条件求解各控制方程,可得到式(1)~式(4)中的各物理量。其中, $|u_r(r,z)| \ll |u_z(r,z)|$, 可认为质点速度只存在着 $u_z(r,z)$, 在这个近似条件下,孔截面上的声压保持恒定,仅沿 z 向变化。物理量 $\xi(r,z)$ 在孔截面上的平均值应满足

$$\xi(z) = A^{-1} \iint \xi(r,z) dA \quad (9)$$

式中: A 为孔截面面积。由式(9)可求得 $u_z(z)$ 和平均逾温分别为

$$u_z(z) = -\frac{dp(z)/dz}{i\omega\rho_0(z)} F(\lambda) \quad (10)$$

$$T(z) = \left(\frac{\gamma-1}{c_0^2 \rho_0(z)} \right) F(\lambda_T) p(z) - \frac{dT_0(z)/dz}{\rho_0(z)\omega^2} \frac{F(\lambda_T) - B^2 F(\lambda)}{1-B^2} dp(z)/dz \quad (11)$$

式(10)~式(11)中的 Biot 动态黏性修正函数^[6]为

$$F(\lambda) = 1 - (2/x)J_1(x)/J_0(x), x = (-i)^{1/2}\lambda \quad (12)$$

式中: λ 是与黏性边界层厚度相关的声雷诺数; λ_T 是与热边界层厚度有关的声雷诺数,且满足 $\lambda_T = B\lambda$, B^2 为气体普朗特数。

利用式(7)、式(10)及式(11),又可求得

$$\rho(z) = (1/c_0^2)(\gamma - (\gamma-1)F(\lambda_T))p(z) + \frac{\beta}{\omega^2} \frac{dT_0(z)}{dz} \frac{F(\lambda_T) - B^2 F(\lambda)}{1-B^2} \frac{dp(z)}{dz} \quad (13)$$

进一步,引入渗流速度 $U_z(z)$ 、多孔材料曲折度 α_∞ 及孔隙率 Ω ,则

$$i\omega\rho(z) + \frac{1}{\Omega}\rho_0 \frac{d}{dz}U_z(z) - \frac{1}{\Omega\alpha_\infty^{1/2}}\beta_0(z) \frac{dT_0(z)}{dz}U_z(z) = 0 \quad (14)$$

$$U_z(z) = -\Omega \frac{dp(z)/dz}{i\alpha_\infty\omega\rho_0(z)}F(\lambda) \quad (15)$$

将式(13)和式(15)代入式(14),整理后得到包含材料声学参数的声压波动方程为

$$\frac{d^2 p(z)}{dz^2} + 2\alpha(\lambda, \lambda_T) \frac{dp(z)}{dz} + k_0(\lambda, \lambda_T)^2 p(z) = 0 \quad (16)$$

$$\alpha(\lambda, \lambda_T) = \frac{1}{2} \frac{1}{F(\lambda)} \left(\frac{dF(\lambda)}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dT_0} + \frac{1}{T_0} \left(\frac{\alpha_\infty(F(\lambda_T) - B^2 F(\lambda))}{1 - B^2} \right) \right) \frac{1}{\alpha_\infty^{1/2}} \frac{dT_0}{dz} \quad (17)$$

$$k_0(\lambda, \lambda_T)^2 = \alpha_\infty \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{1}{F(\lambda)} (\gamma - (\gamma - 1)F(\lambda_T)) \quad (18)$$

式中: α 为声阻尼因子; k_0 为复波数因子。

1.3 材料表面声阻抗率

1.3.1 均匀温度场 多孔材料表面法向声阻抗率 $Z(0) = p(0)/U_z(0)$, 在均匀温度场条件下, $dT_0(z)/dz=0$, 此时可采用参考温度法来计算材料的吸声性能, 并且材料吸声性能将主要依赖于气体物理参数随环境温度 T_H 的变化^[7], 即

$$\rho_0(T_H) = \rho_0(T_H) \frac{T_c}{T_H}, c_0(T_H) = c_0(T_c) \left(\frac{T_H}{T_c} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda(T_H) &= \lambda(T_c) \left(\frac{T_c}{T_H} \right)^{5/4} \left(\frac{T_H + T_s}{T_c + T_s} \right)^{1/2} \\ \lambda_T(T_H) &= \lambda_T(T_c) \left(\frac{T_c}{T_H} \right)^{5/4} \left(\frac{T_H + T_s}{T_c + T_s} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

对于实际的多孔材料

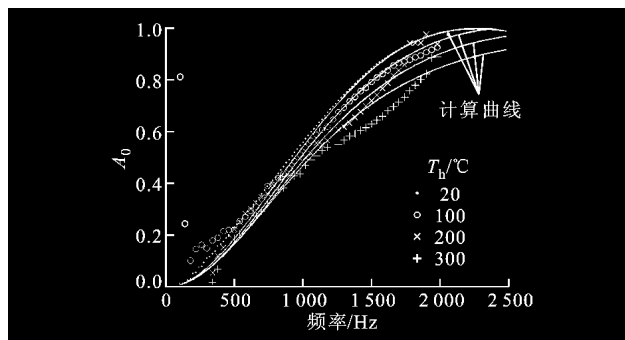
$$\lambda(T_c) = c_1 \left(\frac{8\omega\rho_0(T_c)\alpha_\infty}{\sigma(T_c)\Omega} \right)^{1/2}$$

$$\lambda_T(T_c) = c_2 \left(\frac{8\omega\rho_0(T_c)\alpha_\infty}{\sigma(T_c)\Omega} \right)^{1/2}$$

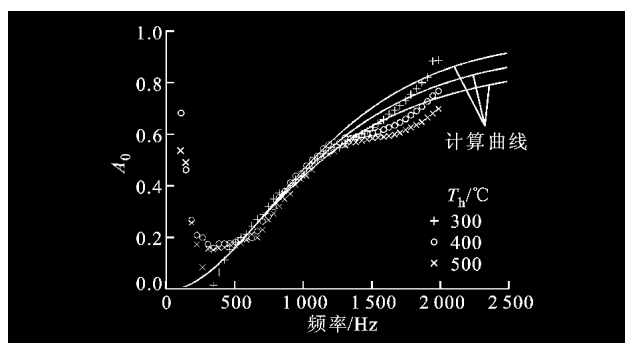
式中: $\sigma(T_c)$ 为起始温度时的材料静流阻率; c_1 和 c_2 分别为与黏性和热相关的因子。通常, $\lambda(T_c)$ 及 $\lambda_T(T_c)$ 在表达形式上的差异即构成了不同的吸声模型^[6]。根据文献^[7]可取 $T_c=300$ K, $T_s=110.4$ K。由式(16)可知, $\alpha(\lambda(T_H), \lambda_T(T_H)) = 0$, 且 $k_0(\lambda(T_H), \lambda_T(T_H))$ 中的各相关物理量均取 T_H 时

的值, 根据 $p(0)/U_z(0)$ 即可计算出材料的归一化表面声阻抗率 Z_l 及吸声系数 A_0 。

以厚度 $d=25$ mm 的烧结型金属纤维试件为例, 进行吸声性能计算, 试件参数 $\Omega=90\%$, $\alpha_\infty=1.664$, $\sigma(T_c)=20\ 610$ N·m⁻⁴·s。图 2~图 3 给出了当摄氏温度 T_h 分别为 20、100、200、300、400 和 500 °C 时, 试件的计算结果。



(a) $T_h=20\sim300$ °C



(b) $T_h=300\sim500$ °C

图 2 不同温度下的材料吸声系数

1.3.2 恒定温度梯度场 恒定温度梯度也是一种非均匀温度场。作为一种近似处理, 文中令 k_0 和 α 在 $z=d/2$ 处取值, 则式(16)的解可表示为 $p(z) = Ae^{ikz}$, 代入式(16)后可得

$$-k^2 + i2\alpha(\lambda, \lambda_T)k + k_0^2(\lambda, \lambda_T) = 0 \quad (21)$$

求解式(21), 即可得考虑温度梯度 T_g 后的复波数分别为

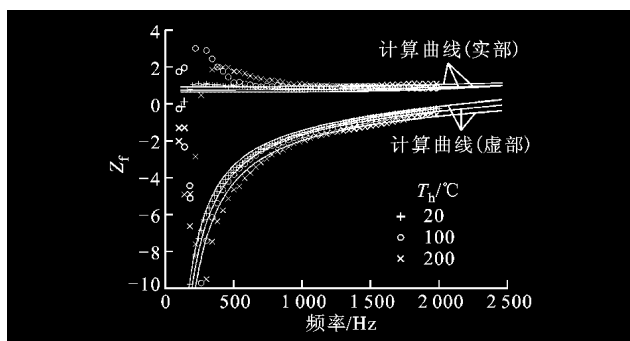
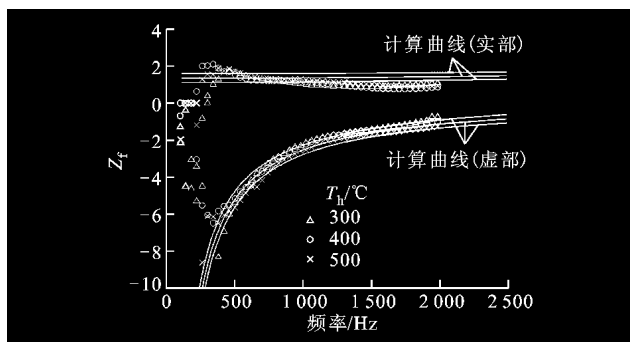
$$k^+ = i\alpha + (k_0^2 - \alpha^2)^{1/2}; \quad k^- = i\alpha - (k_0^2 - \alpha^2)^{1/2} \quad (22)$$

则材料中所传播的 2 种行波的声压及质点渗流速度分别为

$$p^+(z) = A^+ e^{ik^+z}; \quad p^-(z) = A^- e^{ik^-z} \quad (23)$$

$$U^+ = -\frac{\Omega}{\alpha_\infty} \frac{dp^+}{dz} F(\lambda); \quad U^- = -\frac{\Omega}{\alpha_\infty} \frac{dp^-}{dz} F(\lambda) \quad (24)$$

利用 $z=d$ 处的材料声阻抗率可得

(a) $T_h = 20 \sim 200$ °C(b) $T_h = 300 \sim 500$ °C图3 不同温度下的材料归一化 Z_t

$$\frac{A^-}{A^+} = \frac{Z(d)k_b^+ e^{i(k_b^+ - k_b^-)d} - \Theta_b e^{i(k_b^+ - k_b^-)d}}{\Theta_b - Z(d)k_b^-} \quad (25)$$

$$\Theta = -\frac{\omega \rho_0 \alpha_\infty}{\Omega F(\lambda)} \quad (b \text{ 在 } z = d \text{ 处取值})$$

若材料固定在刚性壁面上 ($Z(d) \rightarrow \infty$), 则

$$Z(0) = \left(\frac{k_b^+ e^{i(k_b^+ - k_b^-)d} - k_b^-}{k_b^+ k_s^- e^{i(k_b^+ - k_b^-)d} - k_s^+ k_b^-} \right) \Theta_s \quad (26)$$

(s 均在 $z = 0$ 处取值)

由式(26)即可计算材料的 Z_t 、 A_0 值(见图4和图5), 其中材料参数同1.3.1节, 材料表面温度为200 °C.

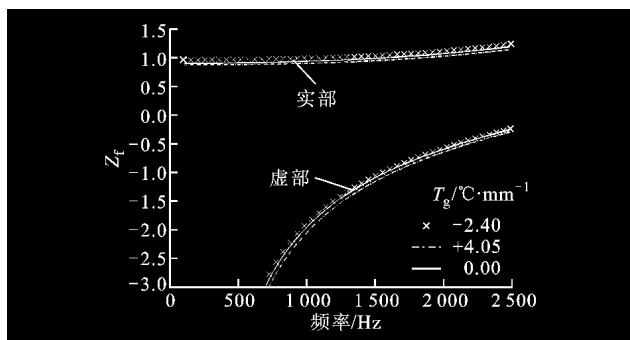


图4 不同温度梯度下的材料表面声阻抗率

2 高温吸声性能测试

本文对均匀温度场条件下的材料吸声性能进行了实验测试研究, 并自制了一台高温声学测试装置.

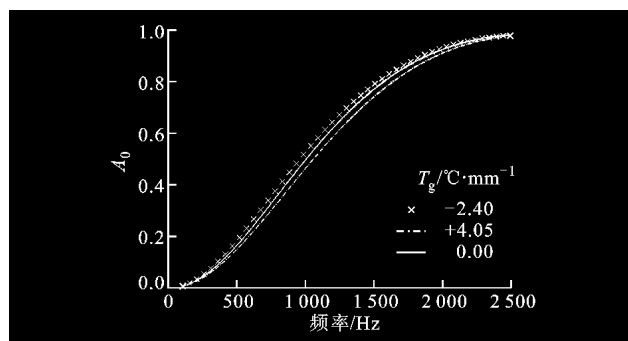


图5 不同温度梯度下的材料吸声系数

该测试装置中的声学测量系统借鉴了 Chung 与 Blaser^[8] 的双传声器传递函数法, 主要的问题是在高温条件下如何保证阻抗管内传递平面波及声源处于正常的工作温度范围(扬声器工作温度极限通常为75 °C, 最高可达150 °C). 本文采用局部加热、局部冷却的设计方案, 即在测试段(试件和高温传声器所在部位)加热, 并具有足够长的恒温区域. 在实际装置中, 将试件及高温传声器前的3倍管径长度作为恒温区域, 用以保证声波在到达传声器时, 高次波完全被衰减, 使这部分阻抗管内传播的是平面波, 而在扬声器位置前, 则采取强制水冷的方法, 以保证扬声器处于正常的工作温度.

实验中对材料进行间断加热, 分别在预设温度点进行声学测量, 温度点依次取20、100、200、300、400和500 °C. 测试仪器包括B&K4182 高温传声器、B&K2035 分析仪及GF-10 功率放大器. 测试频率范围为100~2 000 Hz, 测试装置如图6所示.



图6 多孔金属材料的高温吸声性能测试装置

3 分析与讨论

在均匀温度场的条件下, 总体上材料吸声系数是随温度的升高而呈降低趋势, 这主要是因为材料静流阻率随温度的升高而增大. 另外, 由实验和计算结果也可看出, 温度变化对材料表面声阻抗率和声抗率亦有显著的影响(见图3), 即随着温度的升高, 归

一化声阻率随之提高,归一化声抗率(绝对值)也随之增大。此外,还可看出当材料温度在较低范围内(20~300℃)时,计算和测试结果总体吻合较好,而在较高温度(300~500℃)时,误差相对较大(尤其是声阻率和吸声系数)。当温度较高时,若要精确地计算材料的吸声性能则需要进一步考虑其他因素,在理论计算方面,参考温度法采用的是文献[7]中的半经验公式,而由这些公式计算出的物性值与相应的实测值^[9]之间的误差却非常小。例如,当 $T_H=350\text{ K}$ 时, η 估算值的相对误差 $e_\eta=1.48\%$,当 $T_H=800\text{ K}$ 时, $e_\eta=1.3\%$ 。此外, γ 、 B^2 的变化范围也较小(当 $T_H=293\sim 800\text{ K}$ 时, $B^2=0.712\sim 0.703$, $\gamma=1.4\sim 1.33$,且当 $T_H>600\text{ K}$ 时,才需考虑取 $\gamma=1.33$),即由这些参数变化所引起的误差是可以忽略的。因此,由理论计算导致的较大误差可能是当温度较高时,金属纤维丝的局部刚度及强度下降,使得原来的刚性骨架模型不再适用所致。在实验测试方面,影响最大的2个因素为:①由于材料段加热而声源处强制冷却的存在,因此导致沿阻抗管轴线方向可能存在温度场的不均匀,进而使材料加热段出现温度梯度(特别是正温度梯度),从而造成了在300℃以上的测试数据中就已经包含了一些温度梯度的影响因素;②当温度较高时,由于阻抗管内存在热边界层的作用,管截面上的温度分布近似呈抛物线形,因此可能会造成阻抗管内平面波的波阵面发生弯曲,而导致材料(300~500℃)吸声曲线出现弯折变化。由阻抗管内温度场不均匀所造成的自然对流也可能对材料的高温吸声性能测试结果产生影响。

温度梯度对多孔金属材料吸声性能的影响也是比较明显的,如负温度梯度明显提高了烧结金属纤维材料的归一化声阻率,使之能够更好地与空气特性阻抗匹配,从而在一定程度上改善了材料的吸声性能。

4 结 论

本文以烧结金属纤维多孔材料为研究对象,对其在不同温度和温度梯度作用下的吸声性能进行了实验和理论研究,并得出了如下主要结论。

(1)在均匀温度场条件下,随着温度的升高,材料静流阻率和表面声阻率增大,从而影响了材料的吸声性能。采用参考温度法能较好地对较低温度(300℃以下)的烧结金属纤维多孔材料的吸声性能

进行计算,当温度较高时,需进一步考虑对阻抗管平面波畸变及计算模型的修正。为了进一步提高实验的测试精度,还应注意提高测试装置阻抗管轴向及管截面温度分布的均匀性。

(2)当材料归一化声阻率小于1时,正温度梯度将不利于提高材料的吸声性能,而负温度梯度则明显有利于改善材料的高温吸声性能。

参考文献:

- [1] UMNOVA O, ATTENBOROUGH K, SHIN U C, et al. Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials [J]. *Applied Acoustics*, 2005,66(6): 607-624.
- [2] XIE Zhenkai, IKEDA T, OKUDA Y, et al. Characteristics of sound absorption in lotus-type porous magnesium [J]. *J Appl Phys*, 2004,43(10): 7315-7319.
- [3] HAKAMADA M, KUROMURA T, CHEN You-qing, et al. High sound absorption of porous aluminum fabricated by spacer method [J]. *Applied Physics Letters*, 2006,88: 1-3.
- [4] 卢天健, DUPÈRE I D J, DOWLING A P. 多孔泡沫材料的声吸收特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2007, 41(9): 1003-1011.
LU Tianjian, DUPÈRE I D J, DOWLING A P. Absorption of sound in cellular foams [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007,41(9): 1003-1011.
- [5] 王晓林. 金属多孔材料吸声板的优化模型 [J]. *声学学报*, 2007,32(2): 116-121.
WANG Xiaolin. An optimized model for porous metal sound absorbers [J]. *Acta Acoustica*, 2007,32(2): 116-121.
- [6] ALLARD J F. Propagation of sound in porous media [M]. London: Elsevier Applied Science, 1993: 49-117.
- [7] PERCE A D. Acoustics an introduction to its physical principles and applications [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1981:508-519.
- [8] CHUNG J Y, BLASER D A. Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties I: theory [J]. *J Acoust Soc Am*, 1980,68(3): 907-913.
- [9] 王启杰. 对流传热传质分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 600-627.

(编辑 管咏梅)