

轻质多孔陶瓷的制备及吸声性能研究

孙进兴, 陈 斌, 刘培生

(北京师范大学 核科学与技术学院, 射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 通过模压法成功制备轻质多孔陶瓷吸声材料, 采用 JTZB 吸声系数测试系统研究造孔剂粒径、含量以及样品厚度对多孔陶瓷材料吸声性能的影响。结果表明: 造孔剂含量为 50vol%时, 大孔径多孔陶瓷吸声性能优于小孔径多孔陶瓷; 随着造孔剂含量的增加, 第一吸收峰从低频向高频移动, 峰值从 0.41 增加到 0.82, 孔隙率过高和过低都不利于提高材料吸声性能; 样品厚度从 10 mm 增加到 30 mm, 第一吸收峰逐渐向着低频方向移动; 造孔剂含量为 60vol%, 样品厚度为 20 mm 时, 样品整体具有优异吸声性能, 并逐层在其背后加入空腔发现, 随着空腔层数的增加, 样品的第一吸收峰从高频向低频移动, 平均吸声系数逐渐增大。

关 键 词: 多孔陶瓷; 吸声系数; 模压法

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

Preparation of Light Weight Porous Ceramics and Sound Absorption Performance Research

SUN Jin-Xing, CHEN Bin, LIU Pei-Sheng

(Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Light weight porous ceramics were successfully prepared by conventional mold. Effects of particle sizes, content of pore-forming agent and sample thickness on sound absorption performance of porous ceramics were studied by means of JTZB absorption coefficient measurement. The results indicate that when pore-forming agent content is 50vol%, sound absorption performance of macroporous ceramics is better than that of microporous ones. As the pore-forming agent content increases, the sound absorption peak moves from low frequency to high frequency, with the peak value increasing from 0.41 to 0.82. Neither high nor low porosity can improve the sound absorption material performance. The first sound absorption peak gradually moves towards the low frequency when sample thickness increasing from 10 mm to 30 mm. The sample obtains super sound absorption performance when pore-forming agent content is 60vol% and sample thickness is 20 mm. By adding cavity layer to the porous ceramics rear one by one, the sound absorption peak moves from high frequency to low frequency and the average sound absorption coefficient gradually increases with the increase of cavity layer number.

Key words: porous ceramic; sound absorption coefficient; molding-pressing method

随着工业的快速发展, 噪声污染越来越严重, 吸声降噪作为环境保护的重点工作之一, 得到科学工作者的广泛关注^[1-5]。根据吸声机理的不同, 吸声

材料可以分为共振吸声材料和多孔吸声材料, 其中共振吸声材料可以看做多个亥姆霍兹吸声共振器并联而成的共振吸声结构, 其最高吸声系数出现在共

收稿日期: 2015-12-29; 收到修改稿日期: 2016-02-20

基金项目: 北京师范大学校测试基金(c16) Testing Foundation of Beijing Normal University (c16)

作者简介: 孙进兴(1991-), 男, 硕士研究生. E-mail: sjx476526525@163.com

通讯作者: 刘培生, 教授. E-mail: liu996@263.net

振频率处^[6]; 多孔吸声材料内部具有大量贯通的三维孔隙, 当声波入射到材料表面时, 一部分被材料表面反射掉, 另一部分则进入孔隙内部向前传播, 在传播过程中, 由于粘滞作用, 声能转化为热能而耗散, 从而达到吸声降噪的作用^[7-8]。

多孔陶瓷材料在吸声领域被广泛应用, 多孔陶瓷内部含有大量相互连通的孔隙, 孔径可控, 气孔率一般在 20%~95%之间。多孔陶瓷具有耐高温、耐腐蚀、可控的渗透性、高比表面积、高的机械强度和低密度等诸多优点, 通常作为过滤、分离、布气、隔热、吸声和生物陶瓷等功能材料使用^[9-13]。Studart 等^[14]将多孔陶瓷的制备工艺过程分为复制技术、牺牲模板法和直接泡沫法三种。制备多孔陶瓷的常用方法有冷冻注模法^[15-16]、固态烧结法^[17]、直接发泡法^[18]、模板法^[19-21]、凝胶注模法^[22]、反应合成法^[23]等。本工作通过模压法在一定的烧结工艺下制备多孔吸声陶瓷, 着重研究造孔剂粒径大小、体积分数含量以及样品厚度对多孔陶瓷材料吸声性能的影响, 并在此基础上选择吸声性能最优的样品, 通过背后引入空腔来研究空腔的引入对复合结构吸声性能的影响。

1 实验方法

1.1 轻质多孔陶瓷材料的制备

将天然沸石矿物粉末、粘结剂与去离子水充分混合, 并加入造孔剂(由有机物与粘结剂混合造粒而成的两种不同粒径小球, 其中大球粒径为 4~5 mm, 小球粒径为 1~2 mm)以及适量的添加剂和辅料, 混合均匀, 经过模压、干燥、烧结、磨样等步骤得到测试所需的样品。模压是将混合后的原料放入一定规格铝合金模具中, 通过压样机施加 90 N 的压力得到预制样品块。模压制备的样品先在室温下放置 48 h, 然后放入马弗炉中 240℃保温 10 h 充分干燥, 最后采用 SX-G36163 型节能高温实验电炉以 20℃/min 加热升温至 1200℃保温 40 min 后, 待样品自然冷却取出, 获得多孔陶瓷块。沸石是沸石矿物的

总称, 它是一种含水的碱或碱土金属的铝硅酸盐矿物, 由 TO_4 (T 指 Si、Al、P 等) 四面体构成^[24]。高温烧结后, 沸石中的 Si、Al 组分与沸石中的碱金属阳离子生成非晶的玻璃相, 从而降低其结晶度。由不同粒径造孔剂制备的多孔陶瓷如图 1 所示。

1.2 吸声系数的测试

图 2 为 JTZB 吸声系数测试系统(北京世纪建通科技发展有限公司)示意图, 测量仪器主要是利用一根均匀圆形截面的刚壁管, 该装置可以测量声波向入射时的吸声系数和声阻抗。当扬声器产生的声波经所测试样表面反射后, 在管中形成驻波声场。移动测试车找到声压极大值 $P_{\max}(\text{dB})$ 和极小值 $P_{\min}(\text{dB})$, 根据声压极大值和极小值的差值来确定材料法向入射吸声系数 α , 相应的计算公式为:

$$\alpha = \frac{4 \times 10^{(P_{\max} - P_{\min})/20}}{\left(1 + 10^{(P_{\max} - P_{\min})/20}\right)^2}$$

利用驻波管三分之一倍频程法, 在 200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、1600、2000 Hz 共 11 个中心频率点进行测试。

2 结果与分析

2.1 造孔剂粒径大小对多孔陶瓷材料吸声性能的影响

多孔陶瓷造孔剂粒径大小与吸声系数关系曲线

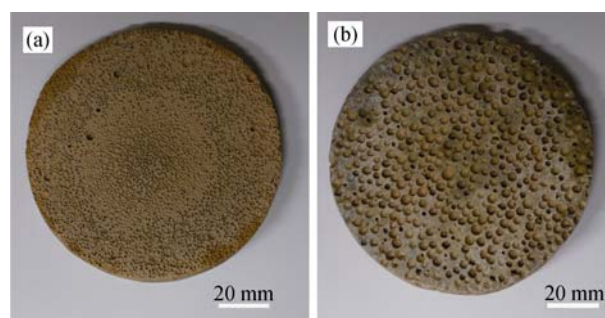


图 1 不同孔径造孔剂制备的多孔陶瓷的宏观照片

Fig. 1 Pictures of porous ceramics prepared from pore-forming agents with different pore sizes

(a) Microporous ceramics (1-2 mm); (b) Macroporous ceramics (4-5 mm)

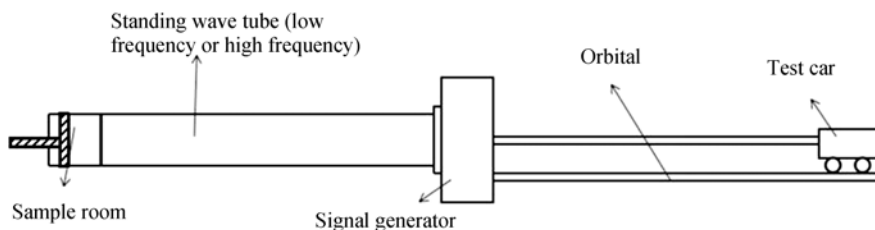


图 2 JTZB 吸声系数测试系统示意图

Fig. 2 Schematic drawing of JTZB absorption coefficient test system

如图 3 所示(造孔剂含量为 50vol%, 样品厚度为 15 mm)。从图 3 可以看出, 声波频率在 630 Hz 处出现分界点, 当入射声波频率小于 630 Hz 时, 大孔陶瓷和小孔陶瓷的吸声系数很小, 几乎不具备吸声性能。声波频率在 630~2000 Hz 时, 大孔陶瓷吸声性能优于小孔陶瓷, 这是因为在相同造孔剂含量的情况下, 大孔陶瓷由于孔径较大, 很容易与相邻的孔洞连通, 构成连通型气孔, 当入射声波进入孔洞中, 连通型气孔可以延长声波的传播距离, 较多的声能转化为热能而耗散; 小孔陶瓷孔径较小, 孔与孔之间很难贯通, 只有小部分声能转化为热能而耗散, 因此小孔陶瓷的吸声性能比大孔陶瓷差。

2.2 造孔剂含量对多孔陶瓷材料吸声性能的影响

多孔陶瓷造孔剂含量与吸声系数关系曲线如图 4 所示(造孔剂粒径为 4~5 mm, 样品厚度为 20 mm), 由图中曲线可以看出, 对于造孔剂含量为 70vol%制备的样品, 没有出现共振吸声, 最大吸声系数在频

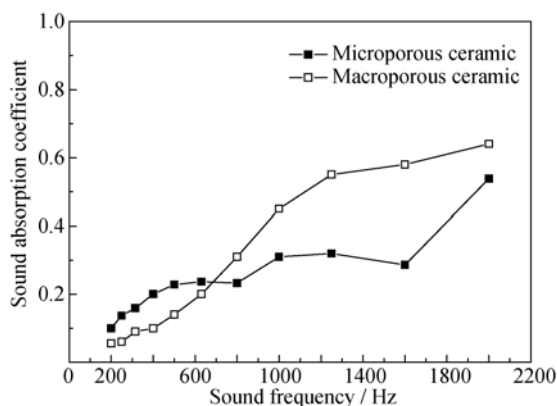


图 3 造孔剂粒径对多孔陶瓷吸声系数的影响

Fig. 3 Effect of particle size of pore-forming agent on sound absorption coefficient of porous ceramics

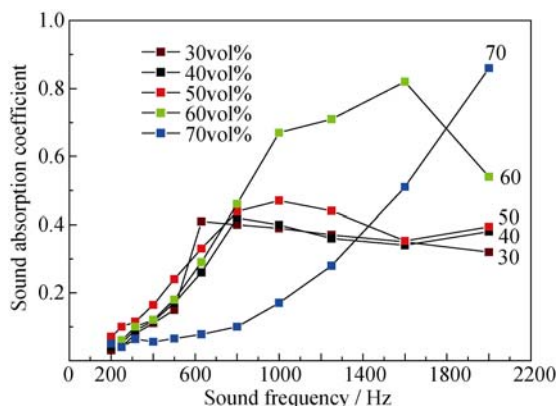


图 4 造孔剂含量对多孔陶瓷吸声系数的影响

Fig. 4 Effect of pore-forming agent content on sound absorption coefficient of porous ceramics

率 2000 Hz 处产生, 达到 0.86。对于其他样品, 都在不同频率处产生共振吸收峰, 其吸声系数随着频率的增加先增大后减少。

造孔剂含量为 30vol%, 第一吸收峰值出现在频率 630 Hz 处; 造孔剂含量为 40vol%, 第一吸收峰值出现在频率 800 Hz 处; 造孔剂含量为 50vol%, 第一吸收峰值出现在频率 1000 Hz 处; 造孔剂含量为 60vol%, 第一吸收峰值出现在频率 1600 Hz 处。随着造孔剂含量的增加, 第一吸收峰从低频向高频移动, 峰值从 0.41 增加到 0.82。当造孔剂含量较低时, 不利于声波进入孔隙中, 同时声波在材料内部的传播受到阻碍; 当造孔剂含量过高时, 材料的力学性能受到严重影响, 同时吸声性能由于材料内部弯曲度降低而下降。总之, 造孔剂含量过高和过低都不利于吸声。

2.3 样品厚度对多孔陶瓷材料吸声性能的影响

多孔陶瓷的厚度与吸声系数关系曲线如图 5 所示(造孔剂粒径为 4~5 mm, 造孔剂含量为 50vol%)。样品厚度为 10 mm, 在频率 1250 Hz 处出现吸收峰, 峰值为 0.43; 样品厚度为 15 mm, 吸声系数随声波频率增加逐渐增大, 在频率 2000 Hz 处吸声系数达到 0.64; 样品厚度为 20 mm, 在频率 1000 Hz 处出现吸收峰, 峰值为 0.47; 样品厚度为 25 mm, 在频率 800 Hz 处出现吸收峰, 峰值为 0.55; 样品厚度为 30 mm, 在频率 630 Hz 和 1000 Hz 处出现吸收峰, 峰值分别为 0.47 和 0.7。随着样品厚度的增加, 第一吸收峰从高频向低频方向移动, 峰值逐渐增加。样品厚度的增加会延长声波在内部传播的路径, 从而提高吸声性能。

2.4 空腔层数对多孔陶瓷材料吸声性能的影响

工程上, 通常多孔材料背后引入空腔组成复合结构来提高其吸声性能。增加低频率吸收的办法

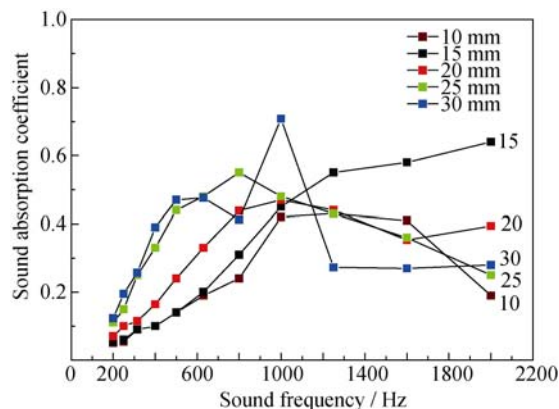


图 5 样品厚度对多孔陶瓷吸声系数的影响

Fig. 5 Effect of sample thickness on sound absorption coefficient of porous ceramics

是用薄板共振体, 在硬壁前装一可振动的薄板与板后面的空气(充当了弹簧)就组成共振体, 可在共振频率附近吸收。本实验空腔的设置结构如图 6 所示。

根据以上研究可知造孔剂含量为 60vol%, 样品厚度为 20 mm 的大孔陶瓷整体吸声性能优异。多孔陶瓷背后逐层加入空腔(每层空腔厚度为 3 mm)并测试其吸声系数, 得到多孔陶瓷背后空腔层数与吸声系数关系曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 样品的第一吸收峰随着空腔层数的增加向低频移动, 样品无背后空腔时, 第一吸收峰出现在声频 1600 Hz 处, 逐层加入空腔, 第一吸收峰从声频 1600 Hz 移动到声频 630 Hz 处。第一吸收峰峰值随着空腔层数的增加先减小后增大。在样品背后引入空腔主要起到共振吸声的效果, 吸声机理较之前也发生了改变, 这种复合结构的吸声性能得到了很大提高。

多孔陶瓷背后空腔层数与平均吸声系数关系曲线如图 8 所示, 从图中可以看出, 样品的平均吸声系数随着空腔层数增加逐渐增大, 材料背后加入五层空腔时, 平均吸声系数达到 0.47。材料背后空腔厚度从 0 mm 增加到 15 mm, 平均吸声系数从 0.36 增加到 0.47。在多孔陶瓷背后引入空腔能产生共振结构, 中低频的吸声性能有效提高, 这是由于当入

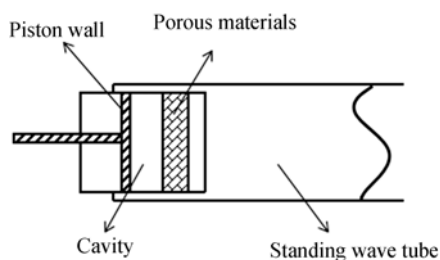


图 6 空腔位置模块图

Fig. 6 Cavity position module chart

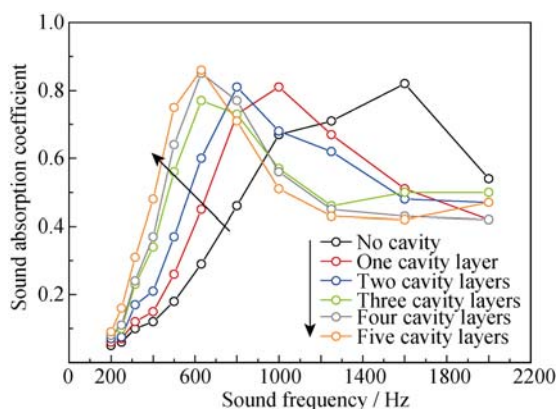


图 7 空腔层数对复合结构吸声系数的影响

Fig. 7 Effect of cavity layer on sound absorption coefficient of composite structure

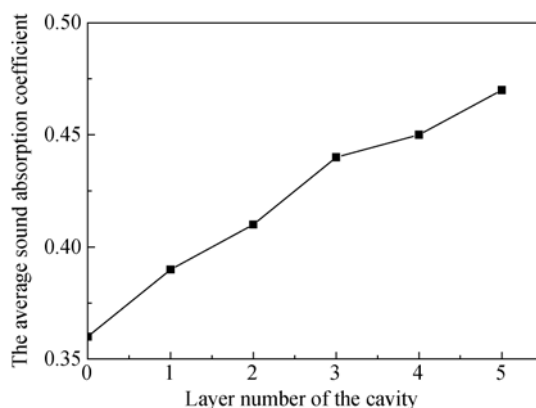


图 8 空腔层数对复合结构平均吸声系数的影响

Fig. 8 Effect of cavity layer on average sound absorption coefficient of composite structure

射声波和系统固有频率相同时, 会产生剧烈振动而耗散大量声能。

3 结论

1) 由模压法制备的多孔陶瓷具有优异的吸声性能, 样品厚度为 20 mm, 造孔剂含量为 70vol% 的陶瓷样品在频率为 2000 Hz 达到 0.86; 样品厚度为 15 mm, 造孔剂含量为 50vol%, 大粒径样品的吸声性能优于小粒径样品。

2) 多孔陶瓷材料的吸声性能受到造孔剂含量的影响, 造孔剂含量过高和过低都不利于提高样品吸声性能。

3) 造孔剂含量为 50vol%, 大孔径样品的第一共振吸收峰随着厚度的增加逐渐向着低频方向移动。

4) 随着多孔陶瓷材料背后空腔层数的增加, 复合材料第一共振吸收峰向低频移动, 平均吸声系数逐渐增大

参考文献:

- [1] LEI Y, PAN J, SHENG M P. Investigation of structural response and noise reduction of an acoustical enclosure using SEA method. *Applied Acoustics*, 2012, **73**(12): 348–355.
- [2] MASAHIRO TOYODA, MIKITO TANNKA, DAIJI TAKAHASHI. Reduction of acoustic radiation by perforated board and honey comb layer systems. *Applied Acoustics*, 2007, **68**(1): 71–78.
- [3] LIU J, HERRIN D W. Enhancing micro-perforated panel attenuation by partitioning the adjoining cavity. *Applied Acoustics*, 2010, **71**: 120–127.
- [4] LOPEZ-HARO S A, GUTIERREZ M I, VERA A, et al. Modeling the thermo-acoustic effects of thermal-dependent speed of sound and acoustic absorption of biological tissues during focused ultrasound hyperthermia. *Journal of Medical Ultrasonics*, 2015, **42**(4): 489–498.
- [5] RWAWIIRE SAMSON, TOMKOVA BLANKA, GLISCINSKA EULALIA, et al. Investigation of sound absorption properties of

- bark cloth non-woven fabric and composites. *Autex Research Journal*, 2015, **15**(3): 173–180.
- [6] 毛东兴, 洪宗辉. 环境噪声控制工程, 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 175.
- [7] XU WEIGANG, JIANG CHUNHAI, ZHANG JINSONG. Improvement in underwater acoustic absorption performance of open-celled SiC foam. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering A Spectra*, 2015, **482**: 568–574.
- [8] ZOU DAPENG, WILLIAMS KEVIN L, THORSOS ERIC I. Influence of temperature on acoustic sound speed and attenuation of seafloor sand sediment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, **40**(4): 969–980.
- [9] MICHEAL SCHEFFLER, PAOLO COLOMBO. Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications. New York: John Wiley and Sons, 2006: 296–300.
- [10] GUO QIANGQIANG, XIANG HUIMIN, SUN XIN, *et al.* Preparation of porous YB₄ ceramics using a combination of *in-situ* borothermal reaction and high temperature partial sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, **35**(13): 3411–3418.
- [11] HU HAILONG, ZENG YUPING, XIA YONGFENG, *et al.* High-strength porous Si₃N₄ ceramics prepared by freeze casting and silicon powder nitridation process. *Materials Letters*, 2014, **133**: 285–288.
- [12] RANIER SEPULVEDA, AMELIA A PLUNK, DAVID C DUNAND. Microstructure of Fe₂O₃ scaffolds created by freeze-casting and sintering. *Materials Letters*, 2015, **142**: 56–59.
- [13] SHI GUODONG, WU ZHANJUN, JIANGCHUNYU, *et al.* Porous alumina ceramics produced by physical vapor deposition assisted freeze-casting method. *Materials Letters*, 2015, **161**: 580–582.
- [14] STUART A R, GONZENBACH U T, TERVOORT E. Processing routes to macroporous ceramics: a review. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, **89**(6): 1771–1789.
- [15] STEPHEN A BARR, ERIK LUIJTEN. Structural properties of materials created through freeze casting. *Acta Materialia*, 2010, **58**: 709–715.
- [16] ZHANG RUBING, HAN BINGYU, FANG DAINING, *et al.* Porous Y₂SiO₅ ceramics with a centrosymmetric structure produced by freeze casting. *Ceramics International*, 2015, **41**(9): 11517–11522.
- [17] LIU CHUANBEI, LIU LAIBAO, TAN KEFENG, *et al.* Fabrication and characterization of porous cordierite ceramics prepared from ferrochromium slag. *Ceramics International*, 2015, **42**(1): 734–742.
- [18] TAKAHIRO TOMITA, SHINJI KAWASAKI, KIYOSHI OKADA. Effect of viscosity on preparation of foamed silica ceramics by a rapid gelation foaming method. *Journal of Porous Materials*, 2005, **12**(2): 123–129.
- [19] DESCAMPS M, RICHART O, HARDOUIN P, *et al.* Synthesis of macroporous β -tricalcium phosphate with controlled porous architectural. *Ceramics International*, 2008, **34**: 1131–1137.
- [20] ANDRÉ STUART, GONZENBACH URS T, ELENA TERVOORT, *et al.* Processing route to macroporous ceramics: a review. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, **89**(6): 1771–1789.
- [21] XU CHANGMING, WANG SHIWEI, KATARINA FLODSTRÖM, *et al.* Cellular silica-based ceramics prepared by direct foaming at high temperature. *Ceramics International*, 2010, **36**: 923–927.
- [22] LI LIUYUAN, WANG HONGJIE, SU SHAOCHANG, *et al.* Porous Si₃N₄ ceramics prepared by TBA-based gel-casting. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, **31**(3): 295–299.
- [23] LIU XINLI, ZHANG HUIBIN, JIANG YAO, *et al.* Characterization and application of porous Ti₃SiC₂ ceramic prepared through reactive synthesis. *Materials & Design*, 2015, **79**: 94–98.
- [24] DUAN CUIYUN, CUI GUANG, XU XINBANG, *et al.* Sound absorption characteristics of a high-temperature sintering porous ceramic material. *Applied Acoustics*, 2012, **73**(9): 865–871.