

引用格式: 伍发元, 代小敏, 方铭, 等. 纤维截面形状对聚酯纤维材料吸声性能的影响研究[J]. 声学技术, 2020, 39(5): 618-621. [WU Fayuan, DAI Xiaomin, FANG Ming, et al. Research on the influence of polyester fiber cross-section shape on sound absorption performance of polyester fiber materials[J]. Technical Acoustics, 39(5): 618-621.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.05.015

纤维截面形状对聚酯纤维材料 吸声性能的影响研究

伍发元¹, 代小敏¹, 方铭², 刘晓磊¹, 李翔^{3,4}, 蔡俊³

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西南昌 330096; 2. 国网江西省电力有限公司, 江西南昌 330096;
3. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 4. 山东科技大学化学与环境工程学院, 山东青岛 266590)

摘要: 为探讨聚酯纤维截面形状对吸声性能的影响, 通过热压法制备了 4 种不同纤维截面形状的聚酯纤维板, 利用阻抗管对 4 种聚酯纤维板在 80~6 300 Hz 频率范围内的吸声性能进行测试。根据流阻率模型和声阻抗模型对材料吸声性能进行预测, 并将该模型的计算结果与测试结果进行比较。结果表明: 扁平截面的聚酯纤维材料的吸声性能最佳, 平均吸声系数达到 0.404; 对于聚酯纤维材料的吸声系数与模型的计算值, 圆形截面聚酯纤维材料吻合较好(全频段误差率为 2.036%), 异形截面聚酯纤维材料的误差较大。

关键词: 聚酯纤维; 吸声系数; 截面形状; 流阻率模型; 声阻抗模型

中图分类号: TU55+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-05-0618-04

Research on the influence of polyester fiber cross-section shape on sound absorption performance of polyester fiber materials

WU Fayuan¹, DAI Xiaomin¹, FANG Ming², LIU Xiaolei¹, LI Xiang^{3,4}, CAI Jun³

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, Jiangxi, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power CO, LTD, Nanchang 330096, Jiangxi, China; 3. School of Environment Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. College of Chemical and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: To investigate the influence of the cross-section shape of polyester fiber on the sound absorption performance, four kinds of polyester fiber panels with different cross-section shapes are prepared by hot pressing method. The impedance tube is used to measure the sound absorption coefficient in the frequency range of 80~6 300 Hz. The sound absorption property of the material is predicted according to the flow-resistance model and the acoustic impedance model. The model calculation results are compared with measurement results. The results show that the polyester fiber material with flat cross-section has the best sound absorption property and the average sound absorption coefficient reaches 0.404; the measured sound absorption coefficient of the polyester fiber material with circular cross-section is in good agreement with the model calculation result, the error rate is 2.036% in the whole frequency range, but for the polyester fiber material with other cross-section shapes, the error is large.

Key words: polyester fiber; sound absorption coefficient; cross-section shape; flow-resistance model; acoustic impedance model

0 引言

聚酯纤维吸声材料属于多孔纤维材料, 其具有良好的吸声性能, 同时也是一种环保型材料。而聚酯纤维本身是用聚对苯二甲酸乙二醇酯制成的, 是当前非常普遍的一种合成纤维^[1]。其材料内部有大

量微小且连通的孔隙, 声波沿着这些孔隙可以深入材料内部, 与材料发生摩擦作用将声能转化为热能从而消耗声能^[2-3]。因此, 吸声性能受材料的厚度、密度、背后空腔深度及空气流阻率等多方面的影响^[4-6], 国内外已有学者在此方向进行了大量研究。Narang 等^[7]研究发现聚酯纤维的吸声系数在 500~4 000 Hz 频率范围内可以达到 0.4~0.7, 是较好的吸声材料。闫志鹏等^[8]研究了聚酯纤维针刺非织造材料在 200~2 000 Hz 频率范围内的吸声性能, 从材料的厚度、针刺密度、表面粗糙度和组成纤维等方面来系统研究其吸声性能的影响因素。Chen 等^[9]利用有限元软件, 研究了不同表面形状和多孔板的

收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-06-25

基金项目: 国网科技项目(52182017001P)

作者简介: 伍发元(1979-), 男, 湖北公安人, 教授级高级工程师, 研究方向为电网输变电设施环境保护。

通讯作者: 蔡俊, E-mail: juncai@sytu.edu.cn

多孔材料吸声特性，证明了多孔材料的流阻率对多孔板吸声效果的显著影响。上述研究均是采用常用的圆形截面聚酯纤维为原材料，对异形截面聚酯纤维的研究未见报道。

本文选取了截面形状为“圆形”“十字形”“扁平形”“三角形”4种聚酯纤维为原料，通过热压的方式制备成纤维板，采用阻抗管测量法，探究不同截面形状聚酯纤维吸声材料的吸声系数随噪声频率的变化特性，并根据纤维材料经验模型进行验证，为建立异形截面材料吸声性能预测模型提供了理论参考。

1 聚酯纤维吸声特性理论模型

本文利用著名的 Delany 和 Bazley 提出的理论模型计算分析聚酯纤维材料的吸声系数^[10]。D-B 模型因其足够成熟且已得到了大量数据验证而被广泛应用^[11-12]，其精确程度对于实际材料的声学性能分析有着巨大帮助。该模型根据施加到线性不变系统的声压与通过垂直于其施加点处压力方向表面产生的声学体积流速之间的关系也是线性的这一规律，通过拉普拉斯变换或傅里叶变化得到。该模型将纤维材料的特性阻抗和传播常数简单地用归一化公式 $f\rho_0/r$ 的幂函数来表示，计算公式为

$$Z_R = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{f\rho_0}{r} \right)^{-C_2} \right] \quad (1)$$

$$Z_I = -\rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{f\rho_0}{r} \right)^{-C_4} \right] \quad (2)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[C_5 \left(\frac{f\rho_0}{r} \right)^{-C_6} \right] \quad (3)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + C_7 \left(\frac{f\rho_0}{r} \right)^{-C_8} \right] \quad (4)$$

式中： Z_R 和 Z_I 是材料特征声阻抗 Z 的实部和虚部； α 和 β 是传播常数 γ 的实部和虚部； c_0 为材料中的声速； ρ_0 是实验条件下的空气密度； f 为入射声波频率； ρ_m 为材料的体积密度； r 为材料流阻率； $C_1 \sim C_8$ 为常数。

其中，流阻率是多孔材料吸声性能的关键参数，不同材料的流阻率各不相同^[13-14]。Garai 等^[15]对聚酯纤维材料的流阻率模型进行了修正研究，将流阻率作为其体积密度的函数，得到了较好的预测结果。其流阻率模型^[15]为

$$r = A\rho_m^B \quad (5)$$

其中： $A = K_2(d)^{-2}$ ； $B = K_1$ ； K_1 、 K_2 为常数； d 为纤维直径。

通过与实验数据拟合分析， A 、 B 数值分别为： $A = 25.989$ ， $B = 1.404$ 。

根据上述的公式和结果，可以求出纤维材料的吸声系数 α_n ：

$$\alpha_n = \frac{4Z_{IR}\rho_0C_0}{|Z_I|^2 + 2\rho_0C_0Z_{IR} + (\rho_0C_0)^2} \quad (6)$$

$$Z_I = (Z_R + iZ_I) [\coth(\alpha + i\beta)l] = Z_{IR} + iZ_{II} \quad (7)$$

式中： Z_I 为聚酯纤维材料特征声阻抗， Z_{IR} 和 Z_{II} 是 Z_I 的实部和虚部。

通过集成流阻率模型和声阻抗模型，可以在不需要测定空气流阻率的前提下，供测定材料厚度和体积密度等材料参数就能得到材料的声学特性。这样不仅可以探讨相关参数对吸声性能的影响，还能够筛选出符合实际要求的最佳参数，从而大大缩短研究工作量，提高材料的加工和选择效率。

2 实验材料及方法

2.1 原材料

实验材料的纤维参数表如表 1 所示。

表 1 纤维参数表
Table 1 Fiber parameters

材料编号	纤维截面形状	纤维细度/D	纤维长度/mm	备注
1	圆形	3	51	直径约为 18~22 μm
2	十字形	15	38	对角长度约为 12~18 μm
3	三角形	2	38	边长约为 18~22 μm
4	扁平形	2	38	长度约为 22~30 μm

由光学显微镜实测不同截面形状聚酯纤维的形态^[16-17]如图 1 所示。

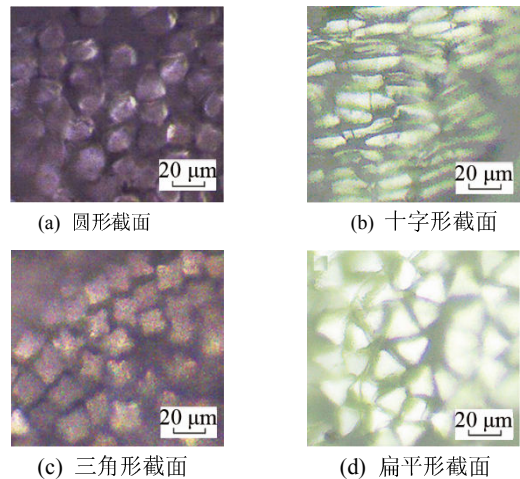


图 1 光学显微镜下各纤维截面形态
Fig.1 Shape of fiber cross-section under optical microscope

2.2 实验仪器、设备

LP-S-50 型平板压机：泰国 Labtech 工程公司；BSWA SW422 490181 型阻抗管：北京声望声电技术有限公司；Olympus BX 43 荧光正置显微镜：奥林匹斯(中国)有限公司。

2.3 实验方法

2.3.1 样品制备

将 4 种截面形状聚酯纤维分别与低熔点聚酯纤维按照质量比为 1:1 混合，在 190℃ 下，热压 8 min 成型。每种纤维材料制备 2 个样品。将制备得到的聚酯纤维材料按照测试仪器的截面要求，分别裁剪成直径为 100 mm(测试频率范围 80~1 600 Hz)和 30 mm(测试频率范围 1 000~6 300 Hz)的圆形试样，如图 2 所示，所需试样体积密度均为 150 kg·m⁻³ 左右，厚度均为 15.6 mm。



图 2 聚酯纤维吸声板成品

Fig.2 Product of polyester fiber sound absorption board

2.3.2 性能测试

利用阻抗管声学分析仪，按照 GB/T18696.2-2002《阻抗管中吸声系数和声阻抗的测试第 2 部分：传递函数法》进行吸声系数测试，将需测试的试样置于驻波管一端，保证其背后无空气层存在，且试样与管壁处无缝隙。每个试样测量 3 次取平均值，测试频率范围为 80~6 300 Hz。

3 结果与分析

3.1 吸声系数测试数据分析

图 3 为不同截面形状的聚酯纤维吸声板对吸声系数的影响。由图 3 可知，在低频阶段，由于材料厚度较小以及未添加空气层辅助，材料的吸声系数整体较小，变化不大；在 300~3 000 Hz 频率范围内，吸声系数是频率的单调函数，即随着频率的增加，吸声系数增大，且十字形、三角形与扁平形聚酯纤维吸声板的吸声系数均高于圆形聚酯纤维的吸声系数；在 3 000~6 300 Hz 频率范围内，异形聚酯纤维吸声板的吸声系数开始下降，并低于圆形聚酯纤维吸声板的吸声系数，而圆形聚酯纤维吸声板的吸声系数在此范围内保持持续上升并趋于稳定。

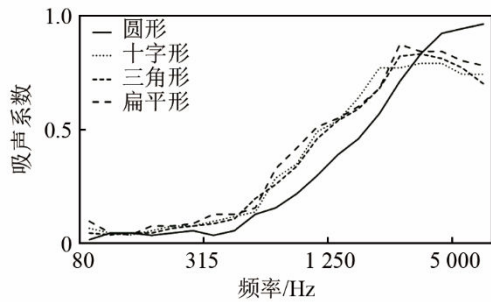


图 3 不同截面形状对吸声系数的影响

Fig.3 The influences of different cross-section shapes on sound absorption coefficient

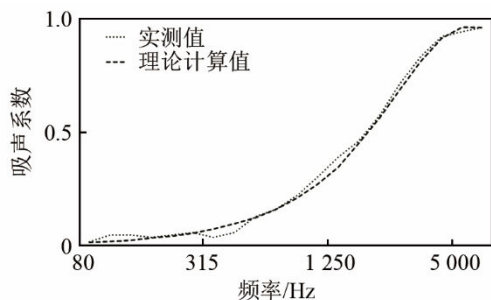
3.2 理论模型与实验结果对比

表 2 为全频段不同截面形状聚酯纤维材料吸声系数的实测值与预测值误差，图 4 为不同截面聚酯纤维吸声板吸声系数实测值与理论计算值对比。从表 2 及图 4 可以看出，运用集成模型对于圆形聚酯纤维吸声板具有良好的预测效果。对于异形聚酯纤维吸声板，在中低频部分预测值总是比实测值偏低，但由于在低频部分整体吸声性能较低，所以偏差不大；而在高频部分，理论值又偏高，这说明，此预测模型仅仅适用于截面为圆形的聚酯纤维，而对于异形截面的聚酯纤维，其结果有较大出入。这是由于异形截面聚酯纤维具有更多的纤维界面和更细微的孔隙，不能单纯地通过体积密度计算获得流阻率进而得到吸声系数，需要通过实测流阻率，进而与理论计算值进行对比，找出偏差的原因。

表 2 全频段不同截面形状聚酯纤维材料吸声系数的实测值与预测值误差

Table 2 Deviations between measured and predicted sound absorption coefficients of polyester fiber materials with different cross-sections in full frequency band

截面形状	800~6 300 Hz 频段吸声系数误差		
	平均误差	标准误差	误差率/%
圆形	0.016	0.018	2.04
十字形	0.100	0.080	13.39
三角形	0.087	0.073	7.90
扁平形	0.095	0.074	11.52



(a) 圆形截面

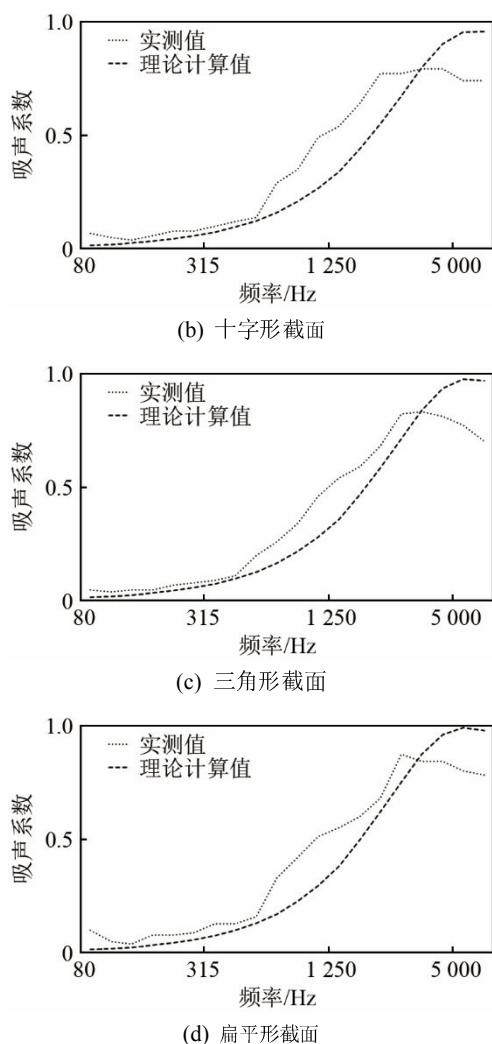


图4 不同截面聚酯纤维吸声板吸声系数实测值与理论计算值对比

Fig.4 Comparison between the measured and the calculated sound absorption coefficients of the polyester fiber sound absorption board with different cross-section shapes

4 结论

本研究通过热压法制备得到不同截面的聚酯纤维吸声板，再由阻抗管法系统测试得到吸声性能。研究表明，异形聚酯纤维的吸声性能在中低频阶段较优于普通圆形聚酯纤维，其中扁平形截面纤维性能最优，平均吸声系数达到0.404。

此外，本研究通过声阻抗和流阻率集成模型理论计算与实测结果对比表明：集成模型对于圆形聚酯纤维有良好的预测效果，而对于异形聚酯纤维，预测值与实测值有较大偏差，后续研究将在此模型基础上进一步改进。

聚酯纤维作为一种零污染、可循环、廉价易得的纤维材料，其作为吸声材料的理论模型还有待进

一步研究。本研究结果可为降低纤维吸声材料的研发成本、新型纤维降噪材料的开发提供基础。

参 考 文 献

- [1] 王军锋. 木质纤维/聚酯纤维复合吸声材料的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [2] 涂琪. 超、特高压变电站降噪用吸声材料的优化设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [3] CROCKER M J, ARENAS J P. Recent trends in porous sound-absorbing materials[J]. *Sound & Vibration*, 2010, **44**(7): 12-17.
- [4] 彭立民, 王军锋, 傅峰, 等. 木质纤维/聚酯纤维复合材料吸声性能的试验分析[J]. *建筑材料学报*, 2015, **18**(1): 172-176. PENG Limin, WANG Junfeng, FU Feng, et al. Experimental study on sound absorption performance of wood fiber/polyester fiber composite materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, **18**(1): 172-176.
- [5] KUCUK M, KORKMAZ Y. The effect of physical parameters on sound absorption properties of natural fiber mixed nonwoven composites[J]. *Textile Research Journal*, 2012, **82**(20): 2043-2053.
- [6] BERARDI, UMBERTO, IANNACE, et al. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications[J]. *Building and Environment*, 2015. **94**(Dec. Pt.2): 840-852.
- [7] NARANG P P. Material parameter selection in polyester fibre insulation for sound transmission and absorption[J]. *Applied Acoustics*, 1995, **45**(4): 335-358.
- [8] 闫志鹏, 靳向煜. 聚酯纤维针刺非织造材料的吸声性能研究[J]. *产业用纺织品*, 2006, **24**(12): 13-16. YAN Zhipeng, JIN Xiangyu. Research on sound absorption performance of polyester fiber needled nonwoven materials[J]. *Industrial Textiles*, 2006, **24**(12): 13-16.
- [9] CHEN W H, LEE F C, CHIANG D M. On the acoustic absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, **237**(2): 337-355.
- [10] DELANY M E, BAZLEY E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials[J]. *Applied Acoustics*, 1970, **3**(2): 105-160.
- [11] DUNN I P, DAVERN W A. Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers[J]. *Applied Acoustics*, 1986, **19**(5): 321-34.
- [12] GARDNER G C, O LEARY, M E, et al. Neural networks for prediction of acoustical properties of polyurethane foams[J]. *Applied Acoustics*, 2003, **64**(2): 229-242.
- [13] 胡颂纯, 钟祥瑞. 纤维型多孔吸声材料流阻的研究[J]. *声学技术*, 1994, **13**(3): 139-143. HU Songchun, ZHONG Xiangzhang. Research on flow resistance of fibrous porous sound absorbing materials[J]. *Technical Acoustics*, 1994, **13**(3): 139-143.
- [14] BIES D A, HANSEN C H. Flow resistance information for acoustical design[J]. *Applied Acoustics*, 1980, **13**(5): 357-391.
- [15] GARAI M, POMPOLI F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications[J]. *Applied Acoustics*, 2005, **66**(12): 1383-1393.
- [16] 严晓燕. 纤维的包埋切片技术与异形纤维特征参数研究[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [17] 严晓燕, 吴雄英. 异形截面纤维特征参数提取及图像识别技术研究进展[J]. *合成纤维*, 2005, **34**(10): 11-14. YAN Xiaoyan, WU Xiongying. Research progress on feature parameter extraction and image recognition of profiled cross-sectional fiber[J]. *Synthetic Fiber*, 2005, **34**(10): 11-14.