

引用格式: 何宇辰, 胡晨, 王俊杰, 等. 扁平形聚酯纤维 Delany-Bazley 吸声模型的优化方法[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 252-256. [HE Yuchen, HU Chen, WANG Junjie, et al. Optimized Delany-Bazley sound absorption model of flat polyester fiber[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 252-256.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.02.016

# 扁平形聚酯纤维 Delany-Bazley 吸声模型的优化方法

何宇辰<sup>1</sup>, 胡晨<sup>1</sup>, 王俊杰<sup>2</sup>, 姚智敏<sup>2</sup>, 蔡俊<sup>2</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽合肥 230022; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 作为经典吸声系数预测模型, Delany-Bazley(DB)模型在纤维材料吸声预测方面一直有着较好的应用与口碑。但对于异形截面聚酯纤维的吸声性能预测, DB 模型预测效果却不尽如人意。针对 DB 模型中对吸声系数预测起重要影响的八个无量纲的常数, 以扁平截面聚酯纤维材料为研究对象, 通过实际测量纤维材料的流阻数据对 DB 模型中的常数进行拟合, 得到扁平截面聚酯纤维材料的优化吸声模型并开展实验验证。研究表明, 优化后的 DB 模型能较精确地分别预测异形截面纤维材料的吸声系数。预测数据和实验数据的误差率由原来的 36.64%降低到 9.16%, 精确度相对提高了 75.00%左右。

**关键词:** 吸声系数; Delany-Bazley (DB)模型; 聚酯纤维; 扁平截面; 流阻

中图分类号: X593

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-02-0252-05

## Optimized Delany-Bazley sound absorption model of flat polyester fiber

HE Yuchen<sup>1</sup>, HU Chen<sup>1</sup>, WANG Junjie<sup>2</sup>, YAO Zhimin<sup>2</sup>, CAI Jun<sup>2</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., LTD., Hefei 230022, Anhui, China;

2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As a classical sound absorption coefficient prediction model, Delany-Bazley (DB) model has been widely used in sound absorption prediction of fiber materials. However, DB model can't accurately predict the sound absorption performance of polyester fiber with special-sections. This study aims to optimize DB model for the sound absorption prediction of flat polyester fiber. The actual flow resistance data are measured to reassign parameter values in DB model. The optimized sound absorption prediction model is verified by the experimental data, and the error rate is analyzed. The results show that the optimized DB model can accurately predict the sound absorption coefficient of fiber materials with special-sections. The relative error between the predicted data and the experimental data decreases from 36.64% to 9.16%, the accuracy is improved by about 75.00%.

**Key words:** sound absorption coefficient; Delany-Bazley (DB) model; polyester fiber; flat section; flow resistance

## 0 引言

纤维材料以其在中高频段具有良好的吸声效果而被广泛应用于航天航空、建筑、汽车等减震降噪领域, 受到了国内外学者们的高度关注<sup>[1]</sup>。由于纤维材料种类繁多, 通过理论模型对不同类型纤维的吸声材料进行参数优化及性能预测, 不仅可以节约研发成本, 还可以根据实际需求进行材料开发以

及相关降噪措施的快速实施, 对噪声污染控制新材料和新技术的研发意义重大<sup>[2]</sup>。

为了准确预测纤维材料的吸声系数, 研究人员建立了各种吸声模型。其中最具代表性的是 Delany-Bazley (DB)模型<sup>[3]</sup>。由于简单便捷, 该模型从 20 世纪 70 年代开始一直被广泛应用于纤维多孔性材料的吸声特性研究。由于该模型所涉及的参数较少, 导致预测结果与实际数值之间容易存在较大的差异。为此, 多年来 DB 模型被众多学者延伸拓展, 以期扩大应用范围, 提高模型预测的准确性。Miki<sup>[4]</sup>修正了 DB 模型阻抗的正实数特性, 使模型能在更宽的频率下得到了更好的运用, 特别是在低于 400 Hz 的频率范围。Garai 等<sup>[5]</sup>通过对不同直径

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-03-03

基金项目: 国网安徽经研院科技项目(编号 B31209190005)资助项目。

作者简介: 何宇辰(1989—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 工程师, 研究方向为电力工程的环境影响研究与优化设计。

通信作者: 蔡俊, E-mail: juncai@sjtu.edu.cn

(18~48 μm)的聚酯纤维材料进行测量,提出了更适合纺织纤维的相关系数。Takeshi<sup>[6]</sup>基于快速傅里叶转换法进一步改进了 DB 模型,分别建立了玻璃棉和岩棉的吸声经验模型,实验证明改进的模型在一定频率下的预测结果比原模型更接近实测值。但这些研究仅针对常规截面(圆形截面)纤维,而对于异形截面纤维的吸声系数预测模型研究未见报道。

在纤维的实际运用中,常规圆形截面的纤维工艺技术相对成熟,性能稳定,但是具有易沾污、易起球和易钩丝等缺点。而有研究表明,异形截面的纤维不但能克服上述问题<sup>[7]</sup>,而且因其拥有更大的比表面积而具有更良好的吸声性能<sup>[8-11]</sup>。但目前还没有适合异形截面纤维吸声性能的预测模型,因此本文在前期研究的基础上<sup>[12]</sup>,选择扁平形截面聚酯纤维作为研究对象,对经典的 DB 模型进行参数修正并验证吸声系数的预测效果,以期异形截面聚酯纤维的吸声性能预测模型的快速建立提供参考。

### 1 Delany-Bazley 模型

Delany-Bazley (DB)模型描述了纤维材料的流阻、声波频率与材料表面特性阻抗、传播波数之间的关系,该模型只有流阻作为自变量<sup>[3,5]</sup>。描述吸声材料声学性能的特征阻抗  $Z_0$  和传播参数  $\gamma$  关系为

$$Z_0 = R + jX \tag{1}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \tag{2}$$

其中:  $R$ 、 $X$  分别为特征阻抗的实部和虚部;  $\alpha$  为衰减参数;  $\beta$  为相位参数。

根据特征阻抗  $Z_0$  和传播参数  $\gamma$  可得到材料的表面阻抗  $Z$ :

$$Z = Z_0 \coth(\gamma l) \tag{3}$$

其中:  $l$  为材料厚度(cm)。

由材料表面阻抗就可以进一步推导出材料正入射时的吸声系数:

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 C_0}{Z + \rho_0 C_0} \right|^2 \tag{4}$$

其中:  $\rho_0$  为空气密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $C_0$  为声速。

另外 Delany 和 Bazley 根据大量的实验得到了  $R$ 、 $X$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  和材料流阻  $r$  的幂指关系:

$$R = \rho_0 C_0 \left[ 1 + C_1 \left( \frac{f}{r} \right)^{-C_2} \right] \tag{5}$$

$$X = \rho_0 C_0 \left[ C_3 \left( \frac{f}{r} \right)^{-C_4} \right] \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{\omega}{C_0} \left[ C_5 \left( \frac{f}{r} \right)^{-C_6} \right] \tag{7}$$

$$\beta = \frac{\omega}{C_0} \left[ 1 + C_7 \left( \frac{f}{r} \right)^{-C_8} \right] \tag{8}$$

DB 模型中  $C_1 \sim C_8$ <sup>[4]</sup>参数的数值如表 1 所示。

表 1 DB 模型  $C_1 \sim C_8$  的参数数值  
Table 1 Values of Parameters  $C_1 \sim C_8$  in DB model

参数	数值	参数	数值
$C_1$	0.057	$C_5$	0.189
$C_2$	0.754	$C_6$	0.595
$C_3$	0.087	$C_7$	0.098
$C_4$	0.732	$C_8$	0.700

从 DB 模型可得,纤维材料吸声系数的预测仅需材料厚度和流阻两个参数。由于流阻较难测量,Delany 和 Bazley 给出了相应的经验公式<sup>[3,5]</sup>:

$$r = A\rho^B \tag{9}$$

其中:  $A=25.989$ ,  $B=1.404$ ,  $\rho$  为密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。其由简单的幂指关系通过材料的容重预测其流阻,因此不可避免地存在经验公式带来的预测误差。

### 2 实验材料和设备

#### 2.1 纤维材料的制备

本研究采用开松-梳理-热压法<sup>[13]</sup>分别制备了圆形和扁平形两种截面形状的聚酯纤维板用于后续研究。纤维材料制备过程如下:将聚酯纤维和低熔点聚酯纤维开松混合,称重铺放于模具中,然后在平板热压机中通过 190 °C 的温度热压 10 min,室温冷却后得到不同参数的聚酯纤维板,其相关物理参数如表 2 所示。制备样品的材料及成品图如图 1 所示。

#### 2.2 仪器与设备

本文采用 YP402N 电子天平(上海精密科学仪器有限公司)测量材料的质量,计算得到聚酯纤维板的容重。测试符合 GB-T 26497-2011<sup>[14]</sup>标准。

表 2 纤维板物理参数(厚度为 7 mm)  
Table 2 Physical parameters of fiberboard (thickness: 7 mm)

样品编号	截面形状	材料密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	流阻实测值/ $(\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2})$
$R_1$	圆形	0.087	25 400
$R_2$		0.134	50 290
$F_1$	扁平形	0.093	45 390
$F_2$		0.144	95 060
$F_3$		0.13	71 455
$F_4$		0.184	156 015
$F_5$		0.211	197 020
$F_6$		0.215	215 525
$F_7$		0.131	84 845
$F_8$		0.114	50 300
$F_9$		0.199	193 175
$F_{10}$		0.149	95 725

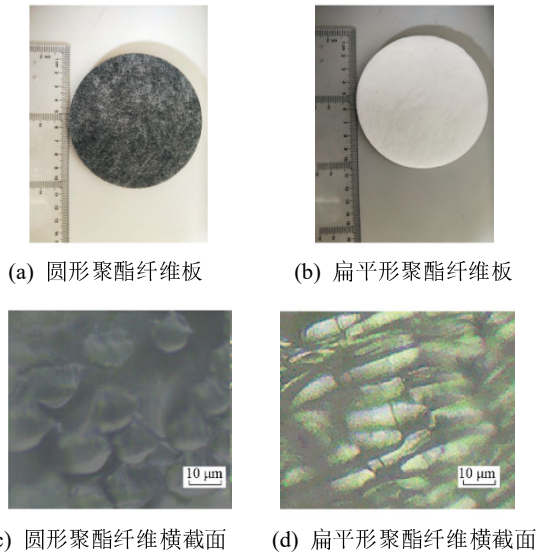


图 1 制备样品的材料及成品图  
Fig.1 Preparation of sample materials and finished product

本文采用四通道阻抗管 BSWASW4224(北京声望声电技术有限公司)测量材料的吸声系数。阻抗管采用传递函数法<sup>[15]</sup>测量声波垂直入射时的吸声系数。其测量样品小易获取,测量方法简单,适合推广普及,阻抗管如图 2(a)所示。

本文采用流阻测试与分析系统 SIGMA(加拿大 Mecanum 公司)测量流阻数据,在极低的压强下测量空气的线速度得到流阻。测试方法符合标准 ISO 9053-2018<sup>[16]</sup>和 9053-2020<sup>[17]</sup>,仪器如图 2(b)所示。

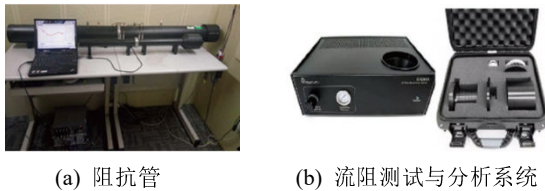


图 2 测试设备  
Fig.2 Picture of testing equipment

本文采用 Olympus BX43 荧光正置显微镜观察不同纤维的截面形状。测试方法符合 GB/T 2609-2015<sup>[18]</sup>标准。

### 2.3 研究方法

采用扁平截面纤维的物理参数对模型参数进行非线性拟合,得到修正后的参数值和优化后的 DB 模型。模型参数修正后,采用修正后的 DB 模型计算得到吸声系数计算值,将计算值与实际测量值对比得到相对误差。以相对误差是否达到 15%为衡量指标,若误差率  $e > 15%$ ,则重新修正模型参数直到误差率  $e \leq 15%$ 。计算和测量值的相对误差率计算公式为

$$e = \frac{|\alpha_0 - \alpha_1|}{\alpha_0} \times 100\% \tag{10}$$

其中:  $e$  为误差率;  $\alpha_0$  为平均吸声系数实测值;  $\alpha_1$  为平均吸声系数预测值。

采用如图 3 所示的流程,进行参数修正。

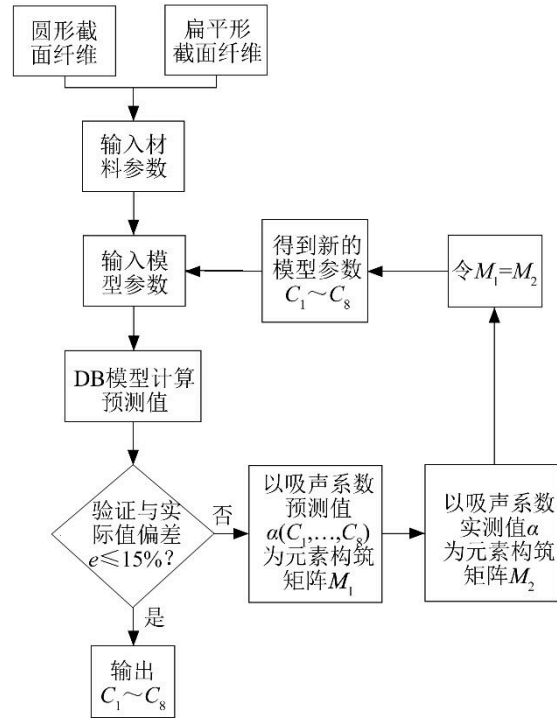


图 3 DB 模型优化流程图  
Fig.3 Flow chart of DB model optimization

## 3 结果与分析

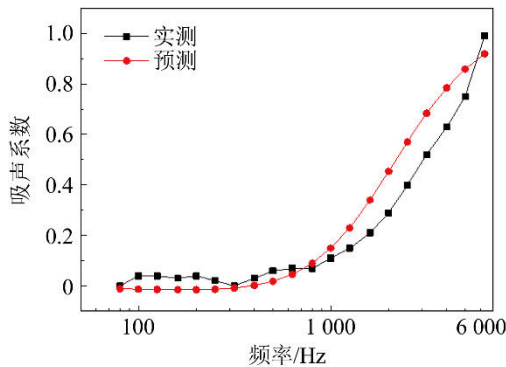
### 3.1 圆形和扁平截面纤维吸声系数的预测结果对比

为了比较 DB 模型计算圆形和扁平形纤维材料吸声性能的差异,选取了表 2 中容重接近的圆形( $R_1$ 、 $R_2$ )和扁平形( $F_1$ 、 $F_2$ )截面聚酯纤维材料,输入到 DB 模型,分别得到两种截面形状聚酯吸声系数的预测值,并将吸声系数预测值与实际测量值进行了比较,如图 4 所示。

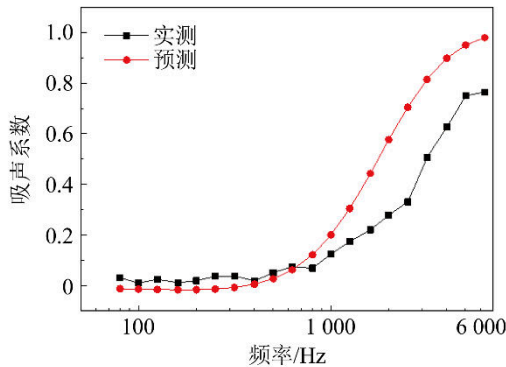
从图 4 可以看出,圆形截面纤维采用原 DB 模型预测平均吸声系数相对误差较小,为 13.00%;而扁平形纤维采用 DB 模型预测平均吸声系数相对误差较大,为 36.64%。表明采用原 DB 模型能较为准确地预测圆形截面纤维的吸声系数,但用于预测异形截面纤维时,会有较大误差。因此有必要对 DB 模型参数进行修正,使其更适用于扁平形截面纤维。

造成两者预测精度差异的原因可能是相同容重下,扁平形纤维由于其比表面积较大,气-固相声阻也较大,从而增大了声波穿过时的粘滞阻力作用<sup>[12]</sup>,使得声波通过扁平形截面纤维时的能量损耗

增加, 吸声系数由此增大。在 DB 模型中, 这种阻力作用以流阻形式表示。根据公式(9)可得, 相同容重的材料流阻应该相同。但是通过实测数据发现, 相同容重下扁平形截面纤维与圆形截面纤维的流阻存在着巨大的差距, 这也从侧面证明了扁平形截面纤维的粘滞阻力作用更加明显。因此, 研究认为有必要根据实测流阻数据修正 DB 模型参数, 减少原 DB 模型的预测误差, 而修正后的 DB 模型将适用于扁平形截面纤维。



(a) 圆形截面样品  $R_1$



(b) 扁平形截面样品  $F_2$

图 4 实测吸声系数与 DB 模型预测吸声系数的对比  
Fig.4 Comparison between measured and DB model predicted sound absorption coefficients

### 3.2 参数修正研究

为此选取表 2 中  $F_1$ - $F_6$  号六组样品, 将这些样品的实测流阻、材料厚度代入 DB 模型, 假设  $C_1 \sim C_8$  为未知数, 从而构筑矩阵  $M_1$ :

$$M_1 = \begin{pmatrix} f_{11}(C_1, C_2 \dots C_8) & \dots & f_{16}(C_1, C_2 \dots C_8) \\ \vdots & & \vdots \\ f_{n1}(C_1, C_2 \dots C_8) & \dots & f_{n6}(C_1, C_2 \dots C_8) \end{pmatrix} \quad (11)$$

该矩阵表示通过 DB 模型预测得到的吸声系数。其中每一行表示同一频率下 6 组材料的吸声系数预测值; 每一列表示同一材料在不同频率下的吸声系数。同时, 将 6 组材料实际测量的吸声系数构筑矩阵  $M_2$ :

$$M_2 = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \dots & \alpha_{16} \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha_{n1} & \dots & \alpha_{n6} \end{pmatrix} \quad (12)$$

该矩阵表示 6 组材料实际测量的吸声系数, 其中每一行为同一频率下 6 组材料的吸声系数, 每一列表示同一材料不同频率下的吸声系数。

$M_1$  和  $M_2$  相等, 通过拟合得到  $C_1 \sim C_8$  数值, 即修正后的 DB 模型参数, 如表 3 所示。

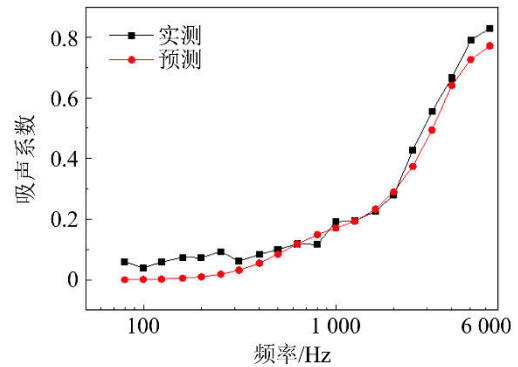
表 3 拟合得到的参数  $C_1 \sim C_8$   
Table 3 Parameters  $C_1 \sim C_8$  obtained by fitting

参数	数值	参数	数值
$C_1$	0.176	$C_5$	0.508
$C_2$	0.232	$C_6$	0.127
$C_3$	14.071	$C_7$	0.326
$C_4$	1.814	$C_8$	0.793

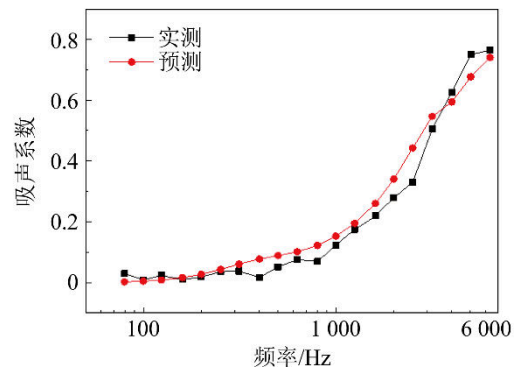
### 3.3 优化后 DB 吸声模型的效果验证

将拟合后得到的  $C_1 \sim C_8$  的值代入 DB 模型得到优化模型, 以表 2 中  $F_7 \sim F_{10}$  4 组扁平形聚酯纤维样品为研究对象, 通过比较模型预测值与实际测量值来验证修正模型的效果。图 5 是优化后 DB 模型吸声预测值与实测值的比较曲线。

表 4 列出了 DB 模型优化前后误差对比。由表



(a) 扁平形截面样品  $F_9$



(b) 扁平形截面样品  $F_{10}$

图 5 优化后 DB 模型预测数据与实测数据验证结果示意图  
Fig.5 Verification results of the optimized DB model predicted data and the measured data

表 4 DB 模型优化前后误差率对比表  
Table 4 Comparison table of error rates before and after DB model optimization

表面形状	样品编号	误差率/%		平均误差率/%
		模型优化前	模型优化后	
圆形	$R_1$	11.26	—	13.00
	$R_2$	14.74	—	
扁平形	$F_1$	29.24	—	36.64
	$F_2$	44.04	—	
扁平形	$F_7$	—	11.41	9.16
	$F_8$	—	17	
	$F_9$	—	8.03	
	$F_{10}$	—	0.2	
误差的降低率/%		75.00		

注：由于  $F_3 \sim F_6$  的吸声系数已被用于优化模型的拟合常数，故在模型优化后的误差率分析中不予采用。

4 可以得到，优化后的 DB 模型预测扁平形聚酯纤维的吸声系数所得到的误差远远低于未优化模型的误差。平均相对误差从起初的 36.64% 下降到 9.16%，降低率达到 75.00%。由此可见，参数拟合后得到的优化 DB 模型能较准确地预测扁平形聚酯纤维材料的吸声系数，从而为异形纤维吸声性能的进一步准确预测提供了方法。

## 4 结 论

本文比较了 DB 模型对于圆形和扁平形截面聚酯纤维吸声性能预测的准确性，通过实测的流阻、吸声系数和材料厚度拟合八个无量纲常数  $C_1 \sim C_8$ ，从而得到了优化模型，并显著提升了 DB 模型预测扁平形纤维吸声系数的效果。

研究表明 DB 模型适合于常规圆形截面纤维的吸声性能预测，误差率仅为 13.00%。而对于异形(扁平形)截面纤维的平均误差率达到 36.64%。

采用实测流阻数据修正模型参数，得到的优化 DB 模型吸声系数的预测值与实验测量值十分接近，平均误差率仅为 9.16%，相对误差降低率为 75.00%，从而证明了参数修正对于模型优化的可行性。

受到时间及实际条件的限制，本文只选取了一种异形截面(扁平形截面)的纤维来优化 DB 模型，后续将考虑对更多截面纤维的模型优化，以期构建异形截面纤维客观参数与 DB 模型优化参数的联系。

## 参 考 文 献

[1] 彭敏, 赵晓明. 纤维类吸声材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3669-3677.  
PENG Min, ZHAO Xiaoming. Advances in the fiber-based sound-absorbing materials[J]. Materials Reports, 2019, 33(21):

3669-3677.  
[2] 刘斌. 低频噪声的危害及监测方法[J]. 科技与创新, 2016(21): 104, 107.  
[3] DELANY M E, BAZLEY E N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials[J]. Applied Acoustics, 1970, 3(2): 105-116.  
[4] MIKI Y. Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan (E), 1990, 11(1): 19-24.  
[5] GARAI M, POMPOLI F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications[J]. Applied Acoustics, 2005, 66(12): 1383-1398.  
[6] KOMATSU T. Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials[J]. Acoustical Science and Technology, 2008, 29(2): 121-129.  
[7] 赵洪亮, 付海明, 雷陈磊, 等. 纤维截面形状对纤维捕集效率及压力损失的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2016, 42(1): 86-92.  
ZHAO Hongliang, FU Haiming, LEI Chenlei, et al. Effect of fibers' cross-sectional shape on fiber collection efficiency and pressure drop[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2016, 42(1): 86-92.  
[8] YANG S, YU W D, PAN N. Fractal phenomenon in sound absorbing behavior of down fiber assembly[J]. Textile Research Journal, 2011, 81(11): 1139-1144.  
[9] ALLARD J F, ATALLA N. Propagation of Sound in Porous Media[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.  
[10] TASCAN M, VAUGHN E A. Effects of fiber denier, fiber cross-sectional shape and fabric density on acoustical behavior of vertically lapped nonwoven fabrics[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2008, 3(2): 155892500800300.  
[11] 吴彤, 于伟东, 郑永红, 等. 纤维形态对针刺非织造布吸声系数的影响[J]. 声学技术, 2015, 34(1): 68-74.  
WU Tong, YU Weidong, ZHENG Yonghong, et al. Effect of fiber morphology on the sound absorption coefficient of needle-punched nonwovens[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(1): 68-74.  
[12] 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, 2020, 39(5): 618-621.  
[13] 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.  
[14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电子天平: GB/T 26497—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
[15] 李维鑫, 郭锐, 王新, 等. 用阻抗法测量材料固有参数研究多层吸声特性[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(3): 265-269.  
LI Weixin, GUO Rui, WANG Xin, et al. Measurement of inherent parameters of materials by impedance method and study on sound absorption properties of multilayer materials[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(3): 265-269.  
[16] Information and documentation-the Dublin core metadata element set. Acoustics—Determination of airflow resistance—Part 1: Static airflow method: ISO 9053-1:2018[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/69869.html>.  
[17] Information and documentation-the Dublin core metadata element set. Acoustics—Determination of airflow resistance— Part 2: Alternating airflow method : ISO 9053-2:2020[S/OL]. <https://www.iso.org/standard/76744.html>.  
[18] 中国机械工业联合会. 显微镜-物镜: GB/T 2609—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.