

车用纤维材料吸声系数预测改进模型

田野 周仪

重庆工贸职业技术学院 重庆 408000

【摘要】：针对纤维吸声材料传统经验模型预测精度不足的问题，本文开展了单层纤维结构吸声特性的预测模型研究。首先，通过丹麦 BK 4206 型阻抗管系统获取了典型车用纤维在不同厚度下的法向入射吸声系数，分析了 Delany-Bazley 模型^[1]和 Dunn-Davern 模型^[2]在预测单层材料时的局限性。在此基础上，基于经典幂律定理，采用最小二乘法对模型的特征阻抗和传播常数表达式中的回归系数进行了全局优化。试验验证表明，改进后的预测模型与实测曲线吻合良好，有效克服了原模型在低频段的预测偏差，且对厚度变化具有更好的鲁棒性。该研究成果简化了吸声系数的获取流程，对车辆声学包开发具有工程应用价值。

【关键词】：纤维材料；吸声系数；最小二乘法；阻抗管

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.031

在车辆 NVH 工程中，长期以来，纤维材料都是声学包吸声介质中应用最广的一类，其吸声系数能否被准确预估，常常直接影响降噪设计的有效性；不过，经典 Delany-Bazley 模型^[1]（D-B 模型）以及在其基础上修正而来的 Dunn-Davern 模型^[2]（D-D 模型）在面向单层材料时仍暴露出两方面不足，其一是低频区间预测偏差偏大^[3]，其二为对厚度变化的适应能力有限^[4]，结果导致设计阶段不得不反复开展试验校验，并由此抬升开发成本。

为改善这一状况，本文先通过阻抗管试验获取典型车用纤维材料的吸声系数，并据此考察传统模型的预测误差；继而以 Dunn-Davern 幂律框架为依托，利用最小二乘法对特征阻抗与传播常数表达式中的 8 个回归系数实施全局优化；随后借助试验数据对比来检验改进模型的精度，最终希望为车用纤维材料吸声性能预测提供一种兼具较高精度与工程效率的算法。

1 试验材料与原理

1.1 试验材料

试验样品采用车用普通玻璃纤维毡，按照 GB/T 18696.2—2002 标准^[5]加工成直径 $\phi 29.8\text{mm}$ 的圆形试样。为探究厚度对吸声性能以及模型精度的影响，制备了两种不同厚度的单层试样；材料静态流阻率通过 SW 系列流阻测试仪并依据 GB/T 25077-2010 标准^[6]测量获得，该参数反映了流体通过材料时所受的粘性阻力，同时也是经验模型的核心输入量。具体参数列于表 1。

表 1 玻璃纤维材料实验测量样品

试样编号	结构	厚度/mm	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	流阻率/ $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
1	单层	20	20	9800
2	单层	26	26	12740

1.2 阻抗管测试原理

采用传递函数法测量材料的法向入射吸声系数。试验系统由丹麦 Bruel&Kjaer（BK）4206 型阻抗管、PULSE 多分析仪及 BK 2730 放大器组成。测试原理和实物图如图 1 所示。

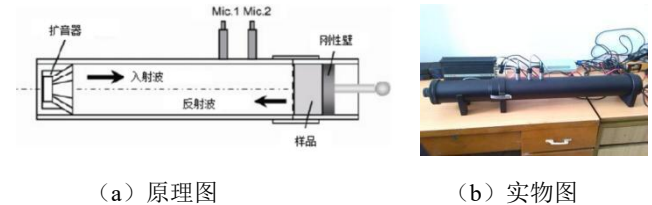


图 1 传递函数测量材料吸声系数实验仪器原理及实物图

在刚性壁面假设下，当平面声波沿阻抗管传播至材料表面时，会产生反射波。在材料表面与刚性壁之间会形成驻波。通过在材料前方布置两个传声器（间距为 S ），测量两点的复声压 p_1 和 p_2 ，可求得传递函数 $H_{12} = p_2/p_1$ 。材料表面的声压反射系数 R 可由式（1）计算：

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jk_0 S}}{e^{jk_0 S} - H_{12}} e^{j2k_0 l} \quad (1)$$

式中: $k_0 = \omega/c_0$ 为空气中波数, ω 为角频率, c_0 为声速,

l 为第二个传声器距试样表面的距离。

材料的法向入射吸声系数 α 可表示为:

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

1.3 数据处理与模型输入

试验在频率范围 100Hz~1600Hz 内进行, 每个试样测量 3 次取平均值以消除随机误差。测得的数据将作为真实值, 用于后续对 Delany-Bazley、Dunn-Davern 及本文改进模型的预测精度进行验证。模型计算所需的输入参数为材料的厚度和流阻率见表 1。

2 模型改进与结果分析

2.1 传统预测模型

传统 D-B 模型及其修正 D-D 模型基于流阻率 σ , 通过幂律关系描述材料的特性阻抗 ($Z = R + jX$) 和传播常数 ($\gamma = \alpha + j\beta$)。D-D 模型的通用表达式如式(3)~式(6)所示:

$$\frac{R}{\rho_0 c_0} = 1 + c_1 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-c_2} \quad (3)$$

$$\frac{X}{\rho_0 c_0} = -c_3 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-c_4} \quad (4)$$

$$\alpha = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[c_5 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-c_6} \right] \quad (5)$$

$$\beta = \left(\frac{2\pi f}{c_0} \right) \left[1 + c_7 \left(\frac{\rho_0 f}{\sigma} \right)^{-c_8} \right] \quad (6)$$

式中 ρ_0 和 c_0 分别为空气密度和声速, f 为频率; $c_1 \sim c_8$ 为回归系数。D-B 模型和 D-D 模型的回归系数如表 2 所示。

表 2 各模型对应参数值

模型	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Delany-Bazley 模型	0.05	0.75	0.08	0.73	0.18	0.59	0.09	0.70
	7	4	7	2	9	5	8	0
Dunn-Davern 模型	0.11	0.36	0.09	0.75	0.16	0.71	0.13	0.49
	4	9	9	8	8	5	6	1

获得 Z 和 γ 后, 单层材料的法向入射吸声系数 α_n 可由表

面阻抗 $Z_s = Z \coth(\gamma L)$ 计算:

$$\alpha_n = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (7)$$

然而, 上述模型主要针对通用矿物棉, 对于特定工艺生产的车用玻璃纤维, 其在低频段及厚度变化时的预测精度往往无法满足工程需求。

2.2 基于最小二乘法的模型改进

为提高预测精度, 本文以 D-D 模型为框架, 基于实测的 20 mm 和 26 mm 玻璃纤维吸声系数数据, 采用最小二乘法对 8 个回归系数 $c_1 \sim c_8$ 进行全局优化拟合。拟合目标是使模型预测值与试验值在 100Hz~1600Hz 频段内的均方根误差 (RMSE) 最小。经过迭代计算, 得到改进模型的回归系数, 如表 3 所示。

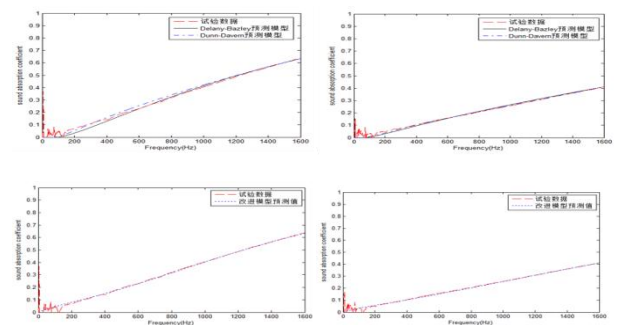
表 3 改进模型参数值

模型	改进模型
C1	0.0225
C2	1.0379
C3	0.1089
C4	0.5897
C5	0.1998
C6	0.5426
C7	0.1196
C8	0.5586

对比表 2 与表 3 可以看出, 改进模型中的系数 c_2 出现了显著增大, 这种变化增强了模型对频率变化的敏感性, 因而有助于低频预测能力的改善; 与此同时, c_1 的减小则对高频特性阻抗的实部形成了修正。

2.3 结果对比与验证

为检验改进模型是否真正有效, 将 20mm 与 26mm 两种试样的预测结果同试验值放在一起比较, 所得对比关系如图 2 所示。



(a)20 mm 厚度 (b)26 mm 厚度

图2 不同模型预测结果与试验值对比

从图2呈现的结果来看,D-B模型在低频段($<500\text{Hz}$)给出的预测值整体偏高,而且当厚度逐渐增大时,其预测曲线趋于过度平滑,难以把吸声峰值频率准确刻画出来;D-D模型虽然在中高频段具有较好的预测表现,但进入低频段后仍存在明显偏差,面对厚度变化时其适应能力也较为有限;相较之下,改进模型的预测曲线在整个频段内与试验值保持了最高程度的吻合。尤其在低频段,改进模型明显压低了传统模型所出现的预测误差,而在吸声峰值频率附近,其预测结果与试验值几乎重合。除此之外,改进模型对厚度变化还表现出较好的鲁棒性,能够准确体现厚度增加所导致的吸声峰向低频方向移动的趋势。

上述试验结果表明,改进模型一方面保留了原有模型形式简单这一优点,另一方面其预测精度也能够满足车辆声学包工程开发的实际需求。

3 结论

本文围绕车用纤维材料展开,通过阻抗管试验获取了不同

厚度单层材料的法向入射吸声系数,并分析了传统Delany-Bazley及Dunn-Davern模型在预测精度方面存在的局限。在经典幂律定理的基础上,采用最小二乘法对模型回归系数进行全局优化,进而建立了改进的单层纤维吸声系数预测模型。经过试验验证与对比分析,主要结论可以概括为以下三个方面。

(1)在模型精度提升方面,改进模型在全频段内与试验值吻合良好,有效克服了传统模型在 500Hz 以下低频段预测值偏高以及厚样失准的问题,并提升了吸声系数尤其是第一吸声峰值频率的预测精度。

(2)在厚度鲁棒性增强方面,改进模型对不同厚度单层玻璃纤维材料均表现出良好的适应性,能够准确反映厚度变化对吸声特性的影响规律,满足车辆声学包设计中变参数迭代的精度需求。

(3)在工程实用性方面,该模型保留了经验模型形式简洁、计算量小的优点,仅依赖流阻率和厚度即可实现高精度预测,简化了车用吸声材料的选型与验证流程,对汽车NVH正向开发具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Delany M E,Bazley E N.Acoustical properties of fibrous absorbent materials[J].Applied Acoustics,1970,3:105-116.
- [2] P.Dunn and W.A.Davern I.Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers[J].Applied Acoustics,1986,19(5):321-334.
- [3] 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(02):252-256.
- [4] 程宇翔,刘学文,熊鑫忠,等.基于阻抗模型的玻璃棉声学参数反演方法研究[J].声学技术,2024,43(01):90-97
- [5] GB/T 18696.2-2002.声学—阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量—第2部分:传递函数法[S].2002
- [6] GB/T 25077-2010 声学多孔吸声材料流阻测量,2011,4.