

3D打印多孔声屏障材料吸声特性研究

聂文强 覃婷 李波* 段盛瀚 邵洁

扬州大学 土木与交通学院, 中国·江苏 扬州 225127

摘要: 为比较 3D 打印多孔砂浆、聚乳酸 (PLA) 多孔结构与岩棉、泡沫铝的法向入射吸声特性, 依据 GB/T 18696.2—2002, 采用双传声器传递函数法, 通过阻抗管对同批试件的法向入射吸声系数进行测试与整理。四类试件名义厚度均为 50 mm, 大、小管试件直径分别为 100 mm 和 29 mm, 数据处理不对缺失频点进行插值。多孔砂浆的有效测试范围为 100~2000 Hz, 其余三类材料为 100~5000 Hz。结果表明, 多孔砂浆在 700 Hz 处的吸声系数达到 0.93, 并在 630~800 Hz 形成较集中的中频响应; PLA 自 1600 Hz 后逐步增强, 5000 Hz 处达到 0.88; 泡沫铝在 2500 Hz 处达到 0.94, 岩棉则随频率升高逐渐增大, 在 5000 Hz 处达到 0.87。四类材料的优势频段并不相同。3D 打印结构可通过孔道和腔体参数调整频谱响应, 适合结合交通噪声频谱开展材料选配与分区布置。阻抗管结果用于材料级频谱比较, 不能直接等同于足尺声屏障的现场插入损失。

关键词: 3D 打印; 多孔砂浆; 聚乳酸; 声屏障; 吸声系数

Sound Absorption Characteristics of 3D-Printed Porous Materials for Traffic Noise Barriers

Nie Wenqiang, Qin Ting, Li Bo*, Duan Shenghan, Shao Jie

School of Civil Engineering and Transportation, Yangzhou University, China Jiangsu Yangzhou 225127

Abstract: To compare the normal incidence sound absorption characteristics of 3D-printed porous mortar, polylactic acid (PLA) porous structures, rock wool, and foam aluminum, the normal incidence absorption coefficients of specimens from the same batch were tested and compiled using the two-microphone transfer function method in an impedance tube, according to GB/T 18696.2-2002. The nominal thickness of all four types of specimens was 50 mm, with diameters of 100 mm for the large tube and 29 mm for the small tube, and missing frequency points were not interpolated during data processing. The effective test range for porous mortar was 100–2000 Hz, while the other three materials were 100–5000 Hz. The results showed that the porous mortar reached a sound absorption coefficient of 0.93 at 700 Hz and formed a relatively concentrated mid-frequency response between 630–800 Hz; PLA gradually increased after 1600 Hz, reaching 0.88 at 5000 Hz; foam aluminum reached 0.94 at 2500 Hz, and rock wool gradually increased with frequency, reaching 0.87 at 5000 Hz. The advantageous frequency bands for the four materials were different. 3D-printed structures can adjust spectral response through pore and cavity parameters, making them suitable for material selection and zonal layout according to traffic noise spectra. The impedance tube results are useful for material-level spectral comparison but cannot be directly equated to actual full-scale noise barrier insertion loss.

Keywords: 3D printing; Porous mortar; Polylactic acid; Traffic noise barrier; Sound absorption coefficient

0 引言

随着综合交通网络向立体化、高密度方向发展, 道路、城市轨道交通及高速铁路沿线的噪声暴露问题日益突出。声屏障通过阻断直达声并改变传播路径降低受声点声级, 其实际效果除受高度、位置和绕射条件影响外, 还与吸声面板的频谱响应密切相关。国家综合立体交通网规划与公路环境保护设计均强调交通基础设施建设应兼顾环境保护和长期服务功能^[1-2]。近年来, 周期结构与吸声材料协

同设计也被用于拓展交通声屏障的频谱控制能力^[3]。

多孔吸声材料的基本机理是空气质点在孔道内振动时与孔壁发生黏滞摩擦和热交换, 使声能转化为热能。材料的流阻率、曲折度、孔隙率以及黏性和热特征长度共同影响等效声阻抗^[4-5]。传统岩棉依靠高孔隙率纤维网络形成宽频耗散, 泡沫铝则依赖开孔或开闭孔复合结构产生摩擦损失和骨架振动。由于纤维堆叠与金属发泡形成的孔隙具有一定随机性, 其峰值频率和有效频段通常难以直接按照目

标交通频谱进行几何设计。

增材制造能够依据数字模型逐层构建材料,为规则晶格、微孔、曲折通道和共振腔的制备提供技术条件^[6]。已有研究发现,孔隙拓扑、相对密度、打印精度及试件重复性都会影响吸声曲线,数字模型仍需通过实体试验校核^[7-8]。水泥基挤出打印可将材料内部孔隙与层间缝隙结合,形成刚性多尺度通道;熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)打印聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)则便于构造预设开孔和内部腔体^[9],两者在结构设计自由度上均不同于传统随机多孔材料。

3D 打印水泥基材料的稳定成形取决于浆体流变性、挤出连续性和层间自支撑能力^[10-11]。PLA 具有良好的熔融沉积成型性能,可通过切片参数调节填充路径与孔隙尺度^[9]。羟丙基甲基纤维素等外加组分可改善砂浆的流变性、形状保持和可建造性^[12]。这些工艺特征为按目标频段调节孔道尺度、填充路径与腔体参数提供了制造基础。道路轮胎—路面作用、动力系统、制动摩擦及气动噪声的主导频率存在差异,因此材料评价应重点关注优势频段与现场声源频谱的匹配关系。

本文整理同批试件的阻抗管测试记录,比较 3D 打印多孔砂浆、PLA、岩棉和泡沫铝的吸声频谱。重点关注各材料的峰值位置、优势频段及曲线变化,并结合打印层间通道和预设孔腔分析频谱差异。所得结果用于判断不同材料在交通噪声频段中的适用范围,并为后续孔道参数试验和声屏障构件验证提供依据。

1 吸声机理与试验方法

1.1 多孔结构的声学作用

当平面声波垂直入射材料表面时,一部分声能被反射,另一部分进入孔道。对于具有连通孔隙的刚性骨架材料,孔壁附近的速度梯度引起黏滞剪切损失,空气压缩与膨胀过程引起热交换损失;孔道越曲折,声波传播路径越长,耗散机会通常越多。但流阻过小会使声波快速穿透而耗散不足,流阻过大又会造成表面反射增强,因此有效吸声需要孔隙连通性、孔径、厚度和背衬条件协同匹配。

预设开孔与内部腔体还会产生共振效应。孔颈中的空气可视为振动质量,腔体中的空气具有弹性,当入射频率接近结构固有频率时,孔颈处空气速度增大,黏滞耗散增强。熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)打印可通过孔径、孔颈长度、腔体体积和阵列分布调节共振频率^[6,13-14];挤出打印砂浆则可通过条带宽度、层高、路径间距及层间连通孔改变流动阻力和有效通道长度。

1.2 3D 打印多孔砂浆

课题组前期同批试件采用挤出式增材制造制备多孔砂浆。普通硅酸盐水泥与快硬型硫铝酸盐水泥的质量比为 0.91 : 0.09,水灰比为 0.27,胶凝材料与砂的质量比为 1 : 1.35;粉煤灰、6 mm 聚丙烯纤维、葡萄糖酸钠和羟丙基甲基纤维素掺量分别为胶凝材料质量的 10%、2%、0.2% 和 0.1%。砂浆流动度约 183 mm,坍落度约 100 mm,凝结时间约 50 min;采用直径 10 mm 喷嘴,以 18 mm/s 的速度完成可挤出性验证和试件打印。试验中挤出线条连续、未见明显堵塞,成型后按试验要求制备厚度为 50 mm 的阻抗管试件。硬化材料除自身孔隙外,逐层沉积形成的条带接触面和预留通道也参与声波传播。多孔砂浆阻抗管试件见图 1。



图1 3D打印多孔砂浆阻抗管试件

1.3 3D 打印 PLA 多孔结构

PLA 是 FDM 工艺中常用的热塑性材料,具有良好的成型精度和数字路径可控性^[9]。课题组前期同批试件采用 X1 Carbon Combo 型 FDM 打印机,原材料为直径 2 mm 的 PLA 线材;喷嘴直径为 0.4 mm,层高为 0.1 mm,打印温度为 200℃。试件依据预设开孔—腔体数字模型逐层打印成型,试件厚度与阻抗管试样厚度保持一致。



图2 3D打印PLA多孔阻抗管试件

1.4 传统吸声材料

传统吸声材料选用岩棉和泡沫铝。岩棉由细纤维交织

形成高孔隙率网络，声波进入纤维间隙后产生摩擦与热交换，通常随频率升高而表现出较强吸收。泡沫铝由金属骨架和发泡孔组成，孔径、开孔程度及孔壁连通性决定空气进入材料内部的能力。两类试件均按阻抗管内径加工，名义厚度与打印材料保持一致，为 50 mm。岩棉和泡沫铝试件分别见图 3 和图 4。

根据课题组原始试验记录，本组泡沫铝的名义孔径为 0.6 mm，相对密度为 0.4602，孔隙率为 54%。该孔隙结构与金属骨架并存，使声波能够进入材料内部并在孔隙中传播。岩棉则依靠连续纤维间隙形成多尺度通道。将两类传统材料与相同名义厚度的打印试件并列，可分别从刚性金属孔网和柔性纤维网络角度进行比较。各类试件均采用刚性背衬，装夹时保证试件外缘与管壁紧密贴合，以减小旁路泄漏和安装差异对测试结果的影响。



图3 岩棉阻抗管试件

(a)

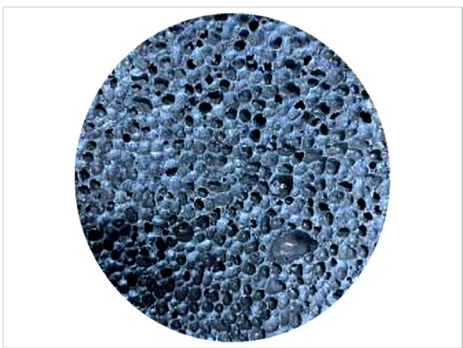


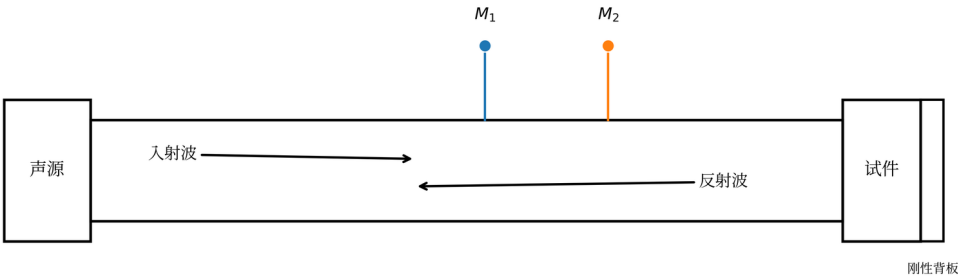
图4 泡沫铝阻抗管试件

表1 四类试件的结构特征与比较目的

材料	成型方式	主要声学结构	比较目的
3D打印多孔砂浆	挤出式增材制造	材料孔隙、层间缝隙与预留通道	考察中频响应
3D打印PLA	熔融沉积成型	预设开孔与内部腔体	考察高频响应
岩棉	纤维堆叠	高孔隙率连通纤维网络	传统纤维材料对照
泡沫铝	金属发泡	开孔/闭孔复合金属网络	传统刚性材料对照

1.5 阻抗管测试测试吸音特性

依据 GB/T 18696.2—2002，采用双传声器传递函数法测定法向入射吸声系数^[13]。大管内径为 100 mm，主要覆盖 50~1600 Hz；小管内径为 29 mm，主要覆盖 1600~6400 Hz。试件外缘与管壁紧密贴合，正面朝向声源，背面与刚性终端接触，不设置附加空气层。测试原理及大、小阻抗管设备实物见图 5。



(b)

(c)



图5 阻抗管测试原理与设备实物：（a）测试原理；（b）标准大阻抗管；（c）标准小阻抗管

测试前对传声器通道进行幅相校准,并检查空管背景噪声、试件端面平整度和边缘密封状态。柔性岩棉装管时避免过度压缩,硬质试件则检查边缘是否存在贯通缝隙。大管和小管在相邻频段的曲线衔接用于判断装夹是否异常。本文整理多孔砂浆 100~2000 Hz,以及 PLA、泡沫铝和岩棉 100~5000 Hz 范围内具有完整记录的离散频率数据;多数频点与 1/3 倍频程中心频率一致,多孔砂浆在主峰附近另保留 560、700、900 和 1400 Hz 等加密测试频点。

数据合并时 1600 Hz 附近的大、小管衔接区间作为重点检查范围。若同一材料在两支管的相邻频点出现不合理突跳,则先回查试件装夹、传声器校准和原始记录,不直接采用平滑处理。多孔砂浆主峰附近的加密频点保留原测试频率,避免只按 1/3 倍频程中心频率归并后掩盖 700 Hz 附近的峰值。本文据此采用离散实测点进行比较,分析重点放在曲线形态和优势频段,不另行计算单值降噪指标。

设反射波与入射波复振幅之比为反射系数 r ,则法向入射吸声系数 α 按式 (1) 计算:

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

式中, α 的理论取值范围为 0~1,数值越大表示该频率下材料吸收的入射声能比例越高。阻抗管结果反映的是小试件法向入射条件下的材料声学响应,不能直接等同于足尺声屏障的现场插入损失。

2 结果与讨论

2.1 3D 打印吸声材料的吸声频谱

四类材料的法向入射吸声系数见图 6,其中多孔砂浆的有效测试记录为 100~2000 Hz,PLA、泡沫铝和岩棉的

有效测试记录为 100~5000 Hz。100~500 Hz 范围内,各材料吸声系数总体较低;进入中频和高频后,曲线形态明显分化,反映出材料孔道结构与声波波长之间不同的耦合关系。

3D 打印多孔砂浆在 500 Hz 处的吸声系数为 0.26,随后快速上升,在 630 Hz 处达到 0.70,在 700 Hz 处达到主峰 0.93,800 Hz 仍为 0.88;此后总体下降,至 1600 Hz 降至 0.10,但在 2000 Hz 处回升至 0.36。其高响应主要集中在 630~800 Hz,2000 Hz 附近又有一次回升。该现象可能与材料内部孔隙及打印条带间连续缝隙延长传播路径、增强黏滞—热耗散有关^[4,6-7]。

多孔砂浆曲线在 500~630 Hz 快速上升,630~800 Hz 保持较高水平,之后明显衰减,主峰两侧并不对称。就本组试件而言,它更接近频率选择性较强的窄带结构,而不是在整个中高频范围内保持高值的宽带材料。2000 Hz 处虽有回升,但已经到达测试上限,现有记录还不足以确认更高频段是否存在完整的第二峰。后续改变条带间距或试件厚度时,可同时记录主峰位置、峰值和高响应区宽度。

3D 打印 PLA 自 1600 Hz 起表现出持续增强的高频响应,在 2000、3150、4000 和 5000 Hz 处的吸声系数分别为 0.38、0.53、0.75 和 0.88,其中 5000 Hz 处为测试范围内最大值。预设开孔、内部腔体和打印壁面可能共同参与了这一高频响应^[6,9,13]。

PLA 曲线在 1600~5000 Hz 范围内未见明显回落,因此 0.88 只是本次测试范围内的最大值,不能视为最终峰值。与多孔砂浆的集中峰不同,PLA 的吸声系数在高频段

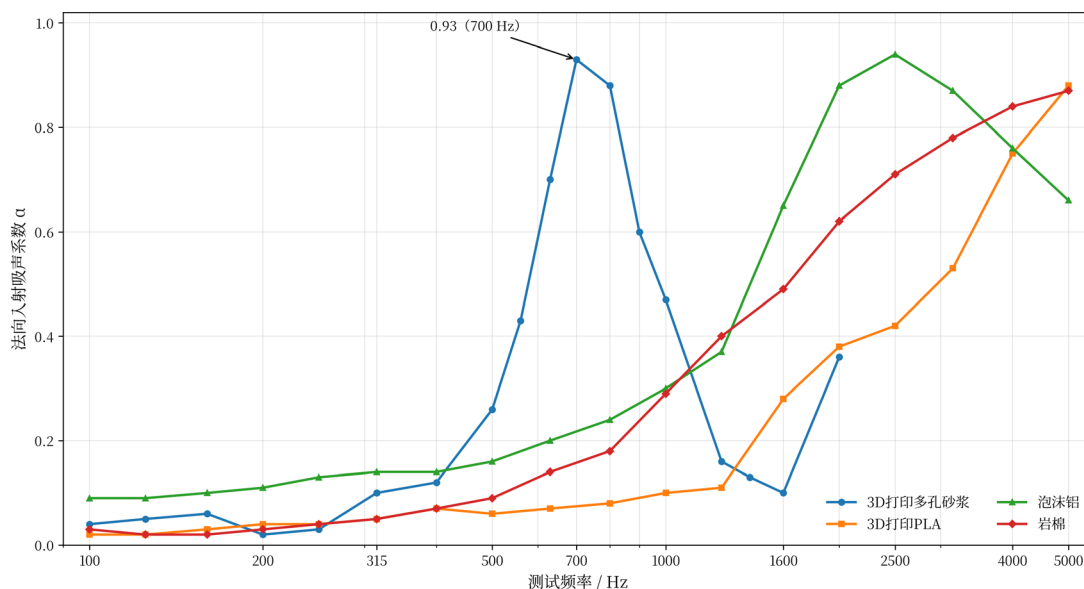


图6 四类材料的吸声系数频谱

表2 四类材料关键声学指标

材料	最大吸声系数对应频率 / Hz	最大吸声系数	本组试件主要频谱特征
3D打印多孔砂浆	700	0.93	630 ~ 800 Hz中频带通峰
3D打印PLA	5000	0.88	1600 Hz后持续增强，5000 Hz为测试上限
泡沫铝	2500	0.94	中高频峰值突出
岩棉	5000	0.87	中高频宽带递增，5000 Hz为测试上限

持续增加。后续试验中，多孔砂浆可重点观察主峰移动和带宽变化，PLA 则需要补测 5000 Hz 以上频段，以确定曲线何时出现回落。

泡沫铝的吸声系数在 1600 Hz 后明显提高，2500 Hz 达到局部峰值 0.94，随后略有下降；岩棉则呈较平缓的持续增长，在 2500、4000 和 5000 Hz 处分别为 0.71、0.84 和 0.87，其中 5000 Hz 处为测试范围内最大值。从多孔介质耗散机理看，泡沫铝的峰值响应可能受到开孔程度和孔腔尺度影响，岩棉的连通纤维网络则有利于形成较宽的高频耗散区间^[4-5]。四类材料的关键指标见表 2。

2.2 频谱差异与材料适用性

四类材料在各自有效测试范围内均取得了较高的最大吸声系数，但峰值所处频率并不相同。泡沫铝在 2500 Hz 处达到 0.94，多孔砂浆在 700 Hz 处达到 0.93，PLA 和岩棉的最大值均出现在 5000 Hz，分别为 0.88 和 0.87。由于多孔砂浆的测试上限为 2000 Hz，而其余材料测试至 5000 Hz，这些最大值只能用于识别各材料的优势频段，不宜据此作简单的整体性能排序。

多孔砂浆在 630 ~ 800 Hz 范围内形成较集中的峰值，适合关注中频成分较突出的声源。PLA 在 1600 Hz 之后持续上升，在本次测试范围内表现为高频增强；泡沫铝在 2500 Hz 附近出现明显峰值，岩棉的曲线则随频率升高较为平缓地增大。四条曲线对应的优势频段不同，实际选材应结合目标路段或线路的 1/3 倍频程噪声分布，而不宜只看单一频点。

同一名义厚度下，四类试件的骨架性质、孔隙形态和装管状态并不相同。岩棉具有可压缩性，装填松紧会改变其体积状态；泡沫铝和打印试件较硬，边缘的微小缝隙则更容易形成旁路泄漏。图 6 只能代表本次加工和装夹条件下的材料响应，不能脱离试件状态作绝对比较。选材时除目标频段外，还需考虑面层保护、构件重量、安装方式和后期更换条件。

3D 打印材料的孔道几何可在建模和成形阶段直接调整^[6]。多孔砂浆的条带间距、层高和预留通道会改变有效

传播路径；PLA 的表面孔径、孔颈长度和腔体体积则可能影响共振位置^[7,13-14]。本次试验仅采用一组结构参数，暂时无法区分各参数对峰值频率的独立影响。现有曲线可作为后续参数分组试验的依据。

在声屏障构件中，四类材料既可按目标频段分别选用，也可在同一面板或不同区段组合。多孔砂浆对应中频，泡沫铝补充中高频峰值，岩棉覆盖较宽的中高频范围，PLA 可继续作为高频可调单元研究。多材料组合后的实际频谱还会受到透声面层、面积比例和安装方式影响，需通过构件试验核对。

2.3 孔道参数优化与声屏障构造验证

本节由材料级吸声频谱出发，讨论两类打印材料的孔道参数如何继续优化，以及透声面层、背腔和安装缝隙等构造因素在构件验证中需要控制的问题。图 6 中的多孔砂浆和 PLA 曲线都只对应一组几何参数。多孔砂浆在 630 ~ 800 Hz 集中抬升，可能与当前条带间距、层高及通道连通方式的共同作用有关；PLA 在 1600 Hz 以上持续增长，说明本组开孔—腔体结构更偏向高频。现有数据尚不能区分单个参数的独立影响^[13-14]。

后续试验宜固定试件外径、厚度、刚性背衬和装夹方式，再分别改变一个几何量。多孔砂浆可设置条带间距和层高梯度，记录主峰频率、峰值及吸声系数不低于 0.5 的频带宽度；PLA 可按表面孔径、孔颈长度和腔体深度分组。各组应设置平行试件，以区分打印误差与结构参数造成的曲线变化。重复性确认后，再将所得关系用于面板构造选择。

阻抗管试件没有设置透声面层和附加背腔，与实际声屏障面板存在明显差别。面层开孔率会影响进入芯材的声能比例，背腔深度会改变结构响应，连接缝处理不当还可能形成旁路传播^[13,13]。因此，图 6 适合用于芯材初选，不能直接作为完整面板的设计曲线。

面板中的材料布置应结合现场 1/3 倍频程频谱确定。若路段频谱随车速、车型或运行状态变化较大，可将不同优势频段的芯材分区配置，但相邻频带能否衔接，仍需通

过构件试验确认^[3]。

构件试验除吸声频谱外, 还应同步记录面板重量、连接状态和开裂情况; PLA 构件还需检验力学与阻燃性能。待材料级曲线具有较好重复性后^[8], 可将选定结构装入开孔率、背腔尺寸和连接方式明确的面板中, 比较阻抗管结果与构件尺度响应^[13]。本节不讨论足尺声屏障的现场插入损失。

3 结论与展望

(1) 3D 打印多孔砂浆在 700 Hz 处的法向入射吸声系数达到 0.93, 630~800 Hz 为其主要高响应区; 2000 Hz 处的吸声系数回升至 0.36。本组打印砂浆表现出较明显的中频选择性。

(2) 3D 打印 PLA 在 1600 Hz 以后持续增强, 2000、3150、4000 和 5000 Hz 处的吸声系数分别为 0.38、0.53、0.75 和 0.88。5000 Hz 为本次测试上限, 因此其峰值位置及更高频段的变化仍需通过补充试验确定。

(3) 泡沫铝在 2500 Hz 处达到 0.94, 岩棉在 5000 Hz 处达到 0.87。四类材料的最大值接近, 但对应频率和曲线宽度不同, 比较时需要同时考虑目标噪声频谱和各材料的有效测试范围。

(4) 打印砂浆的层间通道和 PLA 的预设孔腔提供了可调的几何参数。当前结果适合用于材料级方案筛选, 尚不能替代足尺声屏障的吸声或插入损失评价。

下一步可先设置平行试件, 分别考察条带间距、层高、孔径和腔体尺寸对峰值位置及有效带宽的影响, 避免一次改变多个参数。材料曲线稳定后, 再将选定结构装入带透声面层和背腔的面板中测试, 比较阻抗管结果与构件尺度响应。

参考文献:

- [1] 中共中央, 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[Z]. 北京: 人民出版社, 2021.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. JTG B04—2010. 公路环境保护设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [3] Qin, X., Yang, W., Zhang, Z. et al. (2024) Research on the Design and Noise Reduction Performance of Periodic Noise Barriers Based on Nested Structure. *Journal of Cleaner Production*, 476, 143708.
- [4] Allard, J.F. and Atalla, N. (2009) *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Chichester.
- [5] Johnson, D.L., Koplik, J. and Dashen, R. (1987)

Theory of Dynamic Permeability and Tortuosity in Fluid-Saturated Porous Media. *Journal of Fluid Mechanics*, 176, 379–402.

[6] Li, X., Chua, J.W., Yu, X., et al. (2024) 3D-Printed Lattice Structures for Sound Absorption: Current Progress, Mechanisms and Models, Structural-Property Relationships, and Future Outlook. *Advanced Science*, 11, 2305232.

[7] Wojciechowski, B., Xue, Y., Rabbani, A., et al. (2023) Additively Manufactured Spinodoid Sound Absorbers. *Additive Manufacturing*, 71, 103608.

[8] Tsiokou, V., Shtrepi, L., Badino, E., et al. (2023) Exploratory Acoustic Investigation of Customizable 3D-Printed Hybrid Acoustic Materials (HAMs) through Interlaboratory Impedance Tube Measurements. *Acoustics*, 5(3), 653–675.

[9] Matei, S., Pop, M.A., Zaharia, S.-M., et al. (2024) Investigation into the Acoustic Properties of Polylactic Acid Sound-Absorbing Panels Manufactured by 3D Printing Technology: The Influence of Nozzle Diameters and Internal Configurations. *Materials*, 17(3), 580.

[10] Paritala, S., Singaram, K.K., Bathina, I., et al. (2023) Rheology and Pumpability of Mix Suitable for Extrusion-Based Concrete 3D Printing—A Review. *Construction and Building Materials*, 402, 132962.

[11] Gao, H., Jin, L., Chen, Y., et al. (2024) Rheological Behavior of 3D Printed Concrete: Influential Factors and Printability Prediction Scheme. *Journal of Building Engineering*, 91, 109626.

[12] Yin, Y., Huang, J., Wang, T., et al. (2023) Effect of Hydroxypropyl Methyl Cellulose (HPMC) on Rheology and Printability of the First Printed Layer of Cement Activated Slag-Based 3D Printing Concrete. *Construction and Building Materials*, 405, 133347.

[13] Chua, J.W., Li, X. and Zhai, W. (2025) Design, Multiscale Modelling, and Experimental Characterisation of TPMS-Based Composite Lattices with Enhanced Sound Absorption. *Composite Structures*, 370, 119437.

[14] Giorleo, L., Basu, S. and Piana, E. (2025) Acoustic Performances of Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by Additive Manufacturing: Effects of Cell Geometry, Aspect Ratio, and Wall Thickness. *Additive Manufacturing*, 108, 104835.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

致谢:

本研究得到课题(编号: XCX20250496)的资助。感谢所在学院提供的研究平台与试验条件, 感谢课题组成员

在实验实施、资料整理及论文修改中的协作。

作者简介: 聂文强(2005.05—), 男, 汉族, 江苏南京人, 本科生, 研究方向: 道路工程、绿色交通材料与数字建造。

* 通讯作者: 李波(1982.10—), 男, 汉族, 湖南郴州人, 研究方向: 主要从事道路工程方向研究。