

水泥多孔吸声材料性能的研究

王卫东

(南京兴佑交通科技有限公司,江苏 南京 210000)

摘要: 为了降低噪声对人体伤害,开发一种环保、制造成本低且各频段吸声系数高的吸声材料尤为重要。文章对发泡剂、引气剂对水泥多孔吸声材料的干密度、抗压强度和降噪系数的影响进行研究,并与玻璃棉、岩棉的吸声性能进行了比较。研究表明:随着发泡剂、引气剂掺量及发泡剂稀释比例的减少,水泥多孔吸声材料的干密度、28 d 抗压强度降低,背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数先增加后降低。背后空腔 0 mm 时,水泥多孔吸声材料的吸声系数峰值在 800 Hz 附近为 0.983,岩棉的峰值在 1 000 Hz 附近为 0.922,玻璃棉的峰值在 2 000 Hz 附近为 0.995;背后空腔 50 mm 时,水泥多孔吸声材料的吸声系数峰值在 400 Hz 附近为 0.988,岩棉的峰值在 500 Hz 附近为 0.919,玻璃棉的峰值在 800 Hz 附近为 0.996,降噪系数均大于 0.70。

关键词: 吸声材料; 水泥; 干密度; 降噪系数

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)05-0022-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.05.057

Study on properties of cement porous sound absorbing materials

WANG Weidong

(Nanjing Xingyou Transportation Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: In order to reduce the harm of noise to human body, it is particularly important to develop a kind of sound absorbing materials which is environmental, low manufacturing and high sound absorption coefficient in all frequency bands. The effects of blowing agent and air entraining agent on dry density, compressive strength and noise reduction coefficient of cement porous sound absorbing materials are studied. The sound absorption properties of cement porous sound absorption materials were compared with that of glass wool and rock wool. The tests showed that the dry density and compressive strength of cement porous sound absorbing materials decrease with the decrease of the amount of air-entraining agent and the dilution ratio of air-entraining agent, the noise reduction coefficient of 0 mm and 50 mm cavities increase first and then decrease. When the cavity is 0 mm, the peak value of sound absorption coefficient of cement based porous sound absorption material is 0.983 near 800 Hz, the peak value of rock wool is 0.922 near 1 000 Hz, and the peak value of glass wool is 0.995 near 2 000 Hz. When the cavity is 50 mm, the peak value of sound absorption coefficient of cement porous sound absorption material is 0.988 near 400 Hz, the peak value of rock wool is 0.919 near 500 Hz, the peak value of glass wool is 0.996 near 800 Hz, and the noise reduction Coefficients are over 0.70.

Key words: sound absorbing materials; cement; dry density; noise reduction coefficient

随着人们环保意识的不断增强,噪声污染问题越来越受到重视。近年来,由于高速公路、城市高架道路、高速铁路建设的快速发展和城市机

动车数量的急剧增加,交通噪声问题日趋严重,已经成为影响人民生活最严重、最广泛的污染之一^[1-3]。在各种防治交通噪声污染的措施中,设

收稿日期: 2023-12-11

作者简介: 王卫东(1986—),男,高级工程师,从事新型建筑材料的研究及应用。

立声屏障是一种有效方法。

目前,声屏障按材料种类分为非金属类声屏障和金属类声屏障^[4],但不管是哪种类型声屏障,其中90%以上均是采用穿孔或百叶窗形式的非金属或金属外壳,内部填充岩棉、玻璃棉等非金属纤维类吸声材料的结构形式^[5]。但纤维类吸声材料存在低频段吸声性能差,易吸水、沉降和粉化^[6-7],受长期风压影响,5~10 a左右纤维材料会撕裂破坏,无法起到吸声效果等种种问题。另外,岩棉、玻璃棉等在生产、组配过程中易对产业人员造成呼吸道疾病^[8],现行的国家标准《声屏障结构技术标准》(GB/T 51335—2018)已明确禁止使用。而金属类吸声材料,如泡沫铝吸声材料由于成本太高,孔径大,吸声效果差等缺陷并未大量使用。近年来宣传力度较大的微孔岩吸声板由于采用树脂类材料作为胶粘剂,会挥发出有毒物质,对人体造成伤害,且经过高温过火后,会变酥,用手捏成粉状物,造成极大的安全隐患。因此,研究一款适用于交通等领域的具有环境友好型无机非金属吸声材料迫在眉睫。

泡沫混凝土作为一种水泥多孔轻质材料,通过物理方法将空气引入到水泥浆体中,在其内部形成大量的气孔^[9],但其气孔多以闭孔形式存在,连通孔隙较少。王康等^[10]以铝酸盐水泥和脱硫石膏为主要原料,采用复合发泡手段,通过调节物理泡沫和过氧化氢溶液的掺量,制备了开孔率最大为66.1%,在1 600 Hz前后,峰值吸声系数最高为0.87的轻质多孔吸声材料。褚星东^[11]以循环流化床粉煤灰为原料,十二烷基苯磺酸钠为发泡剂,通过碱激发剂制备孔隙率为59.93%,抗压强度1.72 MPa,吸声系数为0.30~0.89的地聚物基多孔吸声材料。黄学辉等^[12]以煤矸石为基体组分,硼砂为烧结助剂,十二烷基硫酸钠为发泡剂,并结合凝胶注模法,经700℃烧结制得1 600 Hz频段吸声系数为0.953的多孔吸声材料。以上研究表明:采用发泡剂形式的泡沫混凝土类材料在

某一频段,可以作为吸声材料使用,但对于人类可感受到的全频段,吸声效果较差。本文基于泡沫混凝土配制原理,通过发泡剂及引气剂相结合,使水泥浆体中的闭孔结构转变成连通孔形式,再利用表面处理技术,使其表面形成较多的开孔结构,探究其吸声性能,以期可为开发水泥多孔吸声材料提供基础。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

(1) 水泥:江苏某公司生产的P·II52.5R级硅酸盐水泥,其物理性能指标如表1所示。

(2) 发泡剂:密度为1 050 kg/m³,发泡倍数为28,1 h沉降距为62 mm,1 h泌水率为65%。

(3) 引气剂:密度为1 040 kg/m³,pH为6.0,含固量为21%。

(4) 减水剂:江苏某公司生产的聚羧酸高性能减水剂,减水率为31.2%。

(5) 水:自来水,符合《混凝土用水标准》(JGJ 63—2006)要求。

1.2 试验方法

1.2.1 拌合物制作

采用胶砂搅拌机进行拌合,按照水胶比0.2,减水剂掺量为水泥质量的1.4%。将水泥、减水剂和水加入搅拌机中拌合均匀呈浆体状,同时使用高速搅拌器将加入一定比例水稀释过的发泡剂制成泡沫,然后将泡沫加入拌合好的水泥浆体中高速搅拌1 min,最后将拌合物倒入模具成型并养护待测。

1.2.2 吸声系数测试

采用北京某公司生产的SW系列阻抗管测试系统测试试样的垂直入射的吸声系数,根据《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》(GB/T 18696.2—2002)进行测试^[13],吸声系数测试系统示意如图1所示。试件成型尺寸为∅100 mm×60 mm,养护至28 d后,采

表1 水泥的物理性能

标准稠度/%	80 μm筛余/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	安定性	凝结时间/min		3 d强度/MPa		28 d强度/MPa	
				初凝	终凝	抗折	抗压	抗折	抗压
25.8	0.4	355	合格	145	230	6.7	32.2	9.2	59.6

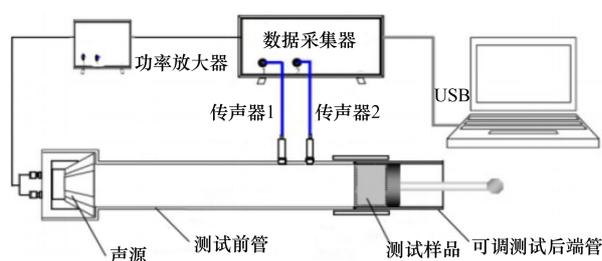


图 1 吸声系数测试系统示意

用切割机将试件上下表面的水泥浆切割掉, 显示出试件的孔结构, 切割后试件尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。

吸声系数测试频率范围为 63 ~ 6 300 Hz, 其中 63 ~ 1 600 Hz 试件尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 1 600 ~ 6 300 Hz 试件尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ($\varnothing 30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 试样待 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 试样测试后通过钻芯取样得到)。

1.2.3 干密度测试

干密度试件采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体混凝土试模, 将拌合好的浆体倒入试模中, 24 h 后脱模, 然后放入标准养护箱养护至 28 d。3 块试件为一组, 采用游标卡尺逐块量取试件长、宽、高 3 个方向的长度值, 每个方向应再起两端和中间位置各测 1 次, 然后在其相对面上再各测 1 次, 取 6 次测量的平均值作为该方向的长度值, 根据测量结果计算每块试件的体积 V 。

然后将测量过长度的 3 块试件放在温度为 (60 ± 5 °C) 干燥箱内, 烘干至相隔 4 h 两次测量的试件质量差不大于 1 g 为止。取出后, 试件放入干燥器内待冷却至室温后称取试件质量 m , 计算试件干密度 $\rho = m/V$, 取 3 块试件的平均值作为该组试件的干密度。

1.2.4 抗压强度测试

测试试件采用干密度测试中称取质量的试件, 采

用 DYE - 300KN 混凝土压力试验机进行抗压强度测试, 试件受压面面积根据干密度测试中的结果确定。

2 试验结果与分析

2.1 发泡剂浓度对水泥多孔吸声材料性能的影响

将发泡剂分别加入 30、40、50、60、70 倍的水稀释制成泡沫, 固定泡沫掺量为水泥质量的 6.0%, 加入水泥浆体中, 研究不同浓度泡沫对水泥多孔吸声材料干密度、抗压强度及降噪系数的影响, 试验结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 随着发泡剂稀释比例的增加, 试样的干密度和抗压强度增加, 背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数先增加后降低。这是由于发泡剂稀释比例增加, 相当于泡沫净含量减少, 导致试样干密度和抗压强度增加; 而降噪系数除了泡沫含量影响外, 还有泡沫孔径的大小、开口率和流阻等因素综合影响。

当稀释比例为 50 倍时, 背后空腔 50 mm 降噪系数达到最大值为 0.71, 此时对应的水泥多孔吸声材料的干密度为 668 kg/m³, 抗压强度为 3.2 MPa; 稀释比例为 40 倍时, 背后空腔 0 mm 降噪系数达到最大值 0.60, 此时背后空腔 50 mm 的降噪系数为 0.70 与最大值 0.71 基本相当, 干密度为 629 kg/m³, 抗压强度为 3.8 MPa。稀释比例 50 倍和 40 倍相比, 两者的性能基本相当, 但从经济性考虑, 选择 50 倍的稀释比例。

除稀释比例为 70 倍外, 其余稀释比例背后空腔 50 mm 的降噪系数均大于背后空腔 0 mm 的降噪系数。这是由于该试样中泡沫含量相对较少, 且内部孔多为封闭气孔, 导致声波不能进入试样内部转化为热能被消耗。

表 2 发泡剂浓度对水泥多孔吸声材料性能的影响

序号	稀释比例	干密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	降噪系数 ^a	
				背后空腔 ^b 0 mm	背后空腔 50 mm
1-1	30	484	0.9	0.34	0.43
1-2	40	629	3.8	0.60	0.70
1-3	50	668	3.2	0.53	0.71
1-4	60	718	4.4	0.57	0.66
1-5	70	866	7.3	0.51	0.48

注: a 为在 250、500、1 000、2 000 Hz 测得的吸声系数的平均值^[14]; b 为在实际应用中, 为了改善多孔材料的低频吸声性能, 往往在材料与刚性壁面之间留有一定深度的空腔^[15]。

2.2 发泡剂掺量对水泥多孔吸声材料性能的影响

将发泡剂加入 50 倍的水稀释制成泡沫，以水泥质量 3.0%、4.0%、5.0%、6.0%、7.0% 的掺量加入水泥浆体中，研究泡沫掺量对水泥多孔吸声材料干密度、抗压强度及降噪系数的影响，试验结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出，随着泡沫掺量的增加，试样的干密度和抗压强度降低，背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数先增加后降低。当泡沫掺量为 5.0% 时，背后空腔 0 mm 降噪系数达到最大值 0.56，此时对应的水泥多孔吸声材料的干密度为 749 kg/m^3 ，抗压强度为 5.6 MPa，背后空腔 50 mm 降噪系数 0.63；掺量为 6.0% 时，背后空腔 50 mm 降噪系数达到最大值为 0.71，此时对应的水泥多孔吸声材料的干密度为 668 kg/m^3 ，抗压强度为 3.2 MPa，背后空腔 0 mm 降噪系数 0.53。

泡沫掺量 4.0% 为临界点，低于 4.0% 背后空腔 0 mm 的降噪系数大于背后空腔 50 mm 的降噪系数，高于 4.0% 相反。这与不同浓度泡沫对水泥基多孔吸声材料的影响相似。

2.3 引气剂掺量对水泥多孔吸声材料性能的影响

将发泡剂加入 50 倍的水稀释制成泡沫，固定泡沫掺量为水泥质量的 3.0%，引气剂以水泥质量的 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0% 不同掺量加

入水泥浆体中，研究引气剂掺量对水泥多孔吸声材料干密度、抗压强度及降噪系数的影响，试验结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出，随着引气剂掺量的增加，试样的干密度和抗压强度降低，背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数先增加后降低。这与相同浓度泡沫掺量增加一致，说明试样中加入引气剂可以起到和增加泡沫掺量相同的效果。

当引气剂掺量为 0.7% 时，背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数均达到最大值 0.55 和 0.63，此时对应的水泥多孔吸声材料的干密度为 729 kg/m^3 ，抗压强度为 4.8 MPa。引气剂掺量 0.4% 为临界点，低于 0.4% 背后空腔 0 mm 的降噪系数大于背后空腔 50 mm 的降噪系数，高于 0.4% 相反。

2.4 与玻璃棉、岩棉吸声性能对比

选取市场常用的玻璃棉和岩棉两种吸声材料，厚度与水泥多孔吸声材料相同，均为 50 mm，测试其吸声性能，其吸声特性曲线降噪系数对比结果分别如图 2 和表 5 所示。

从图 2 可以看出：

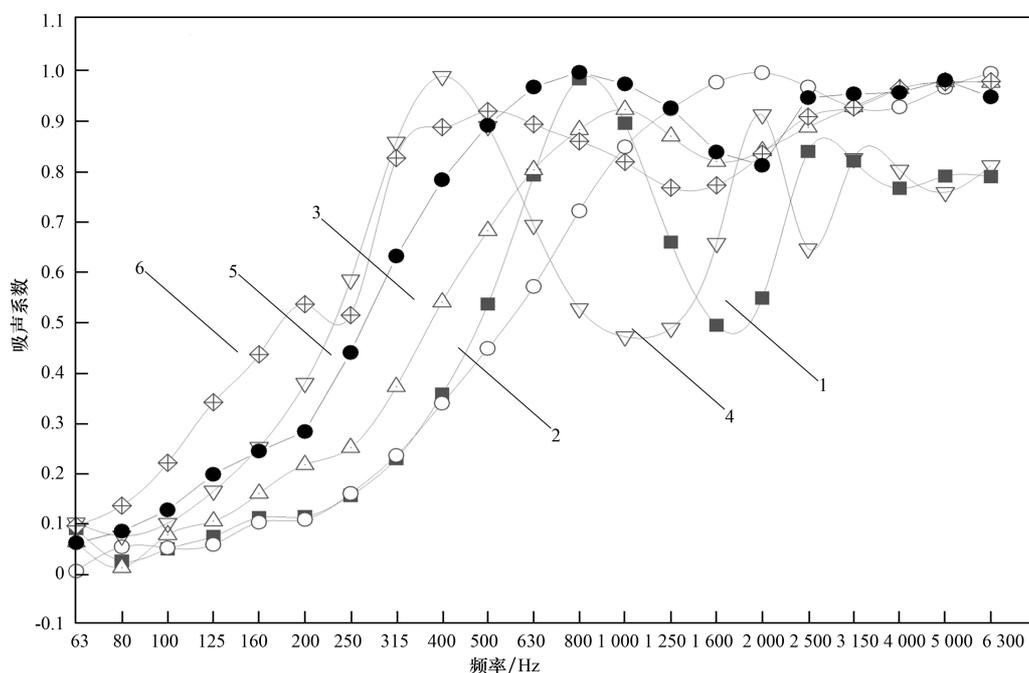
(1) 背后空腔 0 mm 时，63 ~ 1 600 Hz 水泥多孔吸声材料和岩棉随着频率的增加，吸声系数先上升后降低，在此频率范围内水泥多孔吸声材料

表 3 发泡剂掺量对水泥多孔吸声材料性能的影响

序号	泡沫掺量/%	干密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗压强度/MPa	降噪系数 ^a	
				背后空腔 0 mm	背后空腔 50 mm
2-1	3.0	994	8.7	0.28	0.25
2-2	4.0	912	7.9	0.44	0.41
2-3	5.0	749	5.6	0.56	0.63
2-4	6.0	668	3.2	0.53	0.71
2-5	7.0	510	1.1	0.41	0.54

表 4 引气剂掺量对水泥多孔吸声材料性能的影响

序号	引气剂掺量/%	干密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	抗压强度/MPa	降噪系数 ^a	
				背后空腔 0 mm	背后空腔 50 mm
3-1	0	994	8.7	0.28	0.25
3-2	0.2	953	7.5	0.37	0.34
3-3	0.4	904	6.2	0.43	0.43
3-4	0.7	729	4.8	0.55	0.63
3-5	1.0	553	1.7	0.35	0.49



1—4-1 空腔 0 mm; 2—4-2 空腔 0 mm; 3—4-3 空腔 0 mm;
4—4-1 空腔 50 mm; 5—4-2 空腔 50 mm; 6—4-3 空腔 50 mm。

图 2 水泥多孔吸声材料、玻璃棉和岩棉吸声特性曲线

表 5 与玻璃棉、岩棉降噪系数对比结果

序号	材料	干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	降噪系数	
			背后空腔 0 mm	背后空腔 50 mm
4-1	水泥多孔吸声材料	668	0.53	0.71
4-2	玻璃棉	48	0.61	0.78
4-3	岩棉	80	0.67	0.77

的峰值出现在 800 Hz 附近为 0.983, 岩棉的峰值出现在 1 000 Hz 附近为 0.922; 在 1 600 ~ 6 300 Hz 水泥多孔吸声材料的吸声系数随频率增加先上升后降低, 而岩棉吸声系数随着频率增加而增加; 对于玻璃棉趋势与岩棉相近, 只是玻璃棉的分界点为 3 150 Hz, 峰值在 2 000 Hz 附近为 0.995。在 63 ~ 1 000 Hz, 吸声系数从大到小依次为岩棉、水泥多孔吸声材料、玻璃棉; 1 000 ~ 6 300 Hz 吸声系数从大到小依次为玻璃棉、岩棉、水泥多孔吸声材料。

(2) 背后空腔 50 mm 时, 63 ~ 1 250 Hz 水泥多孔吸声材料和岩棉随着频率的增加, 吸声系数先上升后降低, 在此频率范围内水泥多孔吸声材料的峰值出现在 400 Hz 附近为 0.988, 岩棉的峰值出现在 500 Hz 附近为 0.919; 在 1 250 ~ 6 300 Hz 水泥多孔吸声材料的吸声系数随频率增加先上升后降低, 而

岩棉吸声系数随着频率增加而增加; 对于玻璃棉趋势与岩棉相近, 只是玻璃棉的分界点为 2 000 Hz, 峰值在 800 Hz 附近为 0.996。在 63 ~ 500 Hz, 吸声系数从大到小依次为岩棉、水泥多孔吸声材料、玻璃棉; 500 ~ 6 300 Hz 吸声系数从大到小依次为玻璃棉、岩棉、水泥多孔吸声材料。

从表 5 的降噪系数对比结果可以看出, 背后空腔 0 mm 时岩棉的降噪系数最大, 水泥多孔吸声材料的降噪系数最小, 两者相差 0.14; 背后空腔 50 mm 时岩棉和玻璃棉的降噪系数基本相当, 而水泥多孔吸声材料的降噪系数迅速增加到 0.71, 与最大值相差仅为 0.07。在实际应用中, 声屏障结构中吸声材料后会留有一定的空腔, 根据《公路声屏障 第 4 部分: 声学材料技术要求及检测方法》(JT/T 646.4—2016)中具有吸声性能要求的声学材料, 其降噪系数应不小于 0.60 的要

求,所以水泥多孔吸声材料完全满足标准要求,可以作为声屏障吸声材料使用。

3 结论

(1) 随着发泡剂稀释比例的增加,试样的干密度和抗压强度增加,背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数先增加后降低。稀释比例为 50 倍时,背后空腔 50 mm 降噪系数达到最大值为 0.71,此时对应的水泥多孔吸声材料的干密度为 668 kg/m^3 ,抗压强度为 3.2 MPa。

(2) 加入部分引气剂可以起到与增加泡沫掺量相同的效果。随着相同浓度泡沫或引气剂掺量的增加,试样的干密度和抗压强度降低,背后空腔 0 mm 和背后空腔 50 mm 的降噪系数先增加后降低。

(3) 与岩棉和玻璃棉相比,水泥多孔吸声材料的低频吸声效果较好;增加空腔后三者的低频吸声效果增加,而高频基本不变,且降噪系数均大于 0.7。

参考文献:

- [1] 肖力光,毛金羽. 水泥基多孔吸声材料的研究[J]. 北方建筑,2019,4(1):42-46.
- [2] 柏育材,王志健. 交通噪声防治措施及降噪材料研究进展[J]. 上海船舶运输科学研究所报,2023,46(6):60-66.
- [3] 孙小峰,曹心原,张行生,等. 道路声屏障组合吸声结构设计及评估[J]. 科学技术与工程,2024,24(14):5767-5774.
- [4] 公路声屏障 第1部分:分类:JT/T646.1—2016[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
- [5] 潘晓岩,苏卫青,常亮. 采用陶粒吸声材料的声屏障声学性能影响因素研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生,2022,12(1):23-28.
- [6] 李青,鄢磊,朱万旭,等. 新型多孔水泥基陶粒吸声材料的性能分析[J]. 科学技术与工程,2017,17(1):103-107.
- [7] 李健超,柴雪松,李会强,等. 铁路声屏障表观病害智能检测技术[J]. 铁道建筑,2024,64(4):65-69.
- [8] 声屏障结构技术标准:GB/T 51335—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
- [9] 高志涵,陈波,陈家林,等. 基于 X-CT 的泡沫混凝土孔隙结构与导热性能[J]. 建筑材料学报,2023,26(7):723-730.
- [10] 王康,谢辉,王波,等. 发泡剂对复合发泡石膏材料吸声性能的影响[J]. 非金属矿,2022,45(4):10-14.
- [11] 褚星东. 地聚物基吸声材料的制备及性能强化[D]. 太原:山西大学,2024.
- [12] 黄学辉,常宁,宋晓展,等. 凝胶注模-发泡法制备煤矸石多孔吸声材料的工艺研究[J]. 硅酸盐通报,2023,42(3):970-977.
- [13] 王卫东. 绿色环保水泥基微孔吸声材料的研究[J]. 低温建筑技术,2020,42(9):44-48.
- [14] 声学名词术语:GB/T 3947-1996[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [15] 钟祥璋. 建筑吸声材料与隔声材料[M]. 北京:化学工业出版社,2012.