

再生骨料泡沫混凝土的声学性能及孔结构研究

欧阳剑^{1,2}, 曾庆成^{1,2}, 苏林建^{1,2}, 蔡燕霞^{3,4}, 郜佳琦^{3,4}, 李立辉⁴

(1. 广州海珠湾建设有限公司, 广州 510308; 2. 广州市高速公路有限公司, 广州 510000;
3. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为了探究再生骨料泡沫混凝土(RAFC)的降噪性能, 通过配合比改变 RAFC 孔结构, 明确孔结构特征对 RAFC 声学性能的影响。采用图像分析法和 SEM 扫描, 分析了密度与聚丙烯纤维对 RAFC 内部气孔微观结构的影响; 利用阻抗管法测试了 160~1 600 Hz 频段的吸声系数与隔声量, 探讨了孔结构与声学性能的关联。结果表明: 孔隙结构受泡沫与纤维掺量共同影响, 随着密度降低, 大孔与连通孔增多, 少量纤维可抑制气泡合并连通、提升闭孔比例; 适当的孔隙率与连通孔占比有助于提升 RAFC 的吸声性能, 其中孔径>600 μm 的孔隙对低频声音的吸声效果更好; 隔声性能随材料密度增加而提高, 纤维掺入可通过增加闭孔占比进一步改善隔声效果。研究成果可为交通声屏障材料开发提供理论与实验依据。

关键词: 泡沫混凝土; 再生细骨料; 吸声系数; 隔声量; 孔结构

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0019-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.004

Research on Acoustic Performance and Pore Structure of Recycled Aggregate Foam Concrete

OUYANG Jian^{1,2}, ZENG Qingcheng^{1,2}, SU Linjian^{1,2}, CAI Yanxia^{3,4}, GAO Jiaqi^{3,4}, LI Lihui⁴

(1. Guangzhou Haizhu Bay Construction Co., Ltd., Guangzhou 510308, China;

2. Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

3. Zhonglu Gaoke (Beijing) Highway Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;

4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: The acoustic performance of Recycled Aggregate Foamed Concrete (RAFC) was investigated by modifying its pore structure through mix proportion designs to clarify the influence of pore characteristics. Image analysis and SEM scanning were employed to analyze the effects of density and polypropylene fibers on the micro-structural pores of RAFC. The sound absorption coefficient and sound transmission loss in the 160-1 600 Hz frequency range were measured using the impedance tube method, and the relationship between the pore structure and acoustic performance was explored. The results show that: The pore structure is jointly controlled by foam and fiber content. As the density decreases, the proportion of large and interconnected pores increases, while a small amount of fiber can inhibit bubble coalescence and interconnection, thereby increasing the closed-pore ratio. An appropriate porosity and interconnected pore ratio enhance the sound absorption coefficient of RAFC, among which pores larger than 600 μm contribute to better low-frequency sound absorption. The sound transmission loss improves with

项目来源: 国家自然科学基金项目 (52178428)。

作者简介: 欧阳剑 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 城市交通规划。

收稿日期: 2025-11-03

材料科学

increasing material density, and fiber incorporation further improves it by raising the proportion of closed pores. The research findings can provide a theoretical and experimental basis for the development of traffic noise barrier materials.

Key words: Foam concrete; Recycled fine aggregates; Sound absorption coefficient; Sound transmission loss; Pore structure

0 引言

交通噪声污染与固废污染始终是城市发展要面临的两大问题,若将废弃混凝土处理成再生骨料应用于混凝土声屏障,不仅能有效利用再生资源、减少固废排放量,还能控制交通噪声,为居民提供更加舒适的生活环境,对改善城市生态环境具有重要意义。泡沫混凝土作为一种轻质多孔水泥基材料,经国内专家学者们的探索,目前我国已成熟应用于各类回填工程和保温隔热板材等制品,而在近些年,学者们已经开始对使用再生材料的泡沫混凝土以及泡沫混凝土的降噪性能展开了研究。

相关结果表明,在泡沫混凝土中直接使用废弃混凝土处理时收集的再生微粉,在取代水泥用量超过10%时对力学性能产生明显不利影响^[1],但在通过细化激发活性并使用单一种类的再生微粉时,可将掺量提升至30%^[2]。叶涛华等^[3]在研究废弃混凝土再生微粉取代和碳化养护技术对泡沫混凝土性能的影响的过程中发现,随着再生微粉质量取代量的增加,试件的孔隙率逐渐提高,增幅为4.3%~10.9%。不同于再生微粉,再生细骨料的来源对泡沫混凝土性能影响较小^[4],但在掺入再生骨料后,泡沫混凝土的抗压强度有所降低^[5]。在泡沫混凝土的声学性能方面, Kim等^[6]的研究表明,通过使用铝粉等发泡剂提高泡沫混凝土的孔隙率,能有效提升吸声能力。然而,孔隙率与吸声系数之间并非简单的线性关系。葛亚雄等^[7]在探究铝粉、丁腈橡胶粉对泡沫混凝土吸声性能的影响过程中发现,孔隙率与吸声系数存在峰值,当孔隙率超过峰值后,吸声系数反而会下降;付海等^[8]研究进一步揭示了孔隙率通过影响吸水率来调控吸声性能的复杂机制:孔隙率增加会提高吸水率,进而使平均吸声系数先增后减,而饱和吸水状态则会严重劣化其吸声性能。在泡沫混凝土中加入纤维和沸石被证实可用于调控声学特性。邓友生等^[9]、谢辉等^[10]研究发现纤维的掺入能有效提升泡沫混凝土的吸声效果。为寻求吸

声性能与力学强度的平衡,橡胶颗粒等弹性材料被广泛应用。陈立庚^[11]研究表明了掺入橡胶颗粒的泡沫混凝土的抗压强度与吸声性能,发现泡沫掺量越多吸声效果越好,但材料的抗压强度显著下降,在泡沫掺量75%,橡胶颗粒掺量20%时,橡胶颗粒泡沫混凝土在满足6 MPa抗压强度情况下吸声性能最优;吴丽曼等^[12]以化学发泡法制备了不同粉煤灰掺量的超轻泡沫混凝土,结合图像分析软件测得试样的孔结构参数并研究了吸声系数,发现在0~50%粉煤灰掺量下干密度小于300 kg/m³的泡沫混凝土孔隙率在80%~90%之间随掺量增加而下降、平均孔径均大于1 mm,小孔占比随掺量增加而增多,用驻波管测量其平均吸声系数最高为0.34;张文华等^[13]指出泡沫混凝土中大尺寸连通孔会造成隔声性能的下降;邓友生等^[14]通过测试泡沫混凝土不同状态下吸声系数与噪声频率的相关变化特性,进一步发现噪声频率在800~1 200 Hz内,泡沫混凝土的吸声系数均值为0.75,其峰值可达0.90;Zhang等^[15]用阻抗管测试了厚度为20~25 mm地聚物泡沫混凝土的吸声性能,表明其在低频40~150 Hz时吸声效果较高,吸声系数为0.7~1.0,在中高频800~1 600 Hz时则为0.1~0.3。

无论是再生骨料泡沫混凝土(RAFC)的力学性能,还是普通泡沫混凝土的声学性能,学界均已开展较多研究,然而,将两者结合,系统探究RAFC声学性能的研究较少。为此,基于已有成果,旨在通过配合比设计调控RAFC的孔结构,系统测试并分析其吸声性能,进而从细微观层面揭示孔结构特征对RAFC声学性能的影响机制,以期兼具环保效益与高效降噪功能的交通声屏障材料开发提供理论与试验依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,水泥技术指标见表1;所用再生骨料是将废弃混凝土破碎、筛分后得到的粒径为0~5 mm的细骨料,细度模数3.0,

表观密度为 2 631 kg/m³，饱和面干吸水率为 1.38%，级配分析见表 2；粉煤灰为浮选法筛选出来的优质粉煤灰，其性能指标见表 3；聚丙烯纤维性能指标见表 4；发泡剂采用 LG-2258 植物源复合水泥发泡剂，稀释倍数 60，发泡倍数 40，1 h 时沉降距为 9 mm，1 h 泌水量为 30 mL。

表 1 水泥基本性能

Table 1 Basic properties of cement

密度/ (g/cm ³)	比表面积/ (m ² /kg)	凝结时间/min		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d
3.100	350	81	325	28	48

表 2 再生细骨料级配分析

Table 2 Grading analysis of recycled fine aggregate

筛孔尺寸/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	底
累计筛余/%	0.1	23.8	50.1	61.4	81.1	87.8	100

表 3 粉煤灰技术指标

Table 3 Technical indicators of fly ash

平均粒径/ μm	球体密度	真密度	堆积密度	需水量
	/ (g/cm ³)			比/%
1.2	2.52	0.72	0.67	82

表 4 聚丙烯纤维技术指标

Table 4 Technical indicators of polypropylene fiber

纤维类型	比重	纤维直径 /mm	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	拉伸极限/%
束状单丝	0.91	80	>486	>3.5	>15

1.2 试验配合比

为研究孔结构特征对 RAFC 声学性能的影响，设计并制备泡沫掺量为浆体体积 40%、60%、80% 和 100% 的 RAFC 以及在此基础上掺加浆体体积 0.1% 聚丙烯纤维的 RAFC-PP。根据 JGJ/T 341-2014《泡沫混凝土应用技术规程》通过体积法计算得出各原材料单位用量，试验配合比见表 5。

表 5 再生骨料泡沫混凝土配合比

Table 5 Mix proportion of recycled aggregate foam concrete

编号	泡沫掺量/%	密度等级	水	水泥	粉煤灰	再生骨料	纤维
			/ (kg/m ³)				
F40	40	A12	350	630	70	350	
F60	60	A10	306	551	61	306	
F80	80	A9	272	490	54	272	
F100	100	A8	245	441	49	245	
F40-P0.1	40	A12	345	621	69	345	0.64
F60-P0.1	60	A10	301	543	60	301	0.56
F80-P0.1	80	A9	267	481	53	267	0.50
F100-P0.1	100	A8	240	432	48	240	0.45

1.3 试件制备

对试验所需材料按照设计配合比进行称量，并

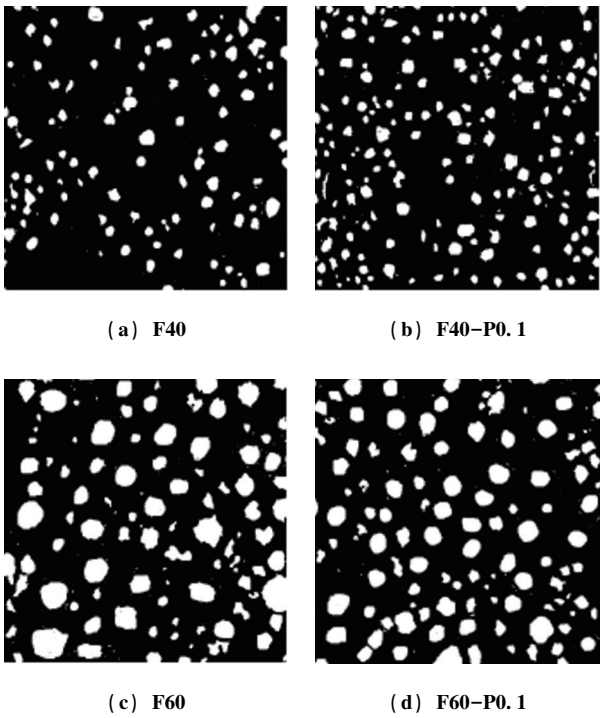
按比例稀释发泡剂备用；将纤维预先加入拌合用水中分散均匀；依次将再生细骨料、水泥、粉煤灰加入搅拌机内干拌 30 s；将水加入搅拌机内搅拌 180 s，直至浆体混合均匀；将稀释液置于发泡机发泡，量取所需体积的泡沫并加入浆体中，继续搅拌 180 s，至泡沫完全溶进浆体，即浆体颜色均匀且无泡沫浮于表面；将新拌 RAFC 浆体倒入试模中，轻轻晃动模具以排除浇筑过程中形成的大气泡，最后用刮刀将试模表面多余浆体刮去，并附上保鲜膜。试件在 (20±2)℃ 环境内静止 48h 后脱模、编号，放入温度 (20±2)℃、相对湿度 95% 以上的标准养护箱中继续养护至指定龄期，待试件养护龄期到达后进行相关试验测试。

1.4 试验方法

1.4.1 孔结构参数测试方法

试件达到龄期后，用切割机沿试件成型面中线将试件切开，并对切面进行打磨、除尘处理。采用数码相机对切面进行拍摄，获取切面图像。图像导入分析软件后选取边长为 6 mm 的正方形区域及最佳阈值进行二值化处理，并统计分析测试结果，得出孔隙率、平均孔径、孔径分布。

各配合比试件截面图像二值化处理后如图 1 所示。



材料科学

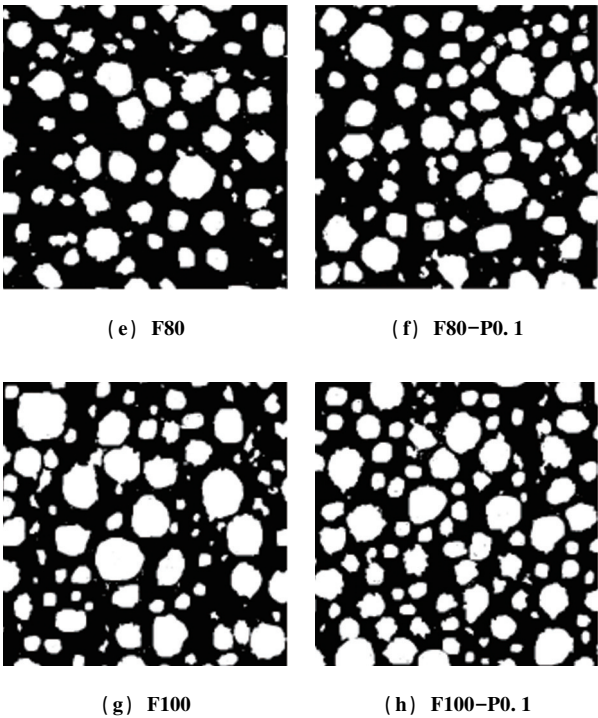


图 1 不同密度 RAFC 的图像二值化处理
Fig. 1 Image binarization of RAFC with different density

1.4.2 吸声系数与隔声量测试方法

RAFC 的吸声系数和隔声量的测试方法参照 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》，采用阻抗管测定垂直入射条件下 RAFC 的吸声系数和隔声量，使用龄期为 28d 的 $\phi 100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 圆柱型试件。取 1/3 频吸声系数的算数平均值作为平均吸声系数。

1.4.3 扫描电镜法

当试件到达龄期后，将其破碎成小块，选取体积为 2 cm^3 块状试样，并对试样进行烘干、喷金镀膜，采用扫描电镜（SEM）对各组试件进行微观形貌观测。

2 结果与讨论

2.1 材料密度对孔隙率和平均孔径的影响

各配合比的试件孔隙率和平均孔径测试结果见表 6。随着密度等级的减小，泡沫混凝土孔隙率逐渐增加。其中，无纤维掺入的 RAFC 试件，随着泡沫掺量的增加，孔隙率的增加量逐渐放缓，增长率分别为 50.0%、30.3%、23.3%；RAFC-PP 试件的孔隙率增长率分别为 40.0%、18.4%、20.0%，变化趋势与无纤维掺入的 RAFC 一致。相同密度等级下，

RAFC-PP 试件比 RAFC 试件的孔隙率分别提高了 22.7%、15.2%、4.7%、1.9%。

RAFC 随着密度的减小，其平均孔径整体呈上升趋势。在相同泡沫掺量下，0.1% 纤维掺量下的 RAFC 平均孔径均低于无纤维掺量的 RAFC，在泡沫掺量为 40%、60%、80%、100% 时，平均孔径分别减小了 16.4%、10.5%、4.9%、3.8%，两者之差不断缩短，密度等级 A9、A8 已经相差不大。由此可知，纤维的加入可以使平均孔径减小，这种现象在密度较高时较为显著，而当密度较低时，效果并不突出。同纤维掺量的情况下，纤维在 RAFC 内部对泡沫稳定效果会随着密度的减小而逐渐变弱，在较低密度时，气泡仍倾向于维持原直径大小。

表 6 不同密度 RAFC 的孔隙率和平均孔径
Table 6 Porosity and average pore size of RAFC with different density

编号	密度等级	孔隙率/%	平均孔径/ μm
F40	A12	22	256
F60	A10	33	304
F80	A9	43	366
F100	A8	53	395
F40-P0.1	A12	27	214
F60-P0.1	A10	38	272
F80-P0.1	A9	45	348
F100-P0.1	A8	54	380

2.2 材料密度对孔径分布的影响

由图 2 可知，随着密度的减小，RAFC 和 RAFC-PP 在孔径小于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 以及孔径在 $200\sim 400\text{ }\mu\text{m}$ 范围的孔隙数量占比出现下降，在 $400\sim 600\text{ }\mu\text{m}$ 以及大于 $600\text{ }\mu\text{m}$ 占比开始逐步上升；在相同泡沫掺量下，相比无纤维掺量的 RAFC，掺入少量纤维后孔径大于 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙占比更小。当密度较大时，RAFC 内部的浆体占比多，泡沫较稳定；而随着密度的减小，

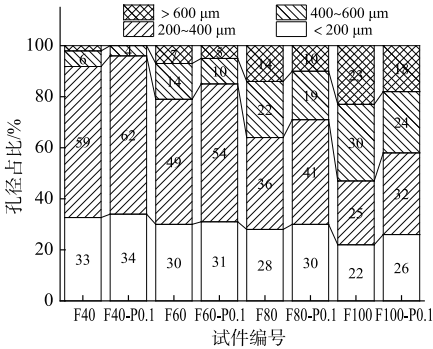
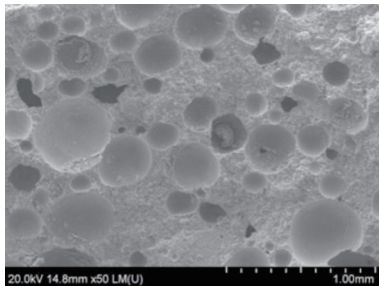


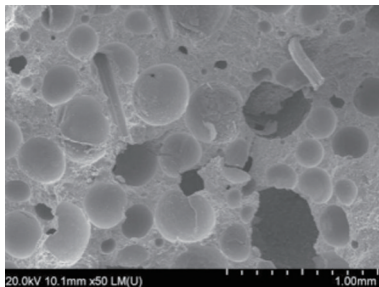
图 2 不同密度 RAFC 的孔径分布
Fig. 2 Pore size distribution of RAFC with different density

气泡容易发生合并和连通,导致硬化后的 RAFC 内部的大孔径占比变大;而纤维的加入起到了阻碍气泡的合并连通的作用,因此呈现出大孔径比例下降,小孔径比例上升的现象。

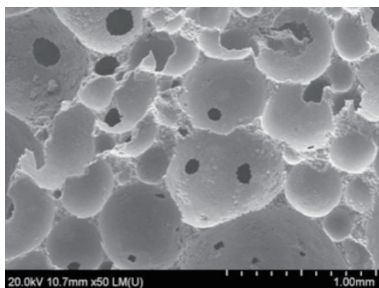
由图 3 可知,泡沫掺量为 40% 时,试样中的孔隙数量较少,并且孔的尺寸较小、周围的水化物质较为紧密地连接在一起,当泡沫掺量增加到 100% 时,孔隙布满整个界面,孔隙数量增加,孔径显著变大。掺入 0.1% 纤维后,与相同泡沫掺量下的试样进行对比,掺纤维后的试样孔隙的孔径分布和大小无明显改变,但在孔隙之间水泥基质的填充反而下降,密度有所下降。另外,当泡沫掺量增加到 100% 时,孔隙直径变大,孔壁厚度变薄,孔隙表面出现小孔,存在明显缺陷,加入纤维后,纤维分布在孔隙之间,对孔隙缺陷有一定改善,但不显著,进一步验证了从二值化图像分析得出的数据。



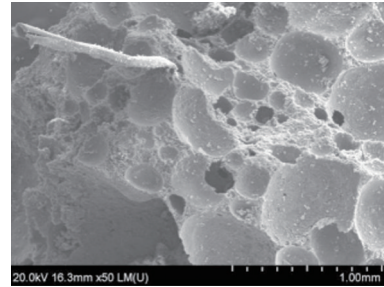
(a) F40



(b) F40-P0.1



(c) F100



(d) F100-P0.1

图 3 不同密度 RAFC 微观形貌 (50 倍)

Fig. 3 Micromorphology of RAFC with different density (50 times)

2.3 孔结构对吸声系数的影响

由图 4 可知, F40、F60、F80 对于低频的吸声性能较弱,吸声系数峰值所在对应频率并不完全相同,但均在 400~800 Hz 区间内达到峰值; F100 在低频的吸声效果更优。

由表 7 可知,随着 RAFC 的密度降低,平均吸声系数呈先上升后下降的趋势,与既往研究所得出的结论相同。结合孔隙率的变化和平均孔径的结果来看,孔隙的增多与孔径的增大使孔隙相互连通并连接至试件表面,这种孔结构有利于吸声,但当平均孔径过大时,声波更快地穿过孔隙间隙,减弱了与孔壁作用效果。可以推测适宜的孔结构对 RAFC 的吸声性能有利。

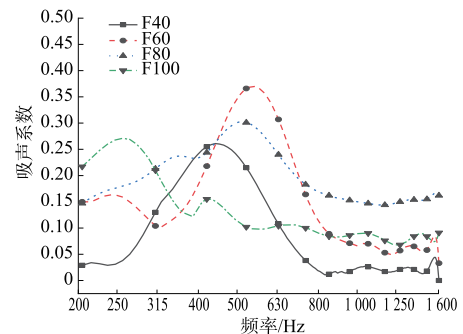


图 4 密度对 RAFC 吸声系数的影响

Fig. 4 Influence of density on absorption coefficient of RAFC

表 7 RAFC 和 RAFC-PP 的平均吸声系数

Table 7 Average absorption coefficient of RAFC and RAFC-PP

编号	密度等级	平均吸声系数
F40	A12	0.08
F60	A10	0.16
F80	A9	0.25
F100	A8	0.14
F40-P0.1	A12	0.06
F60-P0.1	A10	0.12
F80-P0.1	A9	0.18
F100-P0.1	A8	0.13

材料科学

2.4 纤维对吸声系数的影响

由图 4~5 可知, 掺入纤维后, 除了 F80 外, 其他各组的吸声系数峰值均明显下降, F40 的吸声曲线无明显波峰, 平均吸声系数分别降低了 0.02、0.04、0.07、0.01。结合孔径分布的变化和微观形貌图可知, 较少掺量的纤维使大孔径孔隙占比下降, 减少了连通孔隙, 吸声性能因此下降, 另一方面, 越多的纤维暴露在孔隙中越能在吸声性能起增益效果, 低孔隙率的 RAFC 中水泥浆体会包裹大部分纤维, 使其失去降噪效果, 因此可以推测 0.1% 掺量的纤维对于 RAFC 的吸声性能有负面影响。

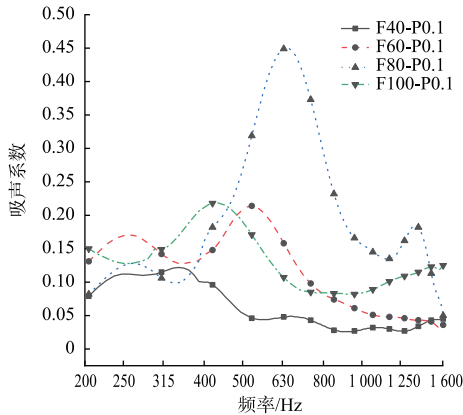


图 5 密度对 RAFC-PP 吸声系数的影响

Fig. 5 Influence of density on absorption coefficient of RAFC-PP

2.5 孔结构对隔声量的影响

由图 6 可知, RAFC 的隔声性能符合质量定律, 随着孔隙率逐渐提升、材料密度的下降, 相比于常规混凝土材料, RAFC 对声音的隔绝效果有所下降。从多孔材料的角度来看, 已知在声音传播过程中, 闭孔会更好的阻止声波的透射, 从而有较好的隔声

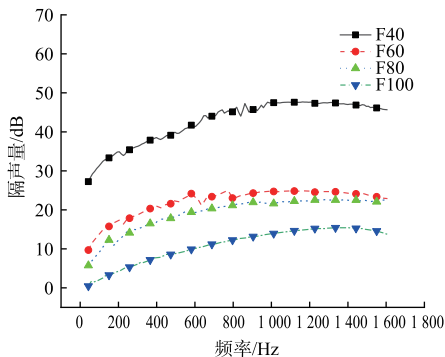


图 6 密度对 RAFC 隔声量的影响

Fig. 6 Influence of density on sound transmission loss of RAFC

效果, 因此结合平均孔径和微观形貌图可知, F60、F80、F100 的 RAFC 内相互连通的孔占比增多、闭孔占比降低, 也会削弱材料的隔声性能。

2.6 纤维对隔声量的影响

对比图 6 和图 7, 可知掺加纤维后的 RAFC 同样符合隔声性能的质量定律。除 F40 外, 其余三组的隔声性能均因加入纤维后有所提升, 结合孔结构分析, 其原因在于纤维降低大孔占比, 减少了连通孔的比例, 对材料的隔声性能有增益效果。

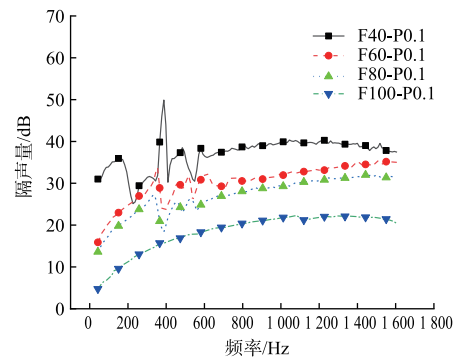


图 7 密度对 RAFC-PP 隔声量的影响

Fig. 7 Influence of density on sound transmission loss of RAFC-PP

3 结论

研究通过调整泡沫及聚丙烯纤维掺量, 改变再生骨料泡沫混凝土的孔结构, 并借助图像分析、SEM 扫描与阻抗管测试, 明确了孔结构特征以及孔隙对吸声与隔声性能的影响规律, 得出以下主要结论:

(1) 由于泡沫表面张力的作用, RAFC 中的小气泡将融合成为大气泡, 而位于浆体液面附近的将直接破裂, 硬化后的试件孔隙率会比理论值小, 随着泡沫掺量的增加, 孔隙率的增加量呈现放缓且孔径分布中呈现出大孔占比增加的现象。较少掺量的纤维在 RAFC 内部起到稳泡、阻碍气泡合并连通的作用, 但对泡沫稳定效果会随着密度的减小而逐渐变弱, 在较低密度时, 气泡仍倾向于维持原直径大小。

(2) 当孔径大于 $600\ \mu\text{m}$ 占比增加时, 吸声系数曲线的峰值会有向低频移动的趋势, 对低频声音的吸声性能增强, 反之, 则对较高频的声音有较好的吸声效果; 孔隙的增多与孔径的增大使孔隙相互连通并连接至试件表面, 有利于吸声, 但当平均孔径过大时, 声波更快地穿过孔隙间隙, 减弱了与孔壁

作用效果, 吸声性能有所降低。适当的孔隙率和连通孔占比对 RAFC 的吸声性能有利。

(3) RAFC 的隔声性能与材料密度呈正比, 密度越大隔声性能越好; 纤维的掺入使 RAFC 内的闭孔占比提高, 隔声性能也有所提升。

参 考 文 献

- [1] 李欣. 再生微粉泡沫混凝土制备与基本性能 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- [2] 刘森. 再生粉体泡沫混凝土的性能研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- [3] 叶涛华, 周子晗, 肖建庄, 等. 碳化养护对含再生微粉泡沫混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (3): 872-882.
- [4] 罗建林. 再生细骨料加气混凝土的试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [5] 杨帆, 张喆, 姜维, 等. 建筑垃圾再生泡沫混凝土性能及其成孔机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2022 (8): 112-115, 171.
- [6] KIM H, HONG J, PYO S. Acoustic characteristics of sound absorbable high performance concrete [J]. Applied Acoustics, 2018, 138: 171-178.
- [7] 葛亚雄, 陈怡, 杜兴英, 等. 丁腈橡胶粉以及铝粉对发泡混凝土孔隙率以及吸声性能的影响 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37 (5): 70-76, 90.
- [8] 付海, 葛亚雄, 陈怡, 等. 吸水率对发泡混凝土吸声性能的影响 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37 (4): 38-43.
- [9] 邓友生, 段邦政, 吴鹏, 等. 泡沫混凝土声屏障吸声特性研究 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (3): 144-151.
- [10] 谢辉, 刘俊超, 侯淑婧. 碱矿渣泡沫混凝土的吸声性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2775-2780.
- [11] 陈立庚. 废旧轮胎橡胶颗粒/水泥复合声屏障研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 吴丽曼, 孙勇, 张晓莉, 等. 粉煤灰对超轻发泡混凝土孔结构及吸声性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (9): 2387-2392.
- [13] 张文华, 杨冯皓, 吕毓静, 等. 泡沫混凝土的稳泡措施和机理研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49 (10): 2266-2275.
- [14] 邓友生, 段邦政, 李玉博, 等. 干湿态泡沫混凝土吸声系数研究 [J]. 混凝土, 2016 (9): 1-5.
- [15] ZHANG Z, PROVIS J, REID A, et al. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 62: 97-105.
- [5] 李方, 杨健, 李粒琿. 废玻璃粉作为辅助胶凝材料对砂浆性能影响及作用机理 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (9): 3208-3218.
- [6] 杨震樱, 周长顺. 含玻璃粉超高性能混凝土力学性能及微观结构研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (12): 3956-3963.
- [7] 刘春阳, 徐佳, 于舰, 等. 玻璃混凝土基本性能试验研究 [J]. 混凝土, 2021 (12): 70-73.
- [8] 李德成, 陈宣东, 黄达. 玻璃粉对玻璃骨料混凝土力学性能和 ASR 影响的研究 [J]. 混凝土, 2021 (3): 79-82.
- [9] 梁毅, 杨卿松, 林书立, 等. 橡胶-玻璃粉改性透水路面强度和冻融性分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (17): 7305-7311.
- [10] 李琼, 安宝峰, 苏睿, 等. 废玻璃粉透水混凝土物理性能及复合胶凝体系微观机理研究 [J]. 材料导报, 2025, 39 (8): 127-137.
- [11] 赵志鹏. 废弃玻璃粉透水混凝土力学及抗硫酸盐侵蚀性能研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [12] 张亚鹏, 张凤娇, 曹佳伟, 等. 洗选煤矸石透水混凝土的制备及其性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 1-5.
- [13] 周玉玲, 明廷臻, 万美南. 透水混凝土强度及透水性能影响因素研究 [J]. 中国测试, 2021, 47 (10): 155-160.
- [14] 白小龙, 魏亚龙, 毕红卫, 等. 硅灰-矿渣粉改性多孔透水混凝土力学及抗冻性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (2): 35-41.
- [15] 夏群, 赵岑, 朱平华, 等. 粉煤灰掺量对直通孔型再生透水混凝土抗盐冻及透水性能的影响 [J]. 混凝土, 2024 (10): 95-99, 110.