

海泡石/玻璃纤维增强陶粒混凝土的制备及其性能研究

姚 军¹, 徐良骥², 吴笑佳³, 阮以喜¹, 何家军¹, 张占群³, 李建军^{3*}

¹淮南东辰固废利用有限公司, 安徽 淮南

²深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南

³安徽省煤基固废新材料产业共性技术研究中心, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年12月23日; 录用日期: 2025年1月14日; 发布日期: 2025年1月26日

摘 要

为解决常规砂石混凝土强度小、保温性能及吸声性能差的问题, 采用煤矸石陶粒取代砂石, 掺入粉煤灰、海泡石、玻璃纤维等掺料, 设计制备了轻质高强陶粒混凝土, 并进行抗折强度、抗压强度等力学性能测试, 以及保温系数、吸声系数测试。试验结果表明: 适量陶粒和混合掺料的加入有利于混凝土力学性能的提高, 过量反而会降低强度。通过对特征样品进行导热系数测定, 结果表明, 陶粒和混合掺料的加入改善了混凝土的保温性能, 导热系数减小。同样地, 对特征样品进行吸声系数测试, 结果表明陶粒和混合料的加入可以提高样品的吸声系数, 且掺入海泡石的陶粒混凝土比掺入玻璃纤维的吸声系数大, 吸声性能更好。

关键词

陶粒混凝土, 海泡石, 玻璃纤维, 混合掺料

Preparation and Properties of Sepiolite/Glass Fiber-Reinforced Ceramite Concrete

Jun Yao¹, Liangji Xu², Xiaojia Wu³, Yixi Ruan¹, Jiajun He¹, Zhanqun Zhang³, Jianjun Li^{3*}

¹Huainan Dongchen Solid Waste Utilization Co., Ltd., Huainan Anhui

²National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Huainan Anhui

³Anhui Industrial Generic Technology Research Center for New Materials from Coal-based Solid Wastes, Huainan Anhui

*通讯作者。

文章引用: 姚军, 徐良骥, 吴笑佳, 阮以喜, 何家军, 张占群, 李建军. 海泡石/玻璃纤维增强陶粒混凝土的制备及其性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 177-184. DOI: 10.12677/hjce.2025.141021

Abstract

To solve the problems of low strength, poor insulation and sound absorption performance of conventional sand and gravel concrete, coal gangue ceramsite was used instead of sand and gravel, and fly ash, sepiolite, glass fiber and other additives were added. Lightweight high-strength ceramsite concrete was designed and prepared, and mechanical properties such as flexural strength and compressive strength, as well as insulation coefficient and sound absorption coefficient were tested. The experimental results indicate that the addition of appropriate amounts of ceramsite and mixed admixtures is beneficial for improving the mechanical properties of concrete, while excessive amounts can actually reduce its strength. The results of measuring the thermal conductivity of characteristic samples showed that the addition of ceramsite and mixed admixtures improved the insulation performance of concrete and reduced thermal conductivity. Similarly, sound absorption coefficient tests were conducted on characteristic samples, and the results showed that the addition of ceramsite and mixtures can improve the sound absorption coefficient of the samples. Moreover, ceramsite concrete mixed with sepiolite has a higher sound absorption coefficient and better sound absorption performance than concrete mixed with glass fiber.

Keywords

Ceramsite Concrete, Sepiolite, Glass Fiber, Mixed Admixtures

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球城市化和建筑行业的快速发展推动了对新型建筑材料的需求。陶粒混凝土作为一种新型轻质混凝土，因其轻质、高强、保温隔热、耐火和抗渗等特性受到关注[1]。这种混凝土由轻质骨料——陶粒与水泥、粉煤灰等胶凝材料混合而成，适用于建筑结构、桥梁工程和地下结构[2]。在节能减排和可持续发展的背景下，陶粒混凝土有助于降低建筑自重和成本，同时提升保温隔热性能和使用寿命[3] [4]。目前已有许多学者对其进行了研究，如辛转红[5]等以陶粒混凝土制备的建筑预制构件较普通混凝土构件减重率超过 20%，实现预制构件轻质化；谢刚[6]研究发现合适的陶粒掺量可使透水混凝土具有良好的自重和抗压强度；Dai 等[7]研究发现，聚丙烯腈基碳纤维复合材料对混凝土有较好的增韧作用，其抗拉强度、抗折强度也有所提高。但对陶粒混凝土在力学性能、保温性能及吸声性能等综合性能方面的研究较少。

因此本研究采用煤矸石陶粒取代砂石，同时掺入粉煤灰、海泡石、玻璃纤维等掺料来制备海泡石/玻璃纤维增强的陶粒混凝土。在力学性能方面，通过对煤矸石陶粒混凝土进行抗折强度、抗压强度等测试，以评估其结构承载能力。同时，考虑到建筑节能的需求，对煤矸石陶粒混凝土的保温系数和吸声系数进行测试，以评价其在建筑节能和噪声控制方面的潜力。这些测试结果将为煤矸石陶粒混凝土的应用提供科学依据，并推动其在建筑行业的广泛应用，旨在为建筑行业提供一种新型的、环保的、高性能的建筑材料，以响应全球对绿色建筑和可持续发展的迫切需求。

2. 试验材料

2.1. 材料指标

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011), 确定混凝土等级强度为 LC30, 水泥采用 P·O 42.5 八公山牌普通硅酸盐水泥, 细骨料采用中国 ISO 标准砂, 粉煤灰采用鄂尔多斯二级灰, 外加剂选用减水率为 35% 的 PCA 聚羧酸系高性能减水剂, 拌合用水选自实验室普通自来水。陶粒、海泡石和玻璃纤维物理性能指标见表 1 和表 2。

Table 1. Physical performance indicators of ceramsite

表 1. 陶粒物理性能指标

	主要成分	粒径 mm	筒压强度(MPa)	饱和吸水率%	堆积密度(kg/m ³)		比表面积(m ² /g)
					松散堆积密度	密实堆积密度	
陶粒	煤矸石 (淮南矿区)	5~8	41.9	11.38	1240	1280	3.4903

Table 2. Physical performance indicators of sepiolite and glass fiber

表 2. 海泡石和玻璃纤维物理性能指标

	主要成分	颜色	形状	规格	含水率
海泡石	硅酸镁盐	灰白色	纤维状	3~5 mm	≤3%
玻璃纤维	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 等	白色	纤维状	3~4.5 mm	≤0.05%

2.2. 材料预处理

陶粒孔隙较多, 在拌合混凝土时会吸收水分影响混凝土的性能, 因此需对陶粒进行预湿。陶粒预湿还可以作为一种内养护的方式, 提高混凝土后期的强度以及减小后期的收缩[8]。将陶粒置于自来水中浸泡, 在混凝土拌合前 1 h 取出陶粒, 晾至饱和面干状态备用。

3. 试验设计与测试

3.1. 陶粒混凝土配合比

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55-2011), 陶粒混凝土各材料用量, 见表 3。本研究主要将陶粒混凝土分为 3 类进行对比研究: 标准砂 - 陶粒混凝土(1#-5#)、海泡石 - 陶粒混凝土(6#-14#)、玻璃纤维 - 陶粒混凝土(15#-23#)。

Table 3. Quantity of various materials for ceramsite concrete

表 3. 陶粒混凝土各材料用量

型号	陶粒/ml	水泥/g	自来水/g	标准砂/g	粉煤灰/g	海泡石/g	玻璃纤维/g	减水剂/g
1#	800	450	200	0	0	0	0	10
2#	600	450	200	337.5	0	0	0	10
3#	400	450	200	675	0	0	0	10
4#	200	450	200	1012.5	0	0	0	10
5#	0	450	200	1350	0	0	0	10
6#	800	315	180	0	135	22.5	0	10
7#	800	315	180	0	135	45.0	0	10

续表

8#	800	315	180	0	135	67.5	0	10
9#	800	360	180	0	90	22.5	0	10
10#	800	360	180	0	90	45.0	0	10
11#	800	360	180	0	90	67.5	0	10
12#	800	405	180	0	45	22.5	0	10
13#	800	405	180	0	45	45.0	0	10
14#	800	405	180	0	45	67.5	0	10
15#	800	315	180	0	135	0	22.5	10
16#	800	315	180	0	135	0	45.0	10
17#	800	315	180	0	135	0	67.5	10
18#	800	360	180	0	90	0	22.5	10
19#	800	360	180	0	90	0	45.0	10
20#	800	360	180	0	90	0	67.5	10
21#	800	405	180	0	45	0	22.5	10
22#	800	405	180	0	45	0	45.0	10
23#	800	405	180	0	45	0	67.5	10

3.2. 抗压强度测试

根据 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》中水泥混凝土抗压强度试验方法制备试件，试件采用 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ ，蒸汽标准养护 3 d、7 d、28 d。试验每组 3 个同条件的试件，将成型试件的侧面选定为受压面，并与压力机几何对中，采用微机控制电子式万能试验机进行抗压强度测试，以每秒 0.3 MPa 的速度连续而均匀的施加荷载，直至试件破坏。

3.3. 抗折强度测试

试件制备根据 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》执行，试件采用 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ ，蒸汽标准养护 3 d、7 d、28 d 后进行混凝土抗折强度测试。成型试件的侧面为劈裂面，每组 3 个同龄期、同条件制备的混凝土试块进行试验。采用微机控制电子式万能试验机，以每秒 0.05~0.08 MPa 的速度连续而均匀的施加荷载，直至试件破坏。

3.4. 导热系数测试



Figure 1. Double flat plate thermal conductivity tester (left); Sample test block (right)
图 1. 双平板导热系数测定仪(左); 试块样例(右)

将陶粒混凝土按照等比例制备成两块尺寸 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ，厚度 20 mm 的试验试块，蒸汽标准养护至 28 d ，采用 IMDRY3001-II 双平板导热系数测定仪测试，见图 1。

3.5. 吸声系数测试

将陶粒混凝土按照等比例制备成直径为 3 mm 和 9 mm 的圆柱形试块，厚度约 $20\sim 30\text{ mm}$ ，蒸汽标准养护至 28 d ，采用驻波管吸声系数测量仪测试，见图 2。



Figure 2. Sound absorption coefficient measuring instrument for standing wave tube (left, center); Sample test block (right)
图 2. 驻波管吸声系数测量仪(左、中); 试块样例(右)

4. 结果与讨论

4.1. 标准砂 - 陶粒混凝土力学性能

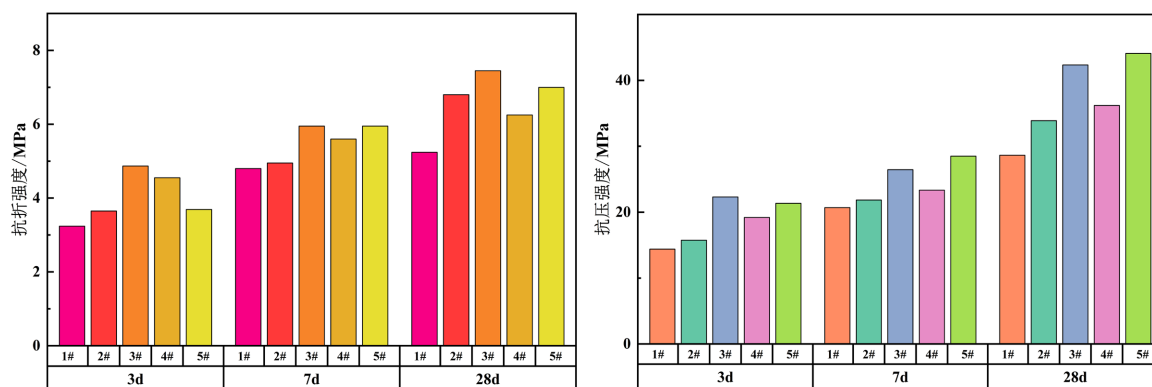


Figure 3. Flexural strength of standard sand ceramsite concrete (left); Compressive strength (right)
图 3. 标准砂 - 陶粒混凝土抗折强度(左); 抗压强度(右)

根据试验设计进行不同比例的陶粒取代标准砂试验。由试验结果图 3 可以看出，随着陶粒取代比例的增加，混凝土试块的强度先增大后减小。取代比例为 25%、50%、75% 时，陶粒混凝土的抗折强度分别为 6.25 MPa 、 7.45 MPa 、 6.8 MPa ，抗压强度分别为 36.2 MPa 、 42.9 MPa 、 33.9 MPa 。试验结果显示，50% 取代率的陶粒混凝土抗折强度、抗压强度更高，更加轻质高强。陶粒表面多孔，预湿处理后加入水泥干拌，其孔隙内吸附部分水泥形成低水灰比的水泥浆，硬化后与包裹在陶粒外表面的水泥形成坚硬整体，提高了陶粒与水泥的界面粘结强度。但是如果陶粒过多，会导致水泥水化产物不能充分填充在陶粒与砂浆界面间，界面过渡区强度较低，混凝土密实度下降，因此，强度逐渐降低[9]。

4.2. 海泡石 - 陶粒混凝土力学性能

由不同比例的海泡石掺入陶粒混凝土浆体，图 4 试验结果表明，在配料中加入海泡石纤维，能有

效提高试块的强度。没有海泡石掺入的陶粒混凝土(1#)抗折强度为 5.24 MPa, 抗压强度为 28.65 MPa, 以 5%、10%、15%的比例掺入海泡石后, 陶粒混凝土的抗折强度、抗压强度最好可达 34.4 MPa、6.25 MPa, 综合力学性能提高 20%。原因在于, 海泡石具有一定的火山灰活性并且改善了浆体的流变性能, 达到纤维增韧的效果。当海泡石直接掺入使用时, 又因海泡石易于分散且纤维束能在浆体中形成相互穿插的网格, 使得浆体的触变性及试件的力学强度均得到良好的改善。但由数据图可以看出, 海泡石以 15%的比例过量掺入后, 抗折强度降低到 5.08 MPa, 抗压强度降低到 21.5 MPa。过多的海泡石掺量, 不仅会降低水泥在浆体中的占比而且会存在聚集成团的现象, 试样的力学性能及耐久性会因此产生不利的影响[10][11]。

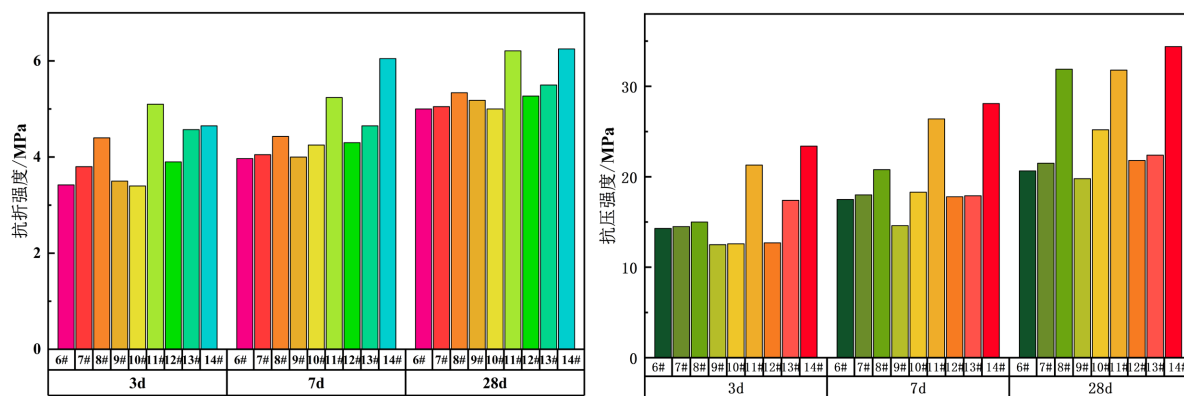


Figure 4. Flexural strength of sepiolite ceramsite concrete (left); Compressive strength (right)

图 4. 海泡石 - 陶粒混凝土抗折强度(左); 抗压强度(右)

4.3. 玻璃纤维 - 陶粒混凝土力学性能

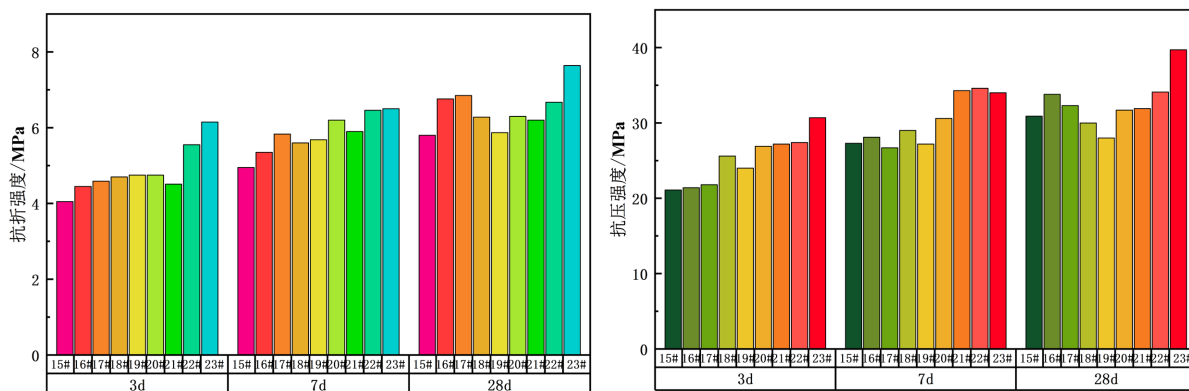


Figure 5. Flexural strength of glass fiber ceramsite concrete (left); Compressive strength (right)

图 5. 玻璃纤维 - 陶粒混凝土抗折强度(左); 抗压强度(右)

同样地, 根据试验设计, 将 5%、10%、15%比例的玻璃纤维掺入到陶粒混凝土, 试验结果见图 5。随着玻璃纤维掺量的增加, 陶粒混凝土的抗折抗压强度都有所增加。但是掺量较多时强度并没有像所预设的趋势发展, 以 15#、16#、17#样品为例, 随着掺量的增加, 陶粒混凝土的抗折强度分别为 5.8 MPa、6.76 MPa、6.85 MPa, 抗压强度分别为 32.3 MPa、33.8 MPa、30.9 MPa, 相比于没有玻璃纤维掺入的陶粒混凝土(1#)抗折强度为 5.24 MPa, 抗压强度为 28.65MPa, 综合力学性能分别提高 11.5%、22.5%、19%。

这可能是因为较小掺量时, 玻璃纤维可形成较为均匀分散的分布, 导致混凝土浆体内陶粒的分布更为均匀, 从而提升混凝土的抗折强度。随着纤维掺量的逐步提高, 纤维在混凝土内的分布变密集, 混凝土抗折强度出现提升[12][13]。玻璃纤维掺量较大时, 混凝土内纤维可能会出现簇状聚集, 抗折强度增加不明显。当加入的纤维量较多时, 部分纤维出现团聚现象, 聚集的纤维团一方面会影响其在混凝土中分布的均匀性, 增加混凝土内的空腔、孔隙等薄弱面, 另一方面减少控制混凝土浆体内粗骨料的分布的有效纤维量, 加之掺入的粉煤灰活性的综合影响, 导致混凝土抗压强度反而有所下降[14][15]。

4.4. 保温性能

Table 4. Insulation coefficient of sepiolite/glass fiber ceramsite concrete

表 4. 海泡石/玻璃纤维 - 陶粒混凝土保温系数

	1#	8#	11#	14#	17#	20#	23#
导热系数/W/(m·k)	0.25324	0.1630	0.1561	0.1432	0.1822	0.1631	0.1528

选取海泡石 - 陶粒混凝土(8#、11#、14#)、玻璃纤维 - 混凝土(17#、20#、23#)特征试样, 对其保温系数进行测试来研究混合料的掺入对陶粒混凝土保温性能的影响。试验结果见表 4, 相比于只有陶粒取代的混凝土试样(1#), 随着海泡石和玻璃纤维的加入, 陶粒混凝土的导热系数有所减小(海泡石 - 陶粒混凝土导热系数由 0.25324 W/(m·k)减小到 0.1432 W/(m·k); 玻璃纤维 - 混凝土导热系数由 0.25324 W/(m·k)减小到 0.1528 W/(m·k), 说明海泡石和玻璃纤维的加入可以增加陶粒混凝土的保温性能。同时, 可以发现海泡石 - 陶粒混凝土的保温性能比玻璃纤维 - 陶粒混凝土导热系数小, 保温性能更好。其中原因可能是陶粒本身就具有多孔的特点, 可提高整体结构的保温性能。海泡石是具有多孔的纤维材料, 它的加入, 吸收了浆体中大量的水分, 导致浆体和易性降低无法填充陶砂间的空隙, 且空气的导热系数要远远小于固体的导热系数, 所以保温性能更好[16][17]。

4.5. 吸声性能

Table 5. Sound absorption coefficient of sepiolite ceramsite concrete

表 5. 海泡石 - 陶粒混凝土吸声系数

频率/赫兹		10~80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500~16000	平均吸声系数
吸声系数	1#	0	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.1	0.1	0.45	0.85	0	0.1457
	8#	0	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.08	0.07	0.11	0.12	0.13	0.11	0.17	0.53	0.95	0	0.1807
	11#	0	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.13	0.13	0.15	0.15	0.2	0.57	0.98	0	0.1964
	14#	0	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	0.14	0.12	0.18	0.17	0.21	0.58	1.1	0	0.2135

Table 6. Sound absorption coefficient of glass fiber ceramsite concrete

表 6. 玻璃纤维 - 陶粒混凝土吸声系数

频率/赫兹		10~80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500~16000	平均吸声系数
吸声系数	1#	0	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.1	0.1	0.45	0.85	0	0.1457
	17#	0	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.08	0.07	0.1	0.1	0.12	0.11	0.15	0.51	0.91	0	0.1714
	20#	0	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.07	0.06	0.1	0.1	0.1	0.11	0.12	0.5	0.9	0	0.1642
	23#	0	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.09	0.08	0.09	0.1	0.11	0.48	0.89	0	0.1542

对选取的海泡石-陶粒混凝土(8#、11#、14#)、玻璃纤维-混凝土特征试样(17#、20#、23#)进行吸声性能的探究,以上表5、表6分别是两种陶粒混凝土的吸声系数测试结果。由试验结果可以看出,海泡石-陶粒混凝土的平均吸声系数要比玻璃纤维-混凝土大。随着海泡石的加入,试样吸声系数有所增大,而随着玻璃纤维增多,吸声系数有所减小,但相比于只有陶粒的混凝土试样,吸声系数都是有所增大。可能是由于海泡石是多孔纤维物质,且具有吸水性,同时陶粒混凝土内部孔隙较多,声波的能量被混凝土内部错综复杂的孔隙所消耗,因此吸声性能有所提升。而玻璃纤维几乎没有活性,且强度较海泡石高,可以填充海泡石水泥颗粒无法填充的微孔隙,使混凝土孔隙率降低,进而导致吸声系数有所降低[10][18]。

5. 结论

(1) 陶粒混凝土抗折强度、抗压强度都随陶粒取代率的增加先上升后下降,试验结果表明50%取代率的陶粒混凝土抗折强度、抗压强度更高,更加轻质高强。海泡石和玻璃纤维的掺入对陶粒混凝土的抗折抗压性能都有所提升,但过量掺入反而会带来一定的负面影响。

(2) 通过对特征样品进行导热系数测定,结果表明,陶粒和混合掺料的加入改善了混凝土的保温性能,导热系数减小。同样的对样品进行吸声性能测试,结果表明陶粒和混合料的加入可以增大试样的吸声系数。

参考文献

- [1] 穆龙飞, 冯竟竟, 杨进波, 等. 页岩陶粒粒径对混凝土强度及热工性能影响研究[J]. 混凝土, 2020(11): 52-56.
- [2] 赵飞洋, 乔思皓, 解培睿, 等. 多粒级粗骨料级配对粉煤灰陶粒混凝土性能影响研究[J]. 混凝土, 2022(8): 60-66.
- [3] 刘军, 董恒瑞, 秦砚瑶, 等. 结构陶粒自保温体系在建筑中的应用分析[J]. 重庆建筑, 2018, 17(7): 45-48.
- [4] 韩斌. 新型建筑材料在建设工程中的应用以及发展趋势[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(19): 152-154.
- [5] 辛转红, 杨再富, 凯乐, 等. 预制陶粒混凝土构件研发及应用[J]. 重庆建筑, 2024, 23(8): 56-59.
- [6] 谢刚. 轻质高强透水性混凝土的配制及性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(6): 25-28.
- [7] 戴慧平, 陈秋飞, 郭鹏宗, 等. 异形微型碳纤维复合材料对混凝土力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(10): 17-22.
- [8] 李梦娟. 陶粒性质及预处理对陶粒混凝土性能影响研究[J]. 北方建筑, 2024, 9(3): 104-108.
- [9] 曹喜. 分布系数对陶粒混凝土力学性能的影响[J]. 山西建筑, 2024, 50(24): 98-100+172.
- [10] 刘宇峰. 海泡石混凝土工作性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [11] 乔天龙. 海泡石对混凝土性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [12] 张延年, 郭晓钰, 王广林, 等. 玻璃纤维混凝土抗折性能及弯曲韧性试验研究[J]. 混凝土, 2024(1): 1-5.
- [13] 袁玉卿, 张亚静, 张业. 聚酯纤维陶粒混凝土性能试验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2024, 54(4): 498-504.
- [14] 唐都都. 纤维对混凝土力学性能影响研究进展[J]. 福建建材, 2024(7): 123-126.
- [15] 吴帅. PVA 纤维增强玻璃粉混凝土的强度特征和微观机理研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2024.
- [16] 孙一天. 轻骨料混凝土复合外墙板热工性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [17] 杨航, 戴绍斌, 李正学, 等. 页岩陶粒混凝土的制备与保温性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2022(4): 14-18.
- [18] 庚利民, 杜红秀, 聂小青, 等. 粉煤灰陶粒轻质混凝土声屏障性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(5): 1897-1905.