

纤维煤矸石基泡沫混凝土性能影响研究

王稷良^{1,2}, 杨宁^{1,2}, 岳志强³, 王永亮³

- (1. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 内蒙古交通集团有限公司项目管理分公司, 呼和浩特 010051)

摘要: 为探究纤维对于煤矸石基泡沫混凝土的改性作用, 对比研究了玻璃纤维、聚酯纤维、玄武岩纤维和聚丙烯纤维对煤矸石基泡沫混凝土工作性、抗压强度的影响。结果表明: 纤维质量掺量 0~0.8% 范围内, 泡沫混凝土的流动度随着聚酯纤维、玄武岩纤维和聚丙烯纤维的掺量增加而减小, 随着玻璃纤维的掺量增加先增大后减小; 纤维的加入能够显著提升泡沫混凝土的抗压强度, 其中玻璃纤维效果最佳, 在纤维掺量为 0.4% 时, 7、28 d 抗压强度分别提升 62.6%、32.6%; 另外, 泡沫混凝土孔隙率测量结果表明纤维可有效改善煤矸石基泡沫混凝土的匀质性, 但超过最佳掺量时, 会对泡沫混凝土的匀质性产生不利影响。

关键词: 煤矸石基泡沫混凝土; 纤维; 流动度; 抗压强度; 匀质性

中图分类号: TU528.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0007-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.002

Research the Influence of Fibers on the Workability and Compressive Strength of Coal Gangue Foam Concrete

WANG Jiliang^{1,2}, YANG Ning^{1,2}, YUE Zhiqiang³, WANG Yongliang³

- (1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

3. Inner Mongolia Transportation Group Co., Ltd., Project Management Branch, Hohhot 010051, China)

Abstract: To investigate the modification effects of fibers on coal gangue foam concrete, a comparative study was conducted on the influence of glass fiber, polyester fiber, basalt fiber, and polypropylene fiber on the workability and compressive strength of coal gangue foam concrete. The results indicate that within the fiber mass content range of 0 to 0.8%, the fluidity of the foamed concrete decreases with the increase in the content of polyester fiber, basalt fiber, and polypropylene fiber, while it first increases and then decreases with the increase in the content of glass fiber. The addition of fibers can significantly enhance the compressive strength of foamed concrete, with glass fiber showing the best effect. At a fiber content of 0.4%, the 7 day and 28 day compressive strengths are improved by 62.6% and 32.6%, respectively. Additionally, the porosity measurement results of the foamed concrete show that fibers can effectively improve the homogeneity of coal gangue foam concrete, but exceeding the optimal content can have an adverse effect on the homogeneity of the foamed concrete.

Key words: coal gangue foam concrete; fiber; fluidity; compressive strength; homogeneity

项目来源: 内蒙古自治区交通运输科技项目 (NJ-2022-13)。

作者简介: 王稷良 (1978—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 高性能水泥基材料。

通信作者: 杨宁 (1994—), 男, 硕士, 研究方向: 土木水利。

收稿日期: 2024-12-11

材料科学

0 引言

在全球能源需求不断增长的背景下,煤炭作为主要的能源之一,其开采量持续上升,而随之产生的煤矸石作为煤炭开采过程中的副产品,也日益成为环境与资源管理的重大挑战。煤矸石不仅占用大量土地,还可能引发地质灾害,对生态环境造成负面影响^[1-3]。因此,如何有效利用煤矸石,实现其资源化和环保化,已成为煤炭行业及环境科学领域亟待解决的关键问题。

近年来,泡沫混凝土作为一种新型的建筑材料,因其轻质、保温、隔音、防火等优良性能^[4-5],受到了广泛的关注。泡沫混凝土的基本原理是在混凝土中引入大量均匀分布的微小气泡,从而显著降低其密度,提高其保温隔热性能^[6-8]。将煤矸石替代部分水泥,制备泡沫混凝土,这不仅能够解决煤矸石的处理问题,还能降低泡沫混凝土的生产成本,提高其环保性能。煤矸石富含硅和铝相,可通过机械活化、热活化、化学活化等^[9]活化处理激发活性,与水泥水化产物发生二次水化反应。张林春等^[10]利用粉磨后的煤矸石制备泡沫混凝土,研究了粉磨时间对煤矸石活性和泡沫混凝土抗压强度的影响,结果表明随着粉磨时间的增长,煤矸石活性不断增加,泡沫混凝土抗压强度先增后减,在 75 min 时达到最大值;Hu 等^[11]研究了煤矸石的活化机理,研究发现煅烧温度对煤矸石活性的影响大于粉磨和煅烧时间,同时采用多种活化方式处理的煤矸石活性优于单一方式处理。虽然通过活化处理可以使煤矸石在泡沫混凝土中发挥更有效的作用,但是由于活化处理的工艺复杂,成本较高因此也可将煤矸石破碎筛分后作为细骨料直接使用^[12],由于经过破碎处理的煤矸石几乎没有活性,因此随着掺量的增加,泡沫混凝土强度会不断降低,同时混凝土内部气泡分布和材料的均匀性也会受到影响。匀质性不佳不仅会导致泡沫混凝土的强度和耐久性下降,还可能影响其保温隔热性能^[13]。为了解决这一问题,提出纤维增强技术,Mugahed 等^[14]研究了不同纤维对泡沫混凝土的影响,结果表明纤维可以有效增强混凝土抗压强度;Yildizel 等^[15]研究了纤维对泡沫混凝土孔结构的影响,结果表明纤维可以降低孔径,使泡沫混凝土

形成更致密的孔隙结构;袁志颖等^[16]分析和研究了泡沫混凝土的孔隙结构密度和抗压强度的影响,结果表明孔径越小,强度越高。

为进一步研究纤维对煤矸石基泡沫混凝土抗压强度和匀质性的影响规律,通过试验对不同纤维种类和掺量的煤矸石基泡沫混凝土的力学性能和匀质性进行对比,确定最佳纤维种类和掺量,为制备出性能更优、匀质性更好的煤矸石基泡沫混凝土提供参考。

1 原材料及试验

1.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥;煤矸石取自乌海某煤田未过火煤矸石,粒径小于 4.75 mm,细度模数 2.86,主要化学成分见表 1;发泡剂为 K12 十二烷基硫酸钠;稳泡剂为 HPMC 羟丙基甲基纤维素,10 万黏度;粉煤灰为 I 级 F 类粉煤灰,烧失量 2.0%,需水量 91%,安定性合格;矿粉为 S95 级矿粉,烧失量 0.8%,玻璃体含量 99%,28 d 活性指数 95%;纤维为玻璃纤维(GF)、聚酯纤维(PET)、玄武岩纤维(BF)、聚丙烯纤维(PP),纤维有关性能见表 2;水为饮用水。

表 1 煤矸石的化学成分

Table 1 Chemical composition of coal gangue /%								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MgO	f-Cao
43.6	32.68	13.68	3.59	2.17	1.83	0.58	0.26	—

表 2 纤维性能指标

Table 2 Fiber performance indexes							
纤维种类	长度/mm	直径/ μ m	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%	纤维种类	密度/(g/cm ³)
GF	6	15	3 400	82.4	2.5	单丝	2.53
PET	6	[16, 24]	550	13.5	[6.0, 12.0]	单丝	1.36
BF	6	17	3 200	100.0		单丝	3.17
PP	6	[18, 48]	>486	>4.8	>15.0	单丝	0.91

1.2 制备方法

将 K12 与水混合制备质量浓度为 0.8% 的发泡剂溶液,发泡倍数 33 倍。配制混合料时,首先将称取的水泥、HPMC、煤矸石、粉煤灰、矿粉在干燥状况下搅拌 1 min,接着加水再搅拌 1 min,搅拌成均匀的水泥浆后,捻散纤维,使其均匀分布在料浆中,继续拌和 3 min。采用物理发泡方式,利用发泡机制泡,称取定量的泡沫混入搅拌好的料浆中,

搅拌均匀后倒入 100 mm × 100 mm × 100 mm 的模具中，静置 48 h 脱模，并将试块放入标准养护室中养护至 28 d。

泡沫混凝土干密度等级为 900 kg/m³，煤矸石、粉煤灰、矿粉取代水泥的质量分别为 30%、20%、20%，水固比为 0.45，稳泡剂掺量为 0.08%（与固体材料质量比值），纤维掺量分别为 0.2%（与固体材料质量的比值，下同）、0.4%、0.6%、0.8%。同时设置一个不掺纤维的基准组。

1.3 性能测试

新拌泡沫混凝土的流动度测试按照 JGJ/T 341—2014《泡沫混凝土应用技术规程》的规定进行。

抗压强度测试按照 GB/T 43487—2023《泡沫混凝土及制品试验方法》规定进行，加荷速度为 0.5 kN/s。

沿泡沫混凝土浇筑面以下 20、50、80 mm 处水平切割上、中、下三层断面，用砂纸打磨光滑，而后用毛刷将断面清理干净，采用光学电子显微镜拍摄断面，每个断面选取三处位置进行拍摄，使用 Image J 图像处理软件分析处理拍摄的照片，断面孔隙率取三处位置的平均值。

2 结果与讨论

2.1 纤维对煤矸石基泡沫混凝土流动性的影响

由图 1 可知，随着玄武岩纤维掺量的增加，流动度逐渐降低，从对照组的 19.3 cm 降至 0.8% 掺量时的 17.1 cm。这表明玄武岩纤维对混凝土的流动性有抑制作用。随着玻璃纤维掺量的增加，流动度先增大后减小，在玻璃纤维掺量为 0.4% 时，流动度达到

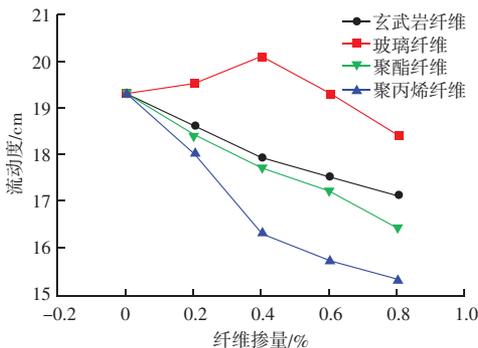


图 1 不同纤维对煤矸石基泡沫混凝土流动度的影响
Fig. 1 Influence of different fibers on fluidity of coal gangue based foamed concrete

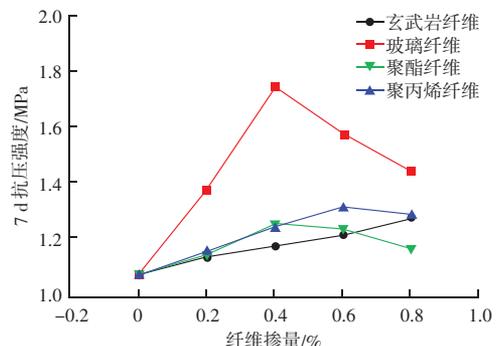
最大值 20.1 cm。这表明玻璃纤维在合适掺量下对混凝土流动性有轻微的改善作用。随着聚酯纤维掺量的增加，流动度逐渐降低，从对照组的 19.3 cm 降至 0.8% 掺量时的 16.4 cm。这表明聚酯纤维对混凝土的流动性也有抑制作用，但程度略低于玄武岩纤维。聚丙烯纤维对流动性的影响最为显著，随着掺量的增加，流动度大幅降低，从对照组的 19.3 cm 降至 0.8% 掺量时的 15.3 cm。这表明聚丙烯纤维对混凝土的流动性有较强的抑制作用。

2.2 纤维对煤矸石基泡沫混凝土抗压强度的影响

由图 2 可知，玻璃纤维和玄武岩纤维对于煤矸石基泡沫混凝土的抗压强度提升较为显著。玻璃纤维最优掺量为 0.4%，此时 7 d 强度为 1.74 MPa、28 d 强度为 2.89 MPa，相较于对照组 7 d 强度 1.07 MPa、28 d 强度 2.18 MPa 分别提升了 62.6%、32.6%。玄武岩纤维 7 d 强度随着纤维掺量的增加缓慢提升，掺量为 0.8% 时，强度为 1.27 MPa，与对照组相比强度提升 18.7%，而 28 d 强度则在掺量为 0.6% 时达到最大值 2.62 MPa，与对照组相比强度提升 20.2%，而后随着掺量增加，强度下降。

聚酯纤维和聚丙烯纤维对于强度的提升幅度较小，并且随着掺量的增加，7 d 强度和 28 d 强度都呈现先增加后减小的趋势。其中聚酯纤维的最佳掺量为 0.4%，此时 7 d 强度为 1.25 MPa、28 d 强度为 2.43 MPa，相较于对照组分别提升 16.8%、11.5%，聚丙烯纤维的最佳掺量为 0.6%，此时 7 d 强度为 1.31 MPa、28 d 强度为 2.37 MPa，相较于对照组分别提升 22.4%、8.7%。

四种纤维均能在一定程度上提高煤矸石基泡沫混凝土的抗压强度。其中，玻璃纤维表现出的增强效果最为显著，其次是玄武岩纤维和聚酯纤维，而聚丙烯纤维的效果最弱。



(a) 7 d 抗压强度

材料科学

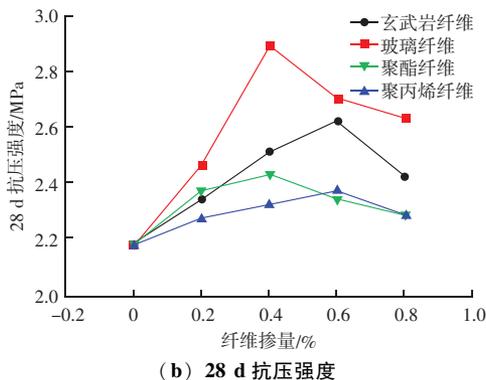
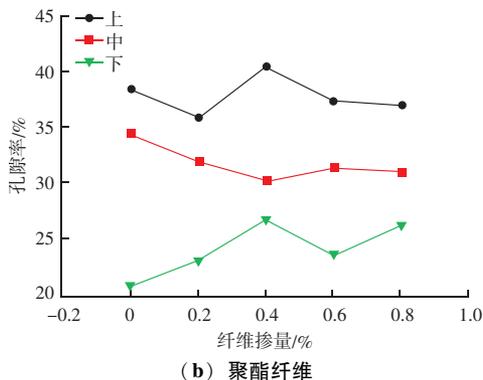
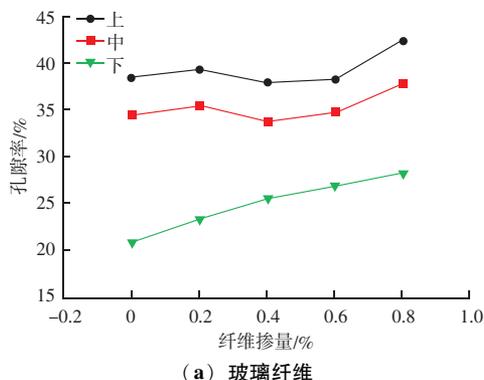


图2 不同纤维对煤矸石基泡沫混凝土抗压强度的影响
Fig. 2 Influence of different fibers on compressive strength of coal gangue based foamed concrete

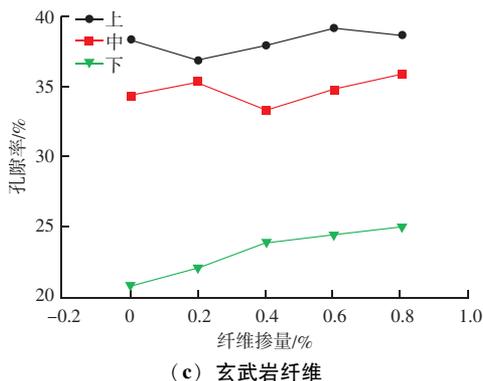
2.3 纤维对煤矸石基泡沫混凝土匀质性的影响

由图3可知,下层断面孔隙率随着四种纤维掺量的增加基本呈现上升的趋势,其中玻璃纤维和聚酯纤维的加入对下层孔隙率的影响较为显著。随着玻璃纤维掺量的增加,孔隙率呈上升趋势,当掺量从0增加到0.8%时,孔隙率从20.7%上升到28.1%。聚酯纤维掺量从0增加到0.8%时,孔隙率从20.7%上升到26.1%。玄武岩纤维的加入对孔隙率的影响相对较小。当掺量从0增加到0.8%时,孔隙率从20.7%上升到24.9%。聚丙烯纤维的加入对孔隙率的影响较为复杂。当掺量为0.2%时,孔隙率低于未掺纤维的对照组孔隙率20.1%,但随着掺量增加,孔隙率逐渐上升,到0.8%时达到25.7%。

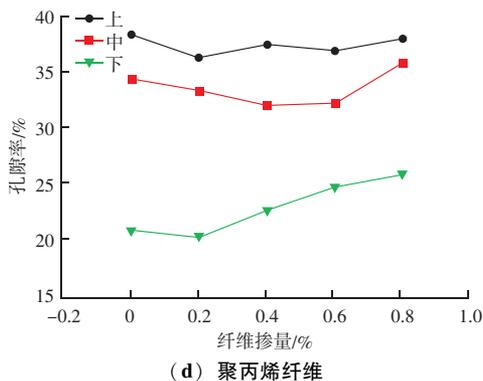
上、中层的孔隙率随着纤维掺量的增加,孔隙率相对变化较小,原因可能是纤维的掺入虽然能抑制上、中层大颗粒煤矸石的沉降,使得孔隙率降低,但同时纤维能够提高泡沫混凝土的料浆稳定性,并且减小泡沫孔径,改善孔形貌,从而提高泡沫稳定性,减少泡沫破裂,使得孔隙率升高。因此在这两种因素的作用下,上、中层的孔隙率没有明显的变化趋势。



(b) 聚酯纤维



(c) 玄武岩纤维



(d) 聚丙烯纤维

图3 不同纤维对不同断面孔隙率的影响
Fig. 3 Influence of different fibers on porosity of different sections

由图4可知,聚酯纤维对于改善煤矸石基泡沫混凝土的匀质性效果最佳。未掺纤维的对照组孔隙率标准差为9.22,掺入聚酯纤维的孔隙率标准差整体呈下降趋势,掺量为0.8%时为最小值5.36,相较于对照组下降了41.8%。掺入玻璃纤维、玄武岩纤维和聚丙烯纤维的孔隙率标准差均呈先降后升的趋势,其中玻璃纤维在掺量为0.6%时达到最小值5.78,相较于对照组下降了37.3%,玄武岩纤维掺量为0.4%时达到最小值7.18,相较于对照组下降了22.1%,聚丙烯纤维掺量为0.6%时达到最小值6.15,相较于对照组下降了33.3%。

纤维可有效改善煤矸石基泡沫混凝土的匀质

性。对于匀质性的改善效果顺序为聚酯纤维 > 玻璃纤维 > 聚丙烯纤维 > 玄武岩纤维，其中聚酯纤维掺量为 0.8% 时改善匀质性效果最佳。

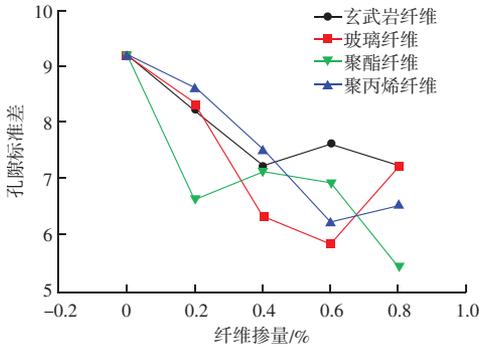


图4 纤维掺量对孔隙率标准差的影响

Fig. 4 Influence of fiber content on standard deviation of porosity

对比图1不同纤维种类和掺量对于强度的影响可以发现，提升抗压强度的最佳掺量和改善匀质性的最佳掺量不一定相同，例如聚酯纤维 28 d 抗压强度最佳掺量为 0.4%，而改善匀质性的最佳掺量为 0.8%，这是因为随着纤维掺量的增加，纤维在泡沫混凝土中形成更加完整稳定的三维网状结构，能有效阻止大颗粒煤矸石的沉降和气泡的上升，但同时可能会导致纤维的团聚，这不仅降低了纤维对于强度的增强效果，还可能成为混凝土内部的弱点，此外纤维所形成的三维网状结构可能会干扰水泥浆体的正常流动和充填，导致混凝土内部形成更多的孔隙或者空隙，这些缺陷区域的存在削弱了混凝土的整体承载能力，从而导致强度下降。

3 结论

通过研究不同纤维（玄武岩纤维、玻璃纤维、聚酯纤维和聚丙烯纤维）掺量对煤矸石基泡沫混凝土性能的影响，主要结论如下：

(1) 纤维的加入总体上降低了泡沫混凝土的流动性。其中，聚丙烯纤维对流动性的抑制作用最为显著，玄武岩纤维和聚酯纤维次之，而玻璃纤维在低掺量时对流动性有轻微改善作用，但随着掺量增加，流动度仍呈下降趋势。

(2) 纤维能在一定程度上提高泡沫混凝土的抗压强度，其中玻璃纤维的增强效果最为显著，玻璃纤维在掺量为 0.4% 时，7、28 d 强度分别提升了 62.6%、32.6%。

(3) 纤维可有效改善煤矸石基泡沫混凝土的匀质性。其中聚酯纤维掺量为 0.8% 时改善匀质性效果最佳。同时纤维提升抗压强度和改善匀质性的最佳掺量存在明显差异。

参 考 文 献

- [1] ZHENG Q, ZHOU Y, LIU X, et al. Environmental hazards and comprehensive utilization of solid waste coal gangue [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2024, 34 (2): 223 - 239.
- [2] 李静, 温鹏飞, 何振嘉. 煤矸石的危害性及综合利用的研究进展 [J]. 煤矿机械, 2017, 38 (11): 128 - 130.
- [3] 李启辉. 煤矸石的性质及综合利用研究进展 [J]. 应用化工, 2023, 52 (5): 1576 - 1581.
- [4] 宋强, 邹颖杰, 张鹏, 等. 泡沫混凝土气泡性能与基体材料研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2024, 52 (2): 706 - 724.
- [5] 胡宝春, 付春雨, 李珊珊. 高性能泡沫混凝土的制备及性能研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (2): 2181 - 2186, 2200.
- [6] 朱兴一, 张启航, 于越, 等. 基于离散元的 EMAS 泡沫混凝土贯入力学性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (2): 122 - 128.
- [7] 关蕾蕾, 陈永贵, 叶为民, 等. 泡沫混凝土收缩及其抑制方法研究进展 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (3): 32 - 43.
- [8] 王小娟, 崔浩儒, 周宏元, 等. 玄武岩纤维增强泡沫混凝土的单轴拉伸及准静态压缩性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40 (3): 1569 - 1585.
- [9] 贾建慧, 马宁, 董阳, 等. 煤矸石综合利用研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30 (增刊1): 36 - 45.
- [10] 张林春, 张爱莲, 王倩, 等. 掺煤矸石泡沫混凝土制备及力学性能 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (9): 2800 - 2806.
- [11] HU Y, HAN X, SUN Z, et al. Study on the Reactivity Activation of Coal Gangue for Efficient Utilization [J]. Materials, 2023, 16 (18): 6321 - 6321.
- [12] 张欣, 周海兵, 陈飞宇, 等. 充填用煤矸石泡沫混凝土的制备与性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34 (6): 1470 - 1474.
- [13] 谢洪阳, 戴宜文, 董建军, 等. 不同因素对泡沫混凝土性能的影响 [J]. 中国粉体技术, 2023, 29 (4): 120 - 129.
- [14] MUGAHED A, ROMAN F, NIKOLAI V, et al. Fibre - Reinforced Foamed Concretes; A Review [J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13 (19): 4323 - 4323.
- [15] YILDIZEL A S, ACIK M, KAPLAN G, et al. Enhancing foam concrete; A comparative analysis of PLA + fiber reinforcements with plain, hooked, and corrugated fibers [J]. Construction and Building Materials, 2024, 443137807 - 137807.
- [16] 袁志颖, 陈波, 陈家林, 等. 泡沫混凝土孔结构表征及其对力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40 (7): 4117 - 4127.