

铁尾砂泡沫混凝土的制备及性能

朱利平, 杜晓丽, 邹天民

(安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 以铁尾砂为细骨料, 采用不同掺量的铁尾砂取代天然砂制备目标密度为 900 kg/m^3 的铁尾砂泡沫混凝土试件, 分析铁尾砂掺量对试件干燥收缩率、吸水率、导热系数、抗压强度、劈裂抗拉强度等性能的影响; 并采用扫描电镜及图象分析软件分析试件的微观形貌。结果表明: 铁尾砂掺量(质量分数)在 0~40% 范围内, 随铁尾砂掺量的增加, 泡沫混凝土的干燥收缩率和吸水率下降, 导热系数略有增加; 泡沫混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度呈先增后减的趋势, 铁尾砂掺量 20% 时抗压和劈裂抗拉强度最高; 掺入适量的铁尾砂可改善泡沫混凝土的孔结构, 内部孔径趋向均匀, 铁尾砂质量分数超过 20% 时泡沫混凝土的微观结构劣化, 这也是导致其力学性能开始下降的原因。

关键词: 泡沫混凝土; 铁尾砂; 抗压强度; 干燥收缩率; 导热系数

中图分类号: TU 528 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23088



Preparation and Properties of Foamed Concrete with Iron Tailings Sand

ZHU Liping, DU Xiaoli, ZOU Tianmin

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Iron tailings sand was used as fine aggregate, and different dosages of iron tailings sand were used to replace natural sand to prepare foam concrete specimens with a target density of 900 kg/m^3 , and the effects of iron tailings sand dosage on the specimens' properties such as drying shrinkage, water absorption, thermal conductivity, compressive strength and splitting tensile strength were analyzed; and scanning electron microscope and graphic analyzing software were also used to analyze the microscopic morphology of the specimens. The results show that the iron tailings sand mixing (mass fraction) in the range of 0–40%, with the increase of iron tailings sand mixing, the drying shrinkage and water absorption of foam concrete decreases, the thermal conductivity increases slightly. The foam concrete compressive strength and splitting tensile strength show a trend of increasing first and then decreasing, and the highest compressive and splitting tensile strength is observed when iron tail sand mixing is 20%. The pore structure of foam concrete can be improved by adding appropriate amount of iron tailings sand, and the internal pore size tends to be uniform, and the microstructure of foam concrete deteriorates when the mass fraction of iron tailings sand is more than 20%, which is also the reason why its mechanical properties begin to decline.

Keywords: foam concrete; iron tailings sand; compressive strength; drying shrinkage; thermal conductivity

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52074005)

作者简介: 朱利平 (1998—), 女, 河南三门峡人, 硕士生, 主要研究方向为泡沫混凝土。

通信作者: 杜晓丽 (1977—), 女, 山东沂南人, 博士, 讲师, 主要研究方向为岩土、混凝土。

引文格式: 朱利平, 杜晓丽, 邹天民. 铁尾砂泡沫混凝土的制备及性能 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(1):81-

泡沫混凝土是一种轻质多孔建筑材料,相比传统混凝土,具有保温隔热性能好、抗震性能好、易加工等优点,广泛用于路堤的填筑、寒冷地区道路的隔热层^[1]、隧道空隙的填充^[2]、建筑外墙^[3]、基坑回填^[4]等工程中。泡沫混凝土的密度一般为300~1 800 kg/m³,其中密度为600~1 200 kg/m³泡沫混凝土的应用较为广泛。天然砂是泡沫混凝土的细骨料,也是泡沫混凝土重要的组成成分,随着泡沫混凝土需求量的增加,天然砂的消耗加剧^[5]。过度采砂会导致水质恶化、地下水位下降等问题,急需寻找能够代替天然砂的其他细骨料。铁尾矿是铁矿石精炼、磨矿、分选后剩余的固体废弃物,粒径小于4.75 mm的铁尾矿称铁尾砂,铁尾砂长期堆放不仅占用土地,还会污染环境^[6-8]。因此,将铁尾砂用于泡沫混凝土可实现废物再利用,对可持续发展具有重要意义。

铁尾砂的晶体结构稳定^[9-11],已有学者研究将铁尾砂作为混凝土细骨料的替代品制备混凝土。Hou等^[12]研究表明,将细度在2.2~3.0间的天然砂和铁尾砂配制的混合砂用于制备混凝土,混凝土的抗压强度得到提升;Liu等^[13]发现机械研磨后铁尾砂的比表面积增加,火山灰活性增加,制备的砂浆强度增加,干燥收缩率降低;Latif等^[14]研究表明,铁尾砂可提高混凝土基体的密度,改善混凝土的耐久性能;陶亚平等^[15]制备铁尾矿砂取代率为0, 25%, 50%, 75%和100%(质量分数)的再生混凝土,混凝土力学性能随着铁尾砂掺量增加呈先增后减的趋势;Zhu等^[16]以铁尾砂为细骨料,与不同再生集料置换率配制混凝土,其均表现出良好的力学性能;秦毅^[17]等将铁尾砂代替泡沫混凝土中的细骨料,掺入小粒径铁尾砂制备的泡沫混凝土的抗冻性能得到有效提升。综上所述表明铁尾砂在混凝土生产中的潜力巨大,但是目前关于铁尾砂对泡沫混凝土性能影响的研究较少。

为此,以铁尾砂为细骨料,采用不同取代量的铁尾砂制备目标密度为900 kg/m³铁尾砂泡沫混凝土,研究铁尾砂掺量对泡沫混凝土干燥收缩率、吸水率、导热系数、抗压强度等综合性能的影响,分析铁尾砂泡沫混凝土的微观结构,为铁尾矿砂在泡沫混凝土中的进一步应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 材料

水泥为淮南八公山牌42.5普通硅酸盐水泥;黏

结剂为I级粉煤灰,化学成分见表1;发泡剂为蛋白质基发泡剂,密度为1.03 g/cm³,发泡倍数为20倍,稀释倍数为25倍,泡沫密度为60 kg/m³;细骨料包括天然砂和铁尾砂,天然砂为淮河中砂,铁尾砂为淮南某铁矿生产的尾矿砂,2种细骨料的物理性质见表2,铁尾砂的X射线衍射图谱见图1。由表2可知,与天然砂相比,铁尾砂颗粒更细,吸水率更高。图1表明铁尾砂是一种典型的高硅石英基尾矿,主要晶相为石英、硅灰石、赤铁矿和伊利石;二氧化硅、铁等含量较高,具有作为胶凝材料的潜质。

表1 水泥和粉煤灰的化学成分 w/%

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	其他
水泥	21.84	4.73	64.14	2.56	0.30	3.45	0.86	2.12
粉煤灰	53.04	34.70	2.32	0.86	0.48	4.91	1.17	2.52

表2 细骨料的物理性质

Tab. 2 Physical properties of fine aggregates

细骨料	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	细度 模数	破碎 指数/%	吸水 率/%
天然砂	2 650	1 360	2.4	11	1.62
铁尾砂	2 770	1 480	1.6	5	2.30

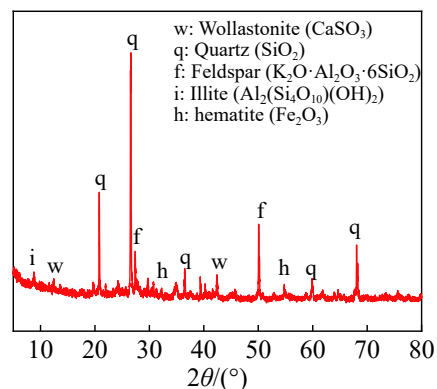


图1 铁尾砂的X射线衍射图谱

Fig. 1 XRD pattern of iron tailings sand

1.2 试验过程

制备5批泡沫混凝土,粉煤灰添加量为水泥质量的15%,铁尾砂的质量分数(在细骨料中质量占比)分别为0, 10%, 20%, 30%和40%,铁尾砂粒径较细、比表面积较大,为保证泡沫混凝土的流动性,通过微调w/b(水胶比)实现浆体均匀铺展,试验配比见表3。按表3的配比称取铁尾砂、天然砂、水泥和粉煤灰等原料,并放入搅拌机干拌2 min,加水混合后再搅拌2 min得到混合浆体。将发泡剂与水按质量比1:20混合后加入发泡剂制备出密度为60 kg/m³

的泡沫。将制备的泡沫加入混合浆体搅拌均匀, 浇筑到 100 mm×100 mm×100 mm 的涂油模具, 24 h 后

脱模, 制得不同铁尾砂掺量的泡沫混凝土试件。各组试件的实际密度见表 3。

表 3 试验配合比

Tab. 3 Mixture proportions

编号	铁尾砂/ (kg·m ⁻³)	天然砂/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	水/ (kg·m ⁻³)	w/b	发泡剂/ (kg·m ⁻³)	实际密度/ (kg·m ⁻³)
A ₀	0	288.9	427.8	64.2	221.40	0.450	5.6	896
A ₁	28.8	261.1	427.8	64.2	221.40	0.454	5.6	895
A ₂	57.8	231.1	427.8	64.2	221.42	0.458	5.6	898
A ₃	86.7	202.2	427.8	64.2	221.43	0.462	5.6	895
A ₄	115.6	173.3	427.8	64.2	221.43	0.464	5.6	899

将制得的试件在标准养护条件下 (相对湿度 ≥ 95%, 温度为 (20±2) °C) 养护至不同龄期后, 依据 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》测试试件的干燥收缩率、吸水率、导热系数、抗压强度和劈裂抗拉强度, 依据 GB/T 10294—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定防护热板法》测试试件的导热系数, 采用扫描电镜 (国仪量子 5000) 和图像分析软件分析试件的微观结构。

2 结果与分析

2.1 干燥收缩率

干燥收缩会影响泡沫混凝土的耐久性能, 泡沫混凝土的干燥收缩主要来自毛细孔失水引起的收缩应力^[18]。不同铁尾砂掺量的泡沫混凝土试件的干燥收缩率如图 2。

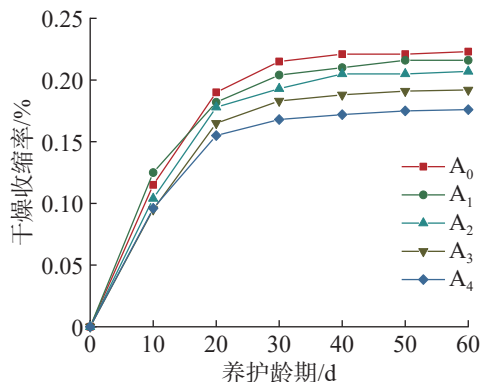


图2 铁尾砂掺量对不同龄期泡沫混凝土试件干燥收缩率的影响

Fig. 2 Effect of iron tailings sand admixture on the drying shrinkage rate of foam concrete specimens at different ages

由图 2 可知: 养护初期, 不同掺量铁尾砂泡沫混凝土试件的干燥收缩率随养护龄期的延长呈线性增加; 养护 30 d 后, 试件的干燥收缩率均逐渐稳定。铁尾砂的掺入对泡沫混凝土养护早期干燥收缩率的影响并不明显, 但随着养护龄期的延长, 相对于未掺

铁尾砂的泡沫混凝土试件, 掺入铁尾砂的泡沫混凝土试件的干燥收缩率明显降低, 且干燥收缩率降幅随铁尾砂掺量增加而增大, 养护 60 d 时, 10% 铁尾砂掺量试件的干燥收缩率为 0.216%, 40% 铁尾砂掺量试件的干燥收缩率为 0.176%。这是由于铁尾砂更细, 使得泡沫混凝土孔径减小, 填充部分孔隙, 并优化了孔隙结构, 从而减缓收缩。这与 Feng 等^[19] 的研究结果一致。

2.2 吸水率

吸水率是衡量混凝土耐久性的一项重要指标。不同掺量铁尾砂泡沫混凝土试件在 7, 28, 56 d 时的吸水率如图 3。

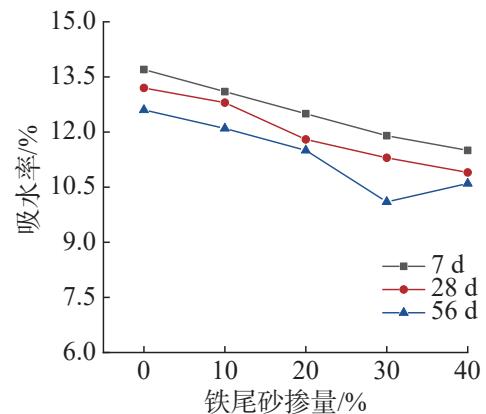


图3 铁尾砂掺量对不同龄期泡沫混凝土试件吸水率的影响
Fig. 3 Effect of iron tailings sand admixture on water absorption of foam concrete specimens at different ages

由图 3 可知: 随着养护龄期的增加, 不同铁尾砂掺量试件的吸水率均有所降低, 主要是由于养护时产生的火山灰和水化产物填充了泡沫混凝土基体内部孔隙。相对于养护龄期为 7 d, 养护龄期 56 d 时, A₀, A₁, A₂, A₃ 和 A₄ 的吸水性能分别降低了 10.4%, 7.3%, 7.6%, 15.9% 和 7.8%。养护龄期 56 d 时, A₄ 的吸水率相对于 A₁ 降低了 16.7%。随铁尾砂掺量的增加, 试件的吸水率总体呈下降趋势。主要是因为

铁尾砂中的氧化物和金属离子与水化反应产生的氢氧化钙进行二次化学反应,产生的化学物质会充填在孔隙中,使得混凝土内部原有孔隙被充填,使得孔隙数量、直径和连通性减少,最终使得混凝土的吸水率下降^[20]。

2.3 导热系数

导热系数是衡量材料导热性能的指标,养护龄期为 28 d,不同铁尾砂掺量试件的导热系数如图 4。从图 4 可看出:铁尾砂掺量在 0~40% 范围内,随铁尾砂掺量增加,试件导热系数增加;相较于 A_0 试件, A_1 , A_2 , A_3 和 A_4 试件的导热系数分别增加了 1.4%, 6.0%, 13.3% 和 16.5%。这是由于随着铁尾砂的增加,泡沫混凝土内部孔隙直径减小及气孔数量减少,泡沫混凝土内部更密实,导热系数升高。但由于各组试件的密度相似,其导热系数差异不大。

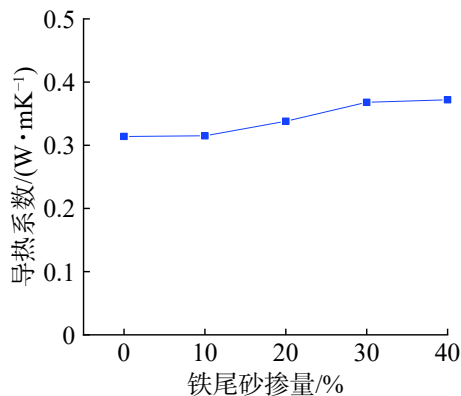


图4 铁尾砂掺量对泡沫混凝土试件导热系数的影响

Fig. 4 Effect of iron tailings sand admixture on thermal conductivity

2.4 抗压强度

养护龄期为 7, 28, 56 d 时,不同铁尾砂掺量的泡沫混凝土试件的抗压强度如图 5。由图 5 可知:铁尾砂泡沫混凝土试件的抗压强度均高于普通泡沫混凝土,由于水泥水化作用使泡沫混凝土的抗压强度随铁尾砂掺量的增加而增加;试件抗压强度随养护龄期的增加而增加,与养护龄期为 28 d 相比,养护 56 d 时, A_0 , A_1 , A_2 , A_3 和 A_4 抗压强度分别增加了 12.1%, 9.7%, 21.5%, 14.8% 和 13.3%, 养护期越长铁尾砂对泡沫混凝土抗压强度的改善越显著,这是因为铁尾砂的活性较低,水化需要的时间更长。

由图 5 还可看出:随铁尾砂掺量增加,不同养护龄期试件的抗压强度均呈先增后降的趋势;铁尾砂掺量为 20% 时试件的抗压强度最高。抗压强度增加一方面归因于较细的铁尾砂颗粒填充了孔隙,优化了孔隙结构,另一方面可能是水泥水化过程中产生的多余的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与铁尾砂进行二次反应,产生

水化硅酸盐凝胶增加了泡沫混凝土强度^[21]。铁尾砂掺量超过 20% 之后,泡沫混凝土强度逐渐降低。这是由于过多铁尾砂使泡沫混凝土内部骨料之间的黏结度下降,从而导致其抗压强度降低,秦毅等^[17]也观察到类似的趋势。

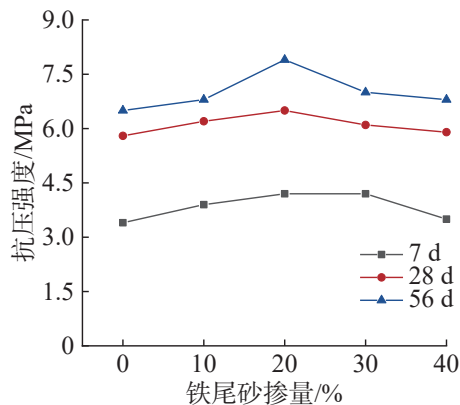


图5 铁尾砂掺量对不同龄期泡沫混凝土试件抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of iron tailings sand admixture on compressive strength of foam concrete specimens at different ages

综上所述铁尾砂的加入可提高泡沫混凝土的抗压强度。依据 JG/T 26—2011《泡沫混凝土》,密度为 900 kg/m^3 泡沫混凝土的抗压强度应大于 2.5 MPa,本试验制作的泡沫混凝土试件满足强度要求。

2.5 劈裂抗拉强度

不同掺量的铁尾砂泡沫混凝土试件的劈裂抗拉强度如图 6。

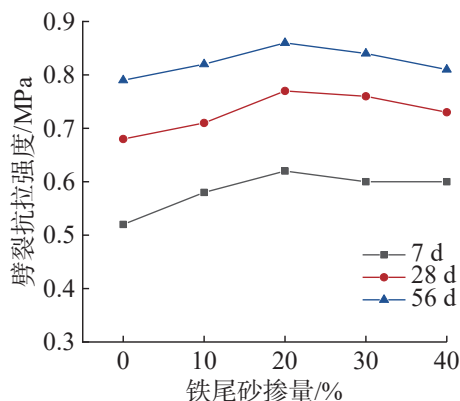


图6 铁尾砂掺量对不同龄期泡沫混凝土试件劈裂抗拉强度的影响

Fig. 6 Effect of iron tailings sand admixture on splitting tensile strength of foam concrete specimens at different ages

由图 6 可知:随养护龄期的增加,不同铁尾砂掺量试件的劈裂抗拉强度逐渐提高,这是由于水化产物逐渐增加所致;与普通泡沫混凝土相比,铁尾砂泡

沫混凝土试件的劈裂抗拉强度均有不同程度的提高, 与抗压强度的趋势相似, 随铁尾砂含量的增加, 泡沫混凝土的劈裂抗拉强度先增大后减小, 其中 20% 掺量的铁尾砂泡沫混凝土的强度最高。养护龄期第 7, 28, 56 d 时, A₂ 的劈裂抗拉强度分别比 A₀ 提高了 10.8%, 13.7%, 16.7%。这是由于泡沫混凝土内部结构的改善所导致的。

2.6 微观结构

不同铁尾砂掺量泡沫混凝土试件的 SEM

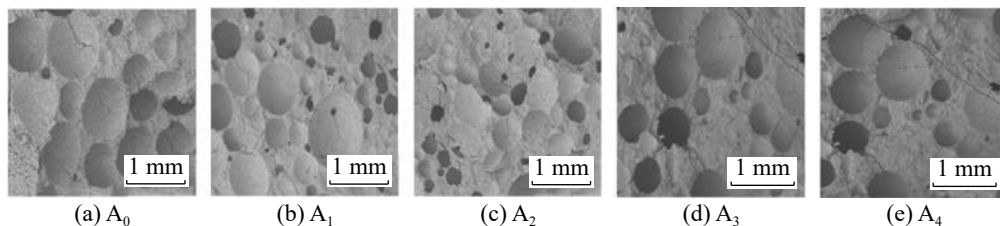


图7 不同铁尾砂掺量泡沫混凝土的 SEM 图

Fig. 7 SEM images of foam concrete with different iron tailings sand admixtures

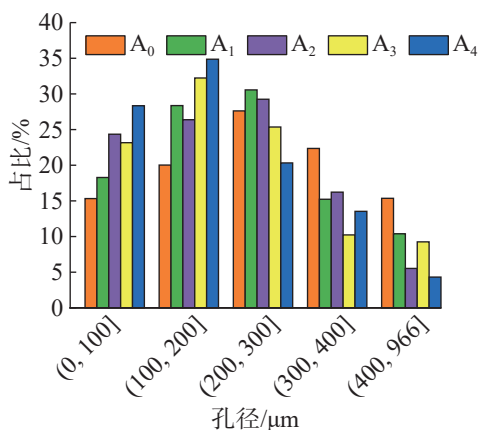


图8 不同掺量铁尾砂泡沫混凝土试件孔径分布

Fig. 8 Pore size distribution of foam concrete specimens with different content of iron tailings sand

表 4 泡沫混凝土试样孔结构参数

Tab. 4 Pore structure parameters of foam concrete specimens

编号	最大孔径/μm	最小孔径/μm	平均孔径/μm
A ₀	965.32	62.35	276.33
A ₁	863.24	35.26	196.28
A ₂	786.35	39.65	198.26
A ₃	943.59	58.56	180.29
A ₄	864.59	42.52	140.21

由图 8 可看出: 铁尾砂掺量从 10% 增至 40% 时, 试件孔径 < 100 μm 气孔的占比由 18.28% 增至 28.34%; 掺量从 0 增至 40% 时, 试件孔径 > 400 μm 气孔的占比由 15.36% 降至 4.32%; 试件 A₀, A₁, A₂, A₃, A₄ 气孔孔径为 100~200 μm 的占比分别为 20.02%, 28.37%, 26.38%, 32.24%, 34.87%。这是因为相对于

(scanning electron microscope) 如图 7, 孔径分布如图 8, 孔结构参数如表 4。由图 7 可看出: 随着铁尾砂掺量的增加, 泡沫混凝土内小气孔数量增加, 大气孔数量减少, 气孔孔径分布趋向均匀, 内部结构得到改善, 从而降低了泡沫混凝土的干燥收缩率和吸水率, 提高了抗压和劈裂抗拉强度。但随着铁尾砂掺量继续增加, 泡沫混凝土内部结构逐渐劣化, 气孔孔径分布逐渐分散, 泡沫混凝土的强度降低, 泡沫混凝土的性能逐渐衰退。

天然砂, 铁尾砂比表面积更大, 需更多的浆体来包裹, 固化气泡作用的浆体更少, 搅拌时在表面张力作用下气泡更易破裂。铁尾砂颗粒较细, 掺入浆体后浆体内部黏结度增加, 浆体中水泥颗粒之间的内摩擦力增大, 颗粒之间引力增强, 破裂的气泡比例升高, 小气泡较多、大气泡较少。由表 4 可看出, 随铁尾砂掺量的增加, 平均孔径和最小孔径逐渐减小, 这是由于铁尾砂填充了部分孔隙, 使泡沫混凝土孔径尺寸减小。由此可看出: 加入铁尾砂可使泡沫混凝土内部孔径更趋向均匀, 铁尾砂的掺入可改善泡沫混凝土的孔结构。

3 结论

以铁尾砂作为细骨料制备目标密度为 900 kg/m³ 泡沫混凝土, 探究铁尾砂掺量对泡沫混凝土性能的影响, 并对其进行微观分析, 得到以下主要结论:

- 1) 随着铁尾砂掺量增加 (0~40%), 泡沫混凝土的干燥收缩率和吸水率下降, 导热系数略有增加。
- 2) 随着铁尾砂掺量增加, 泡沫混凝土的抗压和劈裂抗拉强度呈先增后减趋势, 20% 铁尾砂掺量泡沫混凝土的抗压和劈裂抗拉强度最高。
- 3) 掺入适量的铁尾砂可改善泡沫混凝土的孔结构, 提高泡沫混凝土的力学性能, 掺入质量分数为 20% 铁尾砂的泡沫混凝土气孔分布和气孔尺寸较优, 表现出了最优的微观结构。

参考文献:

[1] 张玉琢, 马洁, 刘海卿. 铁尾矿砂混凝土路用性能试验

- 研究[J]. 混凝土, 2018(12):157-160.
- [2] MA X S, LI C B, CHEN H Y, et al. Research on the improving performance of foam concrete applied to the filling of natural gas pipeline cross-river tunnel[J]. *Materials*, 2022, 15(21):7461.
- [3] 刘超, 罗健林, 李秋义, 等. 泡沫混凝土的生产现状及未来发展趋势[J]. 现代化工, 2018, 38(9):10-14,16.
- [4] 雷东移, 郭丽萍, 刘加平, 等. 泡沫混凝土的研究与应用现状[J]. 功能材料, 2017, 48(11):11037-11042,11053.
- [5] OSMAN G, MIRAC O, ALIAKBAR G, et al. Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38.
- [6] FENG Y, LI F, QI W, et al. Mechanical properties and microstructure of iron tailings cemented paste backfills using carbide slag-activated ground granulated blast-furnace slag as alternative binder[J]. *Minerals*, 2022, 12(12): 1549-1549.
- [7] 王晶. 铁尾矿在国内外道路工程中的应用[J]. 环境与发 展, 2014(7):51-55.
- [8] FEI J, CHEN X. Study on basic mechanical properties of iron ore tailings green concrete[J]. *Agro Food Industry Technology*, 2017, 28(5):390-394.
- [9] ZUCCHERATTE A C V, FREIRE C B, LAMEIRAS F S. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethyltherephtalate[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151:859-865.
- [10] LIU J, ZHOU Y, WU A, et al. Reconstruction of broken Si—O—Si bonds in iron ore tailings (IOTs) in concrete[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2019, 26:1329-1336.
- [11] CARRASCO E V M, MAGALHAES M D C, SANTOS W J D, et al. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131:31-38.
- [12] HOU Y F. Effect of iron tailing sand and natural sand on concrete properties[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 3019:599.
- [13] LIU B, MENG H N, PAN G H, et al. Relationship between the fineness and specific surface area of iron tailing powder and its effect on compressive strength and drying shrinkage of cement composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 357.
- [14] LATIF S A B D, RAHMAN M S A M A. Sorptivity of concrete containing iron ore tailings[J]. *Romanian Journal of Materials*, 2017, 47(3):336-344.
- [15] 陶亚平, 赖天文, 等. 铁尾矿砂再生混凝土的力学及耐久性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54(3):3143-3148.
- [16] ZHU Q, YUAN Y X, CHEN J H. Research on the high-temperature resistance of recycled aggregate concrete with iron tailing sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 327:126889.
- [17] 秦毅. 铁尾矿砂对泡沫混凝土力学性质和微观结构的影响[J]. 中国测试, 2022, 48(6):134-142.
- [18] WAN K T, ZHU H, YUEN T Y P, et al. Development of low drying shrinkage foamed concrete and hygro-mechanical finite element model for prefabricated building façade applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165:939-957.
- [19] FENG X X, XI X L, CAI J W, et al. Investigation of drying shrinkage of concrete prepared with iron mine tailings[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 477:37-41.
- [20] 程和平, 陆璐. 铁尾矿砂掺量对混凝土力学性能、耐久性及水化特性的影响研究[J]. 金属矿山, 2021, 50(11): 215-220.
- [21] ELINWA A U, MAICHIBI J E. Evaluation of the iron ore tailings from Itakpe in Nigeria as concrete material[J]. *Advances in Materials*, 2014, 3(4):27.

责任编辑: 闫芳芳