

沥青拌和站回收粉制备泡沫混凝土的性能研究

徐勤敏, 朱亚光*, 徐培蓁

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 回收粉是沥青拌和站除尘系统回收的粉尘, 粒度较细可以作为掺和料应用于泡沫混凝土。采用复合掺和料(粉煤灰: 硅灰=1: 1)制备 A06 干密度等级的泡沫混凝土基准组, 选取粒径集中于 6~40 μm 的回收粉以 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 的比例取代复合掺和料制备泡沫混凝土, 并对其物理性能进行试验研究。结果表明, 回收粉可以作为掺和料应用于泡沫混凝土, 当回收粉掺量为 20% 时, 泡沫混凝土的干密度等级仍为 A06, 流动性、抗压强度、导热系数和吸水率分别为 109.5 mm, 5.46 MPa, 0.1392 W/(m·K) 和 35.88%, 性能指标优于基准组泡沫混凝土。

关键词: 泡沫混凝土; 回收粉; 干密度; 抗压强度

中图分类号: TU528.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)01-0059-07

Study on the properties of foam concrete prepared with recycled powder from asphalt mixing station

XU Qinmin, ZHU Yaguang*, XU Peizhen

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The recycled powder is the dust recovered from the dust removal system of asphalt mixing station and can be used as an admixture in foam concrete due to its small particle size. In this study, the composite admixture (fly ash : silica fume = 1 : 1) was used to prepare the benchmark group of foam concrete with A06 dry density grade, the recycled powder with particle sizes of 6-40 μm was selected to replace the composite admixture at proportions of 0%, 20%, 40%, 60%, 80% and 100% to prepare foam concrete, and the physical properties were studied experimentally. The results show that the recycled powder can be used as an admixture in the foam concrete, and when the recycled powder admixture is 20%, the dry density grade of foam concrete is still A06, the fluidity, compressive strength, thermal conductivity and water absorption of foam concrete are 109.5 mm, 5.46 MPa, 0.1392 W/(m·K) and 35.88% respectively, the performance indexes are better than those of foam concrete of the benchmark group.

Key words: foam concrete; recycled powder; dry density; compressive strength

收稿日期: 2022-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878365)

作者简介: 徐勤敏(1997-), 女, 山东蒙阴人。硕士, 研究方向为固废资源化利用。E-mail: 359237430@qq.com。

* 通信作者: 朱亚光(1974-), 男, 吉林洮安人。博士, 副教授, 主要从事固废资源化利用方面的研究。E-mail: zygd@sina.com。

随着国家经济的快速发展,能源消耗猛增,致使国家大力推广节能建筑材料^[1]。据统计,2018年我国建筑总能耗量和CO₂排放量分别占全国的46.5%和51.2%;水泥生产和生活取暖均在建筑能耗与碳排放中占据较大比重^[2]。因此,加大节能建筑材料的使用是减少建筑行业能耗与碳排放的解决途径之一。泡沫混凝土是一种轻质多孔的节能建筑材料,由水泥、发泡剂、水、外掺剂等材料组成,具有轻质、保温、可隔音和耐久等优点,掺入粉煤灰、硅灰、矿渣等掺和料还可减少水泥的用量,因此被广泛应用^[3-5]。王静文等指出,适量的粉煤灰可以改善泡沫混凝土的后期强度^[6]。陈立延等针对粉煤灰掺量对泡沫混凝土性能的影响进行研究,得出掺入粉煤灰可以改善浆体和易性和孔隙的结论^[7]。黄玉琴等以纳米二氧化硅、硅灰、矿粉为掺和料取代水泥制备泡沫混凝土,得出硅灰的二次水化可以提高泡沫混凝土后期强度的结论^[4]。刘森用再生粉体制备泡沫混凝土,得出复配粉体中的细颗粒可以优化孔结构的结论^[8]。张景文用再生微粉制备泡沫混凝土,研究结果表明不同粒径的材料按照一定比例复掺可以提高微集料的协同效应^[9]。

另一方面,我国道路交通建设也处于快速发展阶段,沥青混凝土在生产过程中产生的大量粉尘导致环境污染。钟小霞用沥青拌和站回收粉制备中强度等级混凝土,得出回收粉的填充效应可以改善混凝土孔结构,但掺量过多会对混凝土强度产生负面影响的结论^[10]。郭伶伶设计了三种水胶比的路用混凝土,得出回收粉掺量为10%时对混凝土性能影响较小的结论^[11]。吴国林选取三种细度的石灰石粉制备泡沫混凝土,发现石灰石粉中细粉含量为37.93%时,石灰石粉可以发挥最好的填充效果^[12]。

目前降低水泥用量的常用方式为加入掺和料,但是粉煤灰、矿渣粉等掺和料已出现供不应求的局面;将回收粉作为掺和料应用于泡沫混凝土,既可打破粉煤灰等掺和料供不应求的局面,又可增加回收粉的应用途径,具有重大意义^[10-12]。因此,本试验设计干密度等级为A06的泡沫混凝土基准组,在基准组配比的基础上用回收粉以不同比例取代复合掺和料(粉煤灰:硅灰=1:1),以此研究回收粉掺量的增加对泡沫混凝土物理性能的影响规律,并对结果进行对比分析。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

1) 沥青拌和站回收粉:试验使用青岛冠通市政市区分公司的回收粉,球磨3 min后得到的回收粉粒径集中于6~40 μm,粒径分布见图1。回收粉的矿物组成以CaCO₃和SiO₂为主,矿物组成见图2。回收粉的表观密度、堆积密度、需水量比和活性指数均参照标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)^[13]进行测试;烧失量参照标准《水泥化学分析方法》(GB/T 176—2017)^[14]中的灼烧差减法进行测试;化学组成与技术指标分别见表1、表2。

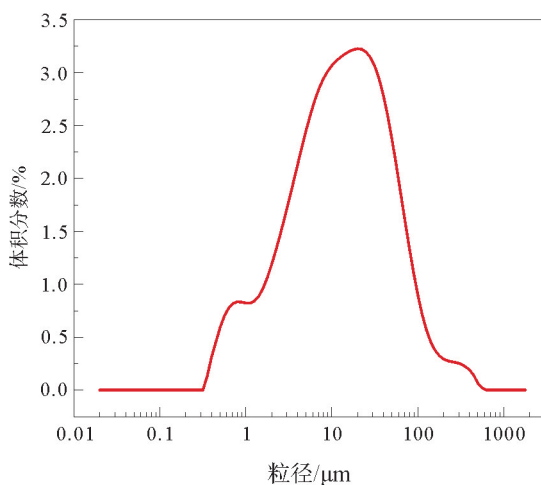


图1 回收粉粒径分布

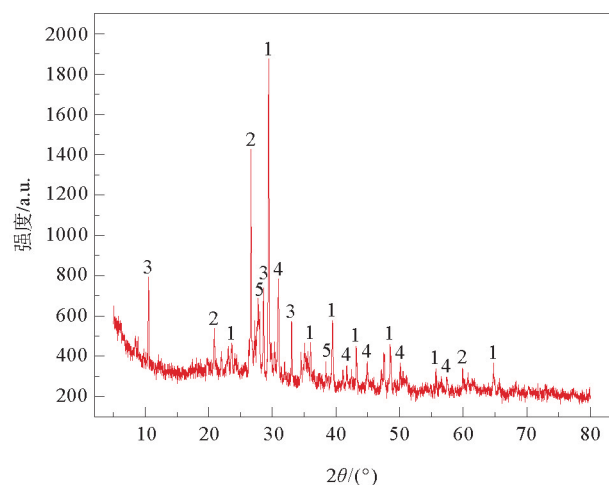


图2 回收粉矿物组成

1—CaCO₃; 2—SiO₂; 3—Ca(OH)₂-镁铁硅酸铝;
4—CaMg(CO₃)₂; 5—CaAl₂Si₂O₈

- 2) 水泥:试验使用 P·O 42.5 山水牌普通硅酸盐水泥,化学组成见表 1,物理性能见表 3。
- 3) 粉煤灰:试验使用巩义市生产的二级粉煤灰,物理性能见表 4。
- 4) 硅灰:试验使用四川朗天硅灰,物理性能见表 5。
- 5) 发泡剂:试验使用的发泡剂是主要由十二烷基苯磺酸钠组成的阴离子发泡剂,生产的泡沫密度为 63 kg/m^3 。发泡剂的性能均符合标准《泡沫混凝土》(JG/T 266—2011)^[15] 中的要求。
- 6) 拌和水:试验使用的拌和水为自来水。

表 1 回收粉、水泥的化学组成

原材料	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	其他
回收粉	39.53	24.96	13.00	10.23	6.18	6.10
水泥	24.99	51.42	8.26	4.03	3.71	7.59

表 2 回收粉技术指标

比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	表观密度/(g·cm ⁻³)	堆积密度/(g·cm ⁻³)	需水量比/%	烧失量/%	28 d 活性指数/%
3523	2.82	1.18	119	15.36	72.4

表 3 水泥的物理性能

比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	氯离子含量/ %	烧失量/ %	凝结时间/min		3 d 强度/MPa	
			初凝	终凝	抗压强度	抗折强度
358	0.04	4	172	234	5.5	27.2

表 4 粉煤灰的物理性能

比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	需水量比/%	烧失量/%	细度/%	安定性
410	2.4	92.5	1.13	21.6	合格

表 5 硅灰的物理性能

比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	需水量比/%	活性指数/%	含水率/%	烧失量/%
173 800	2.3	119	125	2.6	1.7

1.2 泡沫混凝土的制备

为研究沥青拌和站回收粉泡沫混凝土的性能,采用复合掺和料(粉煤灰:硅灰=1:1)等质量取代 20% 的水泥,设计干密度等级为 A06 的泡沫混凝土基准组;在基准组配合比的基础上,选取研磨 3 min 的回收粉以 0%,20%,40%,60%,80%,100% 的取代率等质量取代复合掺和料。配合比见表 6。

表 6 泡沫混凝土配合比

泡沫混凝土	水灰比	水泥/kg	粉煤灰/kg	硅灰/kg	回收粉		泡沫体积/L
					取代率/%	掺量/kg	
FC			78.13	78.13	0	0.00	
FC-20			62.51	62.51	20	31.25	
FC-40	0.36	625	46.88	46.88	40	62.50	1953
FC-60			31.25	31.25	60	93.76	
FC-80			15.58	15.58	80	125.10	
FC-100			0.00	0.00	100	156.26	

注:FC-20 代表用 20% 的回收粉取代复合掺和料所制成的泡沫混凝土

1.3 试块制备

根据表6中所示的混合比例称取材料,精确至0.1g,将所有固体材料搅拌均匀,与水混合后搅拌1min得到浆体。通过物理发泡,制备出相应体积的泡沫,后用手将浆体与泡沫混合2min,手动混合完毕后将其在120 r/min的转速下混合3min,搅拌完毕后立即进行流动度试验,将泡沫混凝土装入尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的模具中。养护1d后拆模,置于标准环境下($(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$)固化到规定龄期后进行测试。

1.4 试验方法

泡沫混凝土的流动度参照标准《泡沫混凝土应用技术规程》(JGJ/T 341—2014)^[16]进行测试。泡沫混凝土的抗压强度、干密度、吸水率参照标准《泡沫混凝土》(JG/T 266—2011)进行测试。泡沫混凝土的导热系数参照标准《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357—2016)^[17]进行测试。

2 试验结果与分析

2.1 回收粉取代率对流动度的影响

泡沫混凝土的流动度随回收粉取代率变化的趋势如图3所示。由图3可知,泡沫混凝土的流动度随着回收粉取代率的增加呈上升趋势。这是因为随着回收粉取代率的增加,粉煤灰与硅灰在复合掺和料中所占比例逐渐降低,回收粉的比表面积远低于硅灰,浸润回收粉颗粒表面所需的水分远少于硅灰,从而增加了浆体中的可用水量;而且,粉煤灰与硅灰的减少导致浆体的黏聚性降低,因此泡沫混凝土的流动度逐渐增加^[18-21]。

2.2 回收粉取代率对抗压强度的影响

泡沫混凝土的7,14,28 d抗压强度随回收粉取代率变化的趋势如图4所示。由图4可知,泡沫混凝土的抗压强度随着回收粉取代率的增加呈现先增加后降低的趋势,当回收粉取代率为20%,40%,60%,80%,100%时泡沫混凝土的28 d抗压强度较基准组的分别提高了25.23%,8.72%,6.19%,3.21%和-6.19%。抗压强度的提高是因为回收粉粒径较小且主要集中于6~40 μm ,致使掺入回收粉在增强复合掺和料微集料协同效应的同时改善浆体流动度,提高孔壁密实度使结构变得更加密实的同时减少泡沫混凝土在搅拌过程中的泡沫破损;且有文献表明,含有较多铝相的掺和料与回收粉以适当比例复掺可以提高 CaCO_3 的反应比例,加速早期水化并在后期水化中生成化学物质比较稳定的单碳水化铝酸钙, SiO_2 可参与水化反应产生水化硅酸钙,在一定程度上可提高基体强度与密实度,改善内部孔隙^[4,10,20,22-23]。但随着回收粉掺量的增加,浆体黏聚性降低的同时泡沫混凝土中气孔破裂概率变大,闭孔连通孔减少, CaCO_3 抑制钙矾石转化导致絮状、网状结晶较少,水化结晶之间的连接力降

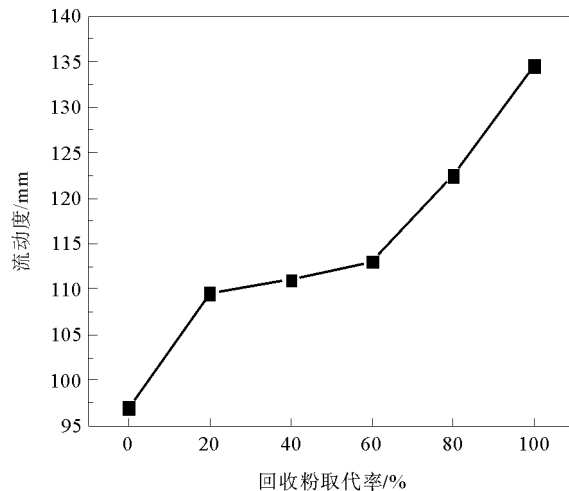


图3 回收粉取代率对泡沫混凝土流动度的影响

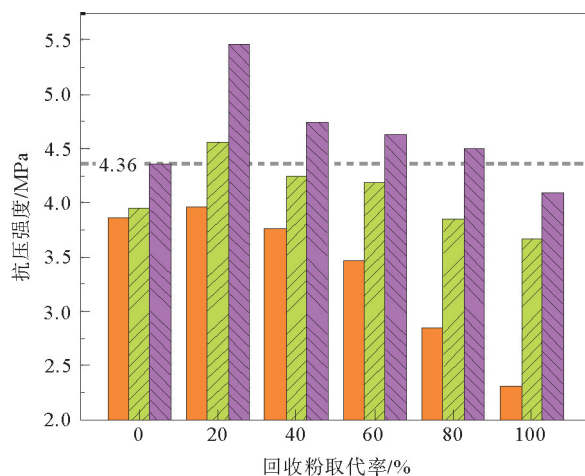


图4 回收粉取代率对泡沫混凝土抗压强度的影响

7 d; 14 d; 28 d

低,导致泡沫混凝土的抗压强度降低^[10,20]。

2.3 回收粉取代率对干密度和导热系数的影响

泡沫混凝土的干密度和导热系数随回收粉取代率变化的趋势,分别如图 5、图 6 所示。由图 5 可知,泡沫混凝土的干密度随着回收粉取代率的增加呈现出先增加后减少再增加的趋势。回收粉掺量为 20% 时,浆体黏度较好,水泥、粉煤灰、硅灰与回收粉之间形成了良好的级配,微集料协同效应加强,颗粒较好地填充泡沫混凝土内部的孔隙,浆体孔壁密实度增大,泡沫混凝土的干密度得到提升。回收粉掺量为 20%~60% 时,浆体的流动性逐渐增大减弱了水泥颗粒间的内摩擦力,搅拌过程中受水泥颗粒剪切作用而破裂的泡沫数量逐渐减少;微集料协同效应逐渐减弱,泡沫的孔壁密实度逐渐降低,泡沫混凝土干密度降低。回收粉掺量为 60% 及以上时,浆体黏聚力骤降,但较多的不规则回收粉颗粒在搅拌过程中导致泡沫破裂程度加大,泡沫混凝土干密度逐渐增加^[9-10,18,24]。

由图 6 可知,泡沫混凝土的导热系数与干密度的变化趋势一致,这是因为泡沫混凝土的导热系数与干密度有较高的相关性^[25]。回收粉掺量为 20% 时,导热系数较基准组增加了 6.1%,这是因为较高的孔壁密实度增加了传热能力;回收粉掺量为 20%~60% 时,导热系数逐渐降低,这是因为随着回收粉取代率的增加孔壁密实度逐渐降低,气孔所占比例逐渐增大,热量传导速度逐渐减缓;当回收粉掺量为 60% 及以上时,气孔所占比例开始持续降低并存在较多的劣化孔,导致传热速率快速增加^[21]。

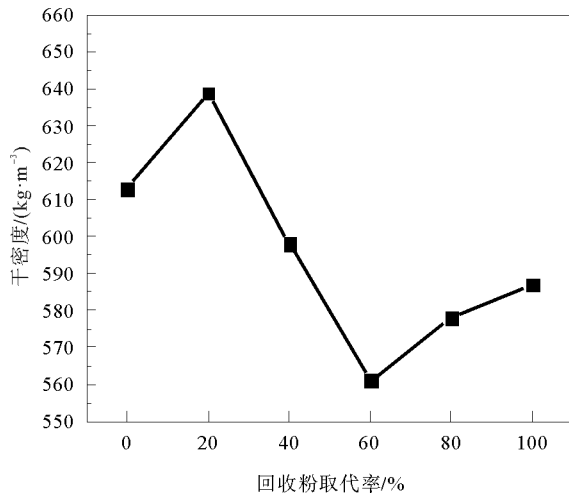


图 5 回收粉取代率对泡沫混凝土干密度的影响

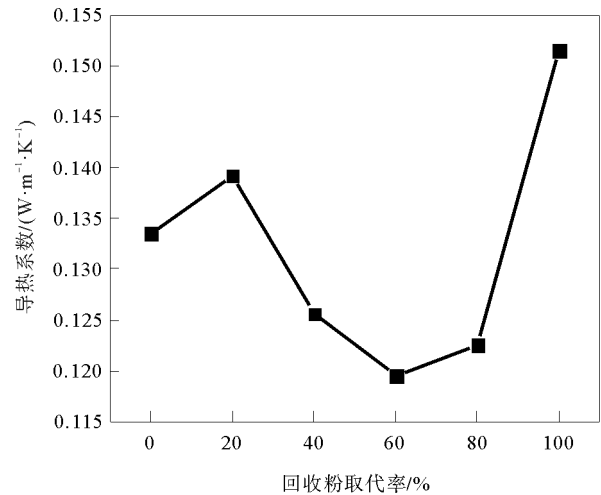


图 6 回收粉取代率对泡沫混凝土导热系数的影响

2.4 回收粉取代率对吸水率的影响

泡沫混凝土的吸水率随回收粉取代率变化的趋势如图 7 所示。由图 7 可知,泡沫混凝土的吸水率随着回收粉取代率的增加呈现先降低后增加的趋势。回收粉掺量为 20% 时,对泡沫混凝土的吸水率有改善效果;呈现出这种趋势是因为当回收粉掺量为 20% 时,泡沫混凝土的孔壁结构得到改善,硅灰、粉煤灰、回收粉的微集料协同效应可以较好地填充孔隙,掺和料的火山灰效应产生 C-S-H 凝胶增加水化结晶黏结力,泡沫混凝土的吸水率出现短暂降低。但当回收粉掺量继续增加时,过剩的钙矾石弱化晶体之间的连接,微集料协同效应逐渐减弱,泡沫混凝土的孔结构出现劣化产生较多的连通孔,导致泡沫混凝土的吸水率逐

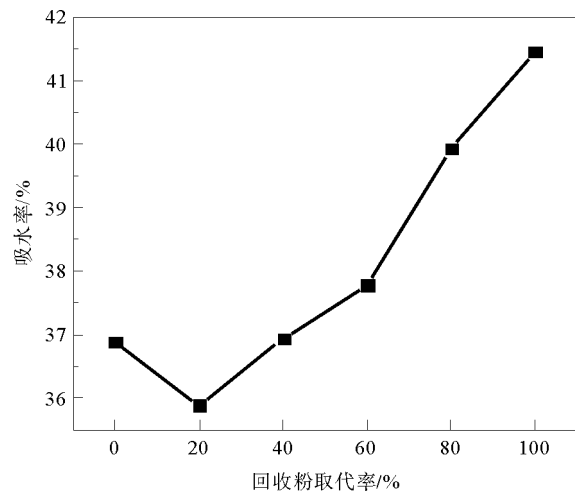


图 7 回收粉取代率对泡沫混凝土吸水率的影响

渐增加^[4,7,11,20]。

3 结论

1) 回收粉可以作为掺和料应用于泡沫混凝土。

2) 随着回收粉取代复合掺和料比例的增加,泡沫混凝土的流动度持续增加;抗压强度呈现先增加后降低的趋势;干密度和导热系数均呈现先增加后降低再增加的趋势;吸水率呈现先降低后增加的趋势。

3) 回收粉取代掺和料的 20%时,FC-20 的干密度等级为 A06,流动度、28 d 抗压强度、导热系数和吸水率分别为 109.5 mm, 5.46 MPa, 0.1392 W/(m·K) 和 35.88%,较基准组分别提高了 12.89%, 25.22%, 4.27%, -2.71%。

参考文献(References):

- [1] 刘惠宁.《中华人民共和国节约能源法》解读纲要[J].应用能源技术,2022(4):1-3.
LIU Huining. Interpretation outline of "Energy Conservation Law of the People's Republic of China" [J]. Applied Energy Technology, 2022(4): 1-3.
- [2] 佚名.中国建筑能耗研究报告 2020[J].建筑节能(中英文),2021,49(2):1-6.
Anon. China building energy consumption annual report 2020[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(2): 1-6.
- [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.
LIU Chao, LUO Jianlin, LI Qiuyi, et al. Outlook and review in foam concrete production[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(9): 10-14.
- [4] 黄玉琴,王瑞燕,龙天艳,等.泡沫混凝土的力学性能优化研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(S2):603-608.
HUANG Yuqin, WANG Ruiyan, LONG Tianyan, et al. Optimization of mechanical properties of foamed concrete[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 603-608.
- [5] 佚名.我国泡沫混凝土发展现状与展望:泡沫混凝土分会 2020 年度行业发展报告[J].混凝土世界,2021(10):18-22.
Anon. Present situation and prospect of foam concrete development in China: Industry development report of foam concrete branch in 2020[J]. China Concrete, 2021(10): 18-22.
- [6] 王静文,刘旭照,尹泽飞,等.泡沫混凝土生产应用现状与前景分析[J].中国建材科技,2018,27(6):44-47.
WANG Jingwen, LIU Xuzhao, YIN Zefei, et al. Present situation and prospect of production and application of foamed concrete[J]. China Building Materials Science & Technology, 2018, 27(6): 44-47.
- [7] 陈立延,杨安,洪芬,等.不同粉煤灰掺量对泡沫混凝土性能及其孔径的影响[J].混凝土,2021(8):137-140.
CHEN Liyan, YANG An, HONG Fen, et al. Influence of different fly ash content on the performance and pore size of foamed concrete[J]. Concrete, 2021(8): 137-140.
- [8] 刘淼.再生粉体泡沫混凝土的性能研究[D].扬州:扬州大学,2021.
LIU Miao. Properties of the foam concrete containing recycled powder derived from construction and demolition waste[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [9] 张景文.再生微粉泡沫混凝土的制备与性能研究[D].西宁:青海大学,2020.
ZHANG Jingwen. Preparation and properties of recycled micropowder foam concrete[D]. Xining: Qinghai University, 2020.
- [10] 钟小霞.回收粉在中等强度等级混凝土中的应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
ZHONG Xiaoxia. Application of recycled powder in medium strength concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [11] 郭伶俐.沥青拌和站回收粉对水泥混凝土路用性能影响分析[J].交通世界,2020(17):15-16.
GUO Lingling. Analysis of the effect of recycled powder from asphalt mixing station on the road performance of cement concrete[J]. TranspoWorld, 2020(17): 15-16.
- [12] 吴国林.石灰石粉对泡沫混凝土的性能影响研究[D].重庆:重庆大学,2016.
WU Guolin. Study on the influence of limestone powder on properties of foam concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [13] GB/T 1596—2017,用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].
GB/T 1596—2017, Fly ash used for cement and concrete[S].
- [14] GB/T 176—2017,水泥化学分析方法[S].
GB/T 176—2017, Methods for chemical analysis of cement[S].
- [15] JG/T 266—2011,泡沫混凝土[S].
JG/T 266—2011, Foamed concrete[S].

- [16] JGJ/T 341—2014, 泡沫混凝土应用技术规程[S].
JGJ/T 341—2014, Technical specification for application of foamed concrete[S].
- [17] JC/T 2357—2016, 泡沫混凝土制品性能试验方法[S].
JC/T 2357—2016, Test methods of properties of foam concrete product[S].
- [18] 幸超群, 邓怡帆, 笄俊伟, 等. 硅灰-粉煤灰复合矿物掺和料对混凝土性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(9): 52-56.
XING Chaoqun, DENG Yifan, DA Junwei, et al. Research on the influence of silica fume-fly ash composite mineral admixture on concrete performance[J]. New Building Materials, 2022, 49(9): 52-56.
- [19] ZHANG Sulei, QI Xiaoqiang, GUO Siyao, et al. A systematic research on foamed concrete: The effects of foam content, fly ash, slag, silica fume and water-to-binder ratio[J]. Construction and Building Materials, 2022, 339: 1-16.
- [20] 杭美艳, 杨冉. 矿物掺和料对泡沫混凝土的性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 1480-1486.
HANG Meiyuan, YANG Ran. Influence of mineral admixtures on properties of foam concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4): 1480-1486.
- [21] 延常玉. 粉煤灰泡沫混凝土的制备及其性能研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
YAN Changyu. Preparation of fly ash foam concrete and its performance study[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [22] 贾煌飞. 石灰石粉与辅助性胶凝材料在水泥基材料中的协同效应[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
JIA Huangfei. Synergistic effects of limestone powder and supplementary cementitious materials in cement-based materials[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [23] 饶美娟, 刘数华, 方坤河. 石灰石粉对水泥早期性能的影响[J]. 粉煤灰, 2010, 22(1): 5-7.
RAO Meijuan, LIU Shuhua, FANG Kunhe. The influence of limestone powder on the early performance of cement[J]. Coal Ash, 2010, 22(1): 5-7.
- [24] 雷洛, 吴艳萍, 王海滨, 等. 硅锰渣对泡沫混凝土孔结构及其性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(9): 13-19.
LEI Luo, WU Yanping, WANG Haibin, et al. Effect of silica-manganese slag on the pore structure and performance of foamed concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 44(9): 13-19.
- [25] 陈士博. 泡沫混凝土孔结构测试与图像分析法应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
CHEN Shibo. Research on pore structure tests and image analysis method application for foamed concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.

(责任编辑 姜锡方; 英文校审 程文华)