

铁尾矿基陶粒混凝土的制备及性能研究

赵威^{1,2}, 曹宝月^{1,2}, 崔孝炜^{1,2}, 韩硕¹

1. 商洛学院陕西省尾矿资源综合利用重点实验室, 陕西 商洛 726000;
2. 商洛学院陕西省矿产资源清洁高效转化与新材料工程研究中心, 陕西 商洛 726000

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)06-0089-05
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.06.012

摘要 随着矿冶行业的快速发展, 尾矿堆积量逐年增多, 特别是铁尾矿已成为国内研究者关注的焦点。先用铁尾矿制备轻质高强陶粒, 然后以该陶粒作为轻骨料制备陶粒混凝土。采用正交试验研究水灰比、减水剂用量、砂用量、增稠剂用量对陶粒混凝土抗压强度及陶粒上浮的影响。通过试验确定该铁尾矿基陶粒混凝土的最佳方案为水灰比 0.25、减水剂用量 0.5%、砂用量 20%、增稠剂用量 0.12%。最终制得 28 d 抗压强度为 67.33 MPa、抗折强度为 8.1 MPa、体积密度 1 940 kg/m³ 的高性能陶粒混凝土。研究中解决了轻骨料陶粒混凝土中陶粒上浮问题, 实现了资源二次开发。

关键词 铁尾矿; 陶粒; 轻骨料; 陶粒混凝土

引言

秦岭南麓的商洛地区, 铁矿资源丰富, 已探明储量 3 355.7 万 t, 占陕西省储量的 49.8%。常年粗放式开发, 导致商洛地区尾矿堆积量大, 污染环境, 破坏生态平衡, 亟待处理^[1-3]。特别是 2020 年应急管理部联合其他八部委联合宣布: 在保证紧缺和战略性矿产矿山正常建设开发前提下, 不再产生新的尾矿库^[4-5]。这就导致部分矿企由于尾矿无处可排, 只能停业甚至倒闭。与发达国家对铁尾矿的利用相比较^[6-7], 我国对铁尾矿的回收利用起步晚, 但发展比较迅速。目前国内对铁尾矿资源再利用的途径多为制备新型建筑材料, 如加气混凝土^[8]、轻质高强陶粒^[9]、透水砖^[10-11]等。但商洛地区工业落后且交通不便, 目前尾矿利用率不足 7%, 亟待引进新技术、新工艺将尾矿变废为宝, 促进商洛经济绿色健康发展。

陶粒混凝土具有质轻、高强、抗震、保温隔热、隔音降噪等优点, 近年来在高层建筑、装配式建筑、桥梁、电厂烟囱等领域广泛应用^[12-13]。但由于陶粒内部气孔率高、密度低, 在陶粒混凝土浇筑成型过程中, 易出现陶粒上浮分层^[14-15], 影响陶粒混凝土后期使用性能。本文采用商洛铁尾矿为原料烧制轻质高强陶粒, 再以该陶粒作为轻骨料制备陶粒混凝土, 主要解决陶

粒上浮问题, 得到该铁尾矿基陶粒混凝土的最佳制备方案。

1 试验原料与方法

本文采用商洛市大西沟铁尾矿作为主要原料, 加入黏土和钾长石为辅助原料制备轻质高强陶粒, 黏土取自商洛市商州区, 钾长石选自商洛市洛南县。其具体化学组成如表 1 所示。

表 1 铁尾矿、黏土、钾长石的化学组成 /%
Table 1 Chemical composition of iron tailings, clay and potash feldspar

原料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	烧失
铁尾矿	49.72	12.73	21.05	2.61	1.62	1.43	2.12	0.96	0.31	7.45
黏土	62.69	14.52	8.89	0.54	1.13	0.99	3.27	0	0.12	7.85
钾长石	67.96	10.90	2.28	0.96	2.45	0.67	12.28	1.56	0	0.94

1.1 铁尾矿基陶粒制备试验

首先将上述三种原料烘干, 分别放入制样机粉碎 40 s, 分别过 200 目筛; 再按铁尾矿: 黏土: 钾长石为 8: 1: 1 的质量配比进行称量, 加入总量 0.5% 的 SiC 作为发泡剂, 球磨 30 min。然后加入总量 25% 的水混合练泥, 陈腐 3 h 后, 成型为直径约 8 mm 的陶粒生球,

收稿日期: 2022-09-04

基金项目: 陕西省重点研发计划(2022GY-429); 陕西高校青年创新团队(20JCS062); 陕西省教育厅青年创新团队建设科研计划项目(21JP037); 商洛学院科学与研究基金项目(21CK02)

作者简介: 赵威(1987—), 男, 陕西商洛人, 博士, 副教授, 主要从事尾矿综合利用研究, E-mail: zwslxy@126.com。

放入烘箱 100 °C 干燥 12 h, 最后放入马弗炉在 1 160 °C 温度下保温 30 min 制得铁尾矿基轻质高强陶粒。

该铁尾矿基轻质高强陶粒的物理性能如表 2 所示, 其物相组成见 X 射线衍射图谱(图 1), 从图 1 可以看出: 经高温烧成后, 该铁尾矿基陶粒的内部晶相为 SiO₂、Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄ 相, 同时存在大量的玻璃相。

表 2 陶粒物理性能
Table 2 Physical properties of ceramsite

陶粒尺寸 /mm	桶压强度 /MPa	堆积密度 / (kg·m ⁻³)	吸水率 /%	表观密度 / (kg·m ⁻³)
10±2	14.42	916	4.46	1 521

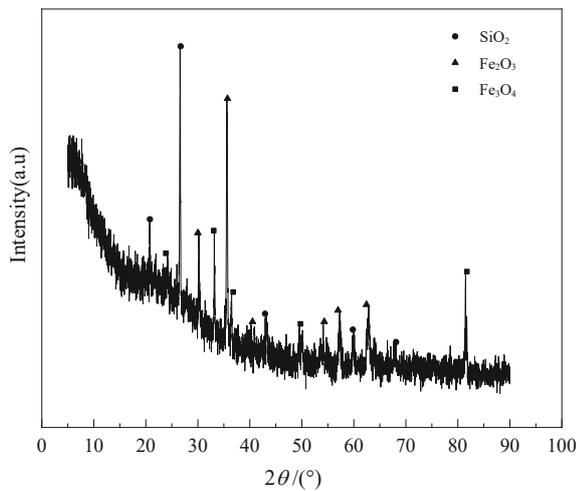


图 1 铁尾矿基陶粒的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD pattern of iron tailings-based ceramsite

1.2 陶粒混凝土制备试验

采用商洛尧柏龙桥水泥有限公司生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥作为胶凝材料; 选用聚羧酸减水剂、深圳乐芙生物科技有限公司生产的威兰胶增稠剂; 细骨料采用的是厦门艾思欧标准砂有限公司制造的标准砂。按试验要求称量水泥、标准砂、铁尾矿基陶粒、减水剂、增稠剂和自来水。将称好的水泥、标准砂和减水剂依次倒入搅拌机, 预搅拌 1 min, 将自来水缓慢加入搅拌机, 继续搅拌 5 min; 待搅拌均匀后加入陶粒继续搅拌, 再加入增稠剂搅拌 2 min。将搅拌均匀的陶粒混凝土倒入 30 mm×30 mm×50 mm 的模具之中填满, 放置到振实台振动 2 min, 再将模具表面溢出的混凝土刮掉。最后将试样放置到湿度 99%、20 °C 的数控水泥混凝土标准养护箱养护, 24 h 后进行脱膜, 继续养护。

铁尾矿基陶粒的物理性能参照国标 GB/T 17431.2—2010 进行测量。陶粒混凝土的 14 d、28 d 抗折强度和抗压碎强度利用 YAW-300C 型水泥抗折抗压一体机进行检测。陶粒混凝土的密度采用体积质量法进行测试。断口形貌采用 DT-VGA500 型电子视频显微镜

拍摄。

2 表征分析

2.1 正交试验设计

本试验采用上述铁尾矿基陶粒作为轻骨料制备陶粒混凝土, 研究水灰比、减水剂用量、砂用量和增稠剂威兰胶的用量对该陶粒混凝土抗压强度影响的大小, 采用正交试验得到制备该高强度陶粒混凝土的最佳配比, 同时解决陶粒的上浮问题, 考察指标为陶粒混凝土 28 d 抗压强度和陶粒上浮与否。

通过查阅参考文献和前期单因素试验确定水灰比的范围为 0.25~0.30; 减水剂用量为 0.3%~0.5%, 增稠剂威兰胶的用量为 0.10%~0.14%, 标准沙用量为 0%~20%, 考虑后期各原料称量具有对比性, 本试验以水泥干重为 100%, 各种原料干重均以占水泥干重的质量分数确定。采用三水平四因素 L₉(3⁴) 正交试验研究陶粒混凝土配合比中水灰比(A)、减水剂用量(B)、砂用量(C)、增稠剂用量(D)对陶粒混凝土 28 d 抗压强度和陶粒上浮与否的影响, 正交试验 3 水平 4 因素正交表见表 3。

根据表 3 正交试验因素水平, 设计 9 组正交试验, 具体设计方案和试验结果如表 4 所示。从试验结果可知, 第 7、8、9 组试验制得的陶粒混凝土中陶粒均上浮。而其他 6 组试验均未出现陶粒上浮的现象。这主要是因为后 3 组试验采用水灰比 0.3, 试验中水含量增多导致水泥砂浆的黏度降低, 水泥砂浆的密度高于

表 3 正交试验因素水平表
Table 3 Factor level tables for orthogonal experiments

水平	因素			
	水灰比 A	减水剂用量 B/%	砂用量 C/%	增稠剂用量 D/%
1	0.25	0.3	0	0.10
2	0.28	0.4	10	0.12
3	0.30	0.5	20	0.14

表 4 试验方案及试验结果
Table 4 Experimental scheme and experimental results

试验	水灰比 A	减水剂用量 B	砂用量 C	增稠剂用量 D	28 d 强度 /MPa	陶粒上浮
①	1	1	1	1	51.75	否
②	1	2	2	2	54.36	否
③	1	3	3	3	64.37	否
④	2	1	2	3	48.40	否
⑤	2	2	3	1	57.33	否
⑥	2	3	1	2	62.50	否
⑦	3	1	3	2	44.53	是
⑧	3	2	1	3	47.25	是
⑨	3	3	2	1	47.37	是

陶粒的体积密度, 故陶粒上浮。其中第 3 组试验试样的抗压强度最大。

2.2 试验结果分析

经过极差计算, 该正交试验的结果分析见表 5。由试验结果可知, 影响该铁尾矿基陶粒混凝土 28 d 抗压强度四个因素的大小程度依次是中水灰比 (A)、减水剂用量 (B)、砂用量 (C) 和增稠剂用量 (D)。以制备高强度陶粒混凝土为试验目的, 排除陶粒上浮试验组别, 水灰比 (A) 因素选择水平 1, 减水剂用量 (B) 因素选择水平 3, 砂用量 (C) 因素选择水平 3, 增稠剂含量 (D) 因素选择水平 2。最优试验方案为 A1B3C3D2, 即选择水灰比为 0.25、减水剂用量为 0.5%、砂用量为 20%、增稠剂用量为 0.12%。

2.3 最优方案试样制备及性能表征

采用正交试验获得的最佳试验方案 A1B3C3D2 并未出现在 9 组正交试验 (表 3) 中, 最后采用该方案另制试样, 对其体积密度、抗压强度、抗折强度及断口形貌都进行了详细表征。

图 2 为该最佳方案 A1B3C3D2 制备陶粒混凝土的断口形貌图, 从图 2 中可以看出, 陶粒在混凝土中分布均匀, 无上浮现象; 断裂时, 部分陶粒拔出, 部分陶粒断裂。从局部放大图可以看出水泥砂浆通过陶粒表面开气孔进入陶粒内部, 使陶粒与水泥砂浆之间的结合更加牢固, 性能更加优异。该方案制备的陶粒混凝土体积密度 1 940 kg/m³, 28 d 抗折强度为 8.1 MPa,

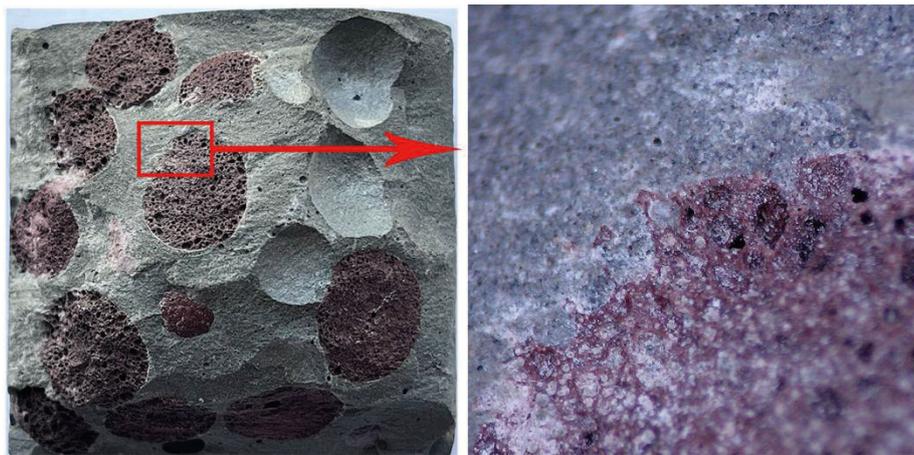


图 2 陶粒混凝土断口形貌
Fig. 2 Fracture morphology of ceramsite concrete

3 结论

本文基于正交试验进行了陶粒混凝土配比设计, 试验结果表明当水灰比为 0.3 时, 陶粒均出现上浮。通过极差分析确定影响该铁尾矿基陶粒混凝土抗

表 5 试验结果分析

Table 5 Analysis of experimental results

指标	因素	A	B	C	D
28 d 抗压强度 /MPa	K1	170.48	138.02	161.5	156.45
	K2	168.23	158.94	150.13	161.39
	K3	132.49	174.24	166.23	160.2
	k1	56.83	46.01	53.83	52.15
	k2	56.08	52.98	50.04	53.80
	k3	44.16	58.08	55.41	53.4
极差 R		12.67	12.07	5.37	1.65
因素主次		A B C D			
优水平	A1	B3	C3	D2	
最优方案		A1B3C3D2			

(A—水灰比, B—减水剂用量, C—砂用量, D—增稠剂用量)。

抗压强度为 67.33 MPa。抗压强度为正交试验 9 组中最高, 故该方案可确定为制备该陶粒混凝土的最优方案。其性能优于国家行业标准 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构技术规程》的要求。

作为对比, 本试验采用粒径与陶粒相当的鹅卵石作为骨料, 在相同工艺条件下制备石子混凝土, 测得其 28 d 抗折强度为 6.9 MPa, 抗压强度为 66.46 MPa, 体积密度为 2 475 kg/m³。与同粒径石子混凝土相比, 该铁尾矿基陶粒混凝土体积密度降低 21.6%, 抗折强度提高 17.4%, 抗压强度提高 1.3%。具有轻质高强、抗震等优异性能, 将在高层建筑、装配式墙材等领域广泛应用。

压强度四个因素的大小程度依次是中灰比、减水剂用量、砂用量和增稠剂含量。该铁尾矿基陶粒的最佳设计方案为: 水灰比 0.25、减水剂用量 0.5%、砂用量 20%、增稠剂用量 0.12%。该方案制备的陶粒混凝土体积密度 1 940 kg/m³, 28 d 抗折强度为 8.1 MPa, 抗压

强度为 67.33 MPa; 为铁尾矿资源综合利用提供了新途径。

参考文献:

- [1] 杨维鸽, 赵培, 李美兰, 等. 秦岭山区尾矿库周边耕地土壤重金属污染特征研究[J]. 辽宁农业科学, 2021(3): 16-21.
YANG W G, ZHAO P, LI M L, et al. Distribution characteristics of heavy metal pollution in cultivated land around tailings reservoir in Shangzhou[J]. Liaoning Agricultural Science, 2021(3): 16-21.
- [2] 张鑫. 商洛市尾矿库安全管理信息系统研究与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
ZHANG X. Research and implementation of safety management information system of tailings reservoir in Shangluo[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [3] 张景书. 商洛市尾矿资源综合利用现状及其对策[J]. 商洛学院学报, 2013(4): 3-7.
ZHANG J S. The current state and countermeasures in comprehensive utilization of tailings resource of Shangluo city[J]. Journal of Shangluo University, 2013(4): 3-7.
- [4] 全国尾矿库数原则上只减不增[J]. 中国环境监察, 2020(Z1): 11.
The number of tailings ponds in China will only decrease but not increase in principle[J]. Environmental monitoring in China, 2020(Z1): 11.
- [5] 崔振华. 省应急管理厅集中开展尾矿库安全风险专项整治行动[J]. 吉林劳动保护, 2020(9): 8.
CUI Z H. The provincial emergency management department concentrated on the special rectification actions of tailings reservoir safety risks[J]. Jilin labor protection, 2020(9): 8.
- [6] 刘文博, 姚华彦, 王静峰, 等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. 材料导报, 2020(S1): 268-270.
LIU W B, YAO H Y, WANG J F, et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Materials Review, 2020(S1): 268-270.
- [7] 孟祥然, 周月鑫, 郭晓影. 铁尾矿综合利用研究综述[J]. 辽宁科技学院学报, 2019(3): 11-14.
MENG X R, ZHOU Y X, GUO X Y, et al. Summary of researching on comprehensive utilization of iron ore tailings[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2019(3): 11-14.
- [8] 顾晓薇, 王岫宇, 刘剑平, 等. 高硅型铁尾矿砂蒸压加气轻质混凝土的制备及其性能研究[J]. 金属矿山, 2022(1): 35-40.
GU X W, WANG S Y, LIU J P, et al. Preparation of autoclaved aerated lightweight concrete with high-silicon iron tailings and its properties study[J]. Metal Mine, 2022(1): 35-40.
- [9] 刘刚, 封孝信, 胡晨光, 等. 利用铁尾矿制备陶粒研究[J]. 华北理工大学学报, 2021(3): 49-54.
LIU G, FENG X X, HU C G, et al. Research on preparation of ceramicsite from iron tailings[J]. Journal of North China University of Science and Technology, 2021(3): 49-54.
- [10] 夏溢, 程寒飞, 刘克权, 等. 铁尾矿粉烧结透水砖的制备及其性能[J]. 安徽工业大学学报, 2021(3): 237-241.
XIA Y, CHENG H F, LIU K Q, et al. Preparation of sintered permeable brick with iron tailing powder and its properties[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2021(3): 237-241.
- [11] 李德忠, 倪文, 刘杰, 等. 铁尾矿制备高强高性能透水砖[J]. 新型建筑材料, 2016(11): 52-54.
LI D Z, NI W, LIU J, et al. High strength and performance water permeable brick prepared by iron tailings[J]. New Building Materials, 2016(11): 52-54.
- [12] 李辛庚, 闫风洁, 岳雪涛, 等. 陶粒混凝土的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020(11): 3407-3418+3452.
LI X G, YAN F G, YUE X T, et al. Research progress on ceramicsite concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020(11): 3407-3418+3452.
- [13] 王杰, 宁宁, 蒋娜, 等. 轻质混凝土性能及应用现状研究[J]. 低温建筑技术, 2020(10): 22-25+29.
WANG J, NING N, JIANG S, et al. Research status of properties and application of lightweight concrete[J]. Low Temperature Building Technology, 2020(10): 22-25+29.
- [14] 丁庆军, 张勇, 王发洲, 等. 高强轻集料混凝土分层离析控制技术研究[J]. 武汉大学学报, 2002, 35(3): 59-62.
DING Q J, ZHANG Y, WANG F Z, et al. Research on control technology of segregation of high strength lightweight aggregate concrete[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(3): 59-62.
- [15] 李渝军, 丁建彤. 泵送高强轻骨料混凝土的抗离析性能[J]. 混凝土, 2005(3): 42-45.
LI Y J, DING J T. Segregation capability of fresh high strength lightweight aggregate concrete[J]. Concrete, 2005(3): 42-45.

Study on Preparation and Performance of Iron Tailings-based Ceramsite Concrete

ZHAO Wei^{1,2}, CAO Baoyue^{1,2}, CUI Xiaowei^{1,2}, HAN Shuo¹

1. Shaanxi Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Tailings Resources, Shangluo University, Shangluo 72600, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center for Mineral Resources Clean & Efficient Conversion and New Materials, Shangluo University, Shangluo 72600, Shaanxi, China

Abstract: With the rapid development of the mining and metallurgy industry, the amount of tailings accumulation is increasing year by year. In particular, iron tailings have become the focus of domestic researchers. Firstly, light high-strength ceramsite was prepared from iron tailings. Then the ceramsites were used as light aggregate to prepare ceramsite concrete. The effect of water-cement ratio, water reducing agent, sand and thickener on compressive strength and floating of ceramsite were studied with orthogonal test. Through experiments, the best scheme of the iron tailings-based ceramsite concrete was that the water-cement ratio was 0.25, the dosage of water reducer was 0.5%, the dosage of sand was 20% and the dosage of thickener was 0.12%. Finally, the 28-day high-performance ceramsite concrete with compressive strength of 67.33 MPa, flexural strength of 8.1 MPa and density of 1 940 kg/m³ was prepared. The floating problem of ceramsite in lightweight aggregate ceramsite concrete was solved.

Keywords: iron tailings; ceramsite; light aggregate; ceramsite concrete

引用格式: 赵威, 曹宝月, 崔孝炜, 韩硕. 铁尾矿基陶粒混凝土的制备及性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 89-93.

ZHAO Wei, CAO Baoyue, CUI Xiaowei, HAN Shuo. Study on preparation and performance of iron tailings-based ceramsite concrete[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 89-93.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn