

煤炭加工与环保

免烧法煤气化粗渣制备陶粒工艺及其性能研究

张 凯,刘舒豪,张日新,王丝蒂,刘航恺,史子玥

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)



扫码移动阅读

摘 要:为实现煤气化粗渣处置资源化、无害化利用,以煤气化粗渣为主要原料,采用改进后的免烧养护法制备 9 组不同配比的免烧煤气化粗渣陶粒,测试各组陶粒的堆积密度、筒压强度和吸水率,并进行性能优异度评价。根据结果筛选出进入浸出毒性测试的试验组,检测浸出液中铬、砷、镉、铅 4 种重金属含量,评价其环境安全性。结果表明:陶粒筒压强度均符合 GB/T 17431.1—2010《轻集料及其试验方法第 1 部分:轻集料》的要求,其值为 5.59~8.71 MPa;吸水率随煤气化粗渣含量增加而升高;陶粒性能优异度得分最高且符合环境安全标准的原料配比为煤气化粗渣掺加量 73%,水泥投加量 15%,石英砂投加量 12%(均为质量分数);浸出毒性测试结果显示,免烧工艺对煤气化粗渣中重金属的固定化能力较高。

关键词:煤气化粗渣;陶粒;重金属;环境安全性

中图分类号:TQ536.4

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)10-0222-06

Research on preparation of non-sintered ceramsite from gasification cinder and its performance

ZHANG Kai, LIU Shuhao, ZHANG Rixin, WANG Sidi, LIU Hangkai, SHI Ziyue

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the resource disposal and harmless utilization of gasification cinder, we took it as the main raw material, and nine sets of non-sintered ceramsites from gasification cinder with different proportions were prepared by the improved method of non-sintered curing. The stacking density, cylinder compressive strength and water absorption of each ceramsite were tested, the attained performance was evaluated. Accounting to the result of which, experimental groups that could enter the test of leaching toxicity were selected. With the detection of the contents of four kinds of heavy metals: Cr, As, Cd and Pb in the leaching solution, their environmental safety was evaluated. The results showed that the cylinder compressive strength of ceramsites all met the requirement of GB/T 17431.1—2010 "Lightweight aggregates and its test methods—Part 1: Lightweight aggregates", the value with the range of 5.59~8.71 MPa. And the water absorption increased with the increase of the content of gasification cinder in ceramsite. The best formula for preparing the ceramsite with the highest attained performance score and the conformity of environmental safety standards was gasification cinder 73%, cement 15% and quartz sand 12% (mass fractions). The results of leaching toxicity showed that non-sintered method posted high immobilization ability of heavy metals in gasification cinder.

Key words: gasification cinder; ceramsite; heavy metal; environmental safety

0 引 言

近年来,陶粒因其密度小、质轻、综合强度高、保

温隔热、耐火抗震性能好、耐风化等其他材料无法比拟的优异性能,在全世界得到快速发展与应用^[1-2]。传统的页岩陶粒、黏土陶粒等是研究最早、发展最快

收稿日期:2018-07-08;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.10.035

基金项目:大学生创新训练资助项目(国家级规划项目)(C201703328);中央高校基本科研业务费资助项目(2018QH03);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金资助项目(SHJT-16-30.8);国家重点研发计划资助项目(2018YFC0406404)

作者简介:张 凯(1984—),男,辽宁朝阳人,副教授,博士。Tel:010-62339810, E-mail:zhangkai@cumt.edu.cn

引用格式:张 凯,刘舒豪,张日新,等.免烧法煤气化粗渣制备陶粒工艺及其性能研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):222-227.

ZHANG Kai, LIU Shuhao, ZHANG Rixin, et al. Research on preparation of non-sintered ceramsite from gasification cinder and its performance [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 222-227.

的陶粒种类,但受到原材料资源属性的制约,无法长期利用。以工业废渣为主要原料的灰渣陶粒具有强度高、耐久性好、软化系数高和耐腐蚀性强等特点,同时可解决目前大量排放的工业废渣(一般采用填埋或露天堆放)既侵占大量土地又污染环境的问题。因此,灰渣陶粒的研究与制备引起了广泛的关注^[3-7]。国内外以粉煤灰、煤矸石、污泥等废物制备灰渣陶粒的研究报道较多。文献[8]以煤气化渣和废弃玻璃为原料(原料中玻璃含量40%),在旋转式立窑中1 120 ℃下成功烧制了陶粒材料;LIU等^[9]研究了以水泥、石灰和斑脱石3种原料为黏结剂情况下,其添加量对煤气化渣陶粒性能的影响,结果表明其对氯离子渗透的抵抗力随轻集料含量的增加而减弱;向晓东等^[10]以钢渣、粉煤灰和黏土为主要原料制备了高强陶粒,并研究了其性能,结果表明随着钢渣含量的增加,陶粒的堆积密度增加、吸水率降低、筒压强度提高。煤气化粗渣是煤粉经高温高压气化后形成的一种混合物,是煤气化技术产生的固体废弃物^[2]。我国煤气化粗渣年产量约65万t,数量庞大^[3]。煤气化粗渣的处置大多是采用简单粗放的堆存填埋方式,这造成土地资源浪费的同时还会造成严重的环境健康问题^[11-13]。目前以新型煤化工产生的煤气化粗渣为原料制备陶粒的研究报道则很少,且陶粒的制备多采用高温烧结的方式,存在着能耗高、效率低、原料利用率低等问题,对于更加节能环保的免烧养护的方式研究较少。因此,笔者以煤气化粗渣为主要原料,采用经过改进后的免烧养护方式制备免烧煤气化粗渣陶粒,通过设计不同的原料配比,以筒压强度、吸水率以及浸出毒性为性能指标,探讨免烧养护方法下的最优配比,同时进行环境安全性评价,以期对煤气化粗渣处理提供一条合理的途径,达到经济节能、安全处置的目的。

1 材料与方法

1.1 试验原料

试验所用的主要原料为煤气化粗渣、石英砂和水泥。石英砂为工业纯级石英砂粒,用于补充玻璃体主要成分SiO₂;水泥主要作为黏结剂使用。煤气化粗渣来自我国西北地区某煤制甲醇厂,其矿物组成主要为石英和方解石等非晶体矿物,经X射线衍射(XRD)定量分析结果表明,样品中方解石质量分数最多可达72%,石英含量较少,质量分数为11%~21%。经电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)

测定,煤气化粗渣样品主要化学组成为CaO、SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、MgO和未燃尽碳等(表1)。

表1 煤气化粗渣中主要化学成分含量

Table 1 Main chemical components content of gasification cinder

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	C
质量分数/%	20.12	8.23	30.08	18.17	2.14	1.93	16.12

1.2 煤气化粗渣陶粒制备方法

1.2.1 原料预处理

将煤气化粗渣置于烘箱中105 ℃烘干2 h使其完全干燥,然后用粉碎机将干燥的粗渣原料粉碎2 min把粗渣磨细;之后用0.25 mm的筛子筛分,取筛下干燥磨细的煤渣溶于质量为干物料32%的NaOH溶液中(质量分数为5%),搅拌5 min后过滤,取滤纸上的滤渣烘干后作为试验原料。

外掺剂石英砂烘干粉碎后,用0.25 mm的筛子筛分,取筛下石英砂粉末作为试验辅料。由于水泥采用现成的合格产品,且在运输与储存过程中几乎没有杂质污染,所以可不经处理直接应用于试验。

1.2.2 原料配比方案

综合考虑效果和经济2方面因素,将原料配比设计为煤气化粗渣63%~77%,石英砂8%~12%,水泥15%~25%(均为质量分数)。根据方差分析原理分别设计不同原料配比的试验组(表2),以研究性能最好的陶粒材料所对应的原料配比方案。

表2 各试验组原料配比方案

Table 2 Ratio of raw materials for each experimental group

试验组号	粗渣投加量/%	水泥投加量/%	石英砂投加量/%
1	77	15	8
2	75	15	10
3	73	15	12
4	72	20	8
5	70	20	10
6	68	20	12
7	67	25	8
8	65	25	10
9	63	25	12

1.2.3 原料造粒成球试验

按相应的配比计量煤气化粗渣、石英砂和水泥,加水搅拌均匀后使用圆盘造球机将原料造粒成球,圆盘造球机成球盘的角度调整为60°。转速先控制在30~35 r/min,经过约30 s,待成球盘中形成大量

粒核后,调大转速至 70~80 r/min 继续运转 30 s,待形成互不粘连的圆球状陶粒生料后取出。

1.2.4 养护条件确定

试验制备免烧煤气化粗渣陶粒的关键步骤在于养护过程。制得的坯体球先在室温下湿席养护 24 h,提高陶粒材料的初期强度;然后在 40 °C 蒸汽下养护 12 h,加快陶粒材料强度的增加速率^[14]。

1.3 样品性能表征

评价陶粒材料性能的主要指标有:化学性质、粒径和堆积密度、吸水性、比表面积以及筒压强度等^[6]。该试验制备的免烧煤气化粗渣陶粒拟定应用于建材、园艺、食品饮料、耐火保温材料等领域,因此,研究主要通过测试陶粒样品的堆积密度、筒压强度、吸水率及其浸出毒性等方面的指标表征免烧煤气化粗渣陶粒的性能。

1) 样品堆积密度表征。测定方法^[15]:在每组试验组制得的陶粒样品中取 30 L 干燥至恒重,分 2 份。用取样勺将试样从容器口上方 50 mm 处倒入,使自然落下。装满后使上部试样成锥体,用直尺沿边缘从中心向两边刮平,凹陷处用粒径小的样品填平,称量。采取的标准^[16]为 GB/T 17431.1—2010《轻集料及其试验方法第 1 部分:轻集料》。陶粒堆积密度 ρ 根据式(1)计算:

$$\rho = \frac{(m_t - m_v) \times 1000}{V} \quad (1)$$

式中: m_t 为样品和容器的总质量,kg; m_v 为容器的质量,kg; V 为容器的容积,L。

以 2 次测定的算数平均值为该组免烧煤气化粗渣陶粒产品的堆积密度。

2) 样品筒压强度表征。测定方法^[15]:在每组试验组制得的陶粒样品中随机选择 5 L 粒径 10~15 mm 的样品进行 3 次测试试验,将样品填入承压筒振动 5 s,再将承压筒放至压力机的下压板上,以每秒 300 N 的速度均匀加荷,记录压入深度为 20 mm 时对应的筒压强度,然后将每组测得的 3 个数据计算其算术平均值,作为该组免烧煤气化粗渣陶粒产品的筒压强度。采用的标准^[16]:密度等级为 700 的工业废渣轻集料的筒压强度应不小于 1.0 MPa。

3) 样品吸水率表征。测定方法^[15]:从每组试验组制得的陶粒样品中取 4 L 烘至恒重后分成 3 份,称量每份质量,将陶粒完全浸水 1 h,然后取出滤水 2 min,倒至拧干的湿毛巾上,来回滚动 10 次后称重。吸水率根据式(2)计算:

$$j = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: j 为陶粒 1 h 吸水率,%; m_0 为烘干试样质量,g; m_1 为浸水试样质量,g。

以 3 次测定的算数平均值为该组免烧煤气化粗渣陶粒产品的吸水率。采用的标准^[16]:密度等级为 600~1 200 的工业废渣轻集料的吸水率不应大于 10%。

4) 样品浸出毒性表征。测定方法^[17]:将质量比为 2:1 的浓硫酸和浓硝酸混合液加入到试剂水中,调节 pH 为 3.20±0.05;根据样品含水率按液固比 10:1(L/kg)计算出所需浸提剂体积并安装好零空间萃取容器(ZHE);把安装好的 ZHE 固定在翻转式震荡装置上,调节震荡装置转速为 30±2 r/min,在 23±2 °C 下震荡 18±2 h;在压力过滤器上装好滤膜用稀硝酸淋洗,过滤并收集浸出液于 4 °C 下保存待测试;使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对陶粒样品进行重金属浸出毒性测试。

1.4 性能优异度指数方法

以综合评分法为基础,根据统计学原理衍变而来的性能优异度指数评分法对陶粒的性能进行评价。评分标准根据试验的具体情况而定,最终参考各试验组产品优异度指数得分情况筛选出合适的免烧工艺条件试验组进行浸出毒性的测试。

1) 评分标准:筒压强度以 6.5 MPa 为合格标准 R_1 ,依据式(3),筒压强度 i 越大,计算出的性能优异度 X_1 得分越高; $i < 6.5$ MPa 时不得分。吸水率以 22% 为合格标准 R_2 ,依据式(4),吸水率 j 越小,计算出的性能优异度 X_2 得分越高; $j > 22\%$ 时不得分。

$$X_1 = \frac{i - R_1}{R_1} \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{R_2 - j}{R_2} \quad (4)$$

2) 优异度评分计算:依据式(5)计算各性能指标最终优异度评分 X_n ,依据式(6)计算各试验组产品综合性能指标的优异度评分 $X_n(i,j)$ 。

$$X_n = \frac{\sum_{k=1}^m X_k}{m} \quad (5)$$

$$X_n(i,j) = X_n(i) + X_n(j) \quad (6)$$

式中: X_n 为第 n 组某性能指标最终优异度评分; m 为重复测试次数; X_k 为某性能指标第 k 次测试优异度评分; $X_n(i,j)$ 为第 n 组综合性能指标的优异度评

分; $X_n(i)$ 为第 n 组筒压强度最终优异度评分; $X_n(j)$ 为第 n 组吸水率最终优异度评分。

3)评分结果说明:评分在0~0.1表示产品等级为合格品,评分在0.1~0.3表示产品等级为一等品,评分在0.3以上表示产品等级为优等品。

2 结果与讨论

2.1 各组陶粒堆积密度测定结果

分别对第1—9组不同配比制得的煤气化粗渣陶粒进行堆积密度测试,结果见表3。

表3 各组陶粒堆积密度测定结果

Table 3 Determination results for stacking density of each group of ceramsite

试验组号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	635	647	651	687	621	664	690	636	681
密度等级	700	700	700	700	700	700	700	700	700

从表3可以看出,各组煤气化粗渣陶粒的堆积密度均在 $600 \sim 700 \text{ kg/m}^3$,密度等级均为700,符合轻集料堆积密度不大于 1200 kg/m^3 的规定^[16]。由此可以确定该试验制备的煤气化粗渣免烧陶粒的筒压强度应不小于 1.0 MPa ,吸水率应不大于10%。

2.2 原料成分比对陶粒抗压强度的影响

分别对第1—9组不同配比制得的煤气化粗渣陶粒进行筒压强度测试,并根据结果进行性能优异度评分,测试及评分结果如图1所示。

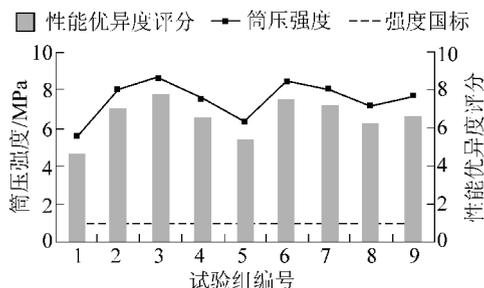


图1 陶粒产品筒压强度及性能优异度评分

Fig.1 Cylinder compressive strength and attained performance scores of ceramsite products

从图1可以看出,第1—9组制备的陶粒产品抗压强度均达标,达标率为100%。达标产品的筒压强度分布在 $7.15 \sim 8.71 \text{ MPa}$,性能优异度评分分布在 $6.15 \sim 7.71$,均达优等品标准。

水泥为粉状水硬性无机胶凝材料,添加水泥可在一定程度上加快陶粒的硬化速度,增加陶粒强

度^[18]。碱液可显著激发煤气化粗渣粉末的潜在活性,在 OH^- 的作用下,煤气化粗渣颗粒表面的 Si-O 和 Al-O 键断裂,玻璃体结构解体, Si-O-Al 网络聚合体的聚合度降低,活性物质溶出,因此陶粒产品的筒压强度较高。但陶粒产品筒压强度与水泥添加量并无明显的线性关系,与邹正禹等^[19]研究得到的陶粒筒压强度随水泥添加量的增大而同步增大的结论不符,可能是免烧煤气化粗渣陶粒工艺在蒸汽养护结束后的前段时间强度还在继续增加,个体间抗压强度增长的速率有所不同导致。

2.3 原料成分比对陶粒吸水率的影响

对不同原料成分比的9组免烧煤气化粗渣陶粒进行吸水率测试,各组测试结果及其性能优异度评分如图2所示。

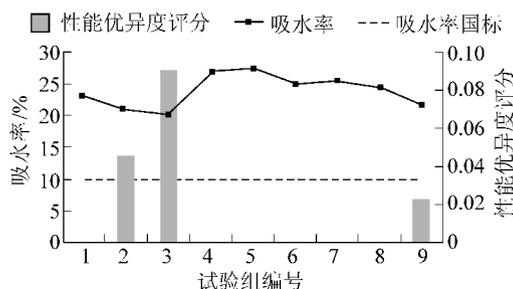


图2 陶粒产品吸水率及性能优异度评分

Fig.2 Water absorption and attained performance scores of ceramsite products

从图2可以看出,免烧煤气化粗渣陶粒产品的吸水率比较高,在63%~77%煤气化粗渣原料添加量范围内,9组免烧工艺陶粒材料样品均未达到吸水率国标,达标率为0。原因可能是免烧工艺过程中,陶粒原料中含量很高的 CaO 等没有经过化学转化,依然保持着与水结合反应的能力。因此,在之后的研究中应将吸水率的控制作为研究重点,不断优化原料配比,改进试验制备方案,在对其他性能影响较小的前提下,将吸水率控制在10%以下。

根据郑伟琴^[20]的研究,随着主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 的粉煤灰掺入量的提高,陶粒的吸水率随之增加,与该研究结果相一致:当水泥含量一定时,随着煤气化粗渣投加量的减少,陶粒的吸水率随之降低。原因可能为煤气化粗渣中的 Al 等成分在碱性环境下产生气体,使得陶粒内部形成了连通孔,对水的吸收能力上升。

2.4 免烧陶粒基础性能优异度评价

陶粒材料的性能表现是各项指标共同作用的结果,对各免烧组陶粒产品抗压强度和吸水率性

能进行评分分析后,根据各试验组产品综合性能指标的优异度评分 $X_n(i,j)$ 的计算算法,评估得到9组试验制备的陶粒材料抗压强度和吸水率2个基础性能指标的综合优异度评分结果,如图3所示。

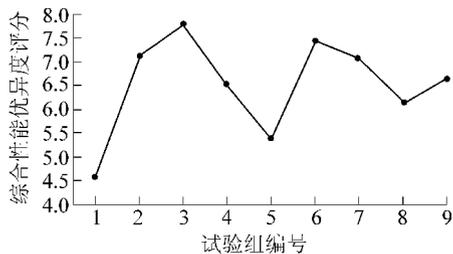


图3 陶粒产品综合性能优异度评分

Fig.3 Comprehensive performance scores of ceramsite products

由图3可知,综合性能优异度评分较高的4组分别为第3、第6、第2、第9组。但第6组陶粒产品仅单一性能指标表现良好,吸水率指标未达到合格标准,因此其综合性能优异度并不能反映其真实性能。由此,筛选出筒压强度和吸水率均达标且综合性能优异度评分较高的第2、第3、第9组,进行下一阶段的浸出毒性测试。

2.5 免烧陶粒浸出毒性测试及环境安全性评价

对甲醇厂煤气化粗渣样品中重金属含量进行检测,结果见表4。

表4 煤气化粗渣中主要重金属含量

Table 4 Content of major heavy metal in gasification cinder

元素	砷	铬	铅	镉
含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	84.237	920.821	7.436	0.064 3

根据检测结果,筛选出铬(Cr)、砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)四种重金属元素为浸出毒性的主要检测元素。购买上述4种元素的国家标准液为母液,配制样品测试时所需要的标准液,根据检测出的各重金属含量设置标液浓度梯度为1、5、10、20、50、100 $\mu\text{g}/\text{L}$,然后使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测试第2、第3、第9组的陶粒产品中重金属元素的浸出浓度。每组样品进行3次平行测试取算术平均值作为最终测试结果,并与GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中IV类标准^[21]对比(表5)。

从表5可以看出,研究所关注的4种特征重金属元素中Cr是主要的潜在污染物质,其在浸出液中

的浓度远高于其他3种重金属元素,与煤气化粗渣中其含量远高于其他3种重金属元素的情况对应。3个试验组制备的陶粒样品浸出毒性测试结果均达标,不存在人体健康和环境安全风险。

表5 陶粒产品浸出毒性测试结果

Table 5 Test results of leaching toxicity of ceramsite products

试验组	含量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$				结果
	Cr	As	Cd	Pb	
第2组	6.732 0	1.678 0	0.059 8	0.949 1	达标
第3组	5.153 0	1.163 0	0.050 5	1.275 0	达标
第9组	7.6900	1.015 9	0.051 6	0.772 3	达标
国家标准	100	100	5	50	—

将表5与表4进行比较,陶粒产品浸出液中重金属元素浓度明显低于煤气化粗渣中重金属元素含量,表明通过免烧工艺制备的陶粒可以有效地固定粗渣中的重金属元素,实现了粗渣处置无害化,安全性高,其原因为陶粒中的玻璃体结构对重金属有着较强的固溶稳定作用,可使重金属的活性降低^[22]。

3 结 论

1)免烧煤气化粗渣陶粒原料成分配比的最优试验条件为:煤气化粗渣掺加量73%,水泥投加量15%,石英砂投加量12%。废弃污染物煤气化粗渣的含量达到了70%以上,陶粒制备原料不含传统的黏土,减少了对耕地的破坏。

2)改进养护条件为室温下湿席养护24h后在40 $^{\circ}\text{C}$ 蒸汽养护12h,既可提高陶粒的强度,又降低了成本。相比传统焙烧法,减少能量的消耗和污染物排放,更具经济效益且节约能源。

3)免烧工艺制备的煤气化粗渣陶粒筒压强度都可达到1.0 MPa的国家标准;相同工艺条件下陶粒材料的吸水率指标未达到10%以下的国家标准,且吸水率随煤气化粗渣含量的增加而升高。

4)研究所关注的4种特征重金属元素中Cr是主要的潜在污染物质,其在浸出液中的含量远高于其他3种重金属元素。免烧工艺对重金属的固定化能力高,浸出毒性测试结果中4种重金属元素浓度明显低于原材料中的含量,且完全符合国家标准,不存在环境安全风险。

参考文献(References):

[1] 闫振甲,何艳君.陶粒生产实用技术[M].北京:化学工业出版社

- 社,2006:116-132.
- [2] 谢红武.结构轻集料混凝土研究进展[J].21世纪建筑材料居业,2011(9):87-91.
XIE Hongwu. Research progress of lightweight aggregate concrete [J]. 21st Century Building Materials, 2011(9):87-91.
- [3] 陈艳容,张 力,冉景煜,等.煤层气与煤矸石在循环流化床内混烧影响因素的试验研究[J].煤炭学报,2009,34(10):1374-1378.
CHEN Yanrong, ZHANG Li, RAN Jingyu, *et al.* Experiment key factors of coal-bed gas and coal gangue combustion in circulating fluidized bed[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10):1374-1378.
- [4] AHMARUZZAMAN M. A review on the utilization of fly ash[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2010, 36:327-363.
- [5] OATS W J, OZDEMIR O, NGUYEN A V. Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(5):413-419.
- [6] XU G R, ZOU J L, LI G B. Effect of sintering temperature on the characteristics of sludge ceramics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(2):394-400.
- [7] 高继光,马银亮,刘锐杰.水煤浆气化灰渣综合利用和效益分析[J].节能与环保,2014(2):72-73.
GAO Jiguang, MA Yinliang, LIU Ruijie. Comprehensive utilization and benefit analysis of coal slurry gasification ash[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2014(2):72-73.
- [8] ANAGNOSTOPOULOS I M, STIVANAKIS V E. Utilization of lignite power generation residues for the production of lightweight aggregates[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(1):329-336.
- [9] LIU X, CHIA K S, ZHANG M H. Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(1):335-343.
- [10] 向晓东,唐卫军,江新卫,等.高强度渣陶粒特性试验研究[J].矿产综合利用,2018(1):96-100.
XIANG Xiaodong, TANG Weijun, JIANG Xinwei, *et al.* Experimental study on the properties of high strength steel slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(1):96-100.
- [11] CHIOU I J, WANG K S, CHEN C H, *et al.* Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash[J]. Waste Management, 2006, 26(12):1453-1461.
- [12] 商晓甫.煤气化渣利用技术研究现状及应用趋势浅析[C]//2016中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷).北京:中国环境科学学会,2016:4.
- [13] 楼紫阳,宋立言,赵由才,等.中国化工废渣污染现状及资源化途径[J].化工进展,2006,25(9):988-994.
LOU Ziyang, SONG Liyan, Zhao Youcai, *et al.* Pollution and utilization of chemical industry waste slag in China[J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2006, 25(9):988-994.
- [14] ROS A, LILLO-RÓDENAS M A, FUENTE E, *et al.* High surface area materials prepared from sewage sludge-based precursors[J]. Chemosphere, 2006, 65(1):132-40.
- [15] GB/T 17431.2—2010,轻集料及其试验方法第2部分:轻集料试验方法[S].
- [16] GB/T 17431.1—2010,轻集料及其试验方法第1部分:轻集料[S].
- [17] HJ/T 299—2007,固体废物浸出毒性浸出方法:硫酸硝酸法[S].
- [18] SUN Yunjuan, JIANG Jianchun, ZHAO Shuheng. A review on the utilization of straw ash[J]. Biomass Chemical Engineering, 2011, 45(6):35-42.
- [19] 邹正禹,刘阳生.粉煤灰免烧陶粒制备及其重金属废水净化性能[J].环境工程学报,2013,7(10):4054-4060.
ZOU Zhengyu, LIU Yangsheng. Preparation of non-sintered ceramics from coal fly ash and its performance on heavy metals removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(10):4054-4060.
- [20] 郑伟琴.旧房拆迁废弃建筑粘土砖的再利用研究[D].南京:南京理工大学,2013:27.
- [21] GB 3838—2002,地表水环境质量标准[S].
- [22] 钱 伟,樊传刚,陈 伟,等.水处理污泥陶粒的制备及其对重金属的固定[J].非金属矿,2012,35(2):72-75.
QIAN Wei, FAN Chuangang, CHEN Wei, *et al.* Preparation and heavy metal immobilization of keramzite spheres from municipal sewage sludge[J]. Non-Metallic Mines, 2012, 35(2):72-75.