

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.03.004



河道底泥轻质陶粒的制备及性能

徐 滕¹, 龚佳豪^{2,3}, 周美成⁴, 董良飞¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 宁波首创厨余垃圾处理有限公司, 浙江 宁波 315000; 3. 首创环境控股有限公司, 上海 200080; 4. 江苏冰洲石环保科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:以河道底泥为主要原料,以粉煤灰、黏土为辅料,通过对原料的化学成分、矿物物相分析,考察其制备轻质陶粒的可行性。分别研究了原料配比、烧结温度及烧结时间等对陶粒性能的影响并对陶粒进行微观结构及矿物组成分析。结果表明,在原料配比 $m(\text{河道底泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{黏土})$ 为 4:2:4,预热温度 350℃,时间 20 min,烧结温度 1180℃,时间 5 min 时,可制备出堆积密度为 0.73 g/cm³,表观密度为 1.39 g/cm³,空隙率为 48.1%,抗压强度为 5.11 MPa 的河道底泥轻质陶粒;河道底泥陶粒中的重金属浸出毒性远低于原料,因此用河道底泥制备轻质陶粒是可行的。

关键词:河道底泥;轻质陶粒制备;物理性能

中图分类号:X 705

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)03-0025-09

Study on Preparation and Performance of Lightweight Ceramsite Made of River Sediment

XU Meng¹, GONG Jiahao^{2,3}, ZHOU Meicheng⁴, DONG Liangfei¹

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Ningbo Capital Kitchen Waste Disposal Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 3. Capital Environment Holdings Limited, Shanghai 200080, China; 4. Jiangsu Ice Island Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Taking the river sediment as the main raw material with fly ash and clay as the auxiliary materials, and the feasibility of preparing the lightweight ceramsite was investigated by analyzing the chemical composition and mineral composition. The effects of raw material ratio, sintering temperature and sintering time on the properties of ceramsite were studied. The microstructure and mineral composition of ceramsite were analyzed by SEM and XRD. The lightweight ceramsite can be prepared when the raw material ratio of the river sediment, fly ash and clay is 4:2:4, at the preheating tem-

收稿日期:2020-01-08。

基金项目:2018年度南京市建邺区“高层次创业人才引进计划”资助项目(建人才发[2018]2号)。

作者简介:徐滕(1995—),女,江苏无锡人,硕士生。通信联系人:董良飞(1972—),E-mail: dlf@cczu.edu.cn

引用本文:徐滕,龚佳豪,周美成,等.河道底泥轻质陶粒的制备及性能[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(3):25-33.

perature 350 °C for 20 min, and the sintering temperature 1 180 °C for 5 min. The bulk density and the apparent density were 0.73 g/cm³ and 1.39 g/cm³, and the porosity and the compressive strength were 48.1% and 5.11 MPa. The heavy metal leaching toxicity is much lower than that of the raw material which shows that it is feasible to prepare lightweight ceramsite from the river sediment.

Key words: river sediment; preparation of lightweight ceramsite; physical performance

随着中国工业生产及城市的迅速发展,大量工业废水和生活污水排入水体,造成河道底泥污染严重^[1]。河道底泥具有污染物含量高、水分含量高及成分复杂等特点,若随意处置,不仅会占用大量土地资源,且容易产生二次污染。若将河道底泥制成水处理填料,则可实现底泥的资源化利用,具有显著的环境效益、社会效益及经济效益^[2]。

近年来,学者们对轻质底泥陶粒的制备进行了大量研究。轻质陶粒具有密度小,比表面积大的特点,将其应用于曝气生物滤池中优势明显。章丹等^[3]以竺山湾底泥、钢渣、秸秆 3 种固体废弃物为原料制备出了表观密度为 0.8 g/cm³,堆积密度为 0.468 g/cm³的超轻陶粒;张国伟等^[4]以河道底泥为主要原料,以生活污水、广西白泥和水玻璃为辅料,得到了堆积密度 0.71 g/cm³,表观密度 1.517 g/cm³的陶粒;陈玉莹^[5]取底泥为主要原料,水生植物体和煤为造孔剂,制备出孔隙率为 61.05%,吸水率为 40.25%,堆积密度为 0.51 g/cm³,表观密度为 1.309 g/cm³的轻质底泥陶粒,并将其所制备的陶粒与商品陶粒作对比应用于曝气生物滤池中,结果表明,底泥陶粒比商品陶粒更易被微生物附着,对污水中的污染物去除效果均高于商品陶粒。这充分说明了轻质底泥陶粒制备的可行性,并且可将其作为理想的生物膜法污水处理的滤料,对于厨余垃圾的沼液处理也具有十分广阔的应用前景。本研究以河道底泥为主要原料,结合另一固体废弃物粉煤灰制备轻质陶粒,通过对原料配比和焙烧工艺的研究,探讨轻质陶粒的烧胀机理,以为河道底泥的处理处置提供新途径,并为轻质河道底泥陶粒的制备提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

河道底泥取自常州市武进区科教城附近某河流,干燥后经研磨并过 74 μm 筛;粉煤灰取自常州市某火电厂锅炉燃烧的废弃物;黏土取自常州市武进区科教城附近草坪。

MAX2500 型 X 射线粉末衍射仪(XRD),购自日本理学公司;S8 Tiger 型 X-射线荧光光谱仪(XRF),购自德国布鲁克 AXS 有限公司;SUPRA55 型扫描电镜(SEM),购自德国蔡司公司;ASAP2010C 型物理吸附仪,购自美国麦克默瑞提克仪器有限公司;SRJX-4-13A 型高温箱式电阻炉,购自浙江上虞市道墟镇燕光仪器设备厂;LA 204 型电子天平,购自瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司;DHG-9123A 型电热恒温鼓风干燥箱,购自上海左乐仪器有限公司;AA6880 型火焰原子吸收光谱仪,购自日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料物相分析

将所用的底泥、粉煤灰、黏土置于烘箱内,在 105 °C 下烘干 8 h,研磨后过 74 μm 筛,利用 XRF 对原料化学组成进行分析测定;采用 XRD 进行矿物物相组成分析。

1.2.2 陶粒制备方法

陶粒制备工艺如图 1 所示。原料预处理后,将粉末状的河道底泥、粉煤灰、黏土按质量比混合,再加

入一定比例的水,混匀,手工制作成颗粒粒径为 5~10 mm 的生料球,将其置于通风处自然晾干陈化。将陈化后的生料球置于高温箱式电阻炉中进行预热,然后按照预设好的升温程序烧结,烧结完成后取出自然冷却,得到河道底泥轻质陶粒。

河道底泥轻质陶粒制备实验的原料配比见表 1。结合前人对河道底泥陶粒制备研究,并以前期探索性实验为依据,兼顾河道底泥资源化利用,将河道底泥掺量固定为 40%,通过改变粉煤灰及黏土掺量,调节陶粒的化学组成。

1.2.3 陶粒性能测试

本实验的目标是制备内部疏松多孔的轻质陶粒,以堆积密度、表观密度、空隙率、抗压强度为指标,确定最佳制备工艺。

1) 物化性能测试:陶粒堆积密度、表观密度、空隙率、抗压强度、烧失率测试方法参考 GB/T 17431—2010《轻集料及其试验方法》;盐酸溶解率测试方法参考 CJ/T 299—2008《水处理用人工陶粒滤料》;抗压强度根据 Yashima 提出的一种试验方法测定,如图 2 所示^[6]。随机取样,测定单颗陶粒的抗压强度,结果取其平均值。抗压强度计算公式为

$$S = \frac{2.8P}{\pi d^2} \tag{1}$$

式中:S 为单颗陶粒抗压强度值,MPa;P 为陶粒破碎时荷载,N;d 为上下承压板距离,mm。

2) 微观结构分析:采用 SEM 对河道底泥轻质陶粒的切面喷金处理后进行微观结构分析。

3) 矿物物相分析:采用 XRD 对烧制陶粒的物相组成进行分析。

4) 重金属浸出毒性分析:称取干燥样品 20 g 置于 500 mL 具塞锥形瓶中,然后加入 500 mL 浸提液,盖紧瓶盖放入恒温水浴振荡器中,振荡频率 30 r/min,振荡 24 h 后取出,收集经 0.45 μm 滤膜过滤后的浸出液,采用火焰原子吸收光谱仪(AAS)测定 Cu,Cr,Pb,Zn,Ni 等重金属的浓度。

5) 比表面积分析:采用物理吸附仪对烧制陶粒的比表面积进行分析。

2 结果与讨论

2.1 原料物相及配比分析

根据陶粒烧制过程中各成分作用的不同,原料组成物质可以分为 3 类。骨架成分:主要为 SiO₂ 和 Al₂O₃,在陶粒烧制过程中主要起支撑骨架作用,是形成强度的主要成分;发气成分:主要是 Fe₂O₃,原料中的 C 与 Fe₂O₃ 在高温时反应生成 CO 和 CO₂ 气体,起到膨胀作用;助熔成分:主要指 CaO,MgO,Na₂O

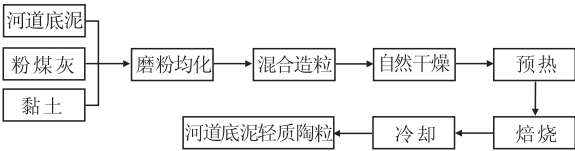


图 1 陶粒制备工艺流程
Fig.1 Flow chart of ceramsites prepared with river sediment

表 1 原料配比
Table 1 Raw materials ratio %

组数	原料配比		
	河道底泥	粉煤灰	黏土
1	40	10	50
2	40	20	40
3	40	30	30
4	40	40	20
5	40	50	10

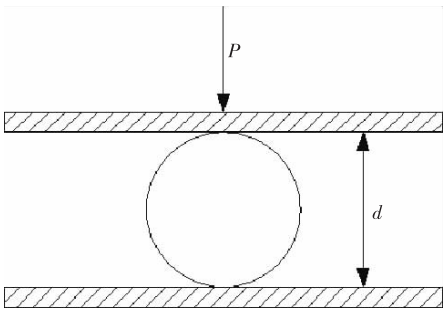


图 2 陶粒抗压强度试验
Fig.2 Test of compressive strength of ceramsite

和 K_2O ,可以降低液相形成的温度。目前公认的烧制膨胀陶粒成分要求,可以参照 Reliy 三相图^[7],如图 3 所示: SiO_2 , 53%~79%; Al_2O_3 , 11%~25%; Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O 等助熔成分之和, 13%~16%。

采用 XRF 对河道底泥成分进行测定,结果见表 2。由表可见,河道底泥中 SiO_2 含量最高,为 57.2%;其次为 Al_2O_3 ,含量为 20.1%,均符合 Reliy 三相图中 SiO_2 , Al_2O_3 的要求。刘明伟等^[8]在研究 Fe_2O_3 对污泥与底泥制备轻质陶粒的性能影响时发现, Fe_2O_3 质量分数为 3.5%~7%时,可以制备出表观密度较高、吸水率低的轻质陶粒。在本实验中,底泥的 Fe_2O_3 成分含量为 9.2%,因此需要添加辅料适当调节比例,以制备出优质的轻质陶粒。

迟培云等^[9]在研究原料的化学成分与坯料膨胀性能的关系时认为, SiO_2 和 Al_2O_3 与易熔成分 Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O 和 K_2O 的比值,一般在以下范围内,坯料膨胀效果较好

$$\frac{m(SiO_2 + Al_2O_3)}{m(Fe_2O_3 + RO + R_2O)} = 3.5 \sim 10 \quad (2)$$

式中: RO 为 CaO , MgO ; R_2O 为 Na_2O , K_2O 。

河道底泥中骨架成分与易熔成分的比值仅为 2.78,因此,为满足上述要求,选用粉煤灰及黏土作为辅料进行陶粒制备。实验选用的粉煤灰、黏土的主要化学成分组成见表 2。

表 2 原料的主要化学成分及含量

Table 2 Chemical composition and content of raw materials

原料	SiO_2	Al_2O_3	$CaO+MgO$	Na_2O+K_2O	Fe_2O_3	烧失量
河道底泥	57.2	20.1	4.80	4.10	9.20	9.78
粉煤灰	56.2	29.7	3.91	1.95	5.43	2.12
黏土	58.8	11.7	2.20	2.60	5.30	7.95

由表 2 可知,粉煤灰和黏土中骨架成分与易熔成分质量比分别为 7.61 和 3.9。因此,以粉煤灰和黏土作为辅料制备陶粒,有利于改善底泥陶粒的膨胀效果。

采用 XRD 对原料进行物相组成分析,结果如图 4 所示。由图可见,河道底泥的主要矿物成分为石英(Quartz, SiO_2)、钙长石(Anorthosite, $CaAl_2Si_2O_8$),同时含有 Cu , Zn , Cr 等重金属化合物,粉煤灰的主要矿物成分为石英(Quartz, SiO_2)、莫来石(Mullite, $Al_{2.35}Si_{0.64}O_{4.82}$)和 CaO ,黏土的主要矿物成分为石英(Quartz, SiO_2)和钠长石(Albite, $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)。

2.2 原料配比对陶粒性能的影响

将生料球在高温电阻炉中以 350 °C 预热 20 min,在温度 1 175 °C 下烧结时间 5 min,得出不同原料配比下陶粒的物理性质如图 5 所示。

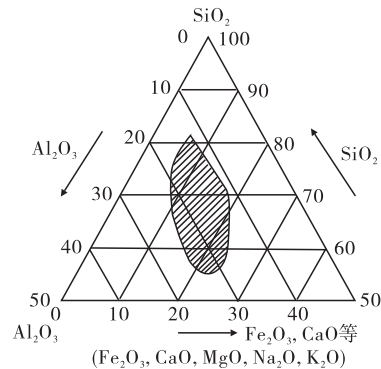


图 3 Reliy 三相图

Fig.3 Reliy three-phase diagram

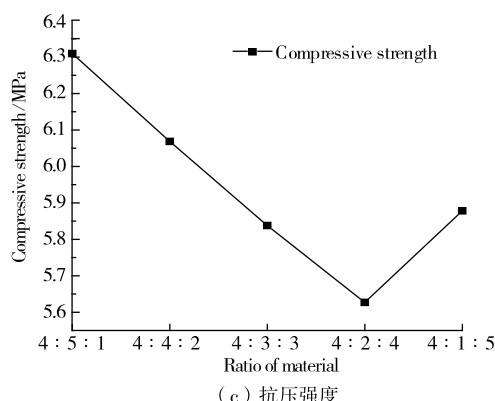
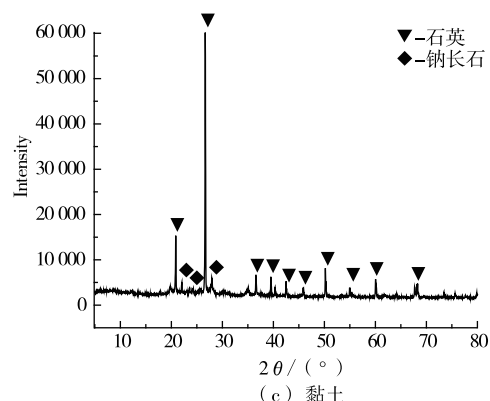
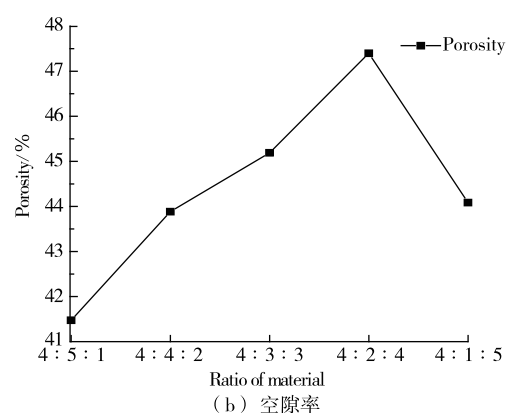
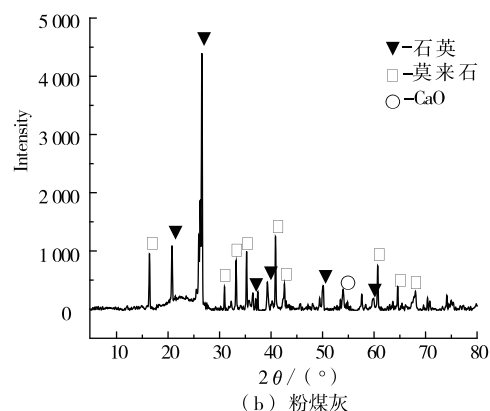
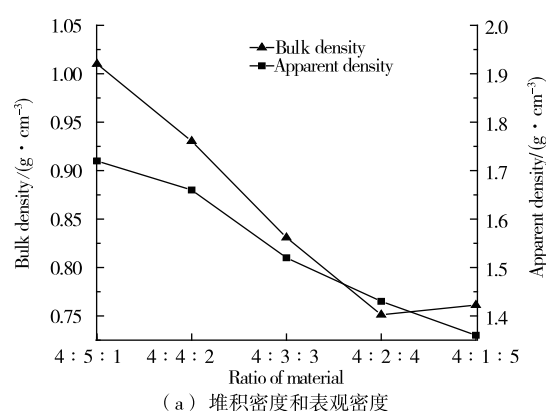
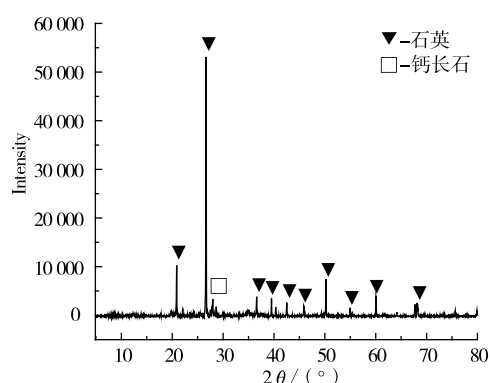


图4 河道底泥陶粒原料 XRD 图

Fig.4 XRD patterns of raw materials of river sediment ceramsite

图5 原料对比对陶粒物理性质的影响

Fig.5 Effect of raw material ratio on physical properties of ceramsite

由图 5(a)可知,随着粉煤灰掺量的减少,河道底泥陶粒的堆积密度呈现先减小后增大的趋势,表观密度呈现逐渐降低的趋势,在 $m(\text{河道底泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{黏土})$ 为 4:2:4 时可烧制出 800 级轻质陶粒。粉煤灰中的 Al_2O_3 含量为 31.1%,属于高铝类粉煤灰,而 Al_2O_3 的熔点高达 2 050 $^{\circ}\text{C}$ ^[10]。因此,随着粉煤灰掺量减少,陶粒产生液相所需的温度也降低,从而使陶粒在 1 175 $^{\circ}\text{C}$ 时即可产生轻微膨胀效果。由图 5(b)可知,空隙率在 $m(\text{河道底泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{黏土})$ 为 4:2:4 时达到最大,较高的空隙率使滤料的持水能力增强,也使污水和空气的传质过程中的阻力减小,有利于为滤料表面的生物膜供氧,为微生物提供营养以维持其生长繁殖^[11]。由图 5(c)可知,陶粒的抗压强度呈现先降低后增大的趋势,这可能是随着粉煤灰掺量减少、黏土掺量的增加,使得料球中的 Al_2O_3 含量减少,陶粒在 1 175 $^{\circ}\text{C}$ 更易产生足够的气相与液相,使陶粒内部的气孔数增加,抗压强度降低,抗压强度在 $m(\text{河道底泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{黏土})$ 为 4:2:4 时达到最小。

泥): m (粉煤灰): m (黏土)为4:2:4时达到最低,为5.63 MPa。当 m (河道底泥): m (粉煤灰): m (黏土)为4:1:5时,陶粒内部产生液相过多,液相填充到气孔中,使陶粒致密化,抗压强度增大。根据GB/T 17431—2010《轻集料及其试验方法》项目指标,800级陶粒抗压强度达到5.0 MPa以上为优等品,实验的5组原料配方均满足此要求。综上,确定原料配方为 m (河道底泥): m (粉煤灰): m (黏土)为4:2:4最佳。

2.3 烧结温度对陶粒性能的影响

烧结温度是影响陶粒膨胀性能的主要因素之一。烧结温度过低,陶粒焙烧不充分,无法形成足够的液相包裹陶粒内部产生的气体,难以膨胀;烧结温度过高,陶粒产生大量液相,容易向陶粒内部回填,使陶粒致密,影响膨胀效果。本实验中,以 m (河道底泥): m (粉煤灰): m (黏土)为4:2:4配制生料球,在高温电阻炉中以350℃预热20 min,分别在1170,1175,1180,1185,1190℃温度下烧结5 min,制得陶粒的物理性质如图6所示。

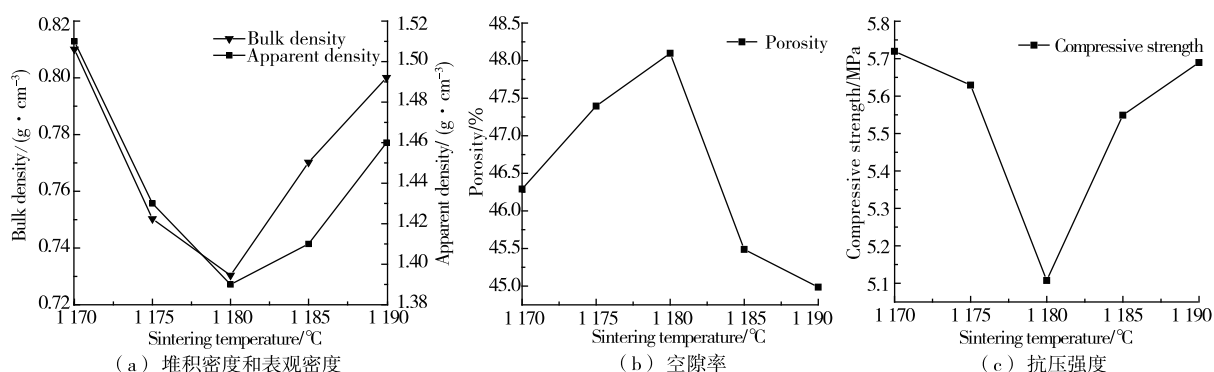


图6 烧结温度对陶粒物理性质的影响

Fig.6 Effect of sintering temperature on physical properties of ceramsite

由图6可知,当烧结温度由1170℃升高至1190℃时,陶粒的堆积密度、表观密度、抗压强度均先减小后增大,空隙率先增大后减小。这是因为烧结温度较低时,陶粒内部的液相较少,液相黏度较大,陶粒内部难以形成较大的孔结构,使制备的陶粒堆积密度、表观密度大、抗压强度高。由图6(a)和图6(c)可知,当烧结温度达到1180℃时,陶粒产生的液相与气相达到平衡,陶粒内部的气孔变多,使陶粒产生轻微膨胀,堆积密度、表观密度及抗压强度较低。随着烧结温度升高,液相产生量迅速增加且多于气相,液相黏度较低,孔结构塌陷,使陶粒体积收缩,堆积密度及表观密度增大。由图6(b)可知,空隙率在烧结温度为1180℃时达到最大为48.1%,在1190℃时最小为45.0%,均满足CJ/T 299—2008《水处理用人工陶粒滤料》滤料空隙率应>40%的相关要求。本实验在1180℃烧结温度下烧制出的陶粒孔隙发达,抗压强度为5.11 MPa。

2.4 烧结时间对陶粒性能的影响

以 m (河道底泥): m (粉煤灰): m (黏土)为4:2:4配制生料球,在高温电阻炉中以350℃预热保温20 min,在1180℃下分别烧结3,5,7,9 min,制得陶粒的物理性质如图7所示。

由图7(a)可知,陶粒的堆积密度及表观密度呈现相似的趋势,即随烧结时间增加,堆积密度及表观密度先减小后增大;这是因为烧结时间短时,陶粒生成的液相较少,使其难以包裹住陶粒内部产生的气相,陶粒无法膨胀。当烧结时间保持在5 min时,产生的液相及气相增加,使陶粒内部产生较大孔结构,陶粒发生轻微膨胀^[12]。如果烧结时间继续增加,陶粒内部产生大量液相,逐渐封闭陶粒孔隙及晶体间

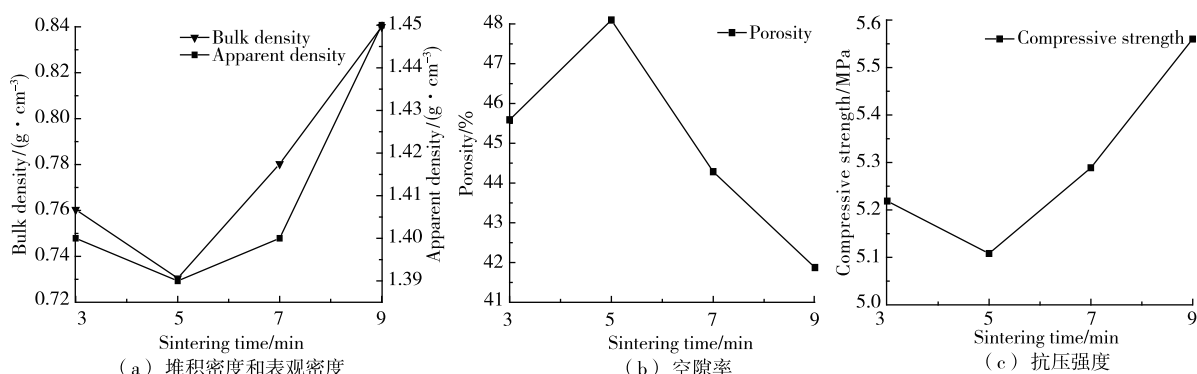


图 7 烧结时间对陶粒物理性质的影响

Fig.7 Effect of sintering time on physical properties of ceramsite

的缝隙,使陶粒致密,堆积密度及表观密度增大。由图 7(b)可知,空隙率在烧结时间递增的情况下呈先增大后减小的趋势,在烧结时间为 5 min 时达到最大,为 48.1%。由图 7(c)可知,随着烧结时间增加,抗压强度呈现先减小后增大趋势;这与陶粒堆积密度及表观密度的变化趋势一致。根据 GB/T 17431—2010《轻集料及其试验方法》,本实验烧制的陶粒均满足 800 级优等品要求。综合以上 4 项性能指标,确定最佳烧结时间为 5 min。

2.5 陶粒物相及微观结构分析

以 m (河道底泥): m (粉煤灰): m (黏土)为 4:2:4 配制生料球,在高温电阻炉中以 350 °C 预热保温 20 min,在 1 180 °C 下烧结 5 min,制得河道底泥轻质陶粒外观图、XRD 图、SEM 图分别如图 8~图 10 所示。

本实验所制备的陶粒粒径为 8 mm 左右,由图 8 可见,河道底泥陶粒为深棕色,表面分布微小气孔且形成光滑釉质层,说明在烧结过程中,陶粒产生了足够的液相包裹陶粒表面,其骨架成分及助熔成分均在合理范围内^[13]。

由图 9 可知,河道底泥轻质陶粒的主要矿物成分为石英(Quartz, SiO₂)、铝酸钙(Ca₃Al₂O₆)、钠长石(Albite, Na₂O·Al₂O₃·6SiO₂)和莫来石(Mullite, Al_{2.35}Si_{0.64}O_{4.82})。相比河道底泥及黏土中的石英成分,粉煤灰的石英衍射峰强度较低,作为辅料掺入后,烧成陶粒的石英衍射峰强度比河道底泥原料略低;烧成陶粒中的铝酸钙是由 Al₂O₃ 和 CaO 在高温条件下生成的,其硬度大的特征使得河道底泥陶粒具有较高抗压强度;烧成陶粒中的莫来石呈网络状分布于玻璃相中,起到增强骨架的作用,使陶粒具有较高的机械强度^[14];钠长石是钠的铝硅酸盐,在高温



图 8 河道底泥陶粒外观图

Fig.8 Appearance of river sediment ceramsite

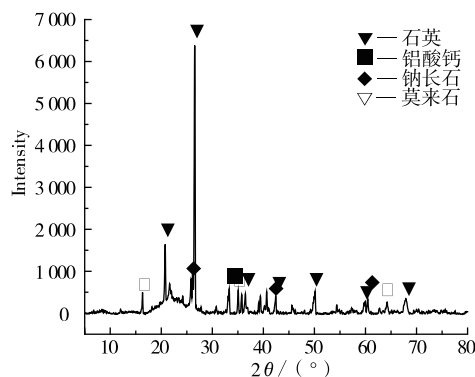


图 9 河道底泥陶粒 XRD 图

Fig.9 XRD patterns of raw materials of river sediment ceramsite

下熔融,填充到胚体颗粒之间,同样有助于增加陶粒的机械强度。

由图 10 可知,河道底泥轻质陶粒内部结构松散,孔隙发达,从而使陶粒具有较大比表面积。

2.6 陶粒重金属浸出分析

陶粒原料河道底泥及粉煤灰作为固体废弃物,其含有的污染物成分复杂(图 4 原料 XRD 测试结果),为防止其在水处理过程中引起二次污染,对陶粒中的主要重金属进行毒性浸出实验,测定结果见表 3。结果表明,所有测定的重金属浸出浓度(ρ)均低于 GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》中的允许值,且成品陶粒浸出液中的重金属浓度远低于原料,表明原料中的重金属在烧结过程中,得到了很好的固定作用,有效防止固体废弃物中重金属浸出造成的二次污染问题^[15]。

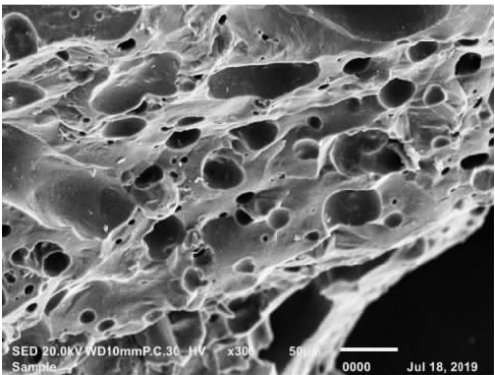


图 10 河道底泥微观结构图
Fig.10 River sediment ceramsite microstructure

表 3 样品的重金属浸出质量浓度
Table 3 Leaching content of heavy metals mg/L

样品	$\rho(\text{Cu})$	$\rho(\text{Zn})$	$\rho(\text{Ni})$	$\rho(\text{Pb})$	$\rho(\text{Cr})$
河道底泥	0.103 2	0.012 9	0.103 3	0.030 2	0.293 1
粉煤灰	0.019 0	0.008 6	0.092 3	0.056 0	1.227 8
黏土	1.422 0	0.090 9	0.077 6	0.062 1	2.309 2
陶粒	0.004 2	0.003 2	0.029 0	0.002 4	0.152 0
浸出毒性标准	100	100	5	5	5

2.7 其他指标分析

结合《水处理用人工陶粒滤料》,将在高温电阻炉中以 350 ℃ 预热保温 20 min,在 1 180 ℃ 下烧结 5 min,制得河道底泥轻质陶粒的其他指标进行测试分析,统计结果见表 4。由表可见,陶粒比表面积大、孔隙发达、盐酸可溶率低,其在水处理过程中耐酸能力强,使用寿命长。

表 4 河道底泥陶粒性能参数
Table 4 Comparison of characterization parameters of river sediment ceramsite

参数	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	空隙率/ %	抗压强度/ MPa	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	盐酸可溶率/ %
河道底泥陶粒	0.73	1.39	48.1	5.11	3.12	0.8%
标准	—	—	≥ 40	≥ 4.0	≥ 0.5	≤ 2

3 结 论

1) 以河道底泥为主要原料,以粉煤灰及黏土为辅料,制备河道底泥轻质陶粒,通过试验确定的最佳原料配比及烧制工艺条件为: $m(\text{河道底泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{黏土})=4:2:4$,预热温度至 350 ℃,预热时间 20 min,烧结温度 1 180 ℃,烧结时间 5 min。

2) 最佳工艺条件下制备的陶粒,堆积密度为 0.73 g/cm^3 ,表观密度为 1.39 g/cm^3 ,空隙率48.1%,抗压强度 5.11 MPa ,比表面积 $3.12 \text{ m}^2/\text{g}$,盐酸可溶率 0.8%。陶粒内部疏松多孔,孔隙均匀,满足 GB/T 17431—2010《轻集料及其试验方法》及 CJ/T 299—2008《水处理用人工陶粒滤料》的相关要求。陶粒重金属浸出毒性远低于原料,不会对环境造成二次污染。

参考文献:

- [1]王建超,章泓立,王军良,等. 河道底泥陶粒烧制的工艺条件及性能研究[J]. 环境污染与防治,2019,41(7):788-792.
- [2]黄玉婷. 疏浚底泥填料制作及污水处理效果研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [3]章丹,叶春,张大磊,等. 利用太湖竺山湾底泥制备轻质陶粒试验研究[J]. 环境工程技术学报,2014,4(5):378-384.
- [4]张国伟,杨波,奚旦立. 河道底泥制备陶粒滤料的研究[J]. 环保科技,2007(1):39-43.
- [5]陈玉莹. 底泥陶粒的研制及其在生物滤池中的应用研究[D]. 温州:温州大学,2017.
- [6]韩露. 新型污泥陶粒的制备及其在污水处理中的应用[D]. 郑州:郑州大学,2018.
- [7]RILEY C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1951,34(4):121-128.
- [8]刘明伟,许国仁,李圭白. Fe_2O_3 对污泥与底泥制备轻质陶粒性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(10):18-21.
- [9]迟培云,张连栋,钱强. 利用淤积海泥烧制超轻陶粒研究[J]. 新型建筑材料,2002(3):28-30.
- [10]范锦忠. 利用粉煤灰生产超轻陶粒的可行性分析[J]. 粉煤灰,2010,22(3):36-40.
- [11]万琼,韩庆吉,张新艳,等. 以给水厂污泥制备新型陶粒及其性能优化[J]. 硅酸盐通报,2019,38(4):1228-1236.
- [12]XU G R,ZOU J L,LI G B. Effect of sintering temperature on the characteristics of sludge ceramsite [J]. Journal of Hazardous Materials,2008,150:394-400.
- [13]张腾飞,荣辉,刘志华,等. 900 密度等级渣土陶粒的制备及性能研究[J]. 新型建筑材料,2017,44(1):109-113.
- [14]曲烈,王渊,杨久俊,等. 城市污泥-盐渍土高强陶粒制备及烧胀机理研究[J]. 新型建筑材料,2016,43(2):47-51.
- [15]XU G R,ZOU J L,LI G B. Stabilization of heavy metals in ceramsite made with sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials,2008,152(1):56-61.

(责任编辑:李艳,谭晓荷)