

铁尾矿粉煤灰免烧陶粒的制备与物理力学特性

张瑞, 鲁建国, 姚华彦, 李运泽, 卢俊雄, 刘帅廷

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 这是一篇矿物材料领域的论文。以铁尾矿和粉煤灰为主要原料制备免烧陶粒, 并研究了不同配比实验条件下铁尾矿掺量对制得免烧陶粒的堆积密度、表观密度、吸水率、强度的影响, 结果表明: 随着铁尾矿掺量的增加, 陶粒的堆积密度和表观密度逐渐增大, 吸水率逐渐减小, 强度呈现先减小后增加的趋势。通过铁尾矿制备成陶粒的方式可以大幅提高铁尾矿利用率, 所制得的免烧陶粒具有实际生产应用价值, 可为铁尾矿固体废弃物资源的综合化利用提供新途径, 有较好的经济效益和环保效益。

关键词: 矿物材料; 铁尾矿; 免烧陶粒; 粉煤灰; 掺量; 实验

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.06.004

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)06-0021-06

引用格式: 张瑞, 鲁建国, 姚华彦, 等. 铁尾矿粉煤灰免烧陶粒的制备与物理力学特性[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 21-26.

ZHANG Rui, LU Jianguo, YAO Huayan, et al. Preparation and physico-mechanics properties of non-sintered ceramsite from iron tailing fly ash[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 21-26.

近年来, 如何将铁尾矿绿色合理资源化利用是当前亟待解决的问题。随着经济的不断发展, 对于矿产资源的开采也越来越多, 但是伴随着资源的不断开采, 矿产废弃物—尾矿的产量也日益增加^[1]。我国重工业在迅猛发展的同时, 也带来了不容忽视的环境问题, 其中一大问题则是我国的尾矿堆存量巨大, 且目前仍呈现不断上升的趋势。铁尾矿在矿产业开发过程中容易大量堆积, 不仅占用土地资源、污染环境, 还存在一定的堆放安全隐患。据调查, 截至2015年, 全国的尾矿存量已经超过146亿t, 其中铁尾矿超过50%, 约为75亿t^[2], 但铁尾矿利用率仅为11%^[3]。全国铁矿山选矿厂每年排放尾矿近3亿t, 而综合利用率也未能达到20%^[4]。因此, 尾矿是否能高效地资源化利用, 是各省固体废弃物消纳的强效手段, 也是发展循环经济

的关键性基础。针对不同特性的铁尾矿的综合利用, 国内外学者展开了一系列研究: 国外将铁尾矿颗粒料用作建筑骨料已经有60多年的使用经验, 以美国明尼苏达地区的粗颗粒铁燧岩尾矿应用最为典型^[5]。国内有刘俊杰等^[6]利用某包头铁尾矿为原料制备免烧砖, 徐庆荣等^[7]将其作为主要原料用来制备水泥熟料, 为提高铁尾矿废料的利用价值, 铁尾矿也被用于制作微晶玻璃^[8]、泡沫陶瓷^[9]等高附加值产品。但利用铁尾矿制备烧结砖、泡沫陶瓷等方法具有一定的局限性, 其本身具有能耗大、成本高等局限性, 在对铁尾矿性质要求极为严格的同时, 消耗的铁尾矿量有限。

探索如何将铁尾矿资源化利用, 是工程建设者、政府管理部门需要解决的重要问题。因此, 本研究制备五种不同配比的陶粒, 对其物理性能

收稿日期: 2022-03-14

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004a07020027); 省级大学生创新训练计划(S202110359102)

作者简介: 张瑞(2000-), 男, 本科, 研究方向为土木工程。

通信作者: 姚华彦(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为固废资源化利用与岩土工程。

进行测试, 确定较优免烧铁尾矿陶粒的制备方法, 制备而成的免烧铁尾矿陶粒有助于铁尾矿固体废弃物的资源化利用, 能够产生一定的工程经济效益并助力绿色发展。

1 实验原料与实验方案

1.1 实验原料

(1) 超细改性粉煤灰: 具有高硅、铝的特性, 具有好的提高陶含量的效果。其主要化学成分结果见表 1。

表 1 粉煤灰主要化学成分/% Table 1 Chemical components of fly ash						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
55.50	27.94	6.06	5.24	1.22	0.50	2.00

从表 1 中可知, 使用的粉煤灰中 SiO₂、Al₂O₃ 的含量分别为 55.5% 和 27.94%, 高硅、铝的特性能较好的提升所制备陶粒的强度。

(2) 纳米四氧化三铁: 购于天津凯利冶金研

究院, 其材料特性见表 2。

表 2 纳米四氧化三铁物理特性参数 Table 2 Physical properties of Nano-iron oxide					
平均粒径/ mm	纯度/ %	比表面积/ (m ² /g)	堆积密度/ (g/cm ³)	密度/ (g/cm ³)	外观
100	>99	66	0.84	4.98	黑色粉末

(3) 水泥: P·O 52.5 的普通硅酸盐水泥。

(4) 水: 为生活用自来水。

(5) 石膏、生石灰和速溶硅酸钠均为实验室采购材料。

1.2 铁尾矿陶粒的制备实验方案

按照表 3 既定的原料配料比分别称取相应质量的铁尾矿、粉煤灰、水泥、石膏、生石灰、速溶硅酸钠、磁性纳米材料和水。王梓^[10]等以铁尾矿粉、粉煤灰作为原料, 通过高温烧结过程制备出了铁尾矿陶粒。本文拟通过控制实验过程中铁尾矿含量和粉煤灰含量, 研究不同配比方案条件下的所制备的免烧铁尾矿陶粒性能, 从而确定较优的陶粒原料配比, 制样过程如下。

表 3 原料配合比/g Table 3 Material mix ratio							
编号	铁尾矿	粉煤灰	石膏	水泥	生石灰	速溶硅酸钠	纳米四氧化三铁
1	300	2 400	60	110	60	15	100
2	600	2 100	60	110	60	15	100
3	900	1 800	60	110	60	15	100
4	1 200	1 500	60	110	60	15	100
5	1 500	1 200	60	110	60	15	100

将铁尾矿、粉煤灰等原料等放入烘箱中, 以 110 ℃ 的温度烘干 4 h 至恒重后过 6 mm 筛。过筛后, 将生石灰加水充分水化, 而后将粉煤灰, 铁尾矿等原料充分拌匀混合后与水、水化后的生石灰和粉状原料混合并搅拌 15 min, 使得原料相互混合均匀。将混合均匀的原料通过圆盘制球机制备成球, 得到生料球。为得到干燥的铁尾矿陶粒, 将制得的生料球放入干燥箱中在 105 ℃ 下干燥 6~8 h 后置于室内自然冷却^[11]。

2 实验方法

2.1 堆积密度

铁尾矿陶粒堆积密度采用《轻集料及其实验方法第二部分: 轻集料实验方法》(GB/T 17431.2)^[12]测定。取铁尾矿陶粒 1.5 L 放在烘箱

中烘干至恒重, 将铁尾矿陶粒样品用料铲从距量筒口上方 50 mm 高度处均匀倒入, 装满后使量筒口上部试样成锥体且四周溢满, 用直尺挂齐平面后称重。采用下式 (1) 可计算堆积密度:

$$\rho = \frac{(m_1 - m_2) \times 10\,000}{V} \quad (1)$$

式中: ρ 为堆积密度, kg/m³, 取 3 次实验结果的算术平均值为堆积密度的测定值; m_1 为铁尾矿陶粒和量筒的质量, kg; m_2 为量筒的质量, kg; V 为量筒的体积, L。

2.2 表观密度

铁尾矿陶粒表观密度采用《轻集料及其实验方法第二部分: 轻集料实验方法》(GB/T 17431.2)^[12]测定。取 500 g 免烧铁尾矿陶粒浸水 1 h, 若有铁尾矿陶粒漂浮于水上, 须用带柄金属

板将其压入水中，倒入筛子滤水 1~2 min，将铁尾矿陶粒放入广口瓶内并注满水，称取总质量 M_1 。采用下式 (2) 可计算表观密度：

$$\rho_{ap} = \frac{m}{[M_2 - (M_1 - m)]/\rho_0} \quad (2)$$

式中： ρ_{ap} 为表观密度， kg/m^3 ，取 3 次实验结果的算数平均值为堆积密度的测定值； m 为铁尾矿陶粒质量， kg ； M_1 为铁尾矿放入广口瓶并注满水总质量， kg ； M_2 为广口瓶注满水总质量， kg ； ρ_0 为水的密度， kg/m^3 。

2.3 吸水率

免烧铁尾矿陶粒吸水率采用《轻集料及其实验方法第二部分：轻集料实验方法》（GB/T 17431.2）^[12] 测定。称取 500 g 烘干后的铁尾矿陶粒放入烧杯内，加水浸泡 1 h，倒入筛子滤水 1~2 min，将铁尾矿陶粒放置在拧干的湿毛巾上来回滚动 8~10 次后称重。采用下式 (3) 可计算吸水率：

$$\omega_a = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： ω_a 为陶粒 1 h 吸水率，取 3 次实验结果的算数平均值为堆积密度的测定值； m_1 为陶粒浸水后质量， kg ； m_0 为烘干后陶粒的质量， kg 。

2.4 颗粒强度

通过测试陶粒的劈裂抗拉强度确定陶粒的单颗粒强度（图 1），随机选取 10 颗陶粒，测定陶粒的单颗抗压强度^[13]，结果取 10 颗陶粒的平均值，其强度公式为^[14-15]：

$$S = \frac{2.8P}{\pi X^2} \quad (4)$$

式中： S 为单颗陶粒的抗压强度值， MPa ； P 为陶粒破坏时的荷载， N ； X 为上下承压板的距离， mm 。

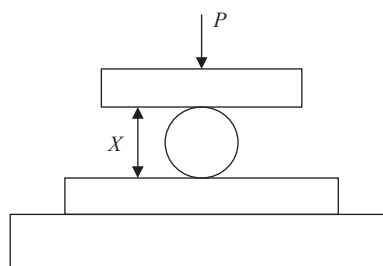


图 1 测定单颗陶粒颗粒强度示意

Fig.1 Schematic diagram of determination of particle strength

2.5 软化系数

由于陶粒样品数量限制，通过对比饱水前后陶粒的颗粒强度变化来计算陶粒的软化系数，其软化系数计算公式见式 (5)：

$$\psi = \frac{S_0}{S} \quad (5)$$

式中： ψ 为软化系数； S_0 为饱水后陶粒的颗粒强度， MPa ； S 为干燥条件下陶粒的颗粒强度， MPa 。

3 结果与分析

固定每千克铁尾矿粉煤灰混合物中石膏、水泥、生石灰、速溶硅酸钠和纳米四氧化三铁的加入量，铁尾矿粉煤灰混合物中铁尾矿掺量的变化范围为 10%~50%。测定五组不同铁尾矿掺量下陶粒的堆积密度、表观密度、吸水率和颗粒强度，探究铁尾矿掺量对不同配比实验条件下免烧铁尾矿陶粒物理特性的影响并分析原因。各项物理性能指标实验结果见表 4。

表 4 免烧铁尾矿陶粒实验成果
Table 4 Test results of iron tailings ceramsite

铁尾矿:粉煤灰	颗粒强度/ MPa	吸水率/%	堆积密度/ (kg/m^3)	表观密度/ (kg/m^3)	软化系数
1:9	1.212 0	27.43	745.95	1 369.13	0.712
2:8	1.138 1	25.79	854.11	1 391.44	0.685
3:7	0.769 0	23.44	901.47	1 401.17	0.708
4:6	0.603 7	22.32	1 010.99	1 439.15	0.820
5:5	0.725 5	22.04	1 105.73	1 481.37	0.723

3.1 堆积密度与铁尾矿掺量的关系

由图 2 可知，随铁尾矿掺量的增加，陶粒的堆积密度逐渐增大，堆积密度和铁尾矿的掺量近似成线性相关关系。且从表面现象来看，随着铁

尾矿掺量的增大，陶粒的粒径并没有发生较大的变化。相关研究数据表明，铁尾矿粉的密度大于超细改性粉煤灰的密度，因此铁尾矿掺量越大，陶粒的堆积密度越大。

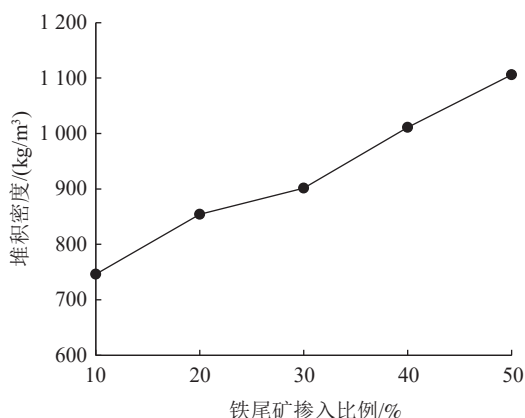


图2 堆积密度和铁尾矿占比的关系

Fig.2 Effect of iron tailing content on stacking density

3.2 表观密度与铁尾矿掺量的关系

由图3可知，随着铁尾矿掺量的增加，陶粒的表观密度不断增大，二者近似成线性关系。主要原因是铁尾矿的密度大于粉煤灰的密度。因此，要得到轻质且强度满足要求的陶粒，需控制铁尾矿的含量，在合理的区间内选择铁尾矿和粉煤灰的掺量配比。

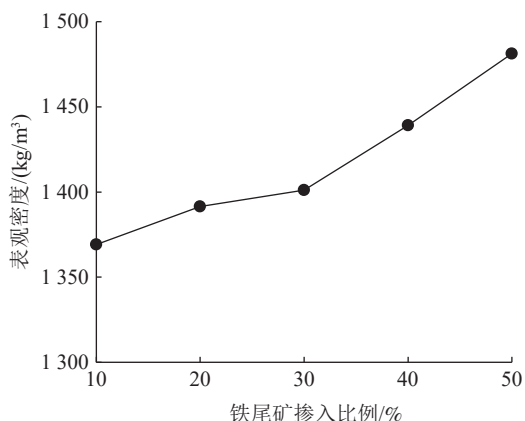


图3 表观密度和铁尾矿占比的关系

Fig.3 Effect of iron tailing content on apparent density

3.3 吸水率与铁尾矿掺量的关系

由图4可知，随着铁尾矿掺量的增加，陶粒吸水率逐渐下降，但吸水率的下降速率逐渐减缓。因粉煤灰掺量较高的陶粒颗粒呈多孔型蜂窝状组织，表面凹凸不平，比表面积较大，孔隙率较高，因此具有很强的吸水性；而相较于铁尾矿掺量较大的陶粒颗粒，其颗粒大，比表面积大，因而吸水能力较弱。

免烧铁尾矿陶粒与粉煤灰陶粒二者颗粒直径不同，两者按一定比例掺和，可有良好的级配效果提高密实度减少空隙，使吸水率降低。因此不难得出，随着铁尾矿的掺量不断增加，陶粒内部

空隙不断减小，吸水率会呈现下降的趋势。

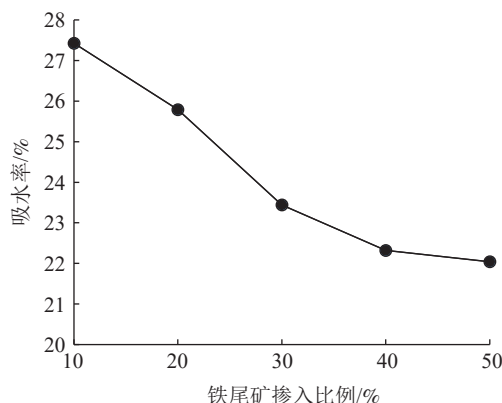


图4 吸水率和铁尾矿占比的关系

Fig.4 Effect of iron tailing content on water absorption

3.4 颗粒强度与铁尾矿掺量的关系

由图5可知，随铁尾矿掺量的增加，陶粒的颗粒强度呈现先下降后增加的趋势，在铁尾矿掺量达到40%后，陶粒强度较前一掺量配比有了小幅度度的上升。

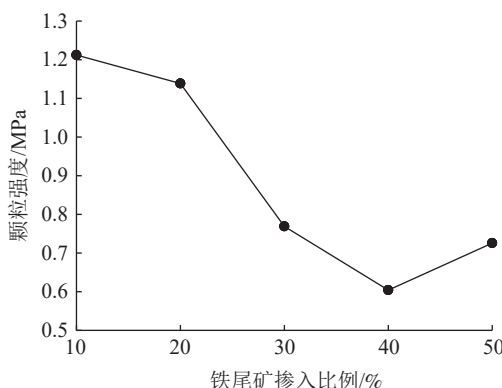


图5 颗粒强度和铁尾矿占比的关系

Fig.5 Effect of iron tailing content on particle strength

随着铁尾矿掺量的增加，陶粒中 SiO_2 、 Al_2O_3 等化学成分占比有一定幅度的减小， Fe_2O_3 等成分不断增高，而 SiO_2 、 Al_2O_3 等成分是形成陶粒强度的主要因素，因而随着铁尾矿掺量的增加，强度明显下降。但当铁尾矿掺量到达50%后，所制陶粒各原料配比得到一定程度优化，过量的铁尾矿粉夹杂在陶粒内部，使得陶粒内部孔隙数量减少，微团粒间连接更加紧密，颗粒间相互嵌挤形成一个整体，增大了铁尾矿粉与各原料之间的摩阻力，从而导致陶粒强度较40%掺量有一定幅度的提升。

3.5 软化系数与铁尾矿掺量的关系

图6是免烧陶粒软化系数与铁尾矿掺量之间的关系。从图中可以看出，陶粒的软化系数随着

铁尾矿掺量的增加并没有显著的量化关系,数值大致在 0.7~0.8 范围之内,并没有出现陶粒饱水后强度出现大幅下降的现象,进一步证明了铁尾矿废料应用于陶粒具有一定的实际应用价值。

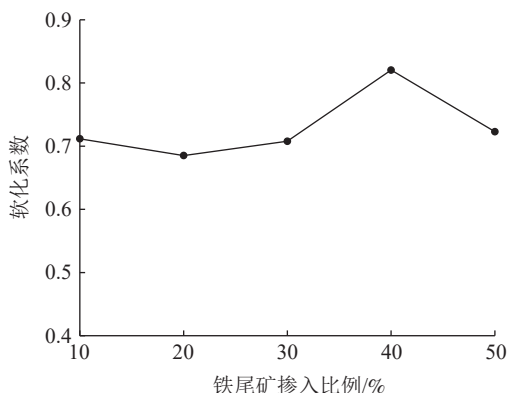


图6 软化系数和铁尾矿占比的关系

Fig.6 Effect of iron tailings content on softening coefficient

4 结 论

(1) 陶粒的堆积密度和表观密度随着铁尾矿掺量的增加而不断增加,二者呈现线性相关关系,而陶粒的吸水性能随着铁尾矿掺量的增加不断减弱,其颗粒强度随着铁尾矿掺量的增加呈现先减小后增加的趋势,软化系数随着铁尾矿掺量的增加并没有发生显著的变化。

(2) 在满足 GB/T 17431.1—2010《轻集料及其试验方法 第1部分》中密度等级 1000 要求的前提下尽可能提高铁尾矿固废的利用率,根据各物理特性指标试验结果,推荐铁尾矿陶粒成分较优的组成为:铁尾矿和粉煤灰的占比比例为 3:7。

(3) 利用铁尾矿粉代替一部分粉煤灰作为陶粒的原材料,使得在强度满足要求的条件下,为铁尾矿粉、粉煤灰、石膏等工业废料的综合利用提供了新的方法,提高固体废弃物资源的利用率,具有良好的经济效益和环境效益。

参考文献:

- [1] 宁波,闫艳,左夏伟,等.铁尾矿砂混凝土力学特性实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):159-164+175.
- NING B, YAN Y, ZUO X W, et al. Experimental study on mechanical properties of iron tailings concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):159-164.
- [2] 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, 21(3):11-14.
- MENG X R, ZHOU Y X, GUO X Y. Review on comprehensive utilization of iron tailings[J]. *Journal of Liaoning*

Institute of Science and Technology, 2019, 21(3):11-14.

- [3] 邓文,江登榜,杨波,等.我国铁尾矿综合利用现状和存在的问题[J]. *现代矿业*, 2012, 27(9):1-3.

DENG W, JIANG D B, YANG B, et al. Comprehensive utilization status and existing problems of iron tailings in China[J]. *Modern Mining*, 2012, 521(9):1-3.

- [4] 王德民,胡百昌,储腾跃,等.低硅铁尾矿制备建筑陶粒及其性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(2): 36-38+51.

WANG D M, HU B C, CHU T Y, et al. Study on preparation and performances of building ceramsite with low silica iron tailings[J]. *New Building Materials*, 2016, 43(2): 36-38+51.

- [5] Collins, R. J., S. K. Ciesielski. Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. national cooperative highway research program synthesis of highway practice 199[M]. Transportation Research Board, Washington, D. C., 1994

- [6] 刘俊杰,梁钰,曾宇,等.利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):136-141.

LIU J J, LIANG Y, ZENG Y, et al. Study on Preparation of non fired brick from iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):136-141.

- [7] 徐庆荣.利用铁尾矿烧制硅酸盐水泥熟料[J]. *现代矿业*, 2018, 34(5):165-168.

XU Q R. Calcining portland cement clinker with iron tailings[J]. *Modern Mining*, 2018, 34(5):165-168.

- [8] 郑伟宏,王哲,晁华,等.铁尾矿-CRT玻璃协同制备CMAS微晶玻璃的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(2):511-517.

ZHENG W H, WANG Z, CHAO H, et al. Preparation of CMAS glass-ceramics by the combination of ferrous tailing and CRT glass[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(2):511-517.

- [9] 黎邦城,石棋,胡海明,等.程潮铁尾矿制备泡沫陶瓷的研究[J]. *中国陶瓷*, 2014, 50(9):82-86.

LI B C, SHI Q, HU H M, et al. Research on the foaming ceramics with the preparation of iron tailings[J]. *China Ceramics*, 2014, 50(9):82-86.

- [10] 王梓,陈鸿骏,薛泽洋,等.铁尾矿粉煤灰陶粒的制备与表征[J]. *材料研究与应用*, 2020, 14(3):217-225.

WANG Z, CHEN H J, XUE Z Y, et al. Preparation and characterization of the iron tailing/fly ash ceramsites[J]. *Materials Research and Application*, 2020, 14(3):217-225.

- [11] 朱思铭,黎强.免烘干脱水污泥制备陶粒的试验研究[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 44(12): 77-82.

ZHU S M, LI Q. Experiment study on usage of dry-free dewatered sludge to make ceramsites[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 44(12): 77-82.

- [12] 轻集料及其试验方法第2部分:轻集料试验方法[S]. GB/T 17431.2—2010.

Lightweight aggregate and its test methods Part 2: Test methods for lightweight aggregate [S]. GB/T 17431.2—2010.

- [13] 沈凡,韦国苏,庞若楠,等.利用磷尾矿烧制轻质陶粒及

其性能研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(6):2303-2308.

SHEN F, WEI G S, PANG R N, et al. On lightweight ceramsite smelting from phosphorus tailings and its properties to be achieved[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(6):2303-2308.

[14] C R Cheeseman, A. Makinde, S Bethanis. Properties of

lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2005, 43(2):147-162.

[15] Li Y D, Wu D F, Zhang J P, et al. Measurement and statistics of single pellet mechanical strength of differently shaped catalysts[J]. Powder Technology, 2000, 13(1-2):176-184.

Preparation and Physico-mechanics Properties of Non-sintered Ceramsite from Iron Tailing Fly Ash

ZHANG Rui, LU Jianguo, YAO Huayan, LI Yunze, LU Junxiong, LIU Shuaiting

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral materials. Non-sintered ceramsite were prepared using iron tailings and fly ash as the main raw materials, and the effects of iron tailings proportion on the stacking density, apparent density, water absorption, and strength of non-sintered ceramsite were studied at different material mix ratio. The results showed that with the increase of iron tailings proportion, the stacking and apparent density of ceramsite gradually increased, while the water absorption gradually decreased. The strength shows a trend of decreasing first and then increasing. The method of preparing ceramsite from iron tailings can significantly improve the utilization rate of iron tailings. The non-sintered ceramsite production have practical application value and can provide a new way for the comprehensive utilization of iron tailings with good economic and environmental benefits.

Keywords: Mineral materials; Iron tailings; Non-sintered ceramsite; Fly ash; Proportion; Test

////////////////////////////////////
(上接第 20 页)

Cooperative Preparation of Glass-ceramics by Blast Furnace Slag and Low-carbon Chromium Iron Alloy Slag

WANG Yifan, WANG Yici, WANG Ruixin, ZHAO Fengguang, CHAI Yifan, LUO Guoping

(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral materials. In order to make high-value utilization and harmless treatment of bulk industrial solid waste, CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-Cr₂O₃ system glass-ceramics were prepared by melting method with Baotou Steel blast furnace slag, low-carbon chromium iron alloy slag and quartz sand as the raw materials. The optimum ratio of raw materials was explored by means of differential thermal analysis (DSC), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that when the mass ratio of blast furnace slag, low-carbon chromium iron alloy slag and quartz sand was 60:40:31, the crystalline phases of glass-ceramics were diopside and omphacite. At this time, the performance of glass-ceramics was the best, the flexural strength reached 126.25 MPa, the crystallinity reached 89.19%, and the microstructure was ideal. The glass-ceramics prepared under the optimal raw material ratio met the requirements for national class A decoration materials, i.e. IRa≤1.0 and I_γ≤1.3, and the leaching concentration of heavy metal chromium in the glass-ceramics met the national standard, indicating that it is feasible to prepare glass-ceramics with blast furnace slag and low-carbon chromium iron alloy slag.

Keywords: Mineral materials; Blast furnace slag; Low-carbon chromium iron alloy slag; Glass-ceramics; Optimal ratio