

铁尾矿制备陶粒工艺、机理与应用进展

李星臻, 李国峰, 刘立伟, 栗艳锋

华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063000

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)06-0056-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.09.001

摘要 我国铁尾矿分布范围广、堆存量巨大,造成了严重的土地占用和环境污染等问题。铁尾矿基陶粒作为轻骨料,具有轻质高强、吸水率低、抗冻性能良好等特点,可应用于建筑材料、园艺、水处理等领域。阐述了陶粒的种类、铁尾矿用于制备陶粒的原料适用性,介绍了铁尾矿制备焙烧陶粒和免烧陶粒的工艺及其产品性能优劣,分析了铁尾矿基陶粒在焙烧和免烧过程中的反应机理,归纳了铁尾矿基陶粒气孔结构的形成原理及研究现状,系统总结了铁尾矿基陶粒的应用现状,提出了未来研究需要解决的问题及发展方向。利用铁尾矿制备陶粒,对促进铁尾矿资源的循环利用和矿山环境保护具有深远意义。

关键词 铁尾矿; 陶粒; 反应机理; 气孔结构

引言

铁尾矿是铁矿石选矿后产生的主要固体废弃物之一,是重要的二次资源,主要分布在鞍山、白云鄂博、攀枝花等地区。我国铁尾矿资源数量庞大,平均每年排放量超5亿^[1-3]。铁尾矿的堆存不仅占用了大量土地资源,造成了环境污染,还给矿山的安全生产带来了隐患,解决铁尾矿的堆存问题、实现铁尾矿的资源化利用迫在眉睫^[4-6]。相关工作者围绕铁尾矿资源化利用开展了很多研究工作,主要包括有价元素回收、制备建筑材料、充填材料、化工产品等^[7-10]。

陶粒的表面呈陶质,外观多为圆形、椭圆形或不规则碎石状,粒径一般为5~25 mm,可替代碎石或卵石充当混凝土骨料。陶粒的颜色各异,焙烧陶粒多为暗红色、赭红色,少数呈现灰白色、灰黑色等;免烧陶粒一般为灰黑色,表面无光泽^[11-14]。陶粒因其良好的保温隔热性、耐久性、抗冻性、耐腐蚀性等性能,广泛应用于建筑、材料、园艺、水处理等领域。我国铁尾矿堆存数量庞大,以铁尾矿为主要原料制备陶粒,是实现铁尾矿规模化利用的有效途径之一^[15-18]。

本文根据陶粒制备的必要条件,概述了制备不同类型陶粒对原料的要求以及铁尾矿制备陶粒的可行性,详细分析了铁尾矿基陶粒制备工艺流程及其优缺点,总结了制备铁尾矿焙烧陶粒与免烧陶粒的机理反

应,归纳了铁尾矿基陶粒气孔结构的形成原理及调控机制研究现状,以及铁尾矿基陶粒在建筑和水处理领域的应用现状,指出其在工业化应用方面存在的问题,并提出解决方案,可以为进一步优化陶粒的气孔结构特征,为铁尾矿基陶粒的推广应用提供参考。

1 陶粒

陶粒是一种人造轻集料,主要由硅酸盐材料经焙烧或免烧工艺制备而成。根据制备原料的不同,陶粒可分为页岩陶粒^[19-20]、黏土陶粒^[21]、尾矿陶粒^[22]、粉煤灰陶粒^[23-24]、污泥陶粒^[25]、煤矸石陶粒^[26-27]等。陶粒制备的关键是原料配比,Riley^[28]的化学成分三元相图如图1所示,由图可知,陶粒原料化学成分含量要求如下:SiO₂为40%~79%,Al₂O₃为10%~25%,其他氧化物为13%~26%,化学成分含量在此范围内是陶粒成功制备的必要条件。以页岩、黏土、粉煤灰为主料制备陶粒,其化学成分含量与制备陶粒所需原料含量极为契合;以尾矿为主料制备陶粒,部分尾矿化学成分含量与制备陶粒所需含量契合度差,如:高硅铁尾矿化学成分中Al₂O₃的含量较低,为1%~13%左右,需添加煤矸石等辅料来制备;以污泥为主料制备陶粒,污泥中SiO₂、Al₂O₃含量偏低,可搭配玻璃粉、膨润土等来制备;以煤矸石为主料制备陶粒,煤矸石中Fe₂O₃、CaO、MgO等氧化物成分含量偏低,可搭配铁尾矿、粉煤灰、

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 河北省矿产资源与生态环境检测重点实验室开放基金项目(HBMREEM202106)

作者简介: 李星臻(1999—),女,山东聊城人,硕士研究生,从事铁尾矿资源综合利用研究, E-mail: lixingzhennw@163.com。

通信作者: 刘立伟(1989—),男,河北唐山,讲师,博士,从事大宗尾矿高附加值利用、复杂铁矿资源综合利用研究, E-mail: kyliuliwei@ncst.edu.cn。

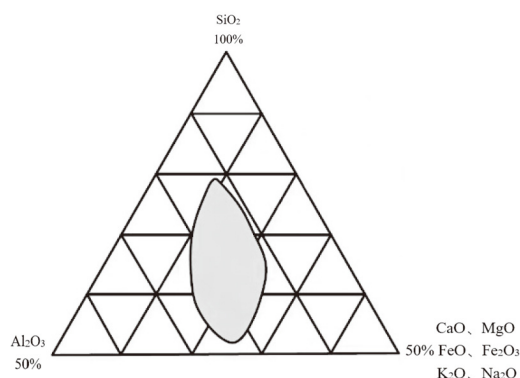


图 1 Riley 化学成分三相图

Fig. 1 Riley's phase diagram

污泥等来制备^[12]。

由于页岩和黏土的不可再生性,且过度开采造成了严重的土地损毁、地貌破坏和环境污染,故页岩陶粒和黏土陶粒已退出主流市场,以尾矿、粉煤灰、污泥、煤矸石等为主要原料制备的陶粒产品能进一步提升市场竞争力,具有广阔前景。WANG 等人^[23]在 m (粉煤灰): m (钾长石): m (膨润土): m (碳化硅)=60:34:3:3、焙烧温度为 1 200 ℃、焙烧时间为 5 min 时,制得密度为 920 kg/m³、抗压强度为 1.08 kN 的陶粒。李扬等人^[29]在 m (金尾矿): m (膨润土)=7:3、预热温度为 400 ℃、预热时间为 30 min、焙烧温度为 1 100 ℃、焙烧时间为 50 min 时,制得堆积密度为 803 kg/m³、表观密度为 1 795 kg/m³、单颗粒强度为 16.59 MPa、吸水率为 0.24% 的陶粒。杨晓伟等人^[30]在油泥掺加量为 60%、焙烧温度为 1 140 ℃、焙烧时间为 20 min 时,制得堆积密度为 1 020 kg/m³、吸水率为 0.32%、筒压强度为 40.99 MPa 的陶粒。

在铁尾矿基陶粒的制备过程中,可通过调整原料质量配比,来适应不同铁尾矿的成分特点,制得堆积密度、表观密度、筒压强度、吸水率等物理性能均符合国标(GB/T 17431.1—2010)要求的陶粒^[28]。以鞍山高硅铁尾矿为主料,可通过添加煤矸石等辅料来调节原料的化学成分含量,制备高硅铁尾矿基陶粒;以白云鄂博铁尾矿为主料,添加高炉渣等辅料调节原料化学成分含量制备陶粒;以钒钛磁铁矿尾矿为主料,高岭土、废玻璃等为辅料,通过调节原料质量配比制得陶粒^[31-32]。故铁尾矿在陶粒制备方面具有较大的应用潜力,有利于实现资源的循环利用^[33-35]。李国峰等人^[36]以铁尾矿、煤矸石为原料,在铁尾矿质量占比为 75%、焙烧温度为 1 100 ℃、焙烧时间为 20 min 时,烧制出堆积密度为 870 kg/m³、表观密度为 1 570 kg/m³、筒压强度为 8.78 MPa、吸水率为 7.93% 的陶粒。赵威等人^[37]在 m (铁尾矿): m (钾钠石粉): m (黏土)=18:1:1、焙烧温度为 1 130 ℃、焙烧时间为 30 min 的条件下,制备出抗压强度为 56.5 MPa 的超高强陶粒。可见,以

铁尾矿为原料制备陶粒是可行的。

2 铁尾矿基陶粒的制备工艺

按照制备工艺的不同,铁尾矿基陶粒可分为焙烧陶粒与免烧陶粒。铁尾矿焙烧陶粒的性能特点为强度高、吸水率低、耐久性良好等,应用于建筑、道路铺设等领域;铁尾矿免烧陶粒的性能特点为透气性好、堆积密度小、耐酸碱腐蚀等,可用于园林、水处理等行业。

2.1 焙烧陶粒

焙烧陶粒按照密度大小、膨胀与非膨胀的特征,可分为烧结陶粒和烧胀陶粒。烧结陶粒的堆积密度较大,在焙烧过程中不发生较大的体积膨胀,其强度高、孔隙率偏低,气孔多呈连通型或开放型;而烧胀陶粒则会发生较大的体积膨胀,内部多呈封闭型气孔,堆积密度小。烧结陶粒与烧胀陶粒在制备原料和制备工艺上存在差异。原料相同时,陶粒是否烧胀主要受焙烧条件的影响;原料不同时,陶粒原料中铝硅酸盐矿物、固定碳等的含量影响其膨胀特性^[17]。其中,焙烧陶粒中的铁尾矿基陶粒是以铁尾矿为主料,经原料预处理、混匀、造粒、烘干、焙烧、冷却制备而成,见图 2 所示。

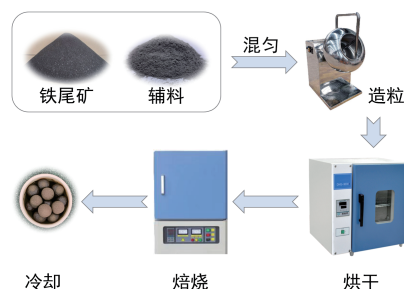


图 2 铁尾矿焙烧陶粒工艺流程

Fig. 2 Technological process for roasted ceramsite prepared by iron tailings

铁尾矿焙烧陶粒的制备是一种资源再利用的有效方式,具有较好的经济和社会效益。吴俊权等人^[38]烧制高硅铁尾矿基陶粒,当以 10 ℃/min 的升温速度由常温升至 1 000 ℃,再以 25 ℃/min 的速度升至 1 210 ℃,保温时间为 30 min 时,制得堆积密度为 888.2 kg/m³、表观密度为 1 907.14 kg/m³、筒压强度为 8.34 MPa、吸水率为 5.04% 的陶粒。李涵^[39]烧制出性能指标满足国标(GB/T 17431.1—2010)900 级陶粒要求的铁尾矿基陶粒,以该陶粒为骨料,制备出能够配制 LC15~LC30 四种强度等级的陶粒混凝土。

上述研究表明,以铁尾矿为主料可烧制出性能优异的陶粒产品,陶粒的堆积密度、表观密度、筒压强度、吸水率等性能均满足国标(GB/T 17431.1—2010)要求,但不足之处在于焙烧陶粒成本高,易产生废气等污染环境^[16]。

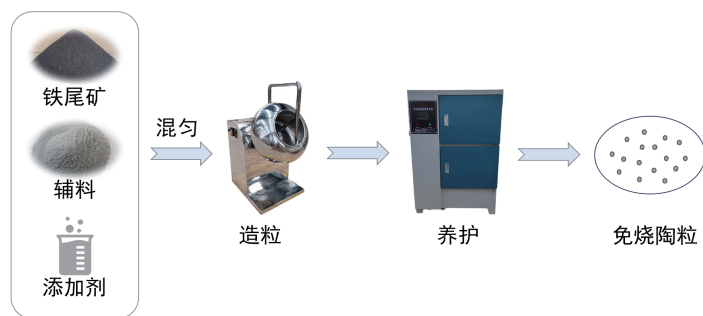


图3 铁尾矿免烧陶粒工艺流程

Fig. 3 Technological process for unfired ceramsite prepared by iron tailings

2.2 免烧陶粒

铁尾矿免烧陶粒通常不需要经过高温处理,多采用蒸压、蒸汽或自然养护等方式来制备,其制备工艺流程是以铁尾矿、水泥等为原料,发泡剂、激发剂等为添加剂^[17],经原料预处理、混匀、造粒、养护制备而成,如图3所示。

铁尾矿免烧陶粒的制备工艺过程无需焙烧,降低了能耗和环境污染。张瑞等人^[40]以铁尾矿和粉煤灰为主料,辅以水泥、石膏制备免烧陶粒,制得的陶粒性能指标满足国标(GB/T 17431.1—2010)对1000级陶粒的要求。那芳溪^[41]以铁尾矿砂为主料,在 $m(\text{铁尾矿砂}):m(\text{煤矸石}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{水泥}):m(\text{石灰}):m(\text{石膏})=35:10:28:15:10:2$,外加剂铝粉为1%、NaOH为3%时,制得堆积密度为 530 kg/m^3 、筒压强度为2.27 MPa、吸水率为17.6%的免烧陶粒。

铁尾矿免烧陶粒制备流程简单、能耗低、成本低,有利于大规模工业化生产和环境保护,但陶粒筒压强度较低、产品质量易受养护方式影响,故免烧陶粒的应用具有局限性^[40]。

3 铁尾矿基陶粒制备反应机理

铁尾矿基陶粒制备工艺不同,其反应机理也不同。铁尾矿焙烧陶粒发生的物理化学反应包括有机物和水分挥发、矿物反应和晶体形成^[39];铁尾矿免烧陶粒则主要发生水化反应,来改善陶粒物理性能^[41-42]。

3.1 铁尾矿焙烧陶粒的机理

铁尾矿焙烧陶粒是以铁尾矿为主料,经焙烧后制得,其表面有一层坚硬外壳,呈陶质或釉质,具有隔水保气的作用。焙烧陶粒的物理化学性质除受焙烧条件的影响外,主要受其原料化学成分的影响,其中这些影响主要来自于原料中的基体成分、造孔剂和助熔剂。基体成分包括 SiO_2 和 Al_2O_3 ,在焙烧过程中生成液相,冷却后形成支撑陶粒强度的基体结构;造孔剂包括 CaCO_3 、 MgCO_3 、C、SiC等,在高温作用下发生化学反应,生成 CO_2 、CO等气体;助熔剂包括 Na_2O 、 MgO 、 K_2O 等碱性氧化物,可加速低温易熔物的形成、

降低烧成温度^[15]。秦晋一等人^[43]以陕南铁尾矿为原料烧制陶粒,发现 Fe_2O_3 既可以促进莫来石相的生成;还可以降低烧成温度,促进陶粒辉石相的生成。

铁尾矿中含有石英、长石、赤铁矿等矿物成分,在高温作用下发生物理化学反应,生成熔融状态的液相成分填充陶粒内部,形成致密的内部结构,提高筒压强度^[44]。李育彪等人^[45]以低硅铁尾矿为主料、铜尾矿和煤粉为辅料烧制陶粒,发现当焙烧温度超过 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 以后,随着焙烧温度的升高,陶粒内的矿物成分逐渐熔化,液相生成量增多,填充了陶粒内部分孔洞,形成致密结构。

陶粒焙烧过程包括预热和焙烧两个阶段,预热阶段的主要目的是去除陶粒中有机物质和水分挥发,焙烧温度一般在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,伴随着矿物的反应过程和晶体的形成^[46-48],铁尾矿基陶粒焙烧过程的化学方程式如表1所示^[5,39,46]。

由表1可知,在铁尾矿基陶粒焙烧过程中,伴随着气体的产生,长石、辉石、莫来石新矿物相均有可能生成,且具体生成的矿物相主要取决于原料成分、焙烧温度、焙烧时间等条件。这些新生成的矿物是陶粒强度的主要来源,影响着陶粒性能。

3.2 铁尾矿免烧陶粒的机理

铁尾矿免烧陶粒的制备原料包括铁尾矿、胶凝材料、造孔剂、发泡剂、激发剂等,再经养护后制备而成。其中,水泥、石膏等胶凝材料的加入,使粉料铁尾矿黏结成团,形成密实结构,该过程伴随着水化反应的发生,生成钙矾石、C-S-H凝胶等水化产物,从而促进陶粒内部致密化结构的形成,提高陶粒筒压强度;膨胀珍珠岩等造孔剂和双氧水、铝粉等发泡剂的加入,使得陶粒在制备过程中生成气体,内部形成多孔结构;此外,氢氧化钠、水玻璃等激发剂的添加,激发物料活性,促进水泥发生水化反应,进一步提高陶粒物理性能^[49]。那芳溪^[41]制备铁尾矿免烧陶粒,发现碱性激发剂加入,可以促进原料水化反应的发生,从而形成致密结构,改善陶粒性能。

铁尾矿免烧陶粒的主要强度来源为水化反应中生成的钙矾石和C-S-H凝胶形成的网状结构,其主

表 1 铁尾矿焙烧陶粒化学反应方程式
Table 1 Chemical reaction equations for roasted ceramsite prepared by iron tailings

反应类型	反应式	序号
气体生成	$C+O_2\rightarrow CO_2\uparrow$	(1)
	$2C+O_2\rightarrow 2CO\uparrow$	(2)
	$C+CO_2\rightarrow 2CO\uparrow$	(3)
	$MgCO_3\rightarrow MgO+CO_2\uparrow$	(4)
	$CaCO_3\rightarrow CaO+CO_2\uparrow$	(5)
	$MgCO_3\cdot CaCO_3\rightarrow MgO+CaO+2CO_2\uparrow$	(6)
	$Fe_2O_3+C\rightarrow 2FeO+CO\uparrow$	(7)
	$Fe_2O_3+3C\rightarrow 2Fe+3CO\uparrow$	(8)
	$Fe_2O_3+CO\rightarrow 2FeO+CO_2\uparrow$	(9)
	$2Fe_2O_3+C\rightarrow 4FeO+CO_2\uparrow$	(10)
	$2Fe_2O_3+3C\rightarrow 4Fe+3CO_2\uparrow$	(11)
	$3Fe_2O_3+3C\rightarrow 2Fe_3O_4+CO\uparrow$	(12)
	$FeS_2\rightarrow FeS+S\uparrow$	(13)
长石生成	$2CaO+Al_2O_3+2SiO_2\rightarrow Ca_2Al_2Si_2O_7$	(14)
	$2CaO+MgO+2SiO_2\rightarrow Ca_2MgSi_2O_7$	(15)
	$CaO+Al_2O_3+2SiO_2\rightarrow Ca(Al_2Si_2O_8)$	(16)
	$K_2O+Al_2O_3+2SiO_2\rightarrow KAlSi_3O_8$	(17)
	$Na_2O+Al_2O_3+6SiO_2\rightarrow 2NaAlSi_3O_8$	(18)
	$nAl_2O_3+nSiO_2+K_2O+Na_2O+CaO+Fe_2O_3\rightarrow \text{长石}$	(19)
辉石生成	$CaO+MgO+2SiO_2\rightarrow CaMgSi_2O_6$	(20)
	$CaO+FeO+2SiO_2\rightarrow CaFeSi_2O_6$	(21)
莫来石生成	$Al_2O_3(\text{无定形})\rightarrow \gamma-Al_2O_3$	(22)
	$3\gamma-Al_2O_3+2SiO_2(\text{无定形})\rightarrow 3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$	(23)

表 2 铁尾矿免烧陶粒水化反应方程式
Table 2 Hydration reaction equations for unfired ceramsite prepared by iron tailings

反应类型	反应式	序号
水化反应	$CaO+H_2O=Ca(OH)_2$	(1)
	$xCa(OH)_2+Al_2O_3+(n-1)H_2O=xCaO\cdot Al_2O_3\cdot nH_2O$	(2)
	$xCa(OH)_2+SiO_2+(n-1)H_2O=xCaO\cdot SiO_2\cdot nH_2O$	(3)
	$Ca(OH)_2+Al_2O_3+2SiO_2+mH_2O=CaO\cdot Al_2O_3\cdot 2SiO_2\cdot nH_2O$	(4)
	$CaSO_4\cdot 2H_2O+C_3A+12H_2O=3CaO\cdot Al_2O_3\cdot CaSO_4\cdot 12H_2O$	(5)

要化学反应方程式如表 2 所示^[41]。

4 铁尾矿基陶粒气孔结构

铁尾矿基陶粒的气孔结构使其具有保温隔热、耐热性能良好、质轻等特点,这是陶粒应用于建筑、材料等领域时不可或缺的特性^[50]。

4.1 铁尾矿基陶粒气孔形成原理

铁尾矿基陶粒气孔结构的形成与陶粒焙烧过程中有机物的氧化、碳酸盐的分解、氧化铁的分解与还原、硫化物的分解与氧化等化学反应的发生有关;而

在免烧陶粒中则需要加入发泡剂、激发剂,使原材料发生特定的化学反应,生成气体,从而形成多孔结构^[51-53]。

铁尾矿基陶粒的气孔结构类型包括细孔状、蜂窝状、中空状等,其主要与原料配比、焙烧温度、焙烧时间等制备条件有关。在陶粒焙烧过程中,当原料的黏度值较硅酸盐玻璃相黏度值低时,则会导致生成的气体膨胀力与高温玻璃相的表面张力不匹配,从而无法形成蜂窝状气孔,使得陶粒性能降低。季枫等人^[54]以铁尾矿为主料,石英、钾长石为辅料,SiC 为发泡剂烧制轻质陶粒,发现当焙烧温度由 1 120 ℃ 升至 1 140 ℃ 时,液相生成量增加、黏度降低,SiC 的反应更完全,使得孔隙率升高且气孔的尺寸增大,孔壁变薄,堆积

密度降低、气孔呈现出中空状。赵威等人^[55]以铁尾矿、黏土和钾长石为原料, SiC 为发泡剂制备轻质高强陶粒, 发现当焙烧温度由 1 130 ℃ 升至 1 160 ℃ 时, 陶粒气孔孔径增大, 且气孔结构逐渐呈现出蜂窝状, 孔隙率升高。

4.2 铁尾矿基陶粒气孔结构

实现铁尾矿基陶粒气孔结构调控, 可拓宽陶粒应用范围。表面多封闭气孔、孔隙率高且筒压强度高的陶粒, 可用来制备陶粒混凝土, 相较于普通混凝土, 以铁尾矿基陶粒为骨料制备的混凝土孔隙率更高、导热系数更低, 可增强墙体材料的自保温性能^[56]; 表面微孔丰富、孔隙率偏低的陶粒, 可用于处理废水, 通过生物法、物理法和化学法等吸附方式, 除去水中异味、微生物和重金属离子等以达到净化水质的效果, 与传统材料相比, 用于水处理的铁尾矿基陶粒吸附性能更强、水处理效率更高、应用更广泛^[57-59]。杜熠^[60]烧制高硅铁尾矿多孔陶粒, 发现非造孔原料含量、烧结温度与总孔隙率和孔径为 0.5~100 μm 气孔的孔隙率呈负相关, 与孔径大于 100 μm 气孔的孔隙率呈正相关; 以玉米粉和活性炭粉为造孔剂可提高总孔隙率及 0.5~100 μm 气孔的孔隙率。

综上所述, 应深入研究陶粒原料配比和制备工艺, 探究铁尾矿和辅料的化学组成、焙烧工艺参数和免烧过程中固化条件等对陶粒产品物相组成与嵌布特征、液相和气体生成特性、气孔结构特征、陶粒的基本物理性质等影响规律, 在保证陶粒产品性能和降低成本的基础上, 实现铁尾矿基陶粒气孔结构调控, 为利用铁尾矿制备轻质高强的陶粒产品提供理论依据。

5 铁尾矿基陶粒的应用现状

21 世纪以来, 随着可持续发展理念的推广, 越来越多的企业关注铁尾矿基陶粒的生产。在国外, 爱德堡材料公司收购多家回收和废弃物处理公司, 涉及到铁尾矿基陶粒的应用, 与此同时, 南非、巴西等发展中国家也在关注铁尾矿基陶粒的研究与开发。在国内, 天津冶建特种材料公司、陕西秦达建材有限公司等建筑材料企业采用先进的生产技术和设备, 不断提升陶粒质量和性能, 积极与科研机构合作, 开展研发工作, 推动了铁尾矿基陶粒的发展。

在建筑领域, 陕西秦达建材有限公司与长安大学李晓光教授团队进行合作, 将固体废弃物的资源化利用与新型装配式建筑行业相结合, 以秦岭地区的铁尾矿为原材料制备膨胀型轻质陶粒和高强陶粒, 立足于区域产业链建设目标, 探索兼备“地域性、适用性、创新性”的固体废弃物资源化利用的发展路线, 为该企业装配式建筑的发展提供了重要保障^[39,61]。

在水处理领域, 北京市水务集团和江苏省生态环

境厅在污水处理改造项目中, 均以铁尾矿基陶粒为滤料, 利用其多孔结构, 有效提高了陶粒对水中污染物的过滤和吸附能力, 将废水中的悬浮物以及氮磷去除, 提升出水水质。通过对铁尾矿基陶粒在水处理领域的应用探索, 形成一套完整的污水处理体系, 推动污水处理和资源回收的双重目标。

目前, 铁尾矿基陶粒的工业化应用案例相对较少, 这是由于实验室研究与工业生产之间存在技术转化瓶颈、生产成本与收益不平衡、应用领域较单一、政策与市场需求存在差异等情况造成的。为推动铁尾矿基陶粒的工业化应用, 未来应加强低能耗、高效率生产方式的研究, 降低生产成本; 通过制备改性或复合材料的方式, 提高陶粒性能, 增强市场竞争力; 同时, 政府可出台相关政策, 推动企业与科研机构之间的技术转化。

6 结语

(1) 铁尾矿主要由石英、长石、绿泥石等矿物组成, 主要化学成分为 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO 等, 与陶粒成分相近, 以铁尾矿为原料可制备出合格陶粒, 即制备铁尾矿基陶粒是可行的。

(2) 铁尾矿焙烧陶粒较免烧陶粒的工业生产技术更成熟、产品质量更稳定, 且因其较高的强度和较低的吸水率而被广泛使用, 反观铁尾矿免烧陶粒, 应用有一定局限性。

(3) 铁尾矿基陶粒焙烧过程中的反应机理主要包括有机物和水分挥发、矿物反应和晶体的形成, 而免烧过程中主要依靠原料间的水化反应来提高陶粒筒压强度。通过优化原料配比和制备工艺, 可以实现铁尾矿基陶粒气孔结构的调控, 为优化铁尾矿基陶粒气孔结构、制备轻质高强陶粒提供指导。

(4) 铁尾矿基陶粒在实验室研究和工业化应用方面均取得一定进展, 尚需在技术、经济、政策等多方面进行分析与探讨。通过多元化策略, 铁尾矿基陶粒的工业化发展前景将更加广阔。

参考文献:

- [1] 尹琛, 白丽梅, 李绍英, 等. 铁尾矿综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(6): 41-53.
YIN C, BAI L M, LI S Y, et al. Research progress on comprehensive utilization of iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(6): 41-53.
- [2] 任明昊, 谢贤, 李博琦, 等. 铁尾矿综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(3): 155-168.
REN M H, XIE X, LI B Q, et al. Research progress on comprehensive utilization of iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(3): 155-168.
- [3] 汪明星, 廖传华, 曾祥荣, 等. 铁尾矿中重金属去除技术研究进展[J]. 矿冶, 2024, 33(1): 86-95.
WANG M X, LIAO C H, ZENG X R, et al. Research progress of heavy

- metal removal technology in iron tailings[J]. *Mining and Metallurgy*, 2024, 33(1): 86–95.
- [4] 杨爽,安路阳,崔晓东,等.鞍山型铁尾矿综合利用现状及发展展望[J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(2): 103–108.
YANG S, AN L Y, CUI X D, et al. Current situation and development prospect of comprehensive utilization of anshan-type iron tailings[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2023, 41(2): 103–108.
- [5] 杨传猛.铁尾矿制备烧结砖和陶粒的研究[D].南京:南京理工大学, 2015.
YANG C M. Preparation of the sintered bricks and ceramsite with iron tailings[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [6] 刘鹏,刘磊,田馨,等.我国铁尾矿工艺矿物学特性及其资源化技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(3): 169–178.
LIU P, LIU L, TIAN X, et al. Reviews of process mineralogy characteristics and comprehensive utilization technology of iron ore tailings in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(3): 169–178.
- [7] 张郁.铁尾矿陶粒轻质混凝土早期变形及其对物理力学性能的影响研究[D].西安:长安大学, 2021.
ZHANG Y. Study on early deformation of iron ore tailings ceramsite lightweight concrete and its effect on physical and mechanical properties[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [8] KONG Y H, ZHANG X, ZHANG L, et al. Investigation on utilization and microstructure of fine iron tailing slag in road subbase construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 447: 138019.
- [9] DUAN X H, LIANG J S, TANG Q G, et al. Research progress on resource utilization of iron tailings and its development trend in China[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 320: 780–784.
- [10] HUA G S, XIN L. Study of utilizing of massive iron tailings resource[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 156/157: 824–828.
- [11] YU W, XUE F L, LUO S H, et al. Effect of pore-forming agent on degradation of phenol by iron tailings based porous ceramics[J]. *Ceramics International*, 2024, 50(18PB): 33791–33801.
- [12] 童思意,刘长森,刘玉林,等.我国固体废弃物制备陶粒的研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(3): 140–150.
TONG S Y, LIU C M, LIU Y L, et al. Research status of ceramsite prepared from solid waste in china[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(3): 140–150.
- [13] ZHAO J S, NI K, SU Y P, et al. An evaluation of iron ore tailings characteristics and iron ore tailings concrete properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 286(3): 122968.
- [14] 张武举,马雯卓,潘建,等.铁尾矿、煤矸石制备高性能陶粒的工艺初探[J]. *环境工程*, 2024, 42(6): 94–102.
ZHANG W J, MA W Z, PAN J, et al. Preliminary study on preparation process of high-performance ceramsite from iron ore tailings and coal gangue[J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(6): 94–102.
- [15] 张云昊,柴铁凡,安胜利,等.选冶固废制备陶粒技术研究现状及展望[J]. *金属矿山*, 2022, 57(7): 259–266.
ZHANG Y H, CHAI Y F, AN S L, et al. Research status and prospects of ceramsite preparation technology using selecting and smelting solid waste[J]. *Metal Mine*, 2022, 57(7): 259–266.
- [16] 吴云端,柴倩,陈柳霖,等.铁尾矿基陶粒的制备及应用研究进展[J]. *化工矿物与加工*, 2024, 53(7): 53–60.
WU Y R, CHAI Q, CHEN L L, et al. Research progress on the preparation and application of iron tailings-based ceramsite[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(7): 53–60.
- [17] 伍树森,罗亚历,李斌.陶粒的制备及其应用研究进展[J]. *江苏陶瓷*, 2023, 56(2): 25–28+31.
WU S S, LUO Y L, LI B. Research progress on preparation and application of ceramsite[J]. *Jiangsu Ceramics*, 2023, 56(2): 25–28+31.
- [18] 李柯,李健,邵艳秋,等.尾矿制备相变材料研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 61–71.
LI K, LI J, SHAO Y Q, et al. Research progress on tailings-based composite phase change materials[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(6): 61–71.
- [19] 张文星.页岩陶粒轻骨料混凝土改性试验研究[D].绵阳:西南科技大学, 2023.
ZHANG W X. Experimental study on modification of shale ceramsite lightweight aggregate concrete[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [20] 党陈萍.页岩陶粒的性能及应用现状研究[J]. *砖瓦*, 2022, 52(9): 41–42+47.
DANG C P. Research on properties and application status of shale ceramsite[J]. *Brick-Tile*, 2022, 52(9): 41–42+47.
- [21] 王祝来,曾晨浙,徐文清.以底泥、黏土和鹅掌楸为原料制作新型陶粒的吸附特性研究[J]. *应用化工*, 2021, 50(2): 403–406+411.
WANG Z L, ZENG C X, XU W Q. Adsorption characteristics of a novel ceramsite obtained from lake sediments, clay and liriodendron[J]. *Applied chemical industry*, 2021, 50(2): 403–406+411.
- [22] 张伟斐.铜尾矿陶粒的制备及其透水混凝土基本性能的研究[D].抚州:东华理工大学, 2023.
ZHANG Y F. Preparation of copper tailings ceramsite and study on basic properties of pervious concrete[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2023.
- [23] WANG S L, WANG X Y, SUN W, et al. Preparation of lightweight and high-strength ceramsite from highly doped coal fly ash[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2023, 33(12): 3885–3898.
- [24] DENG X T, LI J P, DU D, et al. Manufacturing non-sintered ceramsite from dredged sediment, steel slag, and fly ash for lightweight aggregate: Production and characterization[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2024, 31(10): 15078–15090.
- [25] 王燕琳.固硫灰—污泥陶粒的制备及其工艺过程中硫的转化与释放特征研究[D].太原:山西大学, 2023.
WANG Y L. Study on the preparation of CFB fly ash/sewage sludge ceramsite and the characteristics of the transformation and release of sulfur during the technological process[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023.
- [26] 李鑫.污泥/煤矸石陶粒的制备及其对模拟污水处理厂尾水氮磷吸附效果研究[D].沈阳:辽宁大学, 2023.
LI X. Preparation of sludge / coal gangue ceramsite and its adsorption effect on nitrogen and phosphorus in simulated wastewater treatment plant tailwater[D]. Shenyang: Liaoning University, 2023.
- [27] 王志英.煤矸石粉煤灰烧结陶粒制备及物化性能研究[D].太原:山西大学, 2021.
WANG Z Y. Preparation and physicochemical properties of sintered ceramsite produced from coal gangue and fly ash[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [28] C M RILEY. Relation of chemical properties to the bloating of clays[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1951, 34(4): 121–128.
- [29] 李杨,孟凡涛,王鹏,等.黄金尾矿制备轻质高强陶粒的工艺研究[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(8): 1554–1559+1572.
LI Y, MENG F T, WANG P, et al. Preparation process of lightweight

- and high strength ceramsites from gold tailings[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(8): 1554–1559+1572.
- [30] 杨晓伟, 张爱生, 曲俊蓉, 等. 油田污泥基高强陶粒的制备及性能优化[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(1): 215–222.
YANG X W, ZHANG A S, QU J R, et al. Preparation and properties optimization of high strength ceramsite obtained from oily sludge[J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(1): 215–222.
- [31] 陈城. 钒钛磁铁矿尾矿库资源量调查及尾矿资源化利用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
CHEN C. Vanadium titanium magnetite tailings resource investigation and tailings resource utilization[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [32] CHAI Y F, HU W X, ZHANG Y H, et al. Process and property optimization of ceramsite preparation by bayan obo tailings and blast furnace slag[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2023, 30(7): 1381–1389.
- [33] XU J Q, CHEN P. Synergistic effect of iron tailings, steel slag and red mud cementitious materials on mechanical and microstructure properties[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 95(7): 110131.
- [34] 李晓光, 尤碧施, 高睿桐, 等. 低硅铁尾矿陶粒烧结工艺优化试验[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1): 294–298.
LI X G, YOU B S, GAO R T, et al. Optimization sintering process of ceramsite with low silicon iron tailings[J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(1): 294–298.
- [35] 刘楠, 李丛军. 铁尾矿资源利用的现状和应用对策[J]. *中国金属通报*, 2024, 32(6): 74–76.
LIU N, LI C J. The present situation and application countermeasures of iron tailings resource utilization[J]. *China Metal Bulletin*, 2024, 32(6): 74–76.
- [36] 李国峰, 那威, 田江涛, 等. 铁尾矿基陶粒的物理力学性能及其微观性质研究[J]. *金属矿山*, 2022, 57(10): 245–249.
LI G F, NA W, TIAN J T, et al. Physical–mechanical properties and microcosmic properties of iron tailings–based ceramsite[J]. *Metal Mine*, 2022, 57(10): 245–249.
- [37] 赵威, 王之宇, 周春生, 等. 铁尾矿基超强陶粒的制备及性能研究[J]. *非金属矿*, 2023, 46(4): 92–94+99.
ZHAO W, WANG Z Y, ZHOU C S, et al. Study on preparation and properties of super–strong ceramsite based on iron tailings[J]. *Non–Metallic Mines*, 2023, 46(4): 92–94+99.
- [38] 吴俊权, 马晶, 汪应玲, 等. 高硅铁尾矿制备陶粒工艺试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(6): 126–132.
WU J Q, MA J, WANG Y L, et al. Experimental study on preparation of ceramsite from high silicon iron tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(6): 126–132.
- [39] 李涵. 铁尾矿陶粒制备工艺及混凝土性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
LI H. Study on preparation technology of iron tailings ceramsite and performance of concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [40] 张瑞, 鲁建国, 姚华彦, 等. 铁尾矿粉煤灰免烧陶粒的制备与特性[J/OL]. *矿产综合利用*, 1–7[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231031.1723.008.html>.
ZHANG R, LU J G, YAO H Y, et al. Preparation and physical properties of non–sintered ceramsite from iron tailing fly ash[J/OL]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1–7[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231031.1723.008.html>.
- [41] 那芳溪. 煤矸石–铁尾矿砂免烧陶粒制备及碱激发机理研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
NA F X. Study on preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue iron tailing ore non–sintering ceramsite[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [42] WANG P Q, LI X G, FU W Z, et al. Formation of calcium–aluminum–silicate–hydrate (C–A–S–H) in iron ore tailings ceramsite and its influence on cement hydration degree[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 153(10): 105711.
- [43] 秦晋一, 李涵, 李晓光, 等. 高 Fe_2O_3 含量对铁尾矿陶粒物相和力学性能的影响[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(7): 83–88.
QIN J Y, LI H, LI X G, et al. Effect of high Fe_2O_3 content on phase and mechanical properties of iron tailings ceramsite[J]. *New Building Materials*, 2019, 46(7): 83–88.
- [44] 杜鑫, 傅国辉, 褚会超, 等. 铁尾矿特性分析及其利用技术现状和展望[J]. *中国矿业*, 2024, 33(2): 115–124.
DU X, FU G H, CHU H C, et al. Characteristics analysis of iron tailings and current status and prospects of its utilization technology[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(2): 115–124.
- [45] 李育彪, 潘梦真, 蹇守卫, 等. 低硅铁尾矿制备轻质陶粒试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(6): 73–80.
LI Y B, PAN M Z, JIAN S W, et al. Experimental study on preparation of lightweight ceramsite from low silicon iron tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(6): 73–80.
- [46] 王莉莎. 复杂硅酸盐体系高温热力学及固废基陶粒膨胀机理[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
WANG L S. High–temperature thermodynamics of complex silicate systems and expansion mechanism of solid waste–based ceramsite[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [47] YU C H, PEI L Z, MAO Y J, et al. Preparation and characterization of the ceramsites with microscale pores from iron tailing and fly ash[J]. *Micro and Nanosystems*, 2021, 13(4): 370–378.
- [48] ZHANG J Y, GAO X J, WANG J F, et al. Synergistic effects of different ionic surfactants and temperature on rheological behavior and air–void structure of cement mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136183.
- [49] ZHONG M Y, MENG J, NING B K, et al. Preparation and alkali excitation mechanism of coal gangue–iron ore tailings non–sintering ceramsite[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136209.
- [50] LI M, WANG Y J, REN J L, et al. Evaluation and prediction of fatigue life for ceramsite lightweight concrete considering the effects of ceramsite aggregate size and content[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03613.
- [51] 路畅. 铁尾矿制备多孔材料的应用基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
LU C. Applied basic research of porous material derived from iron tailing[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [52] WEI H, SONG B, HUAN Q, et al. Preparation of iron tailings–based porous ceramsite and its application to lead adsorption: characteristic and mechanism[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 126839.
- [53] ZHOU E Q, BAI Y H, ZUO X. Evaluation of dynamic behaviour of rubber particle–clay mixtures using the skeleton void ratio approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 426: 136127.
- [54] 季枫, 尹洪峰, 胡越, 等. 铁尾矿制备闭孔轻质陶粒及其性能研究[J/OL]. *耐火材料*, 1–8[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1136.tf.20240524.1601.002.html>.
JI F, YIN H F, HU Y, et al. Study on the preparation and properties of closed–cell lightweight ceramsite by iron tailings[J/OL]. *Refractories*, 1–8[2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1136.tf.20240524.1601.002.html>.

- [55] 赵威, 曹宝月, 周春生, 等. 铁尾矿基轻质高强陶粒的制备及应用研究[J]. *非金属矿*, 2022, 45(1): 71–73+77.
ZHAO W, CAO B Y, ZHOU C S, et al. Study on preparation and application of light and high strength ceramsite based on iron tailings[J]. *Non-Metallic Mines*, 2022, 45(1): 71–73+77.
- [56] 刘功杰. 铁尾矿陶粒混凝土单轴受压力学特性及预压盐冻性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
LIU G J. Study on uniaxial compression characteristics and pre-compression salt freezing performance of iron tailings ceramsite[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [57] CHEN S K, ZHOU J F, BIE Y J, et al. Sustainable ecological non-sintered ceramsite (SENC) with alkali activators: Performance regulation and microstructure[J]. *Sustainability*, 2024, 16(15): 6634.
- [58] ZHANG Y. Purification of swine wastewater using a biological aerated filter with non-sintered foundry dust based ceramsite[J]. *Academic Journal of Materials & Chemistry*, 2024, 5(2): 8.
- [59] XIONG X, WU Z, JIANG P C, et al. A novel method for preparing lightweight and high-strength ceramsite coarse aggregates from solid waste materials[J]. *Materials*, 2024, 17(11): 2613.
- [60] 杜熠. 微生物载体高硅铁尾矿基多孔陶粒孔结构调控及生物效应研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
DU Y. Study on the pore structure regulation and biological effect of high silicon iron tail-based porous ceramsite as microbial carriers[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [61] 王攀奇. 轻质陶粒的缩聚烧结机理及其在混凝土应用[D]. 西安: 长安大学, 2020.
WANG P Q. The polycondensation and sintering mechanism of lightweight ceramsite and its application in concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

Technology, Mechanism, and Application Progress for Ceramsite Prepared by Iron Tailings

LI Xingzhen, LI Guofeng, LIU Liwei, LI Yanfeng

College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, Hebei, China

Abstract: The iron tailings is widely distributed in China and stockpiled in large volume, which results in serious problems including land occupation and environmental pollution. The iron tailings-based ceramsite, a kind of lightweight aggregate, is characterized by lightweight and high strength, low water absorption, and well frost-resistance, and can be used in building materials, horticulture, and water treatment. The types of ceramsite and the feasibility of using iron tailings as raw material for preparing ceramsite was discussed in this paper. Then, the preparation technologies for roasted ceramsite and unfired ceramsite were introduced and the products performance were compared. The reaction mechanisms for iron tailings-based ceramsite in roasting and no-firing processes were also analyzed. Furthermore, the formation principle of pore structure for iron tailings-based ceramsite and its research status were concluded. Finally, the problems that need to be solved in future and the development direction were put forward basing application status of iron tailings-based ceramsite. Overall, preparation of ceramsite using iron tailings has great significance to promote the recycling of iron tailings resources and environmental protection of mine.

Keywords: iron tailings; ceramsite; reaction mechanism; pore structure

引用格式: 李星臻, 李国峰, 刘立伟, 栗艳锋. 铁尾矿制备陶粒工艺、机理与应用进展[J]. *矿产保护与利用*, 2024, 44(6): 56–63.

LI Xingzhen, LI Guofeng, LIU Liwei, LI Yanfeng. Technology, mechanism, and application progress for ceramsite prepared by iron tailings[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024, 44(6): 56–63.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn