

工业固体废弃物制备陶粒及其应用研究进展

汪学彬¹, 杨重卿^{1,2}, 张祥伟², 侯东来², 孙志明²

(1. 甘肃建投矿业有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 综述陶粒的分类、陶粒制备工艺、工业固体废弃物制备陶粒的原理;粉煤灰、尾矿、废渣、污泥等固体废弃物为原料制备陶粒的技术;以及陶粒用作吸附材料、制备混凝土砌块、制备支撑剂方面的应用。提出固体废弃物制备陶粒的技术有研究基础,可行性较高,是发展固体废弃物资源化利用的重要途径。认为未来应充分发挥大宗固体废弃物的资源特点与成本优势,制备质轻、多孔、高强陶粒并提高产品综合性能;烧结法制备陶粒技术大规模应用的关键是通过配方优化、装备研发等降低生产能耗。

关键词: 工业固体废弃物;陶粒;粉煤灰;尾矿;废渣;污泥

中图分类号: TB44

文献标志码: A

Preparation and application of ceramsite prepared from industrial solid waste: a review

WANG Xuebin¹, YANG Chongqing^{1,2}, ZHANG Xiangwei², HOU Donglai², SUN Zhiming²

(1. Gansu Construction Investment (Holdings) Group Corporation Mining Co. Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. School of Chemical and Environment Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The classification and the preparation process of ceramsite, the principle of preparing it from industrial solid waste, the technology of preparing ceramsite from fly ash, tailings, waste residue and sludge, and the application of ceramsite as adsorption material, concrete block and proppant were summarized. It is pointed out that the technology of preparing ceramsite from solid waste have research foundation and high feasibility, which is an important way to develop solid waste resource utilization. It is considered that the resource characteristics and cost advantages of bulk solid waste should be fully utilized in the future to prepare lightweight, porous and high-strength ceramsite, and improve the comprehensive performance of products, and the key to the large-scale application of ceramsite preparation by sintering method is to reduce production energy consumption through formula optimization and equipment development.

Keywords: industrial solid waste; ceramsite; fly ash; tailings; waste residue; sludge

随着我国经济和现代化建设的发展,工业固体废弃物的产生量与日俱增,近年来更是以超过10亿t/a的速度迅速增长^[1]。工业固体废弃物的大量堆积不仅造成有限土地资源的巨大浪费,而且带来了严重的生态环境和安全隐患。近年来,随着国家环保政策越来越严格,加快建立循环经济发展模式,实现大宗工业固体废弃物的资源化综合利用,已成为建设资源节约型、环境友好型社会和实现可持续发展的关键^[2-4]。

陶粒是经过高温烧结或免烧工艺制备而成的颗粒物或柱状物产品。由于其密度小、内部多孔,形态、成分较均一,且具有一定强度,因而展现出优异的使用性能,如质轻、耐腐蚀、抗冻、抗震、良好的隔绝性等,近年来被广泛应用于建筑材料、环保材料和绿化材料等^[5-6]。按原料的主要来源,陶粒可分为

收稿日期:2020-07-05,修回日期:2020-07-09

基金项目:中央高校基本科研业务费项目,编号:2015QH01。

第一作者简介:汪学彬(1975—),男,高级工程师。研究方向为砂石骨料生产管理以及尾矿综合利用。E-mail:2121883116@qq.com。

通信作者简介:孙志明(1986—),男,教授,博士生导师。研究方向为非金属矿物材料。E-mail:zhimingsun@cumt.edu.cn。

黏土陶粒、页岩陶粒、粉煤灰陶粒等。由于粉煤灰、尾矿和污泥等工业固废的主要化学成分(含 SiO_2 、 Al_2O_3)与黏土或页岩相似,且往往粒径小、比表面积大,因此是一类理想的陶粒生产原料。利用工业固废为主要原料生产陶粒,既能适应市场对于轻质建材、环保材料的重大需求,符合国家发展战略,又可获得良好的经济效益^[7-9]。

国、内外针对工业固体废弃物制备陶粒技术及应用的研究已取得诸多进展。本文中基于工业固体废弃物制备陶粒的主要工艺及原料种类,对不同行业固废制备陶粒的可行性进行了探讨。同时,总结了近年来工业固废制备陶粒的技术研究现状和进展,并对其应用前景进行了系统分析。

1 陶粒制备

1.1 陶粒的分类

陶粒的生产原料主要包括基体材料和辅助材料。陶粒的基体材料来源广泛,近年来逐渐由早期的黏土、页岩等矿产资源逐渐向工业固体废弃物发展,其中用于陶粒生产的工业固体废弃物根据来源的不同分为煤基固废(粉煤灰、煤矸石等)、工业废渣(钢渣、矿渣、高炉渣、有色金属渣、煤渣等)、工业尾矿(选矿产生的各种尾矿)及污泥等。不同类型工业固体废弃物制备陶粒原料及其产品特征见表1。

表1 工业固体废弃物制备陶粒的技术
Tab.1 Preparation of ceramsite from industrial solid waste

工业固体废弃物类型	基体材料	辅助材料	陶粒特征
煤基固废	粉煤灰、煤矸石	膨润土、凝灰岩、石灰石、SiC等	筒压强度高,密度低,孔隙率高
工业废渣	钢渣、矿渣、煤渣等	膨润土、玻璃粉、纯碱、石膏粉等	煅烧温度低,煅烧时间短,抗压强度高
工业尾矿	铁、铜、黄金尾矿等	膨润土、铝矾土、长石、水玻璃、SiC等	固废添加量大,密度低而强度大,吸水率高,疏松多孔
污泥	市政、化工污泥等	膨润土、黄土、玻璃粉、硅酸钙粉等	煅烧温度低,成本低,强度不高

1.2 陶粒制备工艺

1.2.1 烧结陶粒工艺

烧结法是目前最为常见的一种陶粒制备工艺,且已大规模产业化应用。烧结法主要是通过调节基体材料和辅助材料的配比,经过研磨混匀后造粒,并在高温下进行物料烧结,冷却后最终得到陶粒成品。烧结过程中,随温度升高,原料逐渐熔融并形成具有一定黏度的固、液混合相,同时释放出 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 SO_2 和 SO_3 等气体,气体溢出使固、液混合相发泡膨胀,整个过程中始终存在“内部气体强烈逸出与被外部适宜黏度液相抑制”的动态平衡^[10]。当烧结温度达到设定温度,稳定后,气体产生量逐渐减少,陶粒内部形成许多封闭、半封闭的孔隙。最终,经冷却后形成典型的蜂窝状结构。烧结法制备的陶粒具有硬度高、孔隙丰富、膨胀系数大、化学性质稳定等特点,但该工艺往往能耗较高,工艺复杂,生产成本较大。

1.2.2 免烧陶粒工艺

与烧结工艺相比,陶粒的免烧工艺没有高温烧结过程,取而代之的是自然或蒸汽养护流程。由于前期陶粒的胶凝性不足,制备过程中通常需要加入水泥作为激发剂来增强陶粒的胶凝性,同时为固体废弃物的活化提供所需的碱性环境。例如:邹正禹等^[11]以粉煤灰和水泥为原料,添加活性成分 FeS ,按照最优化物料配比混匀造粒,经过自然养护和高温养护后,制备出优级粉煤灰陶粒(堆积密度为 786 kg/m^3 ,表观密度为 1332 kg/m^3 ,筒压强度为 5.22 MPa ,吸水率为 21.4% ,软化系数为 88.5%)。邱珊等^[12]利用秸秆灰为添加剂,在最佳配比下得到低堆积密度(785 kg/m^3)、高比表面积($11.1 \text{ m}^2/\text{g}$)和低破碎率(质量分数为 2.3%)的免烧陶粒,其性能指标及浸出毒性均符合 CJ/T 299—2008《水处理用人工陶粒滤料》的要求,具有良好的应用前景。虽然免烧工艺投资小、能耗低,但免烧陶粒的产品往往强度较低,膨胀系数小,适用领域较窄,且目前多处于实验室研究阶段,难以产业化。

1.3 工业固体废弃物制备陶粒的原理

陶粒的制备原理是在一定环境条件下,基体材料和辅助材料发生不同的物理化学反应,使得产物具有良好的膨胀效果,从而实现产品多孔、轻质并具有一定的强度。陶粒膨胀必须满足以下2个基本条件:第一,高温条件下,原料能够熔融并形成具有一定黏度的玻璃相,从而对原料内部释放出的气体起到密封作用;第二,高温条件下生成黏性玻璃相后可使气体释放。内部气体的释放是陶粒膨胀的基础,当原料内部产生CO和CO₂等气体时,产生气体压力,同时黏性玻璃相对气体溢出具有抑制作用。在上述2个方面共同作用下,实现产品的有效热膨胀。另一方面,冷却后部分溢出的气体使陶粒表面形成多孔结构,未溢出的气体则在内部形成丰富孔道。

通常,原料的化学组成和相对含量会对陶粒的膨胀性和应用性能产生重要的影响,其应用性能主要受酸性氧化物和碱性氧化物共同影响。酸性氧化物SiO₂和Al₂O₃在高温条件下可以生成莫来石,可增强陶粒的强度;碱性氧化物Fe₂O₃、CaO、MgO、K₂O和Na₂O则对陶粒的烧制起到助熔作用,降低烧结温度,扩大烧结温度范围,并能够防止胚料在烧制中粘结。Riley^[13]在大量黏土陶粒制备研究的基础上,提出原料中化学组成的相对质量分数维持在某一特定范围时(SiO₂:40%~79%,Al₂O₃:10%~25%,助溶剂:13%~26%),烧制的陶粒具有良好的膨胀性。表2为部分工业固体废弃物的主要化学组成。由表可知,常见的工业固体废弃物化学组成基本可满足制备陶粒的原料质量要求范围,使得制备陶粒成为可能。

表2 部分工业固体废弃物的主要化学组成质量分数
Tab.2 Main chemical composition of industrial solid waste %

类型	化学组分							烧失物
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	
煤基固废 ^[14-15]	40~60	10~30	2~5	20~30	0.5~2	0.5~1	0.5~2	10~30
工业废渣 ^[16]	15~75	5~10	1~15	20~40	1~10	0.1~2	0.1~1	0~5
工业尾矿 ^[17]	40~75	2~15	2~20	1~15	0~20	0.1~2	0.2~1	3~15
污泥 ^[18-19]	10~60	10~30	3~30	2~4	0.2~1	0.1~3	0.1~15	2~50

2 工业固体废弃物制备陶粒技术

2.1 煤基固体废弃物陶粒

2.1.1 以煤基固废为原料制备轻质多孔陶粒

轻质多孔陶粒通常指比表面积大于10 m²/g,孔隙率为25%~50%,吸水率为20%~40%,堆积密度小于0.9 g/cm³的陶粒,其内部具有丰富的孔隙结构,除硬度大、耐腐蚀、耐高温外,还具有质轻、密度低、抗震性好、吸附性强的优点,可用作航天材料和吸附材料,且在热工窑炉和管道保温方面展现出良好的应用前景。

粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中收集的细灰,是燃煤电厂排出的主要固体废弃物。煤矸石则是采煤或洗煤过程中释放出的一种含碳量较低的固体废弃物。近年来,以粉煤灰和煤矸石为原料制备多孔陶粒已经取得了诸多研究进展。例如:谢士兵等^[20]以粉煤灰为主要原料,利用免烧多孔陶粒制备工艺制得了比表面积为12.94 m²/g,堆积密度为0.71 g/cm³,吸水率为19.5%,筒压强度为4.0 MPa的高性能多孔陶粒;吴廷枫等^[21]探究了微波及造孔剂对所制备的粉煤灰多孔陶粒性能的影响,对比了木屑、碳酸氢铵和煤粉3种造孔剂在微波条件下制得多孔陶粒的性能,优化条件下制备的多孔陶粒孔隙率为42.89%,吸水率为30.11%,抗压强度为16.35 MPa;祁非等^[22]以煤矸石为主要原料,添加质量分数为20%~50%的城市污泥,利用烧结法制备了密度为1 030~1 200 kg/m³,气孔率为26%~50%,吸水率为23%~35%的多孔陶粒,且城市污泥中有害重金属元素得到有效固化;陈彦文等^[23]以煤矸石及粉煤灰为主要原料,利用烧结法制备了堆积密度为566 kg/m³,吸水率为6.61%,筒压强度为6.68 MPa的

多孔陶粒;李小龙等^[24]利用粉煤灰、膨润土、凝灰岩为主要原料制备了超轻空心陶粒,陶粒的堆积密度达到 187 kg/m^3 , 24 h 吸水率为 1.48%, 在保温隔热混凝土及其制品领域具有良好的应用前景;杨威等^[25]以铬污染土壤复配粉煤灰为原料,利用烧结法制备出表观密度为 1.19 g/cm^3 , 1 h 吸水率为 15.2%, 筒压强度为 3.0 MPa 的超轻陶粒,该技术不仅解决了铬污染土壤问题,且生产过程能耗较低。

2.1.2 以煤基固废为原料制备高强陶粒

根据《轻集料及其试验方法》(GB/T17431.1—1998)标准,高强陶粒是指筒压强度不小于 3.0 MPa,具有强度高、吸水率低和级配良好的优点,被广泛应用于各类建筑材料,用其配制的混凝土具有强度高和抗震性能优异的特点,在高层建筑及大跨度桥梁等领域显示出良好的发展潜力与应用前景。例如:庄大英^[26]以粉煤灰及工业污泥为主要原料,利用烧结法制备出堆积密度为 770 kg/m^3 , 筒压强度为 10.1 MPa 的高强陶粒,该工艺在较低的烧结温度和较短的烧结时间下,筒压强度的显著提升;李懋^[27]以煤矸石为主要原料,烧制出堆积密度为 921.3 kg/m^3 , 筒压强度最高可达到 16.8 MPa 的高强陶粒;朱哲等^[28]以武汉市东湖淤泥作为主要原料,以粉煤灰为校正组分,制备了一种高强低吸水率的淤泥-粉煤灰陶粒,其表观密度为 1.182 g/cm^3 , 吸水率为 3.64%, 单颗粒强度为 7.92 MPa。

2.2 尾矿基陶粒

目前选矿厂尾矿的处理方式通常有 2 种:尾矿库存放或固化堆存。近年来,我国尾矿的排放量高达 15 亿 t/a, 堆存量超百亿吨,导致尾矿库超负荷使用,同时也带来了巨大的安全隐患^[29-30]。

以工业尾矿为原料制备陶粒,不仅可以提升尾矿综合利用率,同时其产品也具有良好的前景和经济效益。吴永明^[31]以金尾矿粉及钒钛铁矿粉为主要原料,按最优原料配比制备出筒压强度为 2.5 MPa, 吸水率为 8%, 堆积密度为 555 kg/m^3 的轻质多孔陶粒;孙康康等^[32]以赤泥强磁尾矿为主要原料,优化工艺条件后制得多孔陶粒,其表观密度为 1.98 g/cm^3 , 堆积密度为 1.06 g/cm^3 , 吸水率为 22.41%, 空隙率为 46.46%, 该工艺烧结温度低,所得陶粒孔隙均匀,可用于水处理用人工滤料;王德民等^[33]以低硅铁尾矿为主要原料优化了陶粒制备工艺,烧制出堆积密度为 885 kg/m^3 , 1 h 吸水率为 19.3%, 显气孔率为 43.46% 的轻质多孔陶粒,优化条件下尾矿利用率较高,烧结温度较低,因此生产成本较低。

以工业尾矿为原料,同样可以生产筒压强度不小于 3.0 MPa 的高强陶粒。秦晋一等^[34]以高 Fe_2O_3 铁尾矿为原料制备了堆积密度为 832 kg/m^3 , 筒压强度为 8.04 MPa 高强陶粒,且发现 Fe_2O_3 降低了陶粒烧结温度,对陶粒的生产具有一定指导意义;胡晨光等^[35]以铁尾矿和碱渣为原料制备出了高强核壳结构陶粒,其吸水率为 1.25%, 膨胀率为 1.24%, 堆积密度为 870.3 kg/m^3 , 筒压强度为 10.67 MPa;李扬等^[36]利用经过分选后的黄金尾矿为原料,在较低温度条件下制备出了堆积密度为 803 kg/m^3 , 表观密度为 1795 kg/m^3 , 吸水率为 0.24%, 颗粒强度为 16.59 MPa 的高强陶粒;赵威等^[37]采用质量分数为 80% 商洛钒尾矿为主要原料制备出了性能优异的轻质高强陶瓷颗粒,其堆积密度为 631 kg/m^3 , 筒压强度为 9.1 MPa, 吸水率为 3.1%, 该陶粒具有密度小、强度大的优异性能。

2.3 废渣基陶粒

随着建筑、能源、矿产等重工业的高速发展,工业废渣的排放量也以 10 亿 t/a 的速度增长,因此对于这类固体废弃物的合理有效利用显得尤为重要。随着陶粒技术的不断发展,研究表明,以工业废渣为原料制备陶粒不仅可满足资源综合利用的要求,还能有效解决此类废渣堆存带来的生态环境问题。徐雪丽等^[38]以城市污泥及炼钢废渣为原料在较低温度条件下烧制出堆积密度为 $546 \sim 523 \text{ kg/m}^3$, 吸水率为 7.6%~7.8%, 抗压强度为 5.7~6.1 MPa 的轻质陶粒;徐美娟等^[39]将造纸厂废渣掺杂进粉煤灰陶粒中,制得堆积密度为 837 kg/m^3 , 吸水率为 0.67%, 抗压强度为 55 MPa 的轻质陶粒;Wang 等^[40]以建筑废渣为原料,采用烧结法制备出堆积密度为 1.64 g/cm^3 , 吸水率为 0.7%, 筒压强度为 3.78 MPa 的轻质陶粒,且铬、锰、镍等重金属在陶粒中得到有效固化,不会对环境造成的二次污染。

以工业废渣同样可以生产高强陶粒。陈伟^[41]以钢渣为原料优化了陶粒制备工艺,烧制出抗压强度为 6.0 MPa, 密度为 805 kg/m^3 的高强陶粒;任文强^[42]以工业废渣、废石膏粉、碎玻璃粉末、铝土矿粉为原料,制得体积质量在 1.5 g/cm^3 左右,抗压碎能力为 80 MPa 左右高强陶粒,陶粒性能优异,可用作陶粒支撑剂;王传虎等^[43]以石英砂尾渣、水磨石渣为原料成功制备出膨胀率达到 60%, 筒压强度为

10.5 MPa,堆积密度为 925 kg/m^3 ,吸水率为 9.5% 的高强陶粒;靖青秀^[44]发明了一种无添加成分的钨冶炼废渣高强陶粒,陶粒的吸水率为 1.7%,堆积密度为 925 kg/m^3 ,筒压强度为 6.8 MPa,制备工艺简单,流程短,具有良好的应用前景。

2.4 污泥基陶粒

污泥是制约污水处理的关键问题,目前常用的污泥处理方式(填埋、焚烧、堆肥等)存在高能耗、占用土地、造成二次污染的缺点,污泥资源化利用成为了目前亟待解决的问题。研究表明,将污泥烧结制陶粒是一种节约资源和保护环境并行的有效途径。例如:荣辉等^[45]探究了造纸污泥对粉煤灰陶粒的影响,当污泥添加量较小时,污泥可充当造孔剂,增大孔隙,减少堆积密度,得到多孔陶粒,在污泥添加量为 10% (质量分数)时,得到的质轻多孔陶粒筒压强度为 1.65 MPa,堆积密度为 493 kg/m^3 ;戴东斌^[46]以铬污泥为原料,在最优原料配比条件下制备出轻质多孔陶粒,陶粒筒压强度为 4 MPa,堆积密度为 $500 \sim 550 \text{ kg/m}^3$,吸水率约为 20%,且铬元素的浸出量显著降低;Xu 等^[47]以污泥为原料,在低温条件下烧制出轻质陶粒,并研究发现陶粒中 Cr(VI)的主要以 Cr_2O_3 和 FeCrO_4 形式存在,不易析出,该实验进一步确定了陶粒对重金属元素的固化作用,具有重要的推广意义。

利用污泥为主要原料也可以生产高强陶粒。秦晋一等^[48]以市政污泥为主要原料,按照最优配比制得抗压强度为 4.89 MPa,密度为 1320 kg/m^3 的高强陶粒,且研究发现流动相易产生小孔汇聚现象,而污泥的放气会对小孔汇聚产生扰动,从而烧制出轻质高强陶粒;孙文慧等^[49]在最优配比条件下制得堆积密度为 760 kg/m^3 ,吸水率为 2.6%,筒压强度为 10.3 MPa 的高强陶粒,该优化后的工艺污泥添加量大,资源利用率高;舒天楚等^[50]探究了粉煤灰及煤矸石混合添加剂对污泥陶粒的影响,优化条件下烧成的陶粒性能最优,密度为 $300 \sim 400 \text{ kg/m}^3$,抗压强度为 10.46 MPa,吸水率仅为 1.5%。

3 工业固体废弃物陶粒的应用

工业固体废弃物制备的陶粒往往具有轻质、耐腐蚀、抗冻、抗震及良好的隔绝性等,可被广泛用作吸附材料、吸声材料、保温材料、支撑剂等,具有良好的市场应用前景。

3.1 陶粒用作吸附材料

工业的高速发展带来了经济效益的同时也造成了水体污染,例如大量含磷废水直接排入水体造成的水体富营养化日益严重,有毒重金属废水具有富集性、毒性、不易降解等特点,对生物体产生严重危害。吸附法是目前处理上述废水的主要方法之一。常用的吸附材料主要是活性炭材料,但活性炭使用成本高、使用周期短,难以大规模应用。近年来,将工业固体废弃物陶粒作为环境吸附材料,因其成本低、效率高而受到了广泛关注。

赵媛媛等^[51]利用水厂污泥制备的陶粒对水中 Pb 及 Cd 进行吸附,其对 Pb 和 Cd 的最大吸附容量分别达到了 13.97、18.60 mg/g,实现了以废治废;王正等^[52]研究了煤矸石陶粒对重金属 Cr(VI)的吸附性能及吸附机理;彭慧等^[53]采用水热法制备碳改性陶粒和铁-碳改性陶粒,改性后的陶粒对废水中磷的吸附性能明显提高,相同条件下,2 种陶粒对磷的去除率分别达到 97.28% 和 93.10%;Jing 等^[54]以硅藻土和钨渣为主要原料,制备了新型陶粒,其对 Cu^{2+} 的吸附量达到 9.421 mg/g,进一步研究发现,随着陶粒用量的增加,其对 Cu^{2+} 的总吸附量增加,但吸附容量下降,且吸附过程以扩散控制为主,搅拌可提高材料对 Cu^{2+} 的去除率;Wang 等^[55]以赤泥为主要原料制备了一种新型陶粒,室温条件下其对四环素的理论最大吸附量可达 2.56 mg/g;Chen 等^[56]利用污泥与粉煤灰制备了新型陶粒,其在弱酸条件下对 Pb(II)的去除率达 99%,并对其吸附机理进行了分析;靖青秀等^[57]以钼渣为主要原料制备了水处理用陶粒滤料,利用该陶粒作滤料的曝气生物滤池处理含氨氮模拟污水时, NH_4^+-N 去除率达 77%,该多孔陶粒的生物负载量达 0.047 mg/g,可为曝气生物滤池工艺提供一种新的功能载体材料。

3.2 陶粒制备混凝土砌块

随建筑节能与环保理念的不断深入,新型轻质墙体材料的开发和应用得到了广泛的关注,其中陶粒混凝土砌块因其具有轻质高强、保温性能高、抗震性强、耐火性好等特点,在轻质建材、建筑节能领域展现出了良好的发展前景。

魏莹等^[58]以硅线石尾矿陶粒、水泥和粉煤灰为主要原料,经免烧工艺制备出陶粒加气混凝土砌块,尾矿陶粒的引入降低了砌块的导热系数,提高了保温性能,增强了抗冻融性能,为硅线石尾矿的处理和新型建材的发展提供了新的思路;徐长春等^[59]以陶粒、钢渣为原料制备承重混凝土空心砌块,且随陶粒添加量增加,混凝土砌块的软化系数和密度降低,热阻值增加,有利于砌块减轻自重,提升保温隔热性能;朱静等^[60]研制了一种新型自保温污泥陶粒混凝土砌块,多孔陶粒的引入不仅使砌块具有良好的吸水性和较高的软化系数,且陶粒经过高温烧结后,提升了砌块界面粘结区域的致密性,同时混凝土砌块具有良好的抗冻性能,适用于用作夏热冬冷地区的新型墙体材料。

3.3 陶粒制备支撑剂

压裂支撑剂作为石油开采的重要原料,可有效辅助提高石油的开采量,但随着支撑剂重要原料——高品位铝矾土的过度开采,使得支撑剂的制备成本增加,因此亟需寻求新的生产原料。研究表明,利用固体废弃物制备陶粒支撑剂不仅可以提高其资源利用率,还可以显著降低陶粒支撑剂的生产成本,具有广阔的应用前景。

秦梅等^[61]以煤矸石和铝矾土为主要原料,烧制出煤层气井用的420~840 μm 经济型陶粒支撑剂,该支撑剂在35 MPa闭合压力下的破碎率均低于9%的石油天然气行业标准SY/T 5108—2014;马俊伟等^[62]以铝土矿选尾矿为主要原料制备了轻质高强陶粒支撑剂,52 MPa的闭合压力下破碎率仅为3.67%,满足低密高强陶粒支撑剂标准要求;郝惠兰等^[63]以山西省阳泉市出产的铝矾土、煤矸石和镁渣为主要原料烧结制备出了性能优异的陶粒支撑剂,其密度为2.84 g/cm^3 ,48 MPa闭合压力下破碎率为6.87%;郑林会等^[64]以山西省忻州市出产的高铝煤矸石为主要原料制备出陶粒支撑剂,并且发现矿化剂(氧化镁)的引入有效促进了液相烧结,抑制莫来石晶粒生长,从而进一步提高了支撑剂的强度。

4 结论与展望

随着社会的不断发展,工业固体废弃物资源化利用问题将成为人类可持续发展的重要课题。利用工业固体废弃物制备陶粒已经得到国内外学者的广泛关注,且技术可行性较高,已发展成为固体废弃物资源化利用的重要途径。

工业固体废弃物制备陶粒技术的大规模推广依然存在诸多问题,在配方、装备和工艺等方面研究仍有较大发展空间。

1)未来应充分发挥固体废弃物的资源特点与成本优势,实现变废为宝、以废治废,形成产品生产成本与质量优势,才能真正实现陶粒制备技术在固废资源化领域的大规模应用。

2)利用工业固体废弃物制备质轻、多孔、高强陶粒并进一步提高产品综合性能,拓宽产品应用领域,将是工业固体废弃物陶粒制备技术未来主要的发展方向。

3)烧结法作为目前陶粒的主要生产工艺,如何通过配方优化、装备研发等进一步降低陶粒生产能耗,从而降低产品生产成本,进而提高产品市场竞争力,是未来烧结法制备陶粒技术进一步大规模应用的关键。

参考文献(References):

- [1]王晓丽,李秋义,陈帅超,等.工业固体废弃物在新型建材领域中的应用研究与展望[J].硅酸盐通报,2019,38(11):3456-3464.
- [2]李运凯.浅谈城市固体废物资源化处理[J].科技风,2020(2):133-134.
- [3]李佩链.固废生态资源化利用研究[J].砖瓦世界,2019(18):129.
- [4]左艳梅.城市固体废物处理及资源化利用途径研究[J].广东化工,2015,42(18):135-136.
- [5]王祝来,薛琪,林子增,等.固体废物制备陶粒的专利申请研究进展[J].应用化工,2018,47(11):2455-2458.
- [6]毕东苏,王春杰.粉煤灰陶粒在污水处理中的应用进展[J].功能材料,2007,38(A09):3346-3348.

- [7] HE B, WANG G. Is ceramsite the last straw for sewage sludge disposal: a review of sewage sludge disposal by producing ceramsite in China[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 80(1): 1–10.
- [8] 杨洁, 刘学应. 陶粒制备的研究进展[J]. *建筑节能*, 2013(5): 45–47.
- [9] 桑迪, 王爱国, 孙道胜, 等. 利用工业固体废弃物制备烧胀陶粒的研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(9): 110–114.
- [10] 齐元峰. 超轻多孔污泥固废陶粒研制及膨胀机理探讨[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [11] 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.
- [12] 邱珊, 黄旭, 刘子述, 等. 秸秆灰为添加剂的粉煤灰免烧陶粒的试制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(2): 36–40.
- [13] RILEY C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1951, 34(4): 121–128.
- [14] 杨艳茹, 王杰, 麻永林, 等. 正交设计优化粉煤灰-煤矸石质多孔陶粒的制备过程[J]. *粉煤灰综合利用*, 2017(6): 11–14, 19.
- [15] 吕檬夷. 粉煤灰/煤矸石纤维的软化及其对纸张性能影响的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
- [16] 卢安贤, 袁宇兴, 张骞, 等. 利用工业固体废渣制备新型建筑材料的研究进展[J]. *中国材料进展*, 2018, 37(3): 224–230.
- [17] 刘娥, 成智文, 贺晓梅, 等. 工业尾矿特点及在建筑陶瓷保温材料中的应用[J]. *佛山陶瓷*, 2017, 27(6): 24–26, 33.
- [18] 姚绍武, 张文彬, 夏朝科. 利用石矿尾泥加工轻质陶粒的工艺可行性研究[J]. *矿业工程*, 2018, 16(4): 60–63.
- [19] 李勇冲, 刘永杰, 孙杰璟, 等. 利用赤泥制备闭孔超轻质泡沫陶瓷的研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(11): 113–116.
- [20] 谢士兵, 李猛, 王友成. 免烧粉煤灰陶粒的制备及在造纸废水处理中的应用[J]. *中国造纸*, 2019, 38(11): 85–89.
- [21] 吴庭枫. 微波处理不同造孔剂制备多孔粉煤灰陶粒研究[J]. *工业安全与环保*, 2019, 45(1): 99–102.
- [22] 祁非, 张长森, 陈景华. 利用城市污泥/煤矸石制备多孔陶粒的研究[J]. *陶瓷学报*, 2015, 36(1): 58–63.
- [23] 陈彦文. 一种煤矸石陶粒及其制备方法: CN201610864389.3[P]. 2017–11–10.
- [24] 李小龙, 李珠, 王亮, 等. 高碳粉煤灰超轻空心陶粒的制备[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(18): 260–264.
- [25] 杨威, 陈一萱, 王海超, 等. 铬污染土壤-粉煤灰陶粒制备工艺研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(9): 9169–9173, 9179.
- [26] 庄大英. 一种污泥协同无机固体废弃物制备陶粒的工艺方法: CN201810698274.0[P]. 2020–01–07.
- [27] 李懋. 一种煤矸石陶粒及其制备方法: CN201910576434.9[P]. 2019–09–27.
- [28] 朱哲, 朱航, 何捷, 等. 焙烧制度对武汉东湖淤泥-粉煤灰陶粒性能影响研究[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(4): 21–24.
- [29] 李向敏, 王薪洧, 姜磊, 等. 尾矿治理中植物修复技术研究进展[J]. *环境科技*, 2019, 32(5): 71–75.
- [30] 肖力光, 伊晋宏, 崔正旭. 国内外铁尾矿的综合利用现状[J]. *吉林建筑工程学院学报*, 2010, 27(4): 22–26.
- [31] 吴永明. 以金尾矿和钒钛铁尾矿为主要原料的高强轻质陶粒: CN201910484421.9[P]. 2019–08–09.
- [32] 孙康康, 张凌燕, 刘理根, 等. 赤泥强磁尾矿制备水处理陶粒滤料的研究[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(7): 2270–2275.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 胡晨光, 邢崇恩, 刘蕾, 等. 铁尾矿与碱渣基核壳高强陶粒的制备与性能研究[J]. *金属矿山*, 2019(5): 197–203.
- [36] 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.
- [37] 赵威, 王彬宇, 周春生, 等. 商洛钒尾矿烧制轻质高强陶粒的研究[J]. *人工晶体学报*, 2017, 46(9): 1858–1863.
- [38] 徐雪丽, 宋伟. 低重金属城市污泥钢渣陶粒的制备[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(9): 105–110.
- [39] 徐美娟, 秦敏艳, 吴勇平, 等. 造纸厂废渣制备高性能建筑陶粒的试验研究[J]. *黑龙江造纸*, 2015, 43(3): 42–47.
- [40] WANG C, WU J Z, ZHANG F S. Development of porous ceramsite from construction and demolition waste[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34: 2241–2249.
- [41] 陈伟, 朱才岳, 耿健. 城市污泥外掺炼钢废渣制备陶粒[J]. *城市环境与城市生态*, 2015, 28(3): 12–14.
- [42] 任文强. 一种利用工业废渣制备的陶粒支撑剂: CN201711183727.8[P]. 2018–07–20.
- [43] 王传虎, 葛金龙, 秦英月, 等. 利用石英砂尾泥等工业废渣制备陶粒的研究[J]. *上海环境科学*, 2009, 28(5):

200-203.

- [44]靖青秀. 一种无添加成分的钴冶炼废渣陶粒及其制备方法: CN201910259194. X[P]. 2019-05-24.
- [45]荣辉, 张鸿飞, 张磊, 等. 造纸污泥掺量对污泥陶粒性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2972-2978.
- [46]戴东斌. 制革含铬污泥制备陶粒的性能研究[J]. 低碳世界, 2020, 10(1): 1-2.
- [47]XU G R, ZOU J L, LI G B. Solidification and leaching behaviours of Cr^{6+} in sludge ceramsite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153: 1031-1035.
- [48]秦晋一, 封硕, 方姣, 等. 二氧化硅对污泥烧结陶粒结构强度和孔隙率的影响[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(9): 117-122.
- [49]孙文慧, 夏朝科, 姚金根, 等. 石矿尾泥与市政污泥制备高强陶粒试验研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(1): 25-28.
- [50]舒天楚, 李彦龙, 方飞远, 等. 添加剂对污水污泥烧制陶粒轻骨料性能影响及其重金属毒性评价[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(3): 274-282.
- [51]赵媛媛, 刘丹妮, 戴友芝, 等. 给水厂残泥免烧陶粒对 Pb 与 Cd 的吸附特征[J]. 环境科学研究, 2019, 32(7): 1250-1258.
- [52]王正, 高翔, 郑林会, 等. 煤系高岭土改性制备陶粒吸附剂及其对 Cr(VI) 的吸附性能[J]. 应用化工, 2019, 48(4): 841-844.
- [53]彭惠, 夏霆, 丁洁莲, 等. 水热法表面改性陶粒及其对水中磷的吸附性能[J]. 化工环保, 2018, 38(6): 698-703.
- [54]JING Q X, WANG Y Y, CHAI L Y, et al. Adsorption of copper ions on porous ceramsite prepared by diatomite and tungsten residue[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(5): 1053-1060.
- [55]WANG Y T, GONG S Y, LI Y Z, et al. Adsorptive removal of tetracycline by sustainable ceramsite substrate from bentonite/red mud/pine sawdust[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 2960.
- [56]CHEN Y C, SHI J W, RONG H R, et al. Adsorption mechanism of lead ions on porous ceramsite prepared by co-combustion ash of sewage sludge and biomass[J]. Science of the Total Environment, 2020, 702: 135017.
- [57]靖青秀, 王魏, 游威, 等. 钴渣基陶粒滤料的制备工艺及性能[J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 85-88, 92.
- [58]魏莹, 王永安. 硅线石尾矿陶粒制备加气混凝土砌块的研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(7): 2336-2340, 2345.
- [59]徐长春, 孔德辅, 陈北全, 等. 陶粒钢渣轻质混凝土空心砌块性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(2): 129-132.
- [60]朱静, 杨鼎宜, 洪亚强, 等. 自保温污泥陶粒混凝土砌块及其性能研究[J]. 混凝土, 2015(9): 130-134.
- [61]秦梅, 郝惠兰, 田玉明, 等. 基于煤层气井用陶粒支撑剂的制备[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3355-3359.
- [62]马俊伟, 吴国亮, 张建强. 铝土矿选尾矿制备低密高强陶粒支撑剂的试验研究[J]. 轻金属, 2019(10): 8-11.
- [63]郝惠兰, 田玉明, 秦梅, 等. 烧结温度对添加镁渣制备陶粒支撑剂性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 367-370.
- [64]郑林会, 高翔, 王正, 等. MgO 作矿化剂对多孔轻质陶粒支撑剂结构和性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 440-444.