

城市污泥 / 磷尾矿陶粒的烧结条件及性能研究

张晓亚,冯丽娟,王 济,陈家慧,吴仁迪 贵州师范大学 地理与环境科学学院,贵阳 550025

摘 要:以城市污泥和磷尾矿为原料,选取4个质量混合比(2:1、1:1、1:2、1:3),在不同 烧结条件下(5个温度、5个时间)制备陶粒,对陶粒的堆积密度、吸水率、盐酸可溶率进行测定并对原 料和部分陶粒进行 XRD 物相分析。研究结果显示:随着污泥添加比增大,陶粒堆积密度降低,盐酸可 溶率(2:1除外)和吸水率升高。污泥:磷尾矿质量比为2:1的陶粒,当烧结温度为1000—1100℃ 时,其堆积密度小,吸水率较高;1100—1200℃时,陶粒盐酸可溶率降低,且显著低于其他比例。污 泥含量的增加有助于提高陶粒物相特征峰的强度和丰富度,优化骨架结构。在配料比2:1、烧结温度 1150℃、烧结时间15 min 的条件下,制得堆积密度小(434.70 kg·m⁻³)的轻质陶粒。 关键词:污泥;磷尾矿;陶粒;烧结时间;烧结温度

Research on sintering conditions and performance of municipal sludge/phosphate tailings ceramsite

ZHANG Xiaoya, FENG Lijuan, WANG Ji, CHEN Jiahui, WU Rendi School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Sewage sludge and phosphate tailings are byproducts of wastewater treatment and phosphorite exploitation, respectively. Improper disposal of these materials may cause soil, groundwater, and air pollution. Both materials can, however, be reused to make cement, bricks, and ceramsite. The aim of this study was to prepare ceramsite from such sludge and phosphate tailings, and to determine the optimal sintering conditions. *Materials and methods* Sewage sludge and phosphate tailings were used as raw materials. Chemical components of the materials were examined by X-ray fluorescence spectrometry. The phases of the raw materials and some ceramsites were determined by X-ray diffractometry. Four mixing ratios and five different sintering temperatures and times were tested. Bulk density, water absorption, and hydrochloric acid solubility of the resulting ceramsites were measured. *Results* The results showed that as the sludge addition ratio in the ceramsite increased, its bulk density and HCl solubility (except for the 2 : 1 mass ratio) decreased and

Received Date: 2020-12-07; Accepted Date: 2021-04-20; Online first: 2021-05-05

Corresponding Author: FENG Lijuan, E-mail: feng_lijuan@163.com

引用格式:张晓亚,冯丽娟,王 济,等.2021.城市污泥/磷尾矿陶粒的烧结条件及性能研究 [J]. 地球环境学报, 12(4): 447-454.
 Citation: Zhang X Y, Feng L J, Wang J, et al. 2021. Research on sintering conditions and performance of municipal sludge/phosphate tailings ceramsite [J]. Journal of Earth Environment, 12(4): 447-454.

收稿日期:2020-12-07;录用日期:2021-04-20;网络出版:2021-05-05

基金项目:贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2017]1123);贵州省普通高等学校青年科技人才成长项目(黔教合 KY字[2021]300);贵州省科技合作计划项目(黔科合LH字[2016]7215号)

Foundation Item: Guizhou Provincial Science and Technology Foundation (Qian Sci. Co. Basic, [2017]1123); Youth Science and Technology Talent Growth Project for Ordinary Colleges and Universities of Guizhou Province (Qian Edu. Co. KY [2021]300); Guizhou Provincial Science and Technology Cooperation Project (Qian Sci. Co. LH [2016]7215)

通信作者:冯丽娟, E-mail: feng_lijuan@163.com

地球环境学报

water absorption increased. An increase of sludge content improved the strength and richness of ceramsite phase structure. The optimal ceramsite exhibited a bulk density of 434.70 kg·m⁻³, water absorption of 61.20%, and HCl solubility of 20.44%. *Discussion* For a sintering time of 15 min and temperature of 1000—1050°C, the sludge/ phosphate tailings ceramsite produced using a mass ratio of 2:1 had low bulk density, high water absorbance, and low HCl solubility. As the sludge content increased, the proportion of organic matter increased. Decomposition of this organic matter released significant heat at high temperature, which was conducive to an increase of pores in the ceramsite, formation of framework and enamel layers, and enhancement of characteristic peaks. The optimized ceramsite composition had relatively stable chemical properties and could be used as lightweight aggregate or as a filler for sewage treatment. *Conclusions* The ceramsite produced using a raw materials at a mass ratio of 2:1 and a sintering time of 15 min at 1150°C gave optimal properties of low bulk density, high water absorption, and low HCl solubility. *Recommendations and perspectives* Preparation of ceramsite from sewage sludge and phosphate tailings provides a method for resource utilization of these waste materials.

Key words: sludge; phosphate tailings; ceramsite; sintering time; sintering temperature

随着我国城镇化进程加快,城镇污水处理产 生的污泥量不断增加。目前我国污泥处置方法以 土地利用、填埋及焚烧为主,日本污泥处置以焚 烧为主,美国主要以土地循环利用为主,欧洲国 家(英国、法国、德国)的处置方法则以土地 利用为主(唐小辉和赵力, 2005; 张贺飞等, 2010)。2009年起,我国在污泥农用、林用、 园林绿化及土地改良方面制定了一系列的相关标 准要求, 污泥因含有重金属、有毒有机物等污染 物,在土地利用方面受到一定限制(Veeken and Hamelers, 1999)。由于城市污泥产生量大, 真正 实现资源化利用的处理处置方法较少,污泥填埋 占用大量土地,若处置不善还易造成土壤、地下 水、大气污染等一系列问题,对生态环境安全造 成威胁。因此,安全、规模化、高附加值的污泥 利用方式研发显得尤为重要。

磷尾矿是磷矿开采后丢弃的废料。据统计, 截止2010年,我国磷矿总资源量为168亿t,通 常每生产1t磷精矿,将产生0.44t尾矿(张伟和 代佳雨,2015;周倩倩和周克清,2018)。目前磷 尾矿资源化利用的科技含量和经济效益较低,大 量磷尾矿露天堆放,容易发生尾矿库溃坝、泄漏 等安全事故,危害居民的生命财产安全(李鹏毅 等,2019)。磷尾矿中主要有含氟磷灰石、白云 石、石英等成分,还含有镁、钙、锰、锑、铁、 铝等多种有用矿物,也含有一定量的铜、锌、铅、 镉等重金属污染物(黎继勇等,2015)。长期堆 放不仅对矿区周围环境造成污染,还浪费了大量 的矿物资源。因此,磷尾矿的再利用对保护环境、 促进经济健康发展具有重要意义。

近年来, 污泥在建材利用方面应用较多, 主 要包括制水泥、制砖、制陶粒等,这些利用方式 能有效地固定污泥中的重金属,减少产品利用过 程中对环境的二次污染。其中陶粒作为典型的轻 集料,关于其理化性质、空隙率、孔隙率、吸 水率、堆积密度、含泥量等指标的研究较多(岳 敏等, 2008; 王佳福和吕剑明, 2012; 刘喜等, 2014; 武胜萍等, 2018)。传统陶粒以黏土陶粒、 粉煤灰陶粒、页岩陶粒等为主,用与传统陶粒制 备原料化学成分相似的固体废物(如城市污泥) 代替部分原料,可制备具有吸附净化性能、重金属 固定作用的特殊性质陶粒,促进了固体废物的资 源化利用 (蔡昌凤等, 2007; Xu et al, 2008; 钱 伟等, 2012; 何世华, 2013; 曲烈等, 2016)。 本文以污泥和磷尾矿为原料高温焙烧制备陶粒, 通过试验就焙烧温度和时间对陶粒性能(堆积密 度、吸水率、盐酸可溶率)的影响进行逐一探讨, 筛选出可用于废水处理的轻质陶粒,为污泥和磷 尾矿的资源利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究中的脱水污泥取自贵阳市某污水处理 厂,磷尾矿取自福泉市某磷尾矿库。原料基本性 质如表1所示,主要化学组成见表2。

1.2 陶粒制备方法

陶粒的制备方法采用湿法造粒(祁非等, 2015),将含水率45%±5%的脱水污泥、含水率

第4期

张晓亚,等:城市污泥/磷尾矿陶粒的烧结条件及性能研究

449

20% 左右的磷尾矿于105℃烘干后粉碎过60 目筛, 按照污泥与磷尾矿干质量比2:1、1:1、1:2、 1:3 分别混合,将混合料按固液比8:3 加水湿 润后制成直径5-8 mm的球形颗粒。将颗粒置于 马弗炉(天津泰斯特仪器, SX-5-12 型号),升温 至 400℃ 预热 20 min,根据前期预实验结果,分别 在不同温度(1000℃、1050℃、1100℃、1150℃、 1200℃,烧结时间 15 min)和不同时间(5 min、 10 min、15 min、20 min、25 min,温度 1150℃) 的烧结条件下制备陶粒。

表 1 污泥及磷尾矿的基本性质 Tab. 1 The basic properties of sludge and phosphate tailings							
الكلاطينا	基本性质 Basic properties						
121件 Matarial	pН	有机质	总氮	总磷			
Iviaterial		Organic matter/ $(g \cdot kg^{-1})$	Total nitrogen/ $(g \cdot kg^{-1})$	Total phosphorus/ $(g \cdot kg^{-1})$			
污泥 Sludge	6.84	345.88	22.37	25.09			
磷尾矿 Phosphate tailings	8.33	ND	28.00	59.20			
ND. 去检出 ND: not detected							

表 2 污泥及磷尾矿的主要化学组成										
Tab. 2 The main chemical composition of sludge and phosphate tailings										
材料	化学组成 Chemical components/%									
Material	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	P_2O_5	MgO	K_2O	TiO ₂	S	F
污泥 Sludge	34.31	22.01	14.38	11.04	5.89	5.72	3.08	1.46	1.02	ND
磷尾矿 Phosphate tailings	7.84	58.38	1.77	1.23	11.19	17.12	0.40	0.096	0.188	1.23
ND. 未检出 ND: not detected										

ND:木位出。 ND: not detected

1.3 测定方法

堆积密度、吸水率测定方法参考《轻集料及 其试验方法 第2部分:轻集料试验方法》(GB/T 17431.2—2010),盐酸可溶率测定方法参考《水 处理用人工陶粒滤料》(CJT 299—2008);用X 射线荧光光谱仪(XRF)分析原料的主要化学组 分,X射线衍射仪(XRD)分析原料和部分陶粒 的物相。

2 结果与讨论

2.1 不同烧结条件对陶粒堆积密度的影响

堆积密度反映了陶粒颗粒之间空隙体积的大小,为陶粒衡量产品质量、堆放和运输等方面提供了参考依据。由图 1、图 2 可见,自制污泥/磷尾矿陶粒的堆积密度在 434—617 kg·m⁻³范围内变化。其中,污泥与磷尾矿混合比为 2 :1 的陶粒(434.70—496.79 kg·m⁻³)满足《轻集料及其试验方法 第 1 部分:轻集料》(GB/T 17431.1—2010)中 500 级((400,500] kg·m⁻³)的规定,可用于制备超轻集料,其余陶粒则属于普通轻集料。通过与已报道的污泥/粉煤灰/黏土陶粒(堆积密度)(岳敏等,2008)、污泥/粉煤灰/集料

尾泥(堆积密度)(钱伟等,2012)研究中的数据相对比,发现污泥/磷尾矿制备的陶粒积密度 更小,质地更轻。





通过分析对比得知原料配比对陶粒堆积密度 的影响显著。随着污泥添加比例的降低,堆积密度 有明显的上升趋势,即陶粒试样的堆积密度随着 污泥掺加量的增加而减小。陶粒焙烧过程中由于 污泥中的有机质在预热与高温烧结后,会变为气体

DOI: 10.7515/JEE212003

地球环境学报

逸出,同时释放大量热量使得陶粒中熔融浆体的 黏度降低(钱伟等,2012;何世华,2013),伴 生气体压力增大,使陶粒中熔融体发胀、内部气 孔增加、内部结构连通、陶粒变轻,从而导致其 堆积密度明显降低(陈伟等,2010)。混合比为 1:3的陶粒堆积密度略高于其他陶粒(图1), 且随温度升高而持续升高。由前述分析可知,随着 污泥含量的减少,陶粒的堆积密度增加。当污泥 含量低于30%时,由于有机质含量有限,有机物 燃烧释放的热量和产生的气体量不足以使陶粒膨 胀,无法有效降低堆积密度(陈伟等,2010)。





当烧结时间为 15 min 时,堆积密度随着烧结 温度的变化情况如图 2 所示。烧结温度在 1000— 1150℃,陶粒的堆积密度随烧结温度的升高而降 低,这与陶粒的膨胀性能有关。在此范围内温度升 高,有机质气化更充分,陶粒因内部发育形成气孔 而膨胀,从而使堆积密度降低(柯睿等,2018)。 而当温度过高(1200℃)时,陶粒内部有机质气 化速度快,气体压力大,气体逸出陶粒表面而致 内部塌陷,陶粒膨胀达到最大限度,堆积密度相 应较大(何世华,2013)。另外,温度过高可能 使陶粒成分熔融,来自污泥的碳和 CaO 以及来自 磷尾矿的 SiO₂、Al₂O₃等物质液化后填充陶粒内部 气孔,也会使堆积密度升高(陈伟等,2010;向 晓东等,2018; 周倩倩和周克清,2018)。

2.2 不同烧结条件对陶粒吸水率的影响

吸水率是表征陶粒吸水能力的指标。结合图 3、图4可知,原料配比是影响陶粒吸水率的重要 因素,烧结温度和烧结时间对吸水率也有一定影 响。对于原料配比而言,陶粒吸水率随着污泥含量 的减少而降低。污泥中的有机质在焙烧过程中产 生大量气体使陶粒充分膨胀,连通了陶粒内部与 表面的气孔(陈伟等,2010;何必繁等,2011), 使陶粒内部有更多空间可以吸纳液体。污泥含量 减少,陶粒内部孔隙减少、吸水率降低,这一结 果与堆积密度的分析结果一致。



图 3 烧结时间对陶粒吸水率的影响



rate of ceramsite

吸水率随烧结时间延长有上升趋势(图3)。 烧结时间延长,陶粒液相反应更充分,内部液相 增多致使内部气孔填充,形成的多余液相则可能 封闭表面气孔(曲烈等,2016),从而降低陶粒 吸水率。1:3的陶粒吸水率最小,此陶粒的孔 隙率小,该结果对应了堆积密度的结果。当烧结 时间一定时,陶粒吸水率随着烧结温度的升高逐

张晓亚,等:城市污泥/磷尾矿陶粒的烧结条件及性能研究

渐下降(图4)。烧结温度升高,高熔点物质液 化,陶粒内部液相成分及产生量增加,共熔体填 充了内部气孔,降低了孔隙率,使得吸水率下降 (蔡昌凤等,2007;徐振华等,2013;程海翔等, 2016)。同时温度升高使陶粒表面致密组织增加, 形成釉质层填充表面裂纹(曲烈等,2016),使 陶粒表面光滑,并可能封闭进入内部的孔隙。

本次研究的陶粒1h吸水率虽均未达到《轻集料 及其试验方法第1部分:轻集料》(GB/T17431.1— 2010)中500级(15%)与600级(10%)的标 准。考虑到陶粒的应用方向,当陶粒作为滤料用 于水处理时,有研究表明:吸水率越大,陶粒的 内部孔隙增加,有利于微生物挂膜吸附,从而对 废水中污染物(氨氮、总磷、COD等)的去除 率越高(蔡昌凤等,2007;严子春和胡家炜, 2009;杜倩倩,2016;孙康康等,2016;李佳丽 等,2019)。因此,陶粒用于水处理时,吸水率 对于陶粒去除污染物有一定的积极作用。

2.3 不同烧结条件对陶粒盐酸可溶率的影响

盐酸可溶率体现了陶粒的耐酸程度,一定程 度上反映了陶粒的化学稳定性。盐酸可溶率低的 陶粒在酸性条件下稳定性强,可减少使用过程中 的溶蚀耗损。综合图 5、图 6 可知, 原料配比和烧 结温度对陶粒盐酸可溶率有显著的影响。根据以 上对堆积密度和吸水率的分析可知, 污泥比例越 低, 陶粒内部孔隙越少, 与外部连通的气孔越少, 陶粒与盐酸的接触面积相应减少,有利于降低盐 酸可溶率,盐酸可溶率随污泥含量减小而减小。 由图5得知, 污泥添加比为2:1时陶粒盐酸可 溶率最小,主要有以下两个原因:(1)在一定温 度下(如1150℃),陶粒表面会形成一层以莫来 石(Al₂O₃·SiO₂)、石英(SiO₂)和长石类为主的 不规则晶体组成的致密釉质层(王佳福和吕剑明, 2012; 曲烈等, 2016), 釉质层阻隔酸溶液与陶 粒可溶成分(钙、铝及铁的氧化物)的接触。2:1 陶粒中有机质含量多,在焙烧过程中释放足够的 热量,使尾矿中的 Si、Al 等成分充分熔融反应形 成釉质层,故而可降低盐酸可溶率。(2)当污泥 添加比大于1:1(ω>50%)时, 陶粒烧结过程 中有机质分解,为陶粒形成晶体骨架结构提供充 分热量, 使陶粒在强化、变轻的同时化学稳定性 提高,降低溶于盐酸的可能性(陈伟等,2010; 曲烈等,2016)。









当原料配比相同时, 陶粒的盐酸可溶率随着 温度升高而下降(图6)。不同温度下形成的陶 粒,其成分和结构有所区别。当温度低于1050℃ 时,只有少量 K₂O-Al₂O₃-SiO₂ 熔融物(共熔温度 为980—1150℃)可形成。而温度高于1050℃时, 陶粒内部会逐渐形成 Na₂O-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1062℃左右)、FeO-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1083℃ 左右)、CaO-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1083℃ 左右)、CaO-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1083℃ 左右)、CaO-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1083℃ 左右)、CaO-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1083℃ 方。 之右)、CaO-Al₂O₃-SiO₂(共熔温度 1083℃ 方。 方。 方。 和共熔体(李帆等,1996; 毛军等,2003; 王兴润等,2007),釉质层成分更丰富、厚度增 加,陶粒表面越光滑,盐酸可溶率越低。另外, 污泥中约含有 5.38%钙氧化物、4.63%铝氧化物和 3.07% 铁氧化物(李倩炜等,2015),这些氧化物 均可溶于盐酸。在焙烧过程中,污泥中的钙、铁氧 化物可与磷尾矿中的莫来石、石英形成不溶于盐酸 的共熔体(李帆等,1996),高温促进反应进行, 分散的钙、铁氧化物相应减少,降低了陶粒的盐 酸可溶率。本次研究的陶粒盐酸可溶率均大于《水 处理用人工陶粒滤料》(CJ/T 299-2008)中的 2%的标准,说明自制陶粒的化学稳定性有待进一 步提高。同时通过上述分析可知,加大污泥配料 比(2:1以上)或升高烧结温度能有效地降低盐 酸可溶率,在后续的研究中可以从这两方面对陶 粒的稳定性进行进一步的优化。

对以上陶粒性质变化进行分析可知,污泥与 磷尾矿比例为2:1、烧结时间为15 min、烧结温 度为1000—1150℃的陶粒堆积密度较小,作为轻 质骨料使用时有利于堆放和运输。吸水率较高, 当陶粒用作填料处理污水时,有利于营养物质的 传递以及微生物在陶粒内部孔道中附着生长(徐 振华等,2012)。盐酸可溶率较小,陶粒化学性 质较稳定。综合上述结果,原料配比2:1、烧结 时间15 min、烧结温度1150℃的陶粒综合性能最 佳,该陶粒的堆积密度、吸水率、盐酸可溶率分 别为434.70 kg·m⁻³、61.20%、20.44%。

2.4 物相分析

由上述结果可知,影响陶粒内部结构的主要因 素是烧结温度和原料配比。为进一步了解原料对 陶粒内部构造的影响,对原料和1150℃、15 min 下4个比例的陶粒进行了 XRD 物相分析。图7是 污泥与磷尾矿的 XRD 图谱,结果显示:污泥的主 要晶相为 SiO₂和 CaCO₃,其次为 CaMg(CO₃)₂和 Zn₂Fe(PO₄)₂(H₂O)₄, 磷尾矿则以 CaMg(CO₃)₂ 为主, 其次为Ca₄F(PO₄),这一结果与表2结果所示一 致。图 8 是 4 个不同比例下的陶粒 XRD 图谱,不 同比例下陶粒的基本组成物相大体一致,都以石英 (SiO₂)、莫来石(Al₂SiO₅)、镁橄榄石(Mg₂SiO₄) 为主,含有镁铝榴石(Mg,Al₂(SiO₄),)、磷灰石 (Ca₄F(PO₄),)等物质。随着污泥含量的增加,陶粒 主要晶相的特征峰强度增加,晶相的结晶度越好。 同时钠长石(NaAlSi₃O₈)随之出现,其特征峰强 度也随污泥的增加而增加。当污泥量含量达到 50% 后,物相3(MgHPO₄(H₂O)₃+Mg(OH)₂)消失不见, 随之物相4(Mg₃Si₂O₅(OH)₄)特征峰出现且随着污 泥的增加越来越明显,主要原因可能是污泥中有机 质分解提供了更多的热量有助于晶体分解形成更加 稳定的物相(陈伟等, 2010; 曲烈等, 2016)。





3 结论

通过研究得出以下结论:原料配比显著影响陶 粒堆积密度、吸水率和盐酸可溶率,温度影响次 之,时间对陶粒性质影响较小。随着污泥比例增 加,陶粒吸水率和盐酸可溶率上升、堆积密度减 少,陶粒物相特征峰越明显,晶体的结晶度越好; 随着温度升高,陶粒堆积密度升高,吸水率和盐 酸可溶率降低。本研究中烧结时间为15 min、烧 结温度为1150℃、原料配比为2:1的陶粒最佳, 该条件下的陶粒具备堆积密度小、吸水率大、盐 酸可溶率小的性质。

参考文献

- 蔡昌凤,徐建平,褚 倩,等. 2007. 粉煤灰/污泥烧结陶 粒的研制与应用 [J]. 环境污染与防治, 29(1): 26–29.
 [Cai C F, Xu J P, Chu Q, et al. 2007. Development and application of sintered fly ash/sludge ceramic granules [J]. *Environmental Pollution & Control*, 29(1): 26–29.]
- 程海翔,周 海,李建辉,等. 2016. 城市污泥及其焚烧灰 混合料烧结陶粒的实验研究 [J]. *环境工程学报*,10(2):
 845-850. [Cheng H X, Zhou H, Li J H, et al. 2016. Experimental study on manufacturing haydite by sintering municipal sludge and its incineration ash [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 10(2): 845-850.]
- 陈 伟, 樊传刚, 王 健, 等. 2010. 废纸造纸污泥陶粒的 制备与性能表征 [J]. *过程工程学报*, 10(5): 1015–1019. [Chen W, Fan C G, Wang J, et al. 2010. Preparation and characterization of keramzite spheres using sewage sludge produced by waste paper recycling [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 10(5): 1015–1019.]
- 杜倩倩. 2016. 矿物多孔生物滤料的制备及在有机废水处 理中的应用研究 [D]. 天津:河北工业大学. [Du Q Q. 2016. The preparation of mineral porous biological filter and application in organic wastewater treatment [D]. Tianjin: Hebei University of Technology.
- 何必繁, 王里奥, 黄 川, 等. 2011. 弧叶型旋转窑烧制污 泥陶粒实验研究 [J]. *环境工程学报*, 5(4): 909–916. [He B F, Wang L A, Huang C, et al. 2011. Experimental study on producing ceramsite with sewage sludge in arc blade rotary kiln [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 5(4): 909–916.]
- 何世华. 2013. 工业污泥、海泥和石粉研制轻质陶粒的研 究 [J]. 硅酸盐通报, 32(3): 453-456. [He S H. 2013. Study on producing lightweight ceramsite with industrial sludge, sea mud and stone powder [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 32(3): 453-456.]
- 柯 睿,谈云志,吴 军,等.2018. 富含有机质淤泥烧结陶粒的评估 [J]. 硅酸盐通报,37(8):2405-2410.
 [Ke R, Tan Y Z, Wu J, et al. 2018. Evaluation of sintered ceramsite with rich organic matter silt [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 37(8): 2405-2410.]
- 弊 帆,邱建荣,郑楚光. 1996. 煤中矿物质对灰熔融温度 影响的三元相图分析 [J]. 华中理工大学学报, 24(10):
 97-100. [Li F, Qiu J R, Zheng C G. 1996. The effect of mineral matter in coal on the ash melting point with

ternary phase diagram [J]. *Journal of Huazhong University* of Science and Technology, 24(10): 97–100.]

- 黎继永,童雄,韩彬,等. 2015. 磷尾矿综合利用 研究进展[J]. 矿产保护与利用, (5): 57-62. [Li J Y, Tong X, Han B, et al. 2015. Research development of comprehensive utilization of phosphate tailings [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (5): 57-62.]
- 李佳丽, 冯丽娟, 王 济, 等. 2019. 城市污泥 磷石膏 陶粒的制备条件及性能分析 [J]. 环境监测管理与 技术, 31(4): 64-67. [Li J L, Feng L J, Wang J, et al. 2019. Preparation conditions and properties of sludgephosphogypsum ceramsite [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 31(4): 64-67.
- 李鹏毅, 张冬冬, 宁 平, 等. 2019. 磷尾矿资源化利用研 究 [J]. 化工矿物与加工, 48(2): 66-70. [Li P Y, Zhang D D, Ning P, et al. 2019. Study on resource utilization of phosphate tailings [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 48(2): 66-70.]
- 李倩炜,周笑绿,李 环,等. 2015. 粉煤灰陶粒填料制备 及用作曝气生物滤池填料的性能考察 [J]. 化工进展, 34(9): 3379–3382. [Li Q W, Zhou X L, Li H, et al. 2015. Research on the preparation of fly ash ceramisite as filler of BAF and its performance in wastewater treatment [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 34(9): 3379–3382.]
- 刘 喜,吕贝贝,刘全威,等. 2014. 高强轻骨料陶粒混凝 土配合比及强度影响因素试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 33(4): 847-852. [Liu X, Lü B B, Liu Q W, et al. 2014. Mechanical properties of lightweight concrete under mix proportion and strength factors [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 33(4): 847-852.]
- 毛 军,徐明厚,李 帆. 2003. 碱性矿物质对煤灰熔融特 性影响的研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 31(4): 59-62. [Mao J, Xu M H, Li F. 2003. The effect of alkali mineral matter on the ash melting characteristic [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 31(4): 59-62.]
- 孙康康,张凌燕,刘理根,等.2016.赤泥强磁尾矿制备水处 理陶粒滤料的研究 [J]. 硅酸盐通报,35(7):2270-2275. [Sun K K, Zhang L Y, Liu L G, et al. 2016. Preparation of ceramsite filter materials for water treatment by tailings with high intensity magnetic separation from red mud [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 35(7): 2270-2275.

- 祁 非,张长森,陈景华. 2015. 利用城市污泥/煤矸石 制备多孔陶粒的研究 [J]. *陶瓷学报*, 36(1): 58-63.
 [Qi F, Zhang C S, Chen J H. 2015. Preparation of porous ceramsite with sludge and gangue [J]. *Journal of Ceramics*, 36(1): 58-63.]
- 曲 烈,王 渊,杨久俊,等.2016.城市污泥-玻璃粉轻质 陶粒制备及性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 35(3): 970–974, 979. [Qu L, Wang Y, Yang J J, et al. 2016. Properties and preparation of ceramsite made municipal sludge and glass powder [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 35(3): 970–974, 979.]
- 钱 伟, 樊传刚, 陈 伟, 等. 2012. 水处理污泥陶粒的制备 及其对重金属的固定 [J]. *非金属矿*, 35(2): 72-75. [Qian W, Fan C G, Chen W, et al. 2012. Preparation and heavy metal immobilization of keramzite spheres from municipal sewage sludge [J]. *Non-Metallic Mines*, 35(2): 72-75.]
- 唐小辉, 赵 力. 2005. 污泥处置国内外进展 [J]. *环境科学* 与管理, 30(3): 68-70, 90. [Tang X H, Zhao L. 2005. The development of sludge disposal strategy [J]. *Environmental Science and Management*, 30(3): 68-70, 90.]
- 王佳福,吕剑明. 2012. 利用城市污泥制备陶粒的研究 [J]. 硅酸盐通报, 31(3): 706-710. [Wang J F, Lü J M. 2012. Research on preparation of ceramsite using city sludge [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 31(3): 706-710.]
- 武胜萍, 阎奕汝, 孙蓬元. 2018. 高强淤泥陶粒轻集料的性能与 制备技术 [J]. *硅酸盐通报*, 37(8): 2395–2399. [Wu S P, Yan Y R, Sun P Y. 2018. Performance and preparation techniques of high-strength ceramsite lightweight aggregates made of sendiment [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 37(8): 2395–2399.]
- 王兴润,金宜英,杜 欣,等. 2007. 城市污水厂污泥烧结 制陶粒的可行性研究 [J]. *中国给水排水*, 23(7): 11–15. [Wang X R, Jin Y Y, Du X, et al. 2007. Feasibility research on sintering municipal sewage sludge for manufacturing haydite [J]. *China Water & Wastewater*, 23(7): 11–15.]
- 向晓东, 唐卫军, 江新卫, 等. 2018. 高强钢渣陶粒特性试验 研究 [J]. 矿产综合利用, (1): 96–100. [Xiang X D, Tang W J, Jiang X W, et al. 2018. Experimental investigation of the characteristics of steel slag ceramsite [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (1): 96–100.]
- 徐振华,刘建国,宋敏英,等.2012. 污泥、底泥与粉煤灰烧 结陶粒的工艺研究 [J]. 安全与环境学报,12(4): 21-26.

[Xu Z H, Liu J G, Song M Y, et al. 2012. Technological study on sintering ceramisite with sewage sludge and sediment and fly ash [J]. *Journal of Safety and Environment*, 12(4): 21–26.]

- 徐振华,刘建国,宋敏英,等.2013. 温度对污泥与底泥烧结 陶粒性能的影响 [J]. 环境工程学报,7(5): 1894–1900. [Xu Z H, Liu J G, Song M Y, et al. 2013. Effect of temperature on sintering ceramisite with sewage sludge and sediment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*,7(5): 1894–1900.]
- 岳 敏,岳钦艳,李仁波,等.2008.城市污水厂污泥制备 陶粒滤料及其特性 [J]. 过程工程学报,8(5):972-977.
 [Yue M, Yue Q Y, Li R B, et al. 2008. Preparation and characterization of keramzite from municipal sewage sludge [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 8(5):972-977.]
- 严子春,胡家炜. 2009. 新型多功能净水滤料的制备及其 性能研究 [J]. 水处理技术, 35(6): 36-39, 42. [Yan Z C, Hu J W. 2009. Preparation and performance of a novel multifunctional filter medium for water purification [J]. *Technology of Water Treatment*, 35(6): 36-39, 42.
- 张贺飞,徐 燕,曾正中,等.2010. 国外城市污泥处理处置方 式研究及对我国的启示 [J]. *环境工程*,28(S1): 434-438. [Zhang H F, Xu Y, Zeng Z Z, et al. 2010. Municipal sludge treatment way overseas and its enlightenment to China [J]. *Environmental Engineering*, 28(S1): 434-438.]
- 张 伟,代佳雨. 2015. 磷尾矿综合利用现状及展望 [J]. 化 工矿物与加工, 44(9): 52-55. [Zhang W, Dai J Y. 2015. Current status and prospect of comprehensive utilization of phosphate tailings [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 44(9): 52-55.]
- 周倩倩,周克清. 2018. 磷尾矿资源综合利用现状研究 [J]. 化工矿物与加工,47(9):67–70. [Zhou Q Q, Zhou K Q. 2018. Research on status of comprehensive utilization of phosphate tailings [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 47(9): 67–70.]
- Veeken A H M, Hamelers H V M. 1999. Removal of heavy metals from sewage sludge by extraction with organic acids [J]. Water Science and Technology, 40(1): 129–136.
- Xu G R, Zou J L, Li G B. 2008. Effect of sintering temperature on the characteristics of sludge ceramsite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 150(2): 394–400.