

崔长颢, 杨柳阳, 王雪娇, 等. 利用含重金属土壤制备烧结砖可行性及环境安全性研究 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 312-317.

CUI C H, YANG L Y, WANG X J, et al. Feasibility and environmental safety investigation of making fired bricks by using heavy metals-contained soil [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 312-317.

利用含重金属土壤制备烧结砖可行性及环境安全性研究

崔长颢^{1,2}, 杨柳阳³, 王雪娇¹, 闫大海^{1,2*}

1. 中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所

2. 国家环境保护危险废物鉴别与风险控制重点实验室, 中国环境科学研究院

3. 南京工业大学环境科学与工程学院

摘要 为探明利用含重金属土壤作为页岩替代原料制备烧结砖的可行性和环境安全性, 选取某砖窑以 70% 的比例掺加该土壤替代页岩开展工业化试验, 研究重金属在烟气中的排放情况及在成品砖中的浸出率和分配规律。结果显示: 土壤中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 浓度与页岩原料相似, 可以用作页岩原料的替代; 烧制的成品砖力学性能符合产品质量标准。在以含重金属土壤为原料的砖块烧结过程中, 烟气中常规污染物和重金属污染物排放均满足相关标准, 环境风险可控; 烧结砖中可浸出重金属浓度显著低于 GB 30760—2014《水泥窑协同处置固体废物技术规范》浸出限值, 砖块在使用过程中的重金属浸出风险较低; As、Cd、Cr、Mn、Ni、Pb 和 Cu 在烧结过程中基本赋存在成品砖里, 经烟气挥发和湿法脱硫压滤后留存于脱硫滤饼中的重金属含量极低。研究表明, 利用含重金属土壤制备烧结砖从产品力学性能及环境安全性上均能满足现有标准, 具有一定的资源化利用效益。

关键词 重金属; 污染土壤; 烧结砖; 环境安全性; 浸出与分配

中图分类号: X705 文章编号: 1674-991X(2023)01-0312-06 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210613

Feasibility and environmental safety investigation of making fired bricks by using heavy metals-contained soil

CUI Changhao^{1,2}, YANG Liuyang³, WANG Xuejiao¹, YAN Dahai^{1,2*}

1. Research Institute of Solid Waste Management, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Hazardous Waste Identification and Risk Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3. School of Environmental Sciences and Engineering, Nanjing Tech University

Abstract Soil heavy metal pollution in China is still relatively serious, and inappropriate disposal of heavy metal contaminated soil can lead to a serious damage to both the ecological environment and human health. However, soil normally contains a significant amount of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 , which makes it applicable to prepare sintered bricks. In order to ascertain the feasibility and environmental safety of making sintered bricks by using heavy metal contained soil, an industrialization experiment was carried out in a brick kiln, with a blending ratio of 70% soil to replace shale, to investigate the heavy metal emission in flue gas, and the leaching and distribution properties in fired brick. The results revealed that soil had a similar content of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 compared to shale, and therefore, it could be used as a substitute for shale raw materials. The mechanical properties of the fired bricks met the product quality standards. During the sintering process with heavy metal soil as raw material, the emission of conventional flue gas pollutants and heavy metal pollutants met the relevant standards, and the environmental risk was controllable. The concentration of leachable heavy metals in sintered bricks was significantly lower than the leaching limit of *Technical Specification for Cooperative Disposal of Solid Waste in Cement Kilns* (GB 30760-2014), and therefore, the leaching risk was low during using bricks. As, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb and Cu basically stayed in fired bricks under sintering, and the contents of heavy metals remained in the desulfurization filter cake after flue gas

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2019YSKY-016)

作者简介: 崔长颢 (1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事固体废物环境管理研究工作, 2627357570@qq.com

* 责任作者: 闫大海 (1979—), 男, 研究员, 博士, 主要从事固体废物处理技术研究工作, seavslan@163.com

volatilization and wet desulfurization filter pressing were extremely low. The research showed that using heavy metal-contained soil to make sintered brick could meet the existing standards from both mechanical and environmental safety aspects and had certain resource benefits.

Key words heavy metal; contaminated soil; fired brick; environmental safety; leaching and distribution

《全国土壤污染状况调查公报》(2014 年版)调查显示,我国土壤环境状况总体不容乐观。全国土壤总的点位超标率为 16.1%,且超标元素以重金属为主,Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn 及 Ni 这 7 种重金属超标率分别为 7%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9% 及 4.8%^[1]。土壤重金属污染具有“三致”效应^[2-3],若处置不当可能对生态环境和人体健康产生显著危害。

土壤中含有大量的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ,与制造烧结砖所用的页岩原料成分较为相似,具备替代页岩制砖的潜力。而砖窑中的高温烧结环境可以将土壤中的重金属固化在烧结砖硅酸盐基体中^[3],降低环境风险。目前,国内外针对烧结砖的研究主要集中在 2 个方面:1)研究利用尾矿渣^[4-6]、污泥^[7-8]、飞灰^[9-10]、钻井岩屑^[11-12]等固体废物作为替代原料对烧结砖质量的影响,对在原料替代下的烧结砖力学性能进行可行性评估;2)研究 Cr、As、Cd 及 Pb 等重金属在高温烧结条件下的固化^[13]、浸出^[14-15]和迁移规律^[16-17],判断烧结砖在烧结和使用过程中的环境安全性。

综合国内外烧结砖相关研究发现,有关利用含重金属土壤作为替代原料制备烧结砖可行性的研究较少,且实际开展的烧结砖窑工业化试验仍然不足。笔者依托某烧结砖窑,以含重金属土壤替代页岩原料制作烧结砖,通过现场试验研究重金属在烟气中的排放情况以及在成品砖中的浸出特性和分配规律,对利用含重金属土壤制备烧结砖的力学性能和环境风险进行分析,以期为我国烧结砖原料替代技术的环境安全性评估和产业化发展提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验原料与烧结砖制备

试验所用土壤取自某工业区地块,地块内原工业企业主要为金属制品加工、机械零部件制造、电缆加工生产行业等。开展试验的砖厂所用砖坯原料为页岩、建筑淤泥及煤渣,并按照 70%:15%:15% 的固定比例制作砖坯。为最大化含重金属土壤对烧结砖力学性能和环境安全性的影响,利用土壤完全替代页岩。将按比例混合的试验土壤、建筑淤泥和煤渣通过破碎机破碎后放入陈化库陈化,随后利用真空挤压机在 4.0 MPa 的真空度下将混合材料挤出形成砖坯。

1.2 烧结工艺流程

试验砖厂烧结工艺流程如图 1 所示。砖坯挤出成型后经自然风干、干燥、焙烧等工序成砖出窑。窑炉废气采用湿法一体化脱硫除尘装置进行处理,产生的脱硫废水回用于制砖,脱硫滤饼统一贮存,经处理后的烟气通过烟囱排入大气。

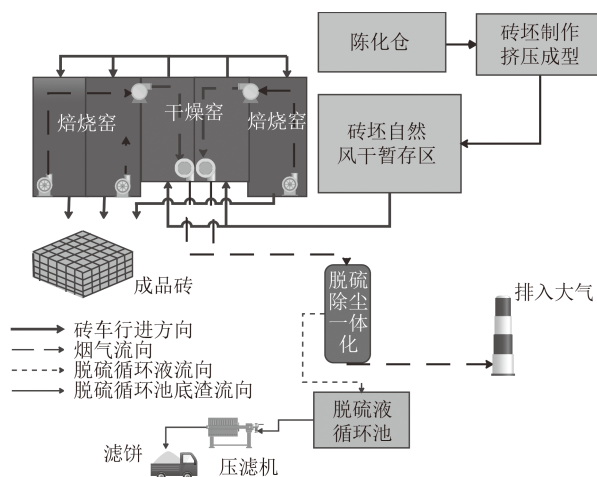


图 1 砖窑烧结工艺流程

Fig.1 Manufacturing process of fired bricks tunnel kiln

试验设置空白和掺烧 2 个工况:空白工况保持原制砖材料和比例不变;掺烧工况下利用试验土壤完全替代页岩,保持建筑淤泥和煤成分及配制比例不变。2 个工况下除砖坯原料发生变化外,其他生产工艺参数如烧结温度、烧成时间、砖车行进速度、引风机功率、引风量等基本一致。

1.3 分析测定方法

试验土壤中 S 浓度参照 GB/T 214—2007《煤中全硫的测定方法》测定。烟气中颗粒物、 SO_2 、 NO_x 和氟化物分别按照 HJ 836—2017《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》、HJ 57—2017《固定污染源废气 二氧化硫的测定 定电位电解法》、HJ/T 43—1999《固定污染源排气中氮氧化物的测定 盐酸萘乙二胺分光光度法》及 HJ/T 67—2001《大气固定污染源 氟化物的测定 离子选择电极法》检测;重金属利用 EPA method 29《固定源金属排放测定》^[18]和 HJ 657—2013《空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》测定。页岩、试验土壤、成品砖和脱硫滤饼中重金属按照 HJ 766—2015《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等

离子体质谱法》检测。成品砖中可浸出重金属浓度按照 GB/T 30810—2014《水泥胶砂中可浸出重金属的测定方法》测定。

1.4 重金属浸出率和分配率计算方法

定义烧结砖中可浸出重金属的质量占重金属总质量的比例为重金属浸出率, 计算公式如下:

$$R_i = \frac{C_i \times V}{C_i \times M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_i 为重金属在烧结砖中的浸出率, %; C_i 为烧结砖中可浸出重金属的浸出浓度, mg/L; V 为浸出液体积, L; C_i 为烧结砖中重金属浓度, mg/kg; M 为浸出测试的烧结砖样品质量, kg。

以出砖窑系统的所有物质, 即烟气、脱硫滤饼和成品砖中重金属总量为 100%, 则重金属在各物料中的分配率按下式计算:

$$K_{i,j} = \frac{N_{i,j} \times C_{i,j}}{N_g \times C_{g,j} + N_f \times C_{f,j} + N_b \times C_{b,j}} \quad (2)$$

式中: $K_{i,j}$ 为重金属 j 在样品 i 中的分配率, %; $N_{i,j}$ 为重金属 j 在物料 i 中的产出量均值, kg; $C_{i,j}$ 为重金属 j 在样品 i 中的浓度, mg/kg; N_g 为烟气流量均值, m^3 ; $C_{g,j}$ 为烟气中重金属 j 的排放浓度, mg/ m^3 ; N_f 为脱硫滤饼产生量均值, kg; $C_{f,j}$ 为脱硫滤饼中重金属 j 的浓度, mg/kg; N_b 为砖块产出量均值, kg; $C_{b,j}$ 为成品砖中重金属 j 的浓度, mg/kg。

2 结果与讨论

2.1 页岩和试验土壤组成成分对比

试验所用页岩和土壤的化学组成和重金属浓度如表 1 和表 2 所示。2 种原料的化学组成较为相似, 均以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主, 同时还有少量的 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 及 MgO 等物质。烧结砖的强度主要受 Si 和 Al 浓度影响, 适宜成砖的 SiO_2 和 Al_2O_3 占比分别为 55%~70% 和 10%~20%^[19]。过高的 SiO_2 和 Al_2O_3 浓度将大幅降低烧结砖的塑性并显著提升烧成温度。土壤中 As、Cd、Cr、Mn、Ni、Pb 和 Cu 有检出, 而其中 Cr 和 Mn 浓度显著高于其他重金属, 为主要特征污染物。试验土壤中 Cr 和 Mn 浓度显著高于页岩, 但 As 浓度相对较低。从化学组成和重金属浓度来看, 该土壤具备替代页岩制备烧结砖的潜力。

2.2 烧结砖烧结和使用过程中环境安全性分析

从图 1 的烧结工艺流程来看, 土壤中重金属主要有 2 个流向: 1) 在砖窑高温条件下挥发进入烟气, 随后通过烟囱排入大气中; 2) 在烧结过程中被固化到成品砖里。因此, 烧结砖烧结和使用过程中的环境安全性分析主要从 2 个方面进行: 1) 通过对比空

表 1 试验用页岩和土壤的化学组成
Table 1 Chemical composition of shale and soil for test

试验原料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO
页岩	68.4	18.9	4.6	2.5	0.1	2.6	1.8
土壤	62.6	19.4	6.7	4.0	0.2	2.4	1.5

表 2 试验用页岩和土壤中重金属浓度

试验原料	As	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Cu
页岩	35.6	5.0	122.3	599.0	41.1	82.8	48.2
土壤	5.2	1.5	400.0	617.2	69.0	55.7	26.4

白工况和掺烧工况下烟气中的重金属浓度, 判断烧结过程中烟气排放风险; 2) 通过对成品砖进行可浸出重金属浓度检测, 明确砖块在使用过程中的浸出风险。此外, 因我国目前已有 GB 29620—2013《砖瓦工业大气污染物排放标准》, 掺烧工况下烟气中常规污染物排放需同时满足该标准。

2.2.1 烟气中污染物的排放分析

2.2.1.1 常规污染物

GB 29620—2013 中规定了砖窑烟气颗粒物、 SO_2 、 NO_x 和氯化物的排放限值。在标准规定的 18% 烟气基准氧含量下, 2 种工况常规污染物检测结果如表 3 所示。

表 3 2 种工况下烟气中常规污染物浓度

污染物	空白工况	掺烧工况	GB 29620—2013 排放限值
颗粒物	3.5	3.6	30
SO_2	2.6	10.5	150
NO_x	18.3	9.1	200
氯化物	0.67	0.31	3

由表 3 可知, 2 种工况下颗粒物、 SO_2 、 NO_x 和氯化物的排放浓度均低于标准限值, 且掺烧工况下仅 SO_2 排放浓度较空白工况显著提升。掺烧工况烟气中 SO_2 排放浓度的提升可能由试验土壤的高 S 含量引起。本次试验所用土壤 S 含量约为 0.6%, 高于我国主要地层板块页岩中 S 含量平均值 (0.5%), 因此造成烟气中 SO_2 排放浓度有所增加。从烟气中常规污染物含量来看, 利用含重金属土壤为原料制备的烧结砖, 烧结过程中烟气常规污染物排放风险可控。

2.2.1.2 重金属

目前我国砖瓦行业暂无烟气中重金属排放标

准,表 4 将 2 种工况下重金属排放浓度与 GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》和 GB 18484—2020《危险废物焚烧污染控制标准》进行对比。结果显示,2 种工况下除 Cd 外其他重金属排放浓度均满足标准,烟气中 Cd 排放浓度满足 GB 16297—1996,但显著高于 GB 18484—2020。相较于空白工况,掺烧工况烟气中 Cr、Mn、Pb 及 Cu 的排放浓度有所上升但幅度不明显,分别提升 10.8%、8.9%、17.5% 及 4.3%。以此来看,利用含重金属土壤为原料制备的烧结砖,烧结过程中烟气重金属排放风险可控。

表 4 2 种工况下烟气中重金属浓度
Table 4 Concentrations of heavy metals

in flue gas under two conditions				mg/m ³
重金属	空白工况	掺烧工况	标准排放限值	
			GB 16297—1996	GB 18484—2020
As	0.037	0.028		0.500
Cd	0.115	0.093	0.850	0.050
Cr	0.409	0.453		0.500
Mn	0.987	1.075		
Ni	0.306	0.289	4.300	
Pb	0.080	0.094	0.700	0.500
Cu	0.117	0.122		

2.2.2 可浸出重金属浓度

常见的烧结砖使用场景包括铺设道路、用作建筑内部隔墙以及外部围墙等,其中的可浸出重金属可以随着雨水淋洗或冲刷进入土壤或地下水中,因此有必要对烧结砖块进行可浸出重金属浓度测定。我国目前暂无烧结砖中可浸出浓度限值,因砖块的使用场景与水泥较为相似,将成品砖中的可浸出重金属浓度与 GB 30760—2014《水泥窑协同处置固体废物技术规范》中的浸出限值进行类比,结果见表 5。

表 5 成品砖中可浸出重金属浓度及控制限值
Table 5 Concentrations and control limits

		of leachable heavy metals in fired bricks							μg/L	
项目		As	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Cu		
空白工况		28.6	0.1	6.5	213.7	7.9	6.0	12.3		
掺烧工况		19.8	0.02	5.6	180.8	6.7	3.9	12.6		
GB 30760—2014 浸出限值		100	30	200	1 000	200	300	1 000		

由表 5 可见,2 种工况下成品砖的可浸出重金属浓度均低于 GB 30760—2014 浸出限值,且掺烧工况下成品砖中 7 种重金属的浸出浓度较空白工况无明显增加。由此判断,掺烧含重金属土壤制成的烧结砖在使用过程的重金属浸出风险较低。

2.3 掺烧砖力学性能评估

利用含重金属土壤制备烧结砖的力学性能如表 6 所示。由表 6 可见,掺烧砖满足 GB/T 5101—2017《烧结普通砖》相关产品的质量标准,以试验土壤为原料未对砖产品质量造成影响。

表 6 掺烧工况下成品砖力学性能

Table 6 Mechanical properties of fired bricks under blending condition

项目		掺烧 工况	GB/T 5101—2017 标准值
尺寸允许 偏差/mm	长度平均偏差	-1.5	±2.0
	长度极差	2.5	≤ 6.0
	宽度平均偏差	-1.5	±1.5
	宽度极差	1.0	≤ 5.0
	高度平均偏差	-0.8	±1.5
	高度极差	2.0	≤ 4.0
外观质量/mm	两条面高度差	1.5	≤ 2
	弯曲	1.3	≤ 2
	杂质凸出高度	1.9	≤ 2
	缺棱掉角的3个破坏尺寸	0	> 5
	大面上宽度方向及其 延伸至条面的长度	26.3	≤ 30
	长度方向及其延伸至 顶面的长度或条顶面上 水平裂纹的长度	28.9	≤ 50
	抗压强度平均值	20.67	≥ 20.0
	强度标准值	16.0	≥ 14.0
放射性核素 限量/(Bq/kg)	内照射指数	0.3	≤ 1.0
	外照射指数	0.6	≤ 1.0

2.4 重金属迁移特性研究

2.4.1 重金属分配率

掺烧工况下,重金属通过砖坯进入砖窑,并通过烟气、脱硫滤饼和成品砖排出砖窑。以排出砖窑的所有物质中重金属总量为 100%,结合重金属在烟气、脱硫滤饼和成品砖中的含量,得到重金属在排出砖窑物质中的分配率如表 7 所示。烧结过程中重金属基本赋存在成品砖里,挥发入烟气和经湿法脱硫压滤后留存于脱硫滤饼中的重金属含量极低。

As 和 Cd 同属于高挥发性金属^[20],但其在烟气中的分配率分别仅有 0.391% 和 0.130%。崔敬轩等^[21]利用高温管式炉模拟高温环境下 As 的挥发特性,结果显示随着温度的升高 As 与原料中的 CaO 等物质发生的固化反应占据主导地位,降低了 As 在烟气中的挥发率。而大量对水泥窑协同处置过程中 Cd 的挥发及冷凝研究表明,烟气中 Cd 含量应占入窑总量的 14%~26%^[22-24]。然而,砖窑对 Cd 的分配率与水

表 7 掺烧工况下重金属在烧结砖隧道窑中的分配率

Table 7 Distribution of heavy metals during co-processing in sintered brick tunnel kiln %

项目	As	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Cu
烟气	0.391	0.130	0.065	0.013	0.028	0.048	0.068
脱硫滤饼	0.003	0.001	0.004	0.001	0.003	0.002	0.009
成品砖	99.606	99.869	99.931	99.986	99.969	99.950	99.923

泥窑截然相反,在烟气中的分配率仅为 0.130%。造成该现象的原因应与烧结温度有关,水泥窑中高温段温度一般稳定在 1 200~1 400 ℃,而本次试验砖窑烧成段温度为 950~1 050 ℃。当温度较低时,Cd 会与原料中的矿物质发生反应并以 $\text{CdAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 形态存在^[25],而 $\text{CdAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 的熔点在 1 200 ℃ 以上,导致大量的 Cd 被固化在成品砖中。

此外,当烧结温度在 950 ℃ 及以上时,Wang 等^[26]发现制砖原料中的矿物质会与 Cr、Mn 和 Ni 发生不可逆反应,将其由元素态转化成稳定的尖晶石或硅酸盐形态从而固化在成品砖中,通过挥发进入烟气中的重金属含量极低,本次试验结果与该文献研究相符。而 Pb 会与 SiO_2 、 Al_2O_3 生成铝-铅硅酸盐^[27],Cu 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 等生成铝-铜尖晶石和铁-铜尖晶石^[28]从而被固定于砖块中,导致烟气和脱硫滤饼中的重金属分配率极低。

2.4.2 重金属浸出率

空白工况及掺烧工况下成品砖中重金属的浸出率如表 8 所示。2 种工况下重金属浸出率无明显变化。除 As 之外,其他重金属浸出率均小于 10%,表明砖窑对绝大多数重金属有明显的固定作用。杨子良等^[29]的研究指出,在砖窑烧结处置含 As 物料时,砖窑内部的高温烧结环境不利于 As 在烧结砖中的固定。主要原因是 As 由难溶的砷酸盐转化为溶解度相对较高的 As_2O_3 或亚砷酸盐,并以残渣态的形式固存于砖块表层中,导致浸出率显著升高。

表 8 2 种工况下重金属在砖窑中的浸出率

Table 8 Leaching rate of heavy metals in brick tunnel kiln under two conditions %

工况	As	Cd	Cr	Mn	Ni	Pb	Cu
空白工况	59.0	1.5	2.0	8.1	4.5	2.5	5.8
掺烧工况	40.0	0.3	1.6	4.9	3.5	1.4	5.4

3 结论

(1) 试验所用土壤中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 浓度与页岩原料相似,可以用作页岩原料的替代。掺烧

砖坯经砖窑烧结后,烟气中常规污染物和除 Cd 外的其他重金属排放浓度均满足相关排放标准,且较空白工况无明显变化。整体来看,利用含重金属土壤为原料制备的烧结砖,烧结过程中烟气常规污染物和重金属排放风险可控。

(2) 2 种工况下成品砖中可浸出重金属浓度均低于《水泥窑协同处置固体废物技术规范》浸出限值,掺烧含重金属土壤制成的烧结砖在使用过程的重金属浸出风险较低,且掺烧砖力学性能满足《烧结普通砖》相关产品质量标准,以含重金属土壤为原料烧结砖未对砖产品质量造成影响。

(3) 重金属在出窑烟气、脱硫滤饼和成品砖中的分配率结果表明,As、Cd、Cr、Mn、Ni、Pb 和 Cu 在烧结过程中基本赋存在成品砖里,进入烟气和脱硫滤饼中的含量极低。重金属浸出结果表明,除 As 显示出较高的浸出率外,其他重金属浸出率均小于 10%,砖窑对大多数重金属具有固定作用。As 在高温烧结条件下可以形成可溶性砷酸盐类物质并以残渣态的形式固存于砖块表层中,酸浸极易将 As 析出从而提升 As 浸出率。因此,应对烧结砖中 As 含量加以关注,以防 As 浸出危害环境和人体健康。

参考文献

- [1] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL].(2014-04-17)[2021-10-11].https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670_wh.htm.
- [2] 李继宁,魏源,赵龙,等.锦矿区土壤重金属生物可给性及人体健康风险评估[J].环境工程技术学报,2014,4(5):412-420.
LI J N, WEI Y, ZHAO L, et al. Bioaccessibility and human health risk assessment of heavy metals in soils of antimony mine area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(5): 412-420.
- [3] POLETTINI A, POMI R, TRINCI L, et al. Engineering and environmental properties of thermally treated mixtures containing MSWI fly ash and low-cost additives[J]. Chemosphere, 2004, 56(10): 901-910.
- [4] 周伟伦,廖正家,陈涛,等.利用铁尾矿制备烧结砖的可行性及烧结固化机理[J].环境工程学报,2021,15(5):1670-1678.
ZHOU J L, LIAO Z J, CHEN T, et al. Feasibility of using iron tailings to prepare sintering brick and sintering solidification mechanism[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5): 1670-1678.
- [5] WEI Z A, ZHAO J K, WANG W S, et al. Utilizing gold mine tailings to produce sintered bricks[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122655.
- [6] 王晓明.尾矿烧结制砖研究和应用[J].中国资源综合利用,2021,39(9):72-75.
WANG X M. Research and application of making bricks by sintering tailings[J]. China Resources Comprehensive

- Utilization, 2021, 39(9): 72-75.
- [7] GOEL G, KATIYAR N K, KIRTHIKA S K, et al. Potential pathway for recycling of the paper mill sludge compost for brick making[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122384.
- [8] 崔敬轩, 何捷, 聂卿, 等. 河湖淤泥制备烧结砖的研究进展[J]. 中国建材科技, 2020, 29(5): 37-41.
- CUI J X, HE J, NIE Q, et al. Research progress on preparation of sintered bricks from river and lake sludge[J]. China Building Materials Science and Technology, 2020, 29(5): 37-41.
- [9] LEIVA C, ARENAS C, PECENO B, et al. A mechanical, leaching, and radiological assessment of fired bricks with a high content of fly ash[J]. Ceramics International, 2018, 44: 13313-13319.
- [10] TAKI K, GAHLOT R, KUMAR M. Utilization of fly ash amended sewage sludge as brick for sustainable building material with special emphasis on dimensional effect[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123942.
- [11] 张忠亮, 金容旭, 张雪梅, 等. 利用海上油气田水基钻井废物制备烧结砖[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9): 3020-3028.
- ZHANG Z L, JIN R X, ZHANG X M, et al. Preparation of sintered brick from water-based drilling wastes in offshore oil and gas field[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 3020-3028.
- [12] 王之超, 何洁, 张曼丽, 等. 油基钻井岩屑固化体中多环芳烃释放特征[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(4): 647-652.
- WANG Z C, HE J, ZHANG M L, et al. Release characteristics of PAHs in oil-based drilling cuttings solidified body[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(4): 647-652.
- [13] LI C, WEN Q, HONG M, et al. Heavy metals leaching in bricks made from lead and zinc mine tailings with varied chemical components[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134: 443-451.
- [14] GHOSH I, GUHA S, BALASUBRAMANIAM R, et al. Leaching of metals from fresh and sintered red mud[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2/3): 662-668.
- [15] CHEN S W, CHENG P C, TU Y T, et al. Variance in heavy metal leachability of Pb-, Ni-, and Cr-contaminated soils through red brick sintering procedure[J]. Environ Monit Assess, 2019, 191(4): 253.
- [16] 田梦莹, 杨玉飞, 黄启飞, 等. 烧结砖中重金属释放特性研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 191-195.
- TIAN M Y, YANG Y F, HUANG Q F, et al. On the heavy-metal releasing features in sintered bricks[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 191-195.
- [17] 刘敬勇, 孙水裕, 陈涛. 固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1166-1173.
- LIU J Y, SUN S Y, CHEN T. Effects of adsorbents on partitioning and fixation of heavy metals in the incineration process of sewage sludge[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1166-1173.
- [18] 杨柳阳. 重金属在砖窑协同处置过程中的挥发特征及使用过程中释放限值探究[D]. 南京: 南京工业大学, 2021.
- [19] 徐厚林. 烧结砖化学成分及物理性能简述[J]. 砖瓦世界, 2015(4): 33-34.
- [20] ARENA U, GREGORIO F. Element partitioning in combustion- and gasification-based waste-to-energy units[J]. Waste Management, 2013, 33: 1142-1150.
- [21] 崔敬轩, 闫大海, 李丽, 等. 水泥窑共处置过程中砷挥发特性及动力学研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1498-1504.
- CUI J X, YAN D H, LI L, et al. Volatilization characteristics and dynamics research on arsenic during co-processing in cement kilns[J]. China Environmental Science, 2014, 34(6): 1498-1504.
- [22] CONG J, YAN D H, LI L, et al. Volatilization of heavy metals (As, Pb, Cd) during co-processing in cement kilns[J]. Environmental Engineering Science, 2015, 32(5): 425-435.
- [23] 崔敬轩, 闫大海, 李丽, 等. 水泥窑协同处置过程中Pb、Cd的挥发特性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(12): 5001-5006.
- CUI J X, YAN D H, LI L, et al. Volatilizing characteristic of lead and cadmium during co-processing in cement kiln[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(12): 5001-5006.
- [24] 丛璟, 闫大海, 李丽, 等. 水泥窑共处置过程中水泥生料对Pb与Cd的吸附/冷凝特性[J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 575-581.
- CONG J, YAN D H, LI L, et al. Research on condensation and absorption characteristics of cement raw meal for Pb and Cd during co-processing in cement kiln[J]. Research of Environmental science, 2015, 28(4): 575-581.
- [25] XU G R, ZOU L J, LI G B. Stabilization of heavy metals in sludge ceramics[J]. Water Research, 2010, 44: 2930-2938.
- [26] WANG G W, NING X N, LU X W, et al. Effect of sintering temperature on mineral composition and heavy metals mobility in tailings bricks[J]. Waste Management, 2019, 93: 112-121.
- [27] TANG Y, LEE P, SHIH K. Copper sludge from printed circuit board production/recycling for ceramic materials: a quantitative analysis of copper transformation and immobilization[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(15): 8609-8615.
- [28] TANG Y, SHIH K, WANG Y, et al. Zinc stabilization efficiency of aluminate spinel structure and its leaching behavior[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(24): 10544-10550.
- [29] 杨子良, 岳波, 闫大海, 等. 含砷废物资源化产品中砷的浸出特性与环境风险分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(3): 293-297.
- YANG Z L, YUE B, YAN D H, et al. Leaching characteristic and environmental risk analysis of arsenic in resource recovery products using arsenic-containing waste[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(3): 293-297. ⊗