

利用沼渣为掺料制备多孔烧结墙体材料的可行性研究

蹇守卫*, 何桂海, 马保国, 张 阳, 孙孟琪, 邝真真

(武汉理工大学 硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 武汉 430070)

摘 要:利用干化沼渣作为造孔剂加入烧结墙体材料原料体系中,可制备具有节能效果的烧结墙体材料。通过实验研究了沼渣掺量、烧结温度和烧结保温时间对节能烧结墙体材料的物理性能、力学性能和工作性能的影响规律,结果表明:利用沼渣作为造孔剂加入到原料体系中可获得较好的塑性成型能力,将沼渣掺量控制在 10%、烧结温度制度控制在 1000 °C 并保温 3 h 时,能够制备出满足 MU10(GB 5101—2003)各项性能指标条件并符合环境保护要求的烧结墙体材料。这为沼渣的综合利用提供了工艺技术方面的指导和借鉴。

关键词:沼气渣;烧结墙体材料;工作性能

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)11-2222-06 **doi:**10.11654/jaes.2015.11.026

Experimental Analysis of Biogas Sludge as Admixture of Porous Sintered Wall Material

JIAN Shou-wei*, HE Gui-hai, MA Bao-guo, ZHANG Yang, SUN Meng-qi, ZHI Zhen-zhen

(State Key Laboratory of Silicate Materials for Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This study explored the feasibility of dried biogas sludge as a blowing agent in sintered block's material system to produce energy-efficient porous sintered shale block. The influences of biogas sludge dose, sintering temperature and soaking time on physical, mechanical and working properties of the sintered wall materials were studied. Results showed that biogas sludge could be used as raw material to product sintered block with excellent plastic forming ability. The blocks sintered with biogas sludge dose of 10% in mass at 1000 °C for 3 hours showed the best mechanical properties. All performance indexes of the product met the requirements of the national standards for sintered common bricks[MU10(GB 5101—2003)] and the environmental protection standards. These results could shed light on new utilization of biogas sludge.

Keywords: biogas sludge; sintered block; property

近年来,随着我国经济建设快速发展,作为我国长期帮扶并重点发展的对象,农村地区也取得了社会经济的快速进步,但随之而来的则是农村消耗的能源也日益增加。沼气作为农村地区可以持续利用的绿色新型能源,加强其开发利用对我国农村经济建设发展起到至关重要的作用。近些年来国家持续加大对农村沼气开发利用的投资力度,也使得我国农村沼气池的数量呈现飞速增长,据统计,我国农村沼气池数量已

从 2006 年底的 2200 万户增加到 2014 年的 5200 万户,沼气产量从 80 亿 m³ 增加到 230 亿 m³, 预计到 2020 年,农村地区在普及沼气技术后沼气产量可以达到 400 亿 m³[1-2]。这将有效减缓农村能源消耗增速,还可减少对日益脆弱的农村生态环境所造成的损害。

随着沼气建设的快速发展,如何高效处理沼渣,成为限制我国沼气事业全面发展的一道技术屏障。沼渣作为发酵后不溶解或难分解的有机物和无机物的混合物,现阶段主要处理方式是将其作为农用废料处理,但该处理方式仍存在的问题:首先是沼渣中含有大量的木质纤维素,而这种纤维素农用利用率并不高,农用消化的时间周期较长^[3];其次是我国对沼液沼渣的使用管理还很薄弱,沼渣中含有大量的有害物质,如重金属 Cu 和 Zn 的含量较高,其农业利用存在

收稿日期:2015-05-30

基金项目:国家科技支撑计划:墙材窑炉大气污染物治理关键技术研究与示范(2013BAC13B01-06);湖北省科技支撑计划项目:湖泊底泥与城市污泥高效利用技术制备节能烧结墙体材料(2015BCA303)

作者简介:蹇守卫(1980—),男,副研究员。

E-mail: jianshouwei@126.com

着重金属积累的危险,影响农作物安全^[4-5],因此,寻求并探索新的沼渣处理方式显得尤为迫切。

将沼渣作为建材利用尤其是用于制备多孔烧结墙体材料,是一种新的处理方式,在国内外鲜有研究。本文研究了以沼渣作为掺合料与页岩复合制备烧结材料,分析沼渣掺量对原料塑性的影响,并且探讨了沼渣不同掺量、不同烧成温度对烧成试样性能的影响并得出最佳试验方案,为沼渣在节能烧结墙体材料中的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 原料

本实验所用页岩来源于湖北十堰,含水率为1.2%,粒度大小为 ≤ 0.15 mm;沼渣来源于重庆云阳一牲畜养殖场,沼气生产的主要原材料为人畜禽粪、秸秆和杂草菜叶等,沼气发酵工艺为常温发酵工艺。原料送样前已经过自然干化处理,为未腐烂秸秆与泥状物体混合物,呈松散状并无明显气味,原料含水率35.3%,送抵实验室在烘箱中于100℃条件下烘干,经过粉磨过筛后粒度大小为 ≤ 0.15 mm。沼渣和页岩的化学成分如表1。沼渣中主要成分为 SiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等,其中含量最高的为可燃有机物,达49.01%;页岩中主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ;两种原料中均同时含有少量的 CaO 、 K_2O 、 MgO 等碱性物质。两种原料的矿物组成如图1所示。沼渣中除含有石英外,还有白云母、方解石、钠长石这几种主要矿物;页岩中也有较多的石英、云母和长石类矿物质。

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

将干化沼渣粉磨后过150目筛,然后与粉磨后过150目筛的页岩按设计比例混合,通过多次独立试验尝试后确定加入总质量6%的水分最易成型,加入水并反复搅拌充分混合均匀后陈化24 h,将混合料加入试块模具中,采用静力压实的方法将试块缓慢压实,在20 MPa压强下保压15 s后脱模,制得直径50 mm、30 mm的圆柱形试块。将试块自然风干48 h后置于 $(105\pm 1)^\circ\text{C}$ 的鼓风电加干燥箱中干燥24 h^[6],然后送入ECFT-55-13型高温电炉中进行烧结,控制不

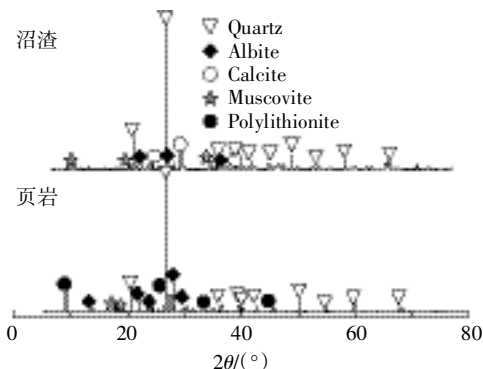


图1 沼渣和页岩的矿物组成

Figure 1 Mineral composition of biogas sludge and shale

同的烧结温度和保温时间,烧结完成后随炉冷却即得到成品。

1.2.2 测试方法

本实验采用原料塑性指数[测试参照《土工试验工程》(SL237—1999)]来反应试样成型难易程度;烧成试样的尺寸偏差、外观质量、强度、抗风化性、泛霜、石灰爆裂等性能测试结果均参照《烧结普通砖》(GB 5101—2003)的性能要求。考虑到实验室与工程实际应用的差别,在实验中采用实心圆柱形坯体(直径55 mm、高30 mm)测试烧成试样的相对尺寸偏差(重复试样10)、外观质量(重复试样10)、抗压强度(重复试样4)、体积密度(重复试样10)、抗风化性(重复试样2)、泛霜(重复试样2)、石灰爆裂(重复试样2)等性能。

2 结果与讨论

2.1 沼渣掺量对混合料塑性性能影响

塑性是指泥料在外力作用下连续变形的能力,一般要求烧结墙体材料混合料的塑性指数在7~15之间^[7]。表2列出沼渣-页岩可塑性指标随沼渣掺量从0%~30%变化的结果。

由表2可以看出,本实验所选用的页岩塑性较差,但加入沼渣后,原料的塑性明显提高,并且原料塑性随沼渣掺量的增加而增加,所得到的混合原料完全符合烧结墙体材料挤出成型要求。其原因在于土体的塑性指数主要受控于粘土矿物与水的相互作用,其中最重要的是粘土矿物总量^[8],加入的沼渣矿物中含有一定的层状云母和钠长石,对塑性指数的提高有极

表1 沼渣和页岩的化学组成(%)

Table 1 Chemical composition of biogas sludge and shale(%)

项目	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	SO_3	Na_2O	Loss	Others
沼渣	21.64	4.68	2.63	7.80	1.56	2.68	0.36	5.73	2.51	0.42	49.01	1.4
页岩	52.24	18.39	6.87	4.27	2.64	2.55	0.95	0.31	0.25	—	10.9	0.63

表2 沼渣与页岩混合料的塑性指数

Table 2 Plasticity index of biogas sludge and shale mixture

沼渣掺量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
0	22.7	18.5	4.2
5	20.21	8.17	12.04
10	20.45	8.44	12.01
15	26.96	13.93	13.03
20	28.46	14.34	13.92
25	32.73	18.20	14.53
30	37.19	22.16	15.03

大的作用^[9],此外沼渣中含量最多的是未腐烂的秸秆,一定量的沼渣掺入对原料体系的塑性基本无负面影响^[10],因而随着沼渣掺量的增加,原料的塑性增加。

2.2 烧结热工参数对烧成试样性能影响

烧结墙体材料其烧成试样性能与烧结温度、烧结保温时间有较大的关系。本实验中先确定了沼渣掺量为15%时,烧结温度范围850~1050℃,烧结保温时间分别为3 h、6 h和9 h对烧成试样性能的抗压强度、烧成收缩、吸水率和体积密度的影响,从而确定对沼渣-页岩试样最佳的烧成温度制度。

图2分别反映不同温度制度下烧结制品的抗压强度和烧成体积变化率指标。对于烧结墙体材料来说,抗压强度是直接反映其使用性能的指标,而体积变化率则决定了能否生产出尺寸规格合格的产品。从图2可以看出,烧结温度在850~950℃时,其抗压强度基本保持不变,且达不到GB 5101—2003中MU10的要求;当烧结温度升到950℃之后,烧结试样的抗压强度随烧结温度的增加而增加。烧结试样的抗压强度与烧结保温时间也有一定的关系:在850~950℃时,烧结保温时间对烧结制品的抗压强度影响不明显;当温度达到1000℃之后,烧结保温时间6 h和9

h比3 h的强度有所增加;但当温度到1100℃时,保温6 h和9 h的烧结试样出现爆裂现象。

烧成体积变化率可以间接反映内部烧结反应的情况。当烧结温度为850~900℃时,烧成试样体积变化表现为微量的烧成膨胀;当烧结温度到900℃以上时,烧成试样体积表现出持续性的收缩变化,即烧成试样体积随温度的升高而减小。出现这种现象是由于烧结墙体材料在850~950℃时,处于固相烧结过程,烧成试样内的固体颗粒之间作用不强且孔隙较大,表现出抗压强度变化不明显和烧成试样体积变化率不大的现象;当温度到950℃之后,烧成试样内部开始呈现出液相烧结,即试样中某些固体颗粒开始熔融产生液相,可以包裹其他的固体颗粒并填充到相应的孔隙当中,烧结温度越高,烧结保温时间越长,烧成试样内部呈现的熔融液相越多,即烧成试样抗压强度越高,烧成收缩越明显;但当烧结温度达到1050℃时,随着保温时间增加,结果出现了烧结爆裂现象。这是由于沼渣本身是作为生物质原料加入到烧结墙体材料原料体系当中,随着烧结温度和烧结保温时间的增高,沼渣发生复杂的物理化学反应,由此释放一定的能量并产生大量的气体^[11],附加上液相烧结形成的玻璃态中所产生的气泡并急剧过热膨胀,而且随着温度升高,其坯体表面越来越致密,阻碍了内部气体的逸出,从而造成制品内部膨胀、起泡,最终导致坯体爆裂变形^[12]。

图3为不同温度制度下烧结制品的吸水率和体积密度。吸水率反映烧结制品内部连通宏孔隙率的大小,体积密度则是烧结墙体材料的密实度的宏观表征,并且可以反映烧结墙体材料的导热性能。由图3可以看出,当烧结温度为800~950℃时,其烧成试样的吸水率变化不大,但当温度升高到950℃以后,其

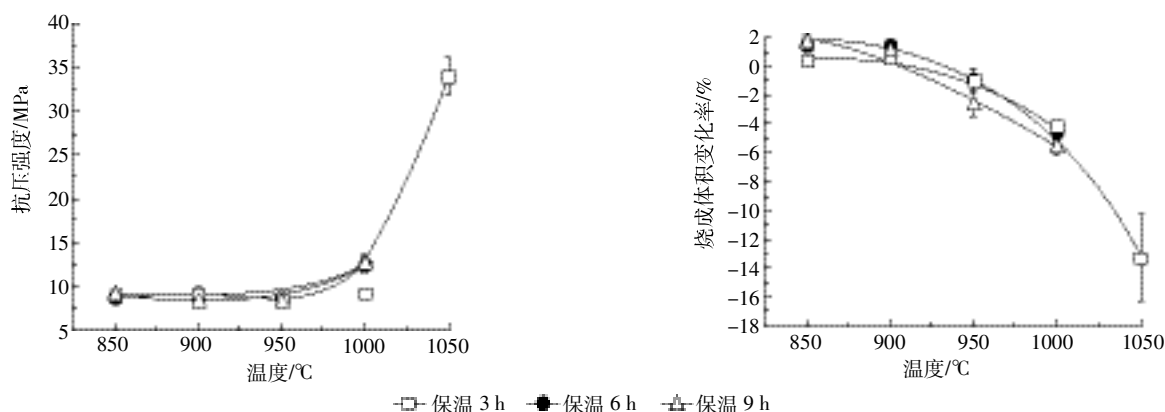


图2 温度制度对烧结墙体材料的抗压强度和烧成收缩的影响

Figure 2 Compressive strength and firing shrinkage of blocks fired at different temperatures

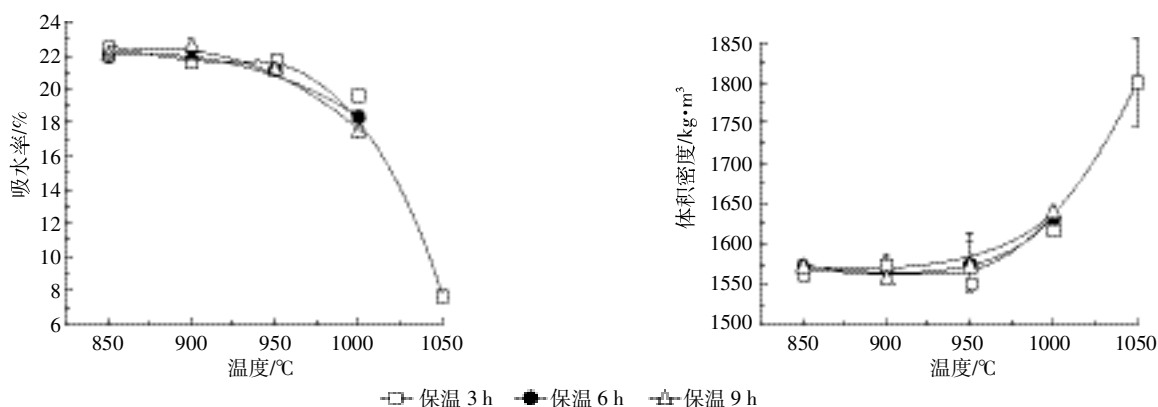


图 3 温度制度对材料吸水率和体积密度的影响

Figure 3 Water absorption and volume density of bricks fired at different temperatures

烧成试样的吸水率逐渐降低,并且试样的吸水率随烧结保温时间的延长而降低。这是由于烧成在 850~950 °C 时,试样内部进行的是固相烧结,内部的颗粒形貌基本保持不变,也就是内部连通宏孔的量无较大变化,但当温度达到 950 °C 后,温度越高,烧结保温时间越长,试样内产生熔融液相就越多,其填充或阻隔相互连通的宏孔,造成试样的吸水率降低。从烧成体积密度上也可以看出类似规律,在 850~950 °C 时体积密度变化不大,但当 950 °C 之后,烧结温度越高,烧结保温时间越长,其产生的熔融液相越多,从而造成体积密度越高。

综上所述并对照《GB 5101—2003 烧结普通砖》对烧结墙体材料相关性质的要求,可以得出沼渣制备节能烧结墙体材料的最佳烧结温度制度为烧结温度为 1050 °C,烧结保温时间 3 h。但在实际烧结过程中,由于马弗炉内同时放入一定量的试块,造成各个试样所处的温度场不均匀,在烧结温度 1050 °C、保温时间 3 h 烧结时,出现了较多烧结试块爆裂现象。为此调整后确定烧结温度 1000 °C、烧结保温时间 3 h。

2.3 沼渣掺量对烧成试样性能影响

2.3.1 沼渣掺量对试样抗压强度和体积变化的影响

以 15% 沼渣掺量确定了最佳的烧结温度制度后,改变沼渣的掺量,分别掺入 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%,在 1000 °C 烧结保温 3 h 温度制度下烧成试样,再对其试样的干燥烧成体积变化率、抗压强度、吸水率和体积收缩分别进行测试。

图 4 为烧成试样的干燥烧成体积变化率、抗压强度随沼渣掺量的变化关系。首先,烧成试块的抗压强度随沼渣掺量的增加而降低。这是由于沼渣本身是作为造孔剂和生物质内燃料加入,其掺量越大,内部产生孔隙越多,抗压强度越低。其次,试块的干燥体积变化率基本是随着沼渣掺量的增加而增加。这是由于随着沼渣的掺量增大,其沼渣中含有较多的植物纤维,其本身体积变化率与页岩相差较大,且两者之间的物理作用力不大,因而随着沼渣产量的增加,干燥体积变化率呈现增大的趋势。最后,烧成试块的烧成体积变化随沼渣掺量的增加而降低。这是由于沼渣作为造孔剂会产生大量微孔,但在 1000 °C 烧结保温 3 h 时,

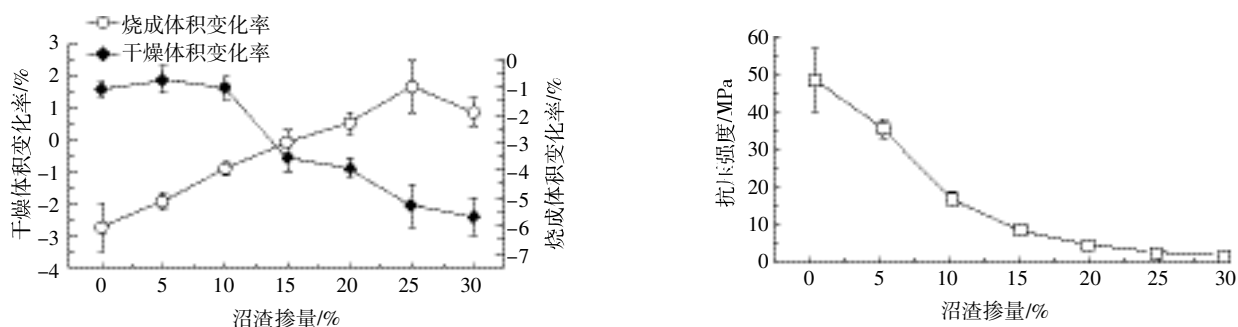


图 4 沼渣掺量对材料抗压强度、干燥和烧成体积变化的影响

Figure 4 Compressive strength, firing and drying shrinkage of bricks as affected by biogas sludge doses

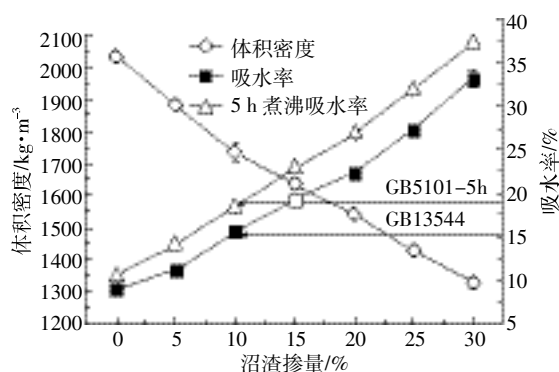


图5 沼气渣掺量对材料体积密度和吸水率的影响

Figure 5 Volume density and water absorption of bricks affected by biogas sludge doses

能够产生大量的熔融液相,对内部的固体间孔隙和造孔剂燃烧后形成的孔隙给予一定的填充,从而在宏观上呈现出烧成体积收缩。

2.3.2 沼渣掺量对试样体积密度和吸水率的影响

图5为不同沼渣掺量下,烧结制品的体积密度、吸水率以及5 h煮沸吸水率的变化情况。试块体积密度随沼渣掺量基本呈反比关系变化,吸水率和5 h煮沸吸水率与沼渣掺量基本呈正比关系变化。这是由于沼渣产量越多,其作为造孔剂产生的孔隙也就越多,因而体积密度逐渐降低,吸水率和5 h煮沸吸水率逐渐升高。5 h煮沸吸水率是表征烧结材料抗风化性能的测试,根据《烧结普通砖》(GB 5101—2003)对烧结墙体材料抗风化性能的要求,要求普通烧结墙体材料在非严重风化区5 h煮沸吸水率平均值<18%,且单块最高不超过20%,合适的沼渣掺量应控制在10%。在该掺量下能够制备出体积密度为1600 kg·m⁻³的烧结墙体材料,相比于普通烧结墙材1800 kg·m⁻³的体积密度^[13],本次利用沼气渣制备的烧结墙体材料应具有更好的保温隔热性能^[14]。

2.3.3 沼渣掺量对试样泛霜和石灰爆裂结果的影响

烧结墙体材料泛霜主要是指材料内可溶性盐类(主要为硫酸盐)在材料的使用过程中,逐渐于砖的表面析出一层“白霜”。这些结晶的白色粉状物不仅影响建筑物的外观,而且结晶的体积膨胀会引起砖表层的疏松,同时破坏砖与砂浆层之间的粘结^[15]。《烧结普通砖》GB 5101—2003针对这一现象也作了具体的要求:优等品无泛霜,一等品不允许出现中等泛霜,合格品不允许出现严重泛霜。这表明对烧结墙体材料的泛霜检测显得极其重要,图6是不同沼渣掺量下泛霜的结果。

由图6可知,在页岩中掺入一定量的沼渣,对其

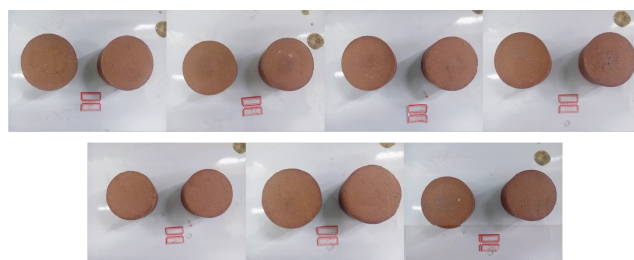


图6 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%沼渣掺量下泛霜结果

Figure 6 Efflorescence of bricks as affected by biogas sludge doses

泛霜程度几乎没有影响,都能够满足《GB 5101—2003 烧结普通砖》对优等品的要求,且选取试样经过6 h蒸煮后无石灰爆裂现象出现。这表明利用沼渣作为造孔剂和内燃料制备节能烧结墙体材料是切实可行且有效的途径。

2.3.4 沼渣制备试样的环境评测

沼渣作为一种农业废弃污染物,含有一定的重金属离子,对其综合利用要严格控制二次污染的风险程度。本实验参照《GB 5085.3—2007 危险废物鉴别标准—浸出毒性鉴别》,对10%沼渣掺量在1000℃烧结保温3 h后的试样浸出液进行了重金属检测。实验结果如表3所示。

表3 烧结后重金属浸出量(mg·L⁻¹)

Table 3 Dissolution of heavy metals in bricks after sintering

项目	Cu	Zn	Pb
《危险废物鉴别标准—浸出毒性鉴别》	100	100	5
烧结后浸出量	0.013	0.12	未检出

此外,对利用沼渣烧结制备墙体材料进行了大气污染物排放模拟,利用热力学软件 FactSage 模拟了沼渣掺量10%条件下,在空气中烧结温度为1000℃、保温时间为3 h时由于沼渣高温反应所生成的气体污染物。以SO₂、氮氧化物(以NO₂计)和F排放这三项进行对比分析,结合到《GB 29620—2013 砖瓦工业大气污染物排放标准》对主要污染物排放量的要求,对比如表4所示。

由表4的数据可知,沼渣-页岩体系制备烧结墙体材料其SO₂、CO和F的排放量均可达到《砖瓦工

表4 沼渣-页岩体系烧结过程气体污染物排放量(mg·m⁻³)

Table 4 Emissions of major gaseous pollutants during sintering process of biogas sludge-shale mixture

项目	SO ₂	氮氧化物(以NO ₂ 计)	F
《工业炉窑大气污染物排放标准》	300	200	3
沼渣-页岩烧结模拟值	0.004 145	1.853 509	0

业大气污染物排放标准》(GB 29620—2013)的排放要求。

3 结论

(1)经过处理后的沼渣对原料的塑性有一定的影响,掺入的沼气渣越多,原料的塑性提高越快,因而沼渣可以作为一种提高原料塑性的功能化材料掺入。

(2)生物质燃料沼渣掺入到烧结墙体材料原料体系中,最佳的烧结温度制度为:烧结温度 1000 ℃,烧结保温时间 3 h。

(3)通过本次实验研究,以沼渣掺入到节能烧结墙体材料中其最佳掺量控制在 10%,就能够制备出满足国标《GB 5101—2003 烧结普通砖》各项性能指标要求且环保的烧结墙体材料。

参考文献:

- [1] 王 飞,蔡亚庆,仇焕广,等. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 184-189.
WANG Fei, CAI Ya-qing, QIU Huang-guang. Current status, incentives and constraints for future development of biogas industry in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 184-189.
- [2] 李 东,袁振宏,孙永明,等. 中国沼气资源现状及应用前景[J]. 现代化工, 2009, 29(4): 1-5, 7.
LI Dong, YUAN Zhen-hong, SUN Yong-ming, et al. China biogas resources: Current status quo of biogas resources and their perspective future of utilization in China[J]. *Modern Chemical Industry*, 2009, 29(4): 1-5, 7.
- [3] 刘丽雪,陈海涛,韩永俊,等. 沼渣物理特性及沼渣纤维化学成分测定与分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 277-280.
LIU Li-xue, CHEN Hai-tao, HAN Yong-jun. Determination and analysis of physical characteristics and fiber chemical composition of biogas residue[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 277-280.
- [4] 刘研萍,文 雪,张继方,等. 秸秆沼渣中重金属的安全风险分析[J]. 中国沼气, 2014, 32(1): 90-94.
LIU Yan-ping, WEN Xue, ZHANG Ji-fang, et al. Safety risk analysis of heavy metals in straw biogas residue[J]. *China Biogas*, 2014, 32(1): 90-94.
- [5] 陈 苗,白 帆,崔岩山,等. 几种沼渣中 Cu 和 Zn 的含量及其形态分布[J]. 环境化学, 2012, 31(2): 175-181.
CHEN Miao, BAI Fan, CUI Yan-shan et al. The contents and species distribution of Cu and Zn in several biogas sludges[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(2): 175-181.
- [6] 黄 中,黎喜强,朱基珍,等. 温度对污泥烧结页岩墙体材料裂缝的影响[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(9): 43-45, 55.
HUANG Zhong, LI Xi-qiang, ZHU Ji-zhen, et al. Effect of temperature on sludge sintered shale brick crack[J]. *New Building Materials*, 2013, 40(9): 43-45, 55.
- [7] 范冬冬. 巢湖水域淤泥制备烧结砖技术研究[J]. 工程技术, 2014, (8): 201-202, 204.
FAN Dong-dong. The technology research of Chaohu Lake's sludge in the process of sintered bricks[J]. *Engineering and Technology*, 2014, (8): 201-202, 204.
- [8] Robert D Holtz, William D Kovacs. An Introduction to geotechnical engineering[M]. New Jersey, Printice-Hall Inc. Englewood Cliffs, 1981: 1-108.
- [9] 陈泽萍,徐则民,刘文连,等. 绿泥石及绢云母对西昌昔格达组粘土塑性指数 I_p 影响的分析[J]. 工程勘察, 2013, 41(7): 1-6, 26.
CHEN Ze-ping, XU Ze-min, LIU Wen-lian, et al. Analysis of the impact of chlorite and sericite on plasticity index of Xigeda formation clay in Xichang[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2013, 41(7): 1-6, 26.
- [10] 蹇守卫,张吕东,马保国,等. 生物质燃料对页岩烧结砖性能的影响规律研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(9): 82-86.
JIAN Shou-wei, ZHANG Lü-dong, MA Bao-guo, et al. Research on the performance of sintered shale brick affected by the biomass fuels[J]. *New Building Materials*, 2014, 41(9): 82-86.
- [11] 马保国,王耀城,袁 龙,等. 不同成孔机理造孔剂对轻质保温烧结制品性能的影响[J]. 中国建材科技, 2009, 18(6): 65-68.
MA Bao-guo, WANG Yao-cheng, YUAN Long, et al. The effect of mechanics of different pore former on the properties of low weight high insulation sintering product[J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2009, 18(6): 65-68.
- [12] 海 龙,梁 冰,卢 钢,等. 煤矸石-粉煤灰烧结砖的研制[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(7): 1292-1296.
HAI Long, LIANG Bing, LU Gang, et al. Development of sintered brick made from coal gangue and fly ash[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 32(7): 1292-1296.
- [13] 童丽萍,雷小娟. 黄河淤泥烧结多孔砖泛霜试验研究[J]. 新型建筑材料, 2008, (1): 36-38.
TONG Li-ping, LEI XIAO-juan. Experimental study on floating hoar frost of Yellow River silt sintered cellular bricks[J]. *New Building Materials*, 2008, (1): 36-38.
- [14] 李庆繁,赵镇魁,桑 勇,等. 关于烧结多孔砖孔洞率有关问题的商榷及标准修订的建议[J]. 砖瓦, 2005(10): 39-44.
LI Qing-fan, ZHAO Zhen-kui, SANG Yong, et al. Discussion on relative problems of the void ratio of fired perforated brick and some proposals for revising standards[J]. *Brick & Tile*, 2005(10): 39-44.
- [15] 王智宇,翁晶晶,屠浩驰,等. 河道淤泥生产烧结砖的基础研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(6): 24-26.
WANG Zhi-yu, WENG Jing-jing, TU Hao-chi. Basic research on manufacturing sintered bricks from river silt[J]. *New Building Materials*, 2010, 37(6): 24-26.