

戴财胜,张仲欢,马淞江.半焦调质城市污泥的成浆性能及其污泥煤浆的流变特性[J].煤炭学报,2017,42(8):2134-2140. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1490

DAI Caisheng,ZHANG Zhonghuan,MA Songjiang. Slurry-ability of municipal sludge conditioned by semi-coke and rheological property of coal-sludge water slurry[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(8):2134-2140. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1490

半焦调质城市污泥的成浆性能及其污泥煤浆的流变特性

戴财胜,张仲欢,马淞江

(湖南科技大学 化学化工学院,湖南 湘潭 411201)

摘 要:采用成浆实验法研究了半焦调质城市污泥的成浆性能以及半焦调质城市污泥与煤混合物的成浆性能及其浆体流变特性。结果表明:半焦的含量是影响半焦调质城市污泥成浆性能的关键因素,半焦调质城市污泥的成浆性能随其半焦含量的增加而变好,当半焦的含量增大到80%时,半焦调质城市污泥的定黏浓度仍只有33.88%,说明其成浆性能差;泥煤混合物的成浆性能随半焦调质城市污泥配比的增大而变差,其定黏浓度(φ)与半焦调质城市污泥配比(x)呈良好的线性相关关系: $\varphi=68.8351-1.2011x$, $R^2=0.9536$;污泥煤浆的浆体为假塑性流体,呈现剪切变稀的性能。上述研究成果对制备高能效的污泥煤浆,实现污泥的能源化利用有重要意义。

关键词:半焦调质城市污泥;污泥煤浆;成浆性能;流变特性

中图分类号:TQ536

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)08-2134-07

Slurry-ability of municipal sludge conditioned by semi-coke and rheological property of coal-sludge water slurry

DAI Caisheng,ZHANG Zhonghuan,MA Songjiang

(School of Chemistry and Chemical Engineering,Hunan University of Science and Technology,Xiangtan 411201,China)

Abstract:The slurry-ability of municipal sludge conditioned by semi-coke and the mixtures from conditioned sludge and coal were investigated using slurry performance experiment. The results indicate that the ratio of semi-coke could be viewed as a key factor for the slurry-ability of conditioned sludge. And the slurry-ability of conditioned sludge was improved with the increase of semi-coke ratio. When the ratio of semi-coke was greater than 80%, the slurry concentration of conditioned sludge was still merely 33.88%, which suggests the quality of the slurry is not satisfactory. The weight fraction of conditioned sludge had a significant impact on the slurry-ability of blended conditioned sludge/coal feedstock. The correlation between the weight fraction of conditioned sludge (x) and slurry concentration (φ) could be quantitatively described by the linear function as follows: $\varphi=68.8351-1.2011x$, $R^2=0.9536$. The increase in the weight fraction of conditioned sludge would undermine the slurry-ability of the conditioned sludge/coal feedstock. The coal-sludge water slurry exhibited a pseudo-plastic behavior with shear thinning property. The research results above are important for preparing sludge coal slurry with a high energy efficiency and converting sludge into a source of energy.

Key words:municipal sludge conditioned by semi-coke; coal-sludge water slurry; slurry ability; rheological property

收稿日期:2016-10-26 修回日期:2017-04-05 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478182)

作者简介:戴财胜(1964—),男,湖南隆回人,教授,博士。E-mail:DCS1218@163.com。通讯作者:张仲欢(1994—),女,安徽六安人,硕士研究生。E-mail:1264351326@qq.com

城市污泥是城市生活污水处理过程中产生的固体废物,具有有机物含量高、粒度较细、含水率高、脱水困难等特点,同时还含有大量有毒、有害的难降解有机物、致病微生物和重金属离子等^[1]。若不对污泥进行适当处理处置,上述有害物质将通过土壤、水体、大气等途径给生态环境、人类及动物的健康带来严重的危害^[2]。目前污泥的处理处置主要有污泥填埋和资源化利用两种方式,污泥填埋不仅占用土地,还会对环境产生二次污染^[3],因此,污泥填埋在许多发达国家被禁止或限量,污泥的资源化利用是污泥处理处置的必然选择。近年来,污泥资源化利用发展迅速,污泥资源化的方式有土地利用、污泥发酵产沼气发电、污泥焚烧发电、污泥制建材、污泥制氢等^[4-7];在先进国家(如美国、德国等),污泥的资源化利用率大于80%,而我国的污泥资源化利用率不足20%^[8-9],因此,急需开发适合我国国情的污泥资源化利用技术,提升我国污泥资源化利用水平。

水煤浆技术是20世纪70年代兴起的一种新型煤基制浆技术,水煤浆既可以作为代油燃料,也可以作为生产甲醇等化工产品的气化原料^[10-12]。城市污泥富含有机物,具有一定的热值^[13],与煤具有某些相似的特征,可以取代水煤浆制备过程中的部分煤炭,用来生产污泥煤浆。目前,污泥与煤混合制水煤浆(简称污泥煤浆)在国外鲜有报道,在国内有李伟东^[14-17]、刘明^[18]、刘建忠^[19]等对污泥与煤制污泥煤浆的成浆性能、流变特性、燃烧性能、结渣特性等做了较系统的研究,并在污泥与煤混配制污泥煤浆的可行性方面达成共识。污泥与煤制污泥煤浆,尽管技术上可行,但还依然停留在实验室阶段,未能实现污泥煤浆的产业化,其最根本的原因是必须对污泥进行预先干燥,这既要增加投资,又要因干燥污泥提高生产成本,给企业带来负效益。

笔者所在的研究团队在污泥调质与脱水及资源

化利用研究中发现:城市污泥用半焦调质经重力浓缩脱水后的浓缩污泥(简称半焦调质城市污泥)具有以下特征:①半焦调质城市污泥的含水率较低,其含水率由调质前的91.74%降至调质后的83.71%^[20],半焦能显著的改善污泥的脱水性能,为污泥煤浆的产业化实施创造了条件;②半焦调质城市污泥的热值大大提高,且具有良好的燃烧性能和气化性能^[21],完全可以用半焦调质城市污泥代替水煤浆生产的部分煤炭和水;③半焦调质城市污泥的水分与目前机械脱水污泥水分(80%左右)相差不多,但前者流动性好,无需干燥,可以直接用泵输送半焦调质城市污泥与煤混合制备污泥煤浆,不仅创新了污泥煤浆的制备方法,大大降低了污泥煤浆的生产成本,还避免了由污泥干燥所带来的二次污染,为污泥煤浆的产业化提供了可能。基于上述条件,笔者探讨了半焦调质城市污泥的成浆性能及其污泥煤浆的流变特性,试图建立污泥制备污泥煤浆的新方法,实现污泥煤浆的产业化,进而实现污泥的高效洁净资源化利用。

1 实验部分

1.1 实验原料

污泥:来源于湘潭河西污水处理厂的脱水污泥,含水率为84.62%。

半焦:根据马淞江等^[22]制备半焦的方法及设备,将新疆北山煤在500℃下热解1.5h,所得到的产物即为半焦;经SDDP制样粉碎机粉碎至300μm以下,且粒径≤0.074mm的半焦占半焦总质量的75.9%。

煤:选用成浆性能良好的云南一本浪煤,经SD-DP制样粉碎机粉碎至300μm以下,且粒径≤0.074mm的煤粉占煤粉总质量的75%左右。

添加剂:选用市面上常用的萘系添加剂NF,添加剂添加量均为总浆体质量的1%。

上述样品的工业分析见表1。

表1 样品的工业分析

Table 1 Proximate analysis of samples

样品	工业分析/%				$Q_{\text{net,ad}}/$ (MJ·kg ⁻¹)	元素分析/%				
	M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}		C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	$S_{\text{t,ad}}$
污泥	3.42	32.71	60.92	2.95	7.01	35.84	9.13	24.48	3.70	0.12
半焦	4.96	16.74	7.40	70.90	29.35	69.94	1.57	2.42	2.02	0.38
一本浪煤	1.90	21.70	11.57	64.83	30.04	74.94	3.08	12.95	2.54	0.49

1.2 实验方法

1.2.1 半焦调质城市污泥的制备方法

首先配制250g含水率为98%的污泥(预先称取

计算所需的水和污泥,分别将其加入500mL的烧杯中,用机械搅拌器搅拌(搅拌速度为1000r/min)15min,使其充分混合均匀),然后加入一定量的半

焦,机械搅拌 15 min 进行污泥调质;最后将调质好的污泥迅速转移到 250 mL 量筒,使污泥在重力作用下浓缩脱水 30 min,将会出现泥水分离界面,上层液能够达标排放,下层浓缩污泥即为半焦调质城市污泥。

1.2.2 污泥煤浆的制备方法

将湘潭河西污水处理厂的污泥经半焦调质后,在重力浓缩的作用下得到半焦调质城市污泥,用半焦调质城市污泥直接与煤粉混合制浆,每次制备污泥煤浆 100 g,根据制浆浓度和半焦调质城市污泥添加比例,称取预先计算所需的半焦调质城市污泥、煤粉、水和添加剂,依次加入 250 mL 烧杯中,机械搅拌 15 min,搅拌速度为 1 000 r/min,就得到污泥煤浆。其浓度、表观黏度、定黏浓度、流动性能、稳定性能的测定方法见戴财胜等^[10,23]的测定方法。

2 结果与讨论

2.1 半焦对城市污泥调质与重力浓缩脱水的效果及半焦调质城市污泥的特性

在 250 g 含水率为 98% 的城市污泥中分别投加 0, 2.5, 5, 10 g 半焦对污泥进行调质与重力浓缩脱水,其实验现象如图 1 所示。

(1)从感官上来看,用半焦对城市污泥进行调质与浓缩脱水对上层液的清洁有显著效果。未经半焦调质的污泥重力浓缩后,上层液依然浑浊,上层液的浊度、COD、SS 分别为 836 NTU, 258.2 mg/L, 630.1 mg/L;经半焦调质后的污泥重力浓缩后,上层液变得清澈,且半焦的投加量越大,上层液越清澈。

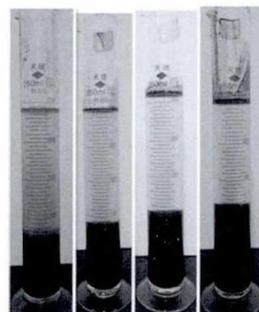


图 1 半焦投加量对污泥重力浓缩的影响

Fig. 1 Effect of different dosages of semi-coke on dewatering properties

当半焦投加量为 2 g/100 g 污泥时,上层液的浊度、COD、SS 可分别降至 14.8 NTU, 38.2 mg/L, 18.2 mg/L,达到国家污水综合排放二级标准。

(2)与原污泥重力浓缩脱水效果相比,经半焦调质后的浓缩污泥(即半焦调质城市污泥)含水率(表 2)显著降低。当半焦投加量为 0 g/100 g 污泥时,即原重力浓缩脱水城市污泥的含水率为 94.24%,随半焦投加量的不断增加,半焦调质城市污泥的含水率从 94.24% (半焦投加量 0 g/100 g 污泥)降至 84.71% (半焦投加量 4 g/100 g 污泥),当半焦的投加量为 4 g/100 g 污泥时,浓缩污泥的含水率与污泥机械脱水的含水率差不多,表明半焦对污泥调质与重力浓缩脱水有着优良的效果。这是由于半焦具有孔隙率高,比表面积大的特点,对污泥有着较强的吸附能力,同时,又因为半焦的疏水性能强,在吸附污泥的同时还有有效的增强了污泥的疏水性能,从而使半焦调质污泥的含水率大大降低。

表 2 半焦投加量对半焦调质城市污泥特性影响

Table 2 Effect of different dosages of semi-coke on municipal sludge properties

半焦投加量/ (g · 100 g ⁻¹ 污泥)	含水率/%	工业分析/%				$Q_{net,ad}/$ (MJ · kg ⁻¹)	表观黏度/ (mPa · s)
		M_{ad}	V_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}		
0	94.24	3.42	32.71	60.92	2.95	7.01	8.2
1	91.86	3.14	26.99	42.86	27.01	14.58	14.8
2	87.23	2.13	24.74	34.80	38.33	18.25	20.5
4	84.71	2.00	22.64	25.56	49.80	22.15	16.8

(3)与原污泥相比,半焦调质城市污泥的热值显著提高。当半焦的投加量为 0 g/100 g 污泥时,即未加半焦调质的浓缩污泥的热值为 7.01 MJ/kg;当半焦的投加量依次为 1 g/100 g 污泥、2 g/100 g 污泥、4 g/100 g 污泥时,半焦调质城市污泥的热值分别为 14.58, 18.25, 22.15 MJ/kg,表明半焦的投加可以大大提高半焦调质城市污泥的热值,为半焦调质城市污泥的燃料化利用创造条件。

(4)从流动特性来看,原机械脱水污泥黏稠,不可流动;而半焦调质城市污泥的含水率虽然与机械脱水污泥含水率差不多,但其具有黏度低(当半焦投加量为 4 g/100 g 污泥时,半焦调质城市污泥含水率为 84.71%,但其黏度只有 16.8 mPa · s)、流动性好的特点。

综上所述,半焦调质城市污泥具有水分较低(现行污水处理厂的浓缩污泥含水率一般是 95% ~

98%,与机械脱水污泥水分(80%左右)相当),热值比原污泥高,流动性好的特点,可以用半焦调质城市污泥直接与煤混合制备污泥煤浆,不需现有污泥煤浆制备方法中必须对污泥进行预干燥的工艺过程,从而大大降低污泥煤浆的生产成本,促使污泥煤浆的产业化成为可能,实现污泥的高效洁净利用。

2.2 半焦添加量对半焦调质城市污泥成浆性能的影响

对不同半焦含量的半焦调质城市污泥进行成浆性能试验,在相同的制浆条件下,半焦的添加量分别为半焦调质城市污泥总质量(干基)的 0,20%,40%,50%,60%,70%,80%,100%。半焦添加量与半焦调质城市污泥浆定黏浓度的关系如图 2 所示,半焦的添加量对半焦调质城市污泥浆流动性、稳定性的影响见表 3。

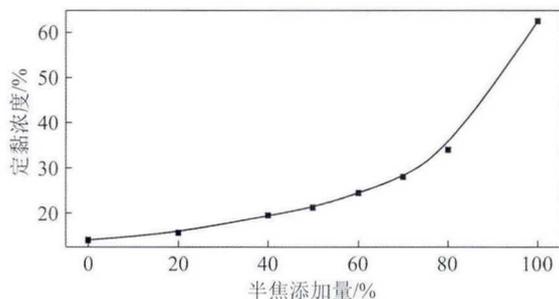


图 2 半焦添加量与半焦调质城市污泥的定黏浓度的关系

Fig. 2 Semi-coke additive amount as a function of concentration of municipal sludge conditioned by semi-coke

表 3 半焦添加量对半焦调质城市污泥浆流动性、稳定性的影响

Table 3 Effect of semi-coke additive amount on fluidity and stability of municipal sludge water slurry conditioned by semi-coke

半焦添加量/%	定黏浓度 φ /%	流动性	7 d 内浆体沉淀情况
0	13.97	C ⁻	7 d 内不发生硬沉淀
20	15.50	C ⁻	7 d 内不发生硬沉淀
40	19.44	C ⁻	7 d 内不发生硬沉淀
50	21.17	C	7 d 内不发生硬沉淀
60	24.38	C	7 d 内不发生硬沉淀
70	28.00	C	7 d 内不发生硬沉淀
80	33.88	B ⁻	7 d 内不发生硬沉淀
100	62.50	A ⁺	36 h 发生硬沉淀

2.2.1 半焦添加量对半焦调质城市污泥定黏浓度的影响

当半焦添加量为 0,即污泥单独制浆时,其定黏浓度很低,只有 13.97%,没有使用价值,说明污泥的成浆性能很差,其单独制浆没有意义;随半焦添加量

的增加,半焦调质城市污泥的定黏浓度也不断的提高,当半焦的添加量分别为 20%,50%,80%时,半焦调质城市污泥的定黏浓度依次为 15.50%,21.17%,33.88%,说明半焦的添加量增加,半焦调质城市污泥的定黏浓度增大,其成浆性能变好。但是,当半焦的添加量增大到 80%时,半焦调质城市污泥的定黏浓度仍只有 33.88%,无法达到国家水煤浆质量标准的技术要求,因此,需要把半焦调质城市污泥与煤粉直接混合制浆,提高污泥煤浆的制浆浓度,满足国家水煤浆质量 3 级标准(GB/T 18855—2002)。

2.2.2 半焦的添加量对半焦调质城市污泥浆的流动性、稳定性的影响

由表 3 可知,城市污泥单独制浆的流动性很差(C 级),而半焦单独成浆时流动性可达到 A⁺级。随半焦添加量的增加,半焦调质城市污泥的流动性能有了一定的改善,当半焦添加量为 20%时,半焦调质城市污泥浆的流动性能仍很差(C 级),当半焦添加量增加至 80%时,半焦调质城市污泥浆的流动性能上升了一个等级(B⁻级),说明半焦能提高半焦调质城市污泥浆的流动性能,为半焦调质城市污泥制浆工业化提供了条件。这是由于半焦孔隙发达,与煤炭一样,具有很强的疏水性能,同时对微细颗粒污泥具有吸附作用^[22],从而破坏污泥的胶体状结构,提高半焦调质城市污泥浆的流动性能。

从稳定性来看,半焦的添加量对半焦调质城市污泥的稳定性影响不大,这是由于污泥中含有胞外聚合物,能够在污泥浆中充当稳定剂的作用^[24],使半焦污泥浆具有良好的稳定性能。

综上所述,半焦能提高半焦调质城市污泥的定黏浓度,同时改善半焦污泥浆的流动性能,说明半焦能改善半焦调质城市污泥的成浆性能,且随半焦添加量的增加,半焦调质城市污泥的成浆性能越好。

2.3 半焦调质城市污泥与煤混合物(简称泥煤混合物)的成浆性能

为了研究半焦调质城市污泥与煤混合物的成浆性能,本研究以半焦调质城市污泥(其中半焦的量占半焦调质城市污泥(干基)总重的 50%)为研究对象,将其按不同比例与成浆性能好的云南一本浪煤混合,得到系列泥煤混合物。在相同的制浆条件下,对上述系列泥煤混合物进行成浆性能实验。当半焦调质城市污泥的配比分别为泥煤混合物总质量的 0,3%,5%,7%,10%,12%时,半焦调质城市污泥的配比与泥煤混合物的定黏浓度的关系如图 3 所示,半焦调质城市污泥配比对泥煤混合物浆的流动性、稳定性的影响见表 4。

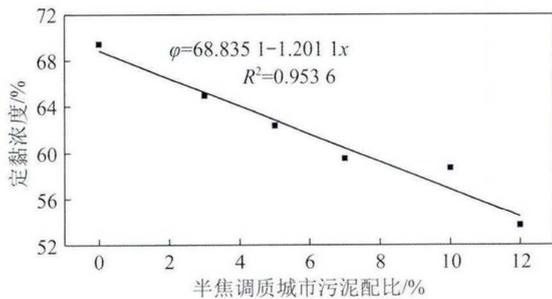


图3 半焦调质城市污泥配比与泥煤混合物的定黏浓度关系

Fig. 3 Municipal sludge conditioned by semi-coke additive amount as a function of concentration of the mixtures

表4 半焦调质城市污泥比对泥煤混合物流动性、稳定性的影响

Table 4 Municipal sludge conditioned by semi-coke additive amount on fluidity and stability of the mixtures

$x/\%$	定黏浓度/ $\%$	流动性	稳定性
0	69.40	A ⁺	7 d 不产生硬沉淀
3	64.93	A	7 d 不产生硬沉淀
5	62.37	A	7 d 不产生硬沉淀
7	59.52	A ⁻	7 d 不产生硬沉淀
10	58.67	B	7 d 不产生硬沉淀
12	53.68	B ⁻	7 d 不产生硬沉淀

2.3.1 半焦调质城市污泥比对泥煤混合物定黏浓度的影响

由图3可知:当一本浪煤单独制浆时,定黏浓度高达69.4%,但当泥煤混合物中半焦调质城市污泥的比例为3%时,其定黏浓度迅速降至64.93%,随半焦调质城市污泥比例进一步增加,泥煤混合物的定黏浓度也进一步降低。说明泥煤混合物的定黏浓度随半焦调质城市污泥配入比例的增加而降低,其成浆性能随半焦调质城市污泥配入比例的增加而变差。半焦调质城市污泥的配比与泥煤混合物的定黏浓度呈良好的线性相关关系,其相关关系为

$$\varphi = 68.8351 - 1.2011x, R^2 = 0.9536 \quad (1)$$

式中, φ 为泥煤混合物的定黏浓度, $\%$; x 为半焦调质城市污泥(干基)配入量占泥煤混合物总质量(干基)的百分比, $\%$ 。

据式(1),可根据半焦调质城市污泥(干基)的配比 x 预测泥煤混合物的定黏浓度。当需要制备满足国家水煤浆质量3级标准(GB/T 18855—2002)的污泥煤浆时(污泥煤浆的浓度 $\geq 60\%$),利用式(1)可计算出半焦调质城市污泥(干基)配入比例为泥煤混合物总质量(干基)的7.36%,这为制备一定浓度的污泥煤浆时,计算半焦调质城市污泥的最大配入比例提供了可行的方法,对污泥制备高性能污泥煤浆有重要

的指导意义。

2.3.2 半焦调质城市污泥的比对泥煤混合物流动性、稳定性的影响

由表4可知,随半焦调质城市污泥比例的增大,污泥煤浆的流动性逐渐降低,当半焦调质城市污泥添加比例为7%时,污泥煤浆仍具有良好的流动性能(A级);当半焦调质城市污泥添加比例为10%时,浆体流动性明显变差,成为B级。

从稳定性来看,无论是一本浪煤单独成浆还是与半焦调质城市污泥混合制污泥煤浆,浆体均可保持7 d不产生硬沉淀。这是由于城市污泥中的胞外聚合物具有一定的表面活性,在污泥煤浆成浆的过程中,可以充当稳定剂的作用,保持浆体的稳定性。

2.4 污泥煤浆的流变特性

污泥煤浆作为代油燃烧的清洁燃料和重要的气化原料,需要具备较好的泵送性能以便于管道输送。流变特性是影响污泥煤浆泵送性能的重要参数之一。作为固-液两相流体,污泥煤浆的流变特性可以用幂次律模型进行表征: $\tau = K\dot{\gamma}^n$,其中, τ 为剪切应力,Pa; K 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流变指数。若浆体为牛顿流体,则 $n=1$;若为胀塑性流体,则 $n>1$,具有剪切变稠特性;若为假塑性流体,则 $n<1$,具有剪切变稀特性^[25]。

在测定污泥煤浆黏度时,剪切应力随剪切速率变化规律曲线称为流变特性曲线。分别对不同半焦调质城市污泥配比下制备的不同浓度的污泥煤浆的流变特性曲线(图4)进行幂次律模型拟合,结果见表5,浆体均呈现假塑性流体($n<1$),具有剪切变稀特性。同时,随半焦调质城市污泥配比的增大,污泥煤浆表现的假塑性基本呈增强趋势(n 值逐渐变小)。说明半焦调质城市污泥可以有效增强污泥煤浆的剪切变稀特性,且随半焦调质城市污泥配比的增大,其剪切变稀的效果越明显。从这点来看,将半焦调质城市污泥与煤混合制备的污泥煤浆相对于一本浪煤单独成浆而言,更符合浆体贮存和管道输送的技术要求。

3 结 论

(1)半焦调质城市污泥具有水分较低,热值高,流动性好的特点,可以用半焦调质城市污泥直接与煤混合制备污泥煤浆。

(2)半焦调质城市污泥的成浆性能随其半焦含量的增加而变好,但其成浆性能总体较差,单独制污泥浆时,无法达到国家水煤浆质量标准的技術要求,因此,需要把半焦调质城市污泥与煤混合制浆。

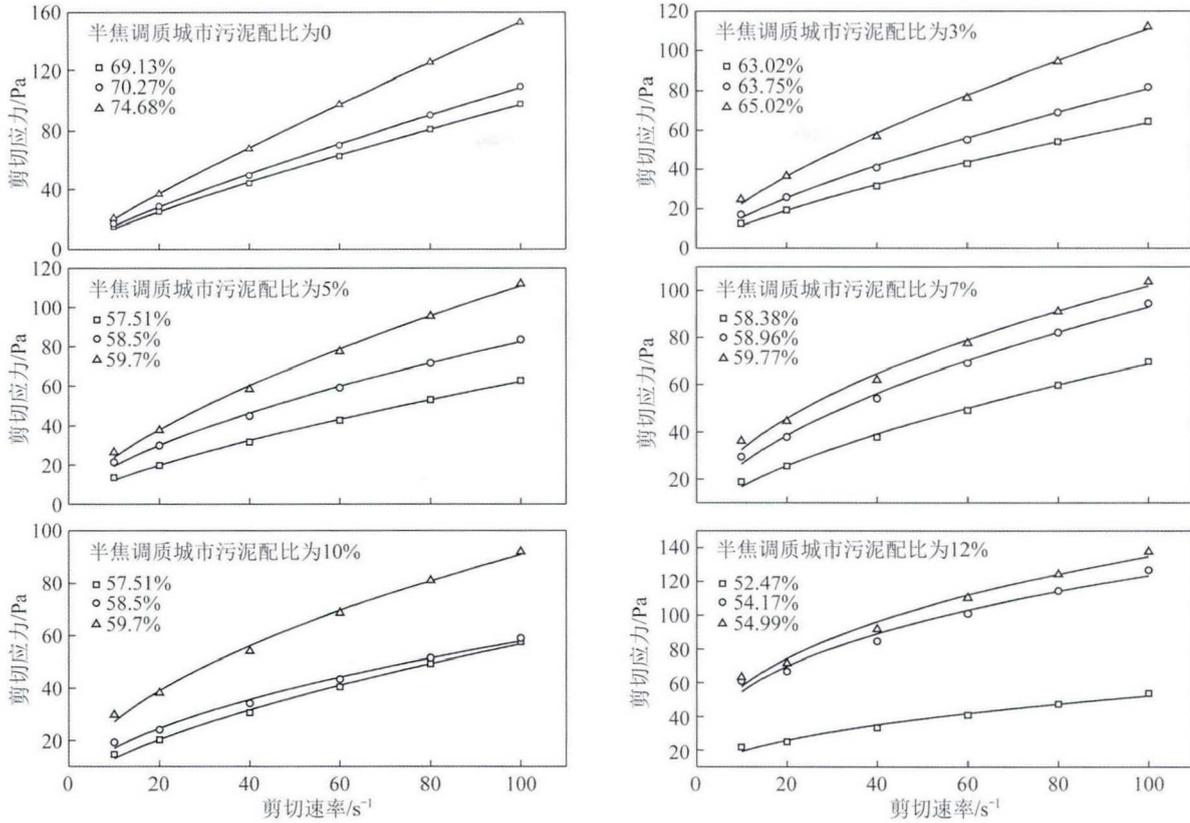


图 4 半焦调质城市污泥配比对污泥煤浆流变特性的影响

Fig. 4 Effect of municipal sludge conditioned by semi-coke additive amount on rheological property of sludge-coal water slurry

表 5 不同半焦调质城市污泥配比下的污泥煤浆流变特性参数

Table 5 Parameters of rheological model for sludge-coal water slurry

$x/$ %	浓度/ %	黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	$K/$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)	n	R^2
0	69.13	969.3	2.039 51	0.840 64	0.999 08
	70.27	969.3	2.332 82	0.835 45	0.998 87
	74.68	1 086.3	2.720 99	0.875 19	0.999 93
3	63.02	642.7	2.042 78	0.747 88	0.997 91
	63.75	739.0	2.937 02	0.720 51	0.997 59
	65.02	1 116.7	4.531 84	0.694 27	0.997 29
5	63.85	619.3	2.365 04	0.709 85	0.997 98
	64.65	821.3	4.551 76	0.629 21	0.996 95
	65.65	1 105.3	5.134 19	0.667 35	0.996 97
7	58.38	694.7	4.110 94	0.611 22	0.994 79
	58.96	936.7	7.526 60	0.545 48	0.992 79
	59.77	1 031.2	10.383 18	0.495 67	0.989 47
10	57.51	582.0	3.005 33	0.638 79	0.995 79
	58.50	901.0	5.026 92	0.531 20	0.990 46
	59.70	1 404.7	8.097 70	0.525 15	0.993 83
12	52.47	535.0	6.994 04	0.436 53	0.977 66
	54.17	1 261.7	24.148 55	0.353 98	0.968 19
	54.99	1 419.5	24.570 32	0.365 8	0.979 68

(3) 在相同的制浆条件下,半焦调质城市污泥的配比显著影响泥煤混合物的成浆性能,泥煤混合物的成浆性能随半焦调质城市污泥配比的增大而变差。泥煤混合物的定黏浓度(φ)与半焦调质城市污泥配比(x)呈良好的线性相关关系: $\varphi = 68.835 1 - 1.201 1x, R^2 = 0.953 6$ 。

(4) 污泥煤浆的浆体为假塑性流体,呈现剪切变稀的特性,且随半焦调质城市污泥配比的增大,其剪切变稀的特性越明显。

参考文献 (References):

[1] 蒋建国. 固体废物处置与资源化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[2] 徐喆, 于晓曼, 曾祥峰. 城市污泥绿色资源化利用[J]. 天津农业科学, 2010, 16(3): 11-13.

[3] 刘良良. 污泥与煤制洁净燃料研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.

[4] WZOREK M. Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 80-89.

[5] SATYANARAYAN S. Biogas production enhancement by soya sludge amendment in cattle dung digesters[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34: 1278-1282.

[6] TYAGI V K, LO S L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery[J]. Renewable and Sustainable Energy Re-

- views, 2013, 25(5):708-728.
- [7] CLIMENT M, FERRER I, BAEZA M D, et al. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions [J]. *Chem. Eng. J.*, 2007, 133(1/3):335-342.
- [8] 张杞蓉, 普晓晶. 中国城市污水厂污泥处置现状研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(4):86-89.
ZHANG Qirong, PU Xiaojing. Current status of China's urban sewage plant sludge disposal [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(4):86-89.
- [9] 杨柯敏, 张春燕, 张燕, 等. 城市污泥处理处置方式及现状分析[J]. *中国资源综合利用*, 2012, 30(12):28-31.
YANG Kemin, ZHANG Chunyan, ZHANG Yan, et al. The way of municipal sludge treatment and disposal and its status analysis of domestic and foreign sludge treatment and disposal [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2012, 30(12):28-31.
- [10] 戴财胜, 刘学鹏, 戴谨泽, 等. 锯木屑与褐煤供热解生物焦的成浆性能及其流变特性[J]. *燃料化学学报*, 2016, 44(7):784-791.
DAI Caisheng, LIU Xuepeng, DAI Jinze, et al. Preparation and rheological property of the char-water slurry based on co-pyrolysis of sawdust and lignite [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2016, 44(7):784-791.
- [11] GAO Zhifang, ZHU Shuquan, ZHENG Mingdong, et al. Effects of fractal surface on rheological behavior and combustion kinetics of modified brown coal water slurries [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2(3):211-222.
- [12] WANG Yi, CAO Maoyong, WANG Zenghui, et al. A novel suspension-floating-circulating fluidized combustion technology for coal slurry [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2016, 3(1):35-46.
- [13] 陈萌, 张建涛, 杨国录, 等. 污泥焚烧工艺研究[J]. *工业安全与环保*, 2011, 37(8):46-48.
CHEN Meng, ZHANG Jiantao, YANG Guolu, et al. The study of sewage sludge incineration process [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2011, 37(8):46-48.
- [14] 李伟东, 李明, 李伟锋, 等. 改性污泥与无烟煤成浆性的研究[J]. *燃料化学学报*, 2009, 37(1):26-30.
LI Weidong, LI Ming, LI Weifeng, et al. Co-slurry ability of modified sewage sludge and anthracite [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2009, 37(1):26-30.
- [15] 李伟东, 李明, 李伟锋, 等. 污泥对水煤浆静态稳定性的影响研究[J]. *环境工程*, 2008(S1):267-271.
LI Weidong, LI Ming, LI Weifeng, et al. The effect of sewage sludge on the static stability of coal-water slurries [J]. *Environment Engineering*, 2008(S1):267-271.
- [16] LI W, LI W, LIU H, et al. Influence of sewage sludge on the slurry ability of coal-water slurry [J]. *Fuel*, 2009, 88(11):2241-2246.
- [17] LI W, LI W, LIU H. Effects of sewage sludge on rheological characteristics of coal-water slurry [J]. *Fuel*, 2010, 89(9):2505-2510.
- [18] LIU M, DUAN Y, LI H. Effect of modified sludge on the rheological properties and co-slurry mechanism of petroleum coke-sludge slurry [J]. *Powder Technology*, 2013, 243(7):18-26.
- [19] LIU J, WANG R, XI J, et al. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid [J]. *Applied Energy*, 2014, 115(4):309-319.
- [20] 马淞江, 刘学鹏, 戴谨泽, 等. 基于半焦的污泥调质与深度浓缩脱水[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(6):2991-2996.
MA Songjiang, LIU Xuepeng, DAI Jinze, et al. Sludge conditioning for deeply concentrated dewatering of sludge by using semi-coke [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(6):2991-2996.
- [21] 马淞江, 张仲欢, 王劲, 等. 半焦与城市污泥混合物的燃烧性能研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(5):22-26.
MA Songjiang, ZHANG Zhonghuan, WANG Jin, et al. Study on combustion performance of semi-coke and municipal sludge mixture [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, 38(5):22-26.
- [22] 马淞江, 刘晓芳, 戴谨泽, 等. 温和热解条件下内蒙褐煤热解半焦的燃烧性能[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(5):1153-1159.
MA Songjiang, LIU Xiaofang, DAI Jinze, et al. Combustion performance of semi-coke from Inner Mongolia lignite under mild pyrolysis conditions [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5):1153-1159.
- [23] 戴财胜, 梁丽静, 戴谨泽, 等. 基于温和热解的低阶煤热解半焦成浆性能研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7):1654-1659.
DAI Caisheng, LIANG Lijing, DAI Jinze, et al. Research on the slurry ability of semi-coke from low rank coal pyrolysis under mild conditions [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7):1654-1659.
- [24] 高绍双. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥絮凝沉降性能的影响研究[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [25] 郝丽芳, 王永刚, 熊楚安. 煤颗粒分布对油煤浆流变特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(2):190-193.
HAO Lifang, WANG Yonggang, XIONG Chu'an. Effect of particle size distribution on the rheology of oil-coal slurries [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(2):190-193.