

# 高压均质改性污泥对水煤浆成浆性的影响研究

陈浩<sup>1 2 3</sup>, 王国房<sup>1 2 3</sup>, 何国锋<sup>1 2 3</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

**摘要:**为实现污泥的资源化利用,利用强碱性物质对污泥进行改性,通过污泥改性机的高压均质作用后将污泥掺入煤中制备高浓度污泥煤浆,研究了改性污泥对煤浆成浆浓度、黏度、流动性及稳定性等性能的影响。结果表明,0.5% NaOH 加入到污泥中黏度为 251 mPa·s,1.0% NaOH 添加量时污泥黏度为 244 mPa·s,过量 NaOH 对污泥作用不明显。经过污泥改性机高压均质后的污泥黏度为 251 mPa·s,电动搅拌后的污泥黏度为 337 mPa·s,污泥改性机对污泥改性作用突出。NaOH 占污泥配比 0.5%,污泥添加量 5%,添加剂比例 0.5%,粗细粉质量比 80:20 时,污泥煤浆成浆浓度最高为 59.8%,流动性和稳定性均达到 A 级,成浆性最好。

**关键词:**碱性物质;污泥改性;污泥水煤浆;高压均质

中图分类号: TQ536 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)01-0010-04

## Influence of modified high shear emulsifying sludge on coal water slurry slurryability

CHEN Hao<sup>1 2 3</sup>, WANG Guofang<sup>1 2 3</sup>, HE Guofeng<sup>1 2 3</sup>

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Environmental Protection, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** To take full advantage of sludge, the sludge was first modified by strong alkali, then the products was sheared and emulsified. At last, the modified sludge was mixed into coal in order to prepare high concentration coal water slurry (CWS). The effects of modified sludge on CWS concentration, viscosity, mobility and stability were investigated. The results showed that, when the dosage of NaOH were 0.5%, 1.0% respectively, the sludge viscosity were 251, 244 mPa·s, while the effects of excessive NaOH was not significant. Treated by high shear emulsifying sludge machine, the sludge viscosity was 251 mPa·s which could reach 337 mPa·s treated by sludge electric mixer. When the mass ratio of NaOH was 0.5%, the dosage of sludge was 5%, the proportion of additives was 0.5% and the ratio of coarse powder to fine powder was 80:20, the sludge CWM was the best.

**Key words:** alkali; modified sludge; sludge coal water slurry; high shear emulsifying

## 0 引 言

污泥是污水处理过程中产量最大的副产物,随着我国工业化和城市化快速发展,城市污水产量不断增加,处理污水所产生的污泥量也在不断增长。据统计,我国污泥产量已突破 3000 万 t/a,

仍以每年 10% 的速率增长。城市污泥中含有大量有害重金属、少量寄生虫卵及病原微生物等有害物质,如果不加处理任意排放,这些有害物质极可能再次成为污染源通过地下水、土壤、空气等途径危及人类健康,对环境造成二次污染<sup>[1-3]</sup>。目前国内处理污泥方法主要是填埋和焚烧<sup>[4]</sup>。在我

收稿日期: 2015-08-12; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.01.003

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA063506); 科技部对俄科技合作专项资助项目(012015RR0061)

作者简介: 陈浩(1989—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向为水煤浆技术及工艺。E-mail: 1174570994@qq.com

引用格式: 陈浩,王国房,何国锋. 高压均质改性污泥对水煤浆成浆性的影响研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 10-13, 19.

CHEN Hao, WANG Guofang, HE Guofeng. Influence of modified high shear emulsifying sludge on coal water slurry slurryability[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 10-13, 19.

国,因填埋场地和运输花费等限制,只有部分地区采用填埋处理技术处理污泥<sup>[5]</sup>。而填埋处理还存在重金属等有危害成分下渗污染地下水等问题。焚烧也是处理污泥的重要手段。污泥焚烧方式主要有2种,一种是脱水污泥直接送入焚烧炉焚烧,另一种是在脱水污泥干化之后进行焚烧<sup>[6-7]</sup>。污泥热值较低,通常不能直接用来燃烧,再加上污泥焚烧需要的设施及操作费用较高,因此焚烧污泥的方法还不具备广泛应用的条件<sup>[8-10]</sup>。从长远看,污泥处理的未来趋势必将是污泥资源化利用。如污泥燃料化、污泥堆肥技术、污泥烧制建筑材料以及污泥低温制油都可能成为城市污泥资源化利用的主要途径<sup>[11-13]</sup>。近年来,国内一些科研单位和高校进行了污泥制备水煤浆的研究,但因污泥固含量低、持水性强和流动性差,造成污泥煤浆浓度过低。高压均质分散技术是近几年发展起来的一种新型均质化技术,主要应用在食品、医药、化

工等行业。高压均质分散技术通过挤压、碰撞、剪切、离心等综合作用从而使不相溶的固相、液相、气相在相应工艺和适量添加剂的共同作用下,瞬间均匀精细地分散乳化,经过高频的循环往复,最终得到稳定的高品质产品<sup>[14-15]</sup>。基于高压均质分散技术的上述特点,将其运用在污泥煤浆制备技术中,具有良好的效果。笔者利用水煤浆技术,将污泥掺入燃料水煤浆,研究高压均质技术、不同比例NaOH及粒度级配对污泥煤浆的影响,为污泥治理工业化进行了基础性探索。

## 1 实验

### 1.1 实验原料及设备

实验原料主要为神华煤和上海污泥。实验设备主要有NXS-4C型水煤浆黏度仪, JJ-1型定时电动搅拌器, HB43型快速水分测定仪, 新型污泥改性机等。上海污泥性质分析见表1。

表1 上海污泥性质分析  
Table 1 Sludge properties analysis

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{gr,dl}$ /	灰成分分析(质量分数)/%						
$M_t$	$M_{ad}$	$A_d$	$V_d$	$w(C_{daf})$	$w(H_{daf})$	$w(N_{daf})$	$w(O_{daf})$	$w(S_{daf})$	(MJ·kg <sup>-1</sup> )	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
81.63	11.92	52.72	45.28	53.27	8.91	9.10	26.82	1.90	10.75	50.11	16.20	7.19	8.54	5.34	0.26	0.30

由表1可知,上海污泥含水率较高,为81.63%; $V_d$ 为45.28%,有利于污泥的燃烧; $A_d$ 较高,为52.72%。灰分不直接参与燃烧反应过程,但灰分越高,煤的发热量越低,浆化特性也越差。因此造成污泥的 $Q_{gr,dl}$ 较低,为10.75 MJ/kg。污泥中含有较高的碳和氧,经计算上海污泥O/C比在0.50以上。上海污泥中的灰成分以SiO<sub>2</sub>为主,达到50%以上。

### 1.2 制备改性污泥

按照不同比例将NaOH分别加入上海污泥中,再将同比例NaOH的污泥分成两等份,分别使用JJ-

1型定时电动搅拌器和新型污泥改性机处理约40 min,即制备出不同比例NaOH改性污泥。

### 1.3 制备污泥煤浆

选择神华特低灰煤作为实验用煤,其煤质分析见表2。实验采用干法制浆将磨好的煤粉即粗细粉、改性污泥、添加剂和水加入烧杯中,用JJ-1型定时电动搅拌器搅拌6 min,制成水煤浆。对水煤浆进行表观黏度、浓度测试和流变性、流动性、稳定性的实验研究。表观黏度由NXS-4C型水煤浆黏度仪,浓度用HB43型快速水分测定仪测定<sup>[16-17]</sup>。

表2 神华煤煤质分析  
Table 2 Coal quality analysis of Shenhua coal

工业分析/%				元素分析/%						$Q_{net,ad}$ /
$M_t$	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{daf}$	$FC_{ad}$	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(S_{i,ad})$	(MJ·kg <sup>-1</sup> )
12.10	11.74	6.38	39.90	55.76	65.34	3.75	0.60	11.70	0.49	25.85

水煤浆流动性的测定采取目测法,分为A、B、C三个等级,每个等级的划分为:A—连续流动,B—间断流动,C—不流动。为表示属于某一等级范围流

动性的较小差别,分别用“+”和“-”号加以区分,“+”号表示某一等级中流动性较好者,“-”号表示某一等级中流动性较差者。

水煤浆的稳定性采用插棒法测试,将被测水煤浆试样密闭静置 8 h 后,插棒观测。水煤浆稳定性的判定分成 4 个等级,具体为: A 级—浆体保持其初始状态,无析水和沉淀产生; B 级—存在少量的析水或少许软沉淀产生; C 级—有沉淀产生,密度分布不均,但经搅拌作用后可再生; D 级—产生部分沉淀或全部硬沉淀。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高压均质作用对污泥煤浆的影响

将上海污泥按 0.5% 比例加入 NaOH,分别使用 JJ-1 型定时电动搅拌器和新型污泥改性机在 3000 r/min 下强力剪切约 40 min,观察 2 种方法处理的污泥状态,并进行浓度与黏度测试,结果见表 3。在煤浆中加入 5% 的改性污泥,考察污泥煤浆流动性及稳定性,结果见表 4。

表 3 不同剪切方法对改性污泥性质的影响

Table 3 The influence of different shear methods on property of modified sludge

剪切方法	浓度/%	黏度/(mPa·s)	流动性
电动搅拌	19.27	337	C
高压均质	18.03	251	B

表 4 不同剪切方法对改性污泥成浆性的影响

Table 4 The influence of different shear methods on pulp property of modified sludge

剪切方法	浓度/%	黏度/(mPa·s)	流动性	稳定性
电动搅拌	56.3	1201	A	B
高压均质	59.8	1235	A	B

由表 3 可知,污泥经电动搅拌剪切的浓度和黏度分别为 19.27%、337 mPa·s,流动性为 C。经过高压均质后,污泥浓度和黏度均有所降低分别为 18.03%、251 mPa·s,流动性为 B。说明新型污泥改性机处理的污泥具有明显的乳化效果。

高压均质改性污泥机理可能是:改性机的特殊结构可以打破污泥中絮凝剂的网状结构及生物质细胞壁等,NaOH 的强碱性将污泥中的结合水变成自由水释放出来,使污泥能够有效分散在自由水中,提高了污泥的流动性。

由表 4 可知,改性污泥分别经过 JJ-1 型定时电动搅拌器和立式新型污泥改性机剪切过后,制出的煤浆浓度分别为 56.3%、59.8%。与电动搅拌相

比,经过高压均质后污泥煤浆浓度提高了 3.5%。

### 2.2 碱性固体对污泥煤浆的影响

#### 2.2.1 不同比例 NaOH 的污泥改性效果

在制备污泥煤浆前,需对上海污泥进行改性预处理,这是改善污泥煤浆流动性和提高污泥煤浆浓度的主要手段。在上海污泥中按不同比例分别加入 NaOH,使用新型污泥改性机改性处理约 40 min,考察污泥浓度、黏度、流动性及稳定性等指标,结果见表 5。由表 5 可知,NaOH 配入比例在 1.0%~1.2% 时,改性效果最好。污泥原本呈现絮凝状没有流动性,随着 NaOH 配入比例的增加,污泥流动性明显变好。NaOH 加入量在 0.5% 以后,污泥黏度变化趋势逐渐减缓。过量的 NaOH 对污泥改性效果并不明显,主要是因为污泥经过立式新型污泥改性机高剪切和超细研磨作用后,污泥中的酸性物质与 NaOH 反应加速,产生了部分自由水。加上 NaOH 对未被剪切的生物质细胞有渗透作用,释放出自由水,改善了污泥的流动性。综合考虑,NaOH 配入量选择 0.5%。

表 5 NaOH 配入比例对改性污泥性质的影响

Table 5 The influence of NaOH amount on property of modified sludge

NaOH 配入比例/%	浓度/%	黏度/(mPa·s)	流动性	稳定性
0	17.91	389	D	B
0.2	17.33	317	C	B
0.5	18.03	251	B	B
1.0	18.11	244	B	B
1.2	18.08	248	B	B

#### 2.2.2 NaOH 改性污泥配入比例对成浆性的影响

将配入 0.5% NaOH 的改性污泥、0.5% 分散剂与神华煤混合制浆,考察污泥煤浆最大成浆浓度,结果见表 6。

表 6 改性污泥配入比例对其成浆性的影响

Table 6 The influence of modified sludge amount on pulp property

污泥添加量/%	浓度/%	黏度/(mPa·s)	流动性
0	63.3	1074	A
2	60.6	1156	A
5	59.8	1235	A
8	56.2	1187	B
10	54.7	1204	B

由表 6 可知,随着污泥配入比例增加,煤浆成浆浓度减小,且减小速度逐渐加快,污泥添加量为

10%时,煤浆浓度低至54.7%,相比未添加污泥的煤浆浓度降低了8.6%。这是由于改性污泥持有大量水,其中大部分水变成了自由水。将改性污泥加入到煤浆中,煤浆浓度明显降低。改性污泥在煤浆中加入比例选择5%为宜,此时污泥煤浆黏度、流动性均满足煤浆质量要求。

### 2.3 粗细煤粉配入比例对污泥煤浆的影响

#### 2.3.1 粗细煤粉制备

将原料煤破碎到 $<6\text{ mm}$ ,将其放入棒磨机中磨矿,每次入料适量。根据煤的磨矿特性与出料粒度要求,选择合适的磨矿时间,将磨好后的煤粉取出,即得到粗煤粉。

取出制备好的部分粗煤粉,将其放入超细研磨机中进行磨矿,入料 $0.7\text{ kg}$ ,选择合适的磨矿时间。对取出的煤粉使用马尔文3000激光粒度分布仪测定其粒度分布。在磨矿时间为 $60\text{ min}$ 时,煤粉的平均粒径为 $13.67\text{ }\mu\text{m}$ ,煤粉粒度分布满足要求,因此选择此时的煤粉为成浆性实验原料。

#### 2.3.2 粗细煤粉比例对污泥煤浆成浆性的影响

将 $0.5\%$  NaOH改性污泥以 $5\%$ 的比例与神华煤制备水煤浆,添加剂比例为 $0.5\%$ ,神华煤粗细煤粉分别以质量比 $85:15$ 、 $80:20$ 、 $70:30$ 进行成浆性实验,结果见表7,不同配比粗细煤粉粒度分布如图1所示。

表7 粗细煤粉比例对改性污泥成浆性的影响

Table 7 The influence of thickness ratio on pulp property of modified sludge

粗细煤粉质量比	浓度/ $\%$	黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	流动性	稳定性
85:15	58.5	1108	C	B
80:20	59.8	1235	A	A
70:30	58.3	1289	A	A

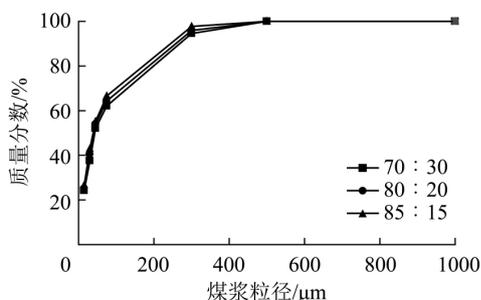


图1 不同粗细煤粉比例下煤浆的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of different thickness ratio

由表7可知,实验制备的污泥煤浆能够满足燃料用煤浆要求。污泥煤浆的成浆浓度随着细粉加入

量的增加先增大后减小。其中在粗细粉比例为 $80:20$ 时,污泥煤浆的成浆浓度最高为 $59.8\%$ ,流动性和稳定性均达到A级。在粗粉中添加一定比例的细粉能够改善煤浆的流动性,提高煤浆堆积密度进而达到提浓的目的。而在煤浆中加入改性污泥后,其因粒度较小含水量较高,相当于起到部分细浆的作用。因此,粗细煤粉质量比为 $80:20$ 时,污泥煤浆成浆性最好。

## 3 结 论

1) 改性污泥经过高压均质作用后,污泥固含量从 $19.27\%$ 降为 $18.03\%$ ,黏度从 $337\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 降至 $251\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。均质化后的污泥流态更好,加入煤浆中能够提高煤浆浓度。

2) NaOH在污泥中配比为 $0.5\%$ 时,改性后污泥黏度为 $251\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,同时流动性较好。

3) 污泥煤浆的成浆浓度随着细粉加入量的增加呈先增大后减小的趋势。其中粗细煤粉质量比为 $80:20$ 时,污泥煤浆的成浆浓度最高为 $59.8\%$ ,流动性和稳定性均达到A级,污泥煤浆成浆性最好。

### 参考文献:

- [1] 秦翠娟,李红军,钟学进.我国污泥焚烧技术的比较与分析[J].能源工程,2011(1):52-56.  
Qin Cuijuan, Li Hongjun, Zhong Xuejin. Comparison and analysis of domestic sludge incineration technology [J]. Journal of Energy Engineering 2011(1): 52-56.
- [2] 刘煜,李伟东,刘海峰.污泥干燥预处理后与神府煤共成浆性的研究[J].燃料化学学报,2010,38(6):656-659.  
Liu Yu, Li Weidong, Liu Haifeng. Co-slurry ability of dried sewage sludge and Shenfu coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2015, 38(6): 656-659.
- [3] 朱妙军.污泥水煤浆的成浆、燃烧及燃烬特性研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [4] 刘猛,段钰锋,李华峰,等.改性污泥与石油焦的共成浆性及流变性分析[J].中国电机工程学报,2012,32(35):59-65.  
Liu Meng, Duan Yufeng, Li Huafeng, et al. Analysis on co-slurry ability and rheology of modified sludge and petroleum coke [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(35): 59-65.
- [5] 胡勤海,熊云龙,朱妙军,等.城市污泥掺制水煤浆燃烧动力学特性[J].环境科学学报,2008,28(6):1149-1154.  
Hu Qin Hai, Xiong Yunlong, Zhu Miaojun, et al. Study on combustion kinetics of coal water slurry prepared with sewage sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2008, 28(6): 1149-1154.

(下转第19页)

- [4] 罗道成, 易平贵, 陈安国. 固相分光光度法测定煤矸石中微量锗[J]. 稀有金属 2003, 27(2): 314-316.  
Luo Daocheng, Yi Pinggui, Chen Anguo. Solid phase spectrophotometry for determination of micro germanium in coal gangue[J]. Chinese Journal of Rare Metals 2003, 27(2): 314-316.
- [5] 李炳焕, 王桂华, 贾静娴, 等. 苯基荧光酮荧光分光光度法测定痕量锗的研究[J]. 化学研究与应用 2002, 14(2): 242-244.  
Li Binghuan, Wang Guihua, Jia Jingxian, et al. The study of spectrofluorometric determination of trace germanium with phenylfluorone[J]. Chemical Research and Application 2002, 14(2): 242-244.
- [6] 敖登高娃, 乌云, 王桂峰. 5'-硝基-水杨基荧光酮荧光熄灭法测定煤中微量锗[J]. 冶金分析 2003, 23(4): 38-40.  
Aodeng Gaowa, Wu Yun, Wang Guifeng. Fluorescence quenching method for the determination of trace germanium in coal with 5'-nitro-salicylfluorone[J]. Metallurgical Analysis 2003, 23(4): 38-40.
- [7] 孔玉梅, 徐晓明, 赵珍义. 改进 FIA 光度法测定煤矸石中痕量锗的研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版) 2014, 41(1): 60-64.  
Kong Yumei, Xu Xiaoming, Zhao Zhenyi. Improvement-FIA spectrophotometric determination of trace germanium coal stone (discussion) research[J]. Journal of Liaoning University( Natural Sciences Edition) 2014, 41(1): 60-64.
- [8] 罗道成, 刘俊峰. 荧光光度法测定煤矸石中微量锗[J]. 化学试剂 2007, 29(5): 297-298.  
Luo Daocheng, Liu Junfeng. Determination of micro-amount of germanium in coal gangue by fluorospectrophotometry[J]. Chemical Reagents 2007, 29(5): 297-298.
- [9] 申明乐, 黄雪征, 刘万峰. 原子荧光光谱法分析煤中的锗[J]. 分析实验室 2007, 26(S1): 232-234.  
Shen Mingle, Huang Xuezheng, Liu Wanfeng. Determination of germanium in coal by atomic fluorescence spectrometry[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory 2007, 26(S1): 232-234.
- [10] 黄玉安, 周方钦. 磷酸三丁酯萃取火焰原子吸收法间接测定植物和煤灰中的痕量锗[J]. 分析科学学报, 2004, 20(4): 434-435.  
Huang Yu'an, Zhou Fangqin. The study on indirect flame atomic absorption spectroscopy determination of trace germanium after extraction with TBP[J]. Journal of Analytical Science 2004, 20(4): 434-435.
- [11] 邹本东, 敖登高娃, 尚洪山, 等. 双向视 ICP-OES 法同时测定褐煤中锗和一些主要成灰元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(9): 1496-1499.  
Zou Bendong, Aodeng Gaowa, Shang Hongshan, et al. Simultaneous determination of germanium and some major ash forming elements in lignites using a dual-view ICP-OES[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis 2005, 25(9): 1496-1499.
- [12] 明芳, 王倩. ICP-AES 法测定粉煤灰中的微量锗[J]. 轻金属 2006(11): 33-36.  
Ming Fang, Wang Qian. Measurement of trace germanium in fly ash by means of ICP-AES method[J]. Light Metal 2006, 11: 33-36.
- [6] 张文丹, 戴财胜. 烟煤与造纸污泥混配物的热解特性研究[J]. 煤炭转化 2012, 35(1): 13-15.  
Zhang Wendan, Dai Caisheng. Pyrolysis characteristics of two mixed ligand of complexes soft coal and papermaking sludge[J]. Coal Conversion 2012, 35(1): 13-15.
- [7] 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-slurryability of modified sewage sludge and anthracite[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology 2009, 37(1): 26-30.
- [8] 田宁宁, 王凯军, 杨丽萍, 等. 污水处理厂污泥处理及利用途径研究[J]. 环境保护 2000(2): 18-20.  
Tian Ningning, Wang Kaijun, Yang Liping. Technology evaluation on disposal and utilization of excess activated sludge[J]. Engineering and Technology 2000(2): 18-20.
- [9] 李军, 王忠军, 张宁, 等. 污泥焚烧技术工艺研究[J]. 环境工程 2005, 23(6): 48-52.
- [10] 梁鹏, 黄霞, 钱易, 等. 污泥减量化技术的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备 2003, 4(1): 44-52.  
Liang Peng, Huang Xia, Qian Yi, et al. Research progress on sludge reduction technologies[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control 2003, 4(1): 44-52.
- [11] 赵丽君, 张大群, 陈宝柱. 污泥处理与处置技术的进展[J]. 中国给水排水 2001, 17(6): 23-25.
- [12] 余杰, 田宁宁, 王凯军, 等. 中国城市污水处理厂污泥处理处置问题探讨分析[J]. 环境工程学报 2007, 1(1): 82-86.  
Yu Jie, Tian Ningning, Wang Kaijun, et al. Analysis and discussion of sludge disposal and treatment of sewage treatment plants in China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering 2007, 1(1): 82-86.
- [13] 邱天, 张衍国. 城市污水污泥燃烧特性试验研究[J]. 热力发电 2003, 32(3): 19-21.
- [14] 王丹. 高剪切分散乳化技术对大豆分离蛋白凝胶特性及微观结构的影响[D]. 长春: 吉林农业大学 2014.
- [15] 桑义敏, 陈家庆, 刘君, 等. 基于剪切乳化机的采油污水再现配置与分散相破碎乳化行为[J]. 环境工程学报, 2013, 7(8): 2877-2884.  
Sang Yimin, Chen Jiaqing, Liu Jun, et al. Behavior of produced wastewater preparation base on shearing emulsifier and dispersed phase droplet breakup[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering 2013, 7(8): 2877-2884.
- [16] GB/T 18856.2—2014, 水煤浆试验方法 第 2 部分: 浓度测定[S].
- [17] GB/T 18856.4—2014, 水煤浆试验方法 第 4 部分: 表观黏度测定[S].