

# 污泥湿式氧化工艺过程模拟及经济性分析

文 路<sup>1,2\*</sup>, 房 慧<sup>3</sup>, 陈 阳<sup>1,2</sup>, 覃小刚<sup>1,2</sup>, 杨 欢<sup>1,2</sup>, 王 焕<sup>1,2</sup>, 孙登科<sup>1,2</sup>

(1. 清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 四川 成都 611731;

2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 成都 611731;

3. 中国东方电气集团有限公司, 四川 成都 611731)

**摘要:** 基于前期实验结果, 利用过程模拟软件搭建湿式氧化的基础模型, 为方案设计提供参考。选取污泥含水率、热值和进气含氧量为变化因素, 对自热条件下反应器可回收热量和系统压力进行模拟计算。结果表明, 进气为纯氧时, 实验压力下, 维持自热的含水率最高为 87.6%; 当考虑污泥泵的实际能力时, 含水率最高可为 89.1%; 干基热值范围在 11~16 MJ/kg 的污泥适用于此基础模型; 随氧浓度增大, 系统所需压力减小。针对某污水厂的污泥, 对 20 t/d 污泥湿式氧化处理方案和对应的综合模型进行了介绍, 并验证了模型的可用性。模拟结果与实验对比, 发现气相产物无 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>; 能量分析表明系统可自热维持。经济性分析结果表明, 20 t/d 系统的总投资约 918 万元, 运行成本约 134.8 元/t。

**关键词:** 污泥; 湿式氧化; 工艺流程; 过程模拟; 经济性

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)03-0227-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.03.052

## Process simulation and economic analysis of sludge wet oxidation treatment

WEN Lu<sup>1,2\*</sup>, FANG Hui<sup>3</sup>, CHEN Yang<sup>1,2</sup>, QIN Xiao-gang<sup>1,2</sup>, YANG Huan<sup>1,2</sup>,

WANG Huan<sup>1,2</sup>, SUN Deng-ke<sup>1,2</sup>

(1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Clean Combustion and Flue Gas Purification, Chengdu 611731, China;

2. Dongfang Boiler Group Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Chengdu 611731, China;

3. Dongfang Electric Corporation, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Based on the results of previous experiments, the basic model of wet oxidation is built by means of process simulation software, which provides a reference for the design of the scheme. The moisture content of sludge, calorific value and oxygen content of intake are selected as variable factors, and the recoverable heat and system pressure of the reactor are simulated under self-heating maintenance conditions. The results show that maximum moisture content to remain self-heating is 87.6% under experimental pressure when the intake is pure oxygen. When considering the actual capacity of sludge pump, the moisture content can be up to 89.1%. The sludge with a dry-based calorific value between 11 and 16 MJ·kg<sup>-1</sup> are suitable for this system. As oxygen concentration increases, the pressure required by the system decreases. In view of sludge in a certain sewage plant, the wet oxidation treatment scheme and corresponding comprehensive model for 20 t·d<sup>-1</sup> sludge are introduced, and the usability of the model is verified. Compared with the experiment results, it is found that there is no SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> in gas products either. Energy analysis shows that the system can be maintained by self-heating. Economic analysis shows that the total investment of the 20 t·d<sup>-1</sup> system is about RMB 9.18 million and the operating cost is about RMB 134.8/t.

**Key words:** sludge; wet oxidation; process flow; process simulation; economics

产量巨大的市政污泥对环境带来的压力已日趋明显, 预计到 2020 年我国城镇污泥产量将攀升至 5 292 万 t<sup>[1]</sup>。近年来, 新的污泥处理处置技术已逐渐代替原有简单粗暴的污泥处理处置方式<sup>[2-5]</sup>。近八成污泥未无害化处理, 《“十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》也再次针对污泥无害化处置提出了更高要求<sup>[6-7]</sup>, 污泥处理方式的探索显得尤为必要。

湿式氧化技术(wet air oxidation)是指在高温高压条件下, 以空气或氧气为氧化剂, 将污泥中溶解、

悬浮的有机物或还原性无机物氧化分解为小分子<sup>[8]</sup>, 最终可达到污泥减量化、无害化和稳定化处理的一种方法。污泥处理技术的确定需要考虑工艺参数对系统的影响, 同时要考虑对成本的影响。工艺参数的选择是否合理, 决定着工艺过程能否实现。复杂的化学过程可通过模拟软件的呈现变得具体化, 同时软件模拟对技术研究的指导也避免了反复无效的试验。利用模拟研究结果对试验进行指导是污泥湿式氧化技术研究过程中非常必要的。

过程模拟软件近年来已在煤的燃烧、气化和生

收稿日期: 2018-08-05; 修回日期: 2019-01-07

作者简介: 文路(1984-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为生物质资源化及污泥处理, 通讯联系人, 028-87899536, wenlu63206539@163.com。

物质领域得到了广泛的应用,而将其应用于模拟污泥湿式氧化的报道非常缺乏<sup>[9-12]</sup>。污泥的含水率、热值、进气含氧对湿式氧化系统自热维持及系统压力有着直接的影响。本文中基于过程模拟软件对此进行了计算分析,并针对 20 t/d 处理量的污泥系统建立模型和进行了经济性分析。污泥湿式氧化技术作为近年来发展起来的新技术,本文中的建模方法和结论能够为其工业化应用提供参考。

## 1 工艺流程建立及计算

### 1.1 前提及假设条件

课题组前期对污泥水热氧化进行了一系列实验研究,已获得优选的反应条件<sup>[13]</sup>。本文中模拟的参数以此为基础。

为使模拟计算过程简化同时接近实际情况,需对污泥湿式氧化过程给出如下假设:①污泥氧化反应达到化学平衡,且污泥在反应器内处于稳定的运行状态;②考虑了一定的反应转化率,即一定比例的污泥参加反应,灰分和未参加反应的污泥为惰性物质,在过程中不参与反应;③假定污泥在反应器内发生氧化反应时,参与反应部分最终反应完全;④忽略过程中的压力损失;⑤未计入余热回收利用;⑥产物中水蒸发达到相平衡;⑦考虑了一定的散热损失。

### 1.2 模块选择、物性方法及组分输入

常规组分直接输入参与反应的各组分的英文名或化学式,查找出相应组分并将其添加到模拟流程里。但由于污泥成分复杂,无法用常规的建模方式对原料成分进行描述。污泥组成类似煤和生物质,可通过测定其工业分析和元素组成及硫分析数据来定义污泥成分。本文中基于原料分析数据,利用产率模块将污泥非常规组分转化为相应的单元素常规组分,同时释放出一股能量流。利用 Fortran 语言对污泥进行常规组分的转化与分解,并将反应效率考虑进来。实际过程中,不同的反应器反应效率差别较大,根据试验结果进行了修正,具体语言定义如下:

$$\text{FACT} = (100 - \text{WATER}) / 100$$

$$\text{REACT} = 0.84$$

$$\text{H2O} = \text{WATER} / 100$$

$$\text{CARB} = \text{ULT}(2) / 100 * \text{FACT} * \text{REACT}$$

$$\text{H2} = \text{ULT}(3) / 100 * \text{FACT} * \text{REACT}$$

$$\text{N2} = \text{ULT}(4) / 100 * \text{FACT} * \text{REACT}$$

$$\text{SULF} = \text{ULT}(6) / 100 * \text{FACT} * \text{REACT}$$

$$\text{O2} = \text{ULT}(7) / 100 * \text{FACT} * \text{REACT}$$

$$\text{ASH} = \text{FACT} - \text{CARB} - \text{H2} - \text{N2} - \text{SULF} - \text{O2}$$

产率模块流出来的物质流和能量流接到 Gibbs 自由能反应器吉布斯模块上,运用最小 Gibbs 自由能的方法计算出反应器出口组成和温度,阀门模块模拟减压阀,分离器模块模拟气液分离罐。为维持反应所需温度,通过分流器模块移走多余反应热。所建的流程模拟图如图 1 所示。

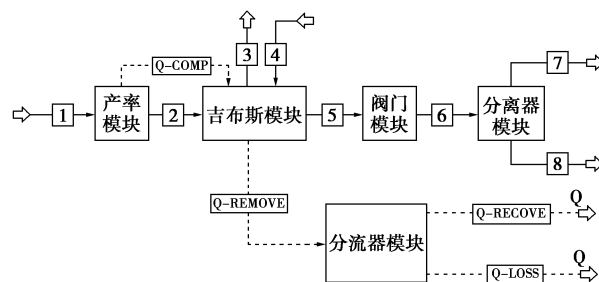


图 1 污泥湿式氧化基础模型

RK-Soave 物性方程适合所有温度及压力下的非极性 or 极性较弱的混合物体系,污泥可与煤炭/生物质类比,本文中在全局设置时选用煤炭/生物质类物质常用的 RK-Soave 物理性方法。水热氧化反应在液相水中进行,且伴随有  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$  等气体,将分离器模块的物性参数单独设置为带亨利定律的 Wilson 方法,其中亨利组分预先在组分中定义。

焓值计算和密度计算选择非常规组分计算方法。对污泥热值进行定义,手动输入燃烧热值。模拟中反应器考虑了一定比例的热损失。

以成都污泥为例,进行湿式氧化处理过程的模拟和分析。污泥工业分析和元素分析见表 1。

表 1 污泥工业分析和元素分析

含水 82.21%	工业分析/%				元素分析/%				高位热 值/(MJ· kg <sup>-1</sup> )	
	M	A	V	FC	C	H	N	St		O
干燥基	0	36.03	56.21	7.76	31.76	4.5	5.45	0.843	21.42	15.12

### 1.3 计算结果

污泥的含水率、热值以及进气含氧量对系统的热平衡计算和系统压力有着直接影响,也与实际工艺路线的确定息息相关。以下分别模拟并分析了污泥的含水率、热值以及进气含氧量的变化对系统的影响。

#### 1.3.1 含水率

进气为纯氧的情况下,计算了实验优选条件下不同含水率时反应器可回收热值,结果见图 2。可见,随着含水率的增大,可回收热量减少。此模拟条件下刚好维持自热时含水率最高为 87.6%。

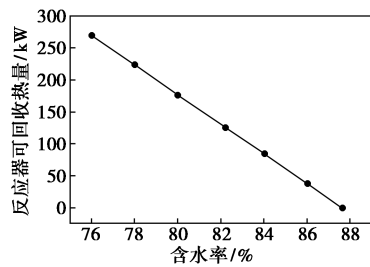


图2 不同含水率条件下反应器可回收热量

进气为纯氧的情况下,可回收热值为零时,维持系统自热,利用设计规定,进行迭代计算得到实验优选温度条件下不同含水率对应的系统压力,结果见图3。可见,随着含水率的增大,维持自热的系统压力是增大的。在87%的点附近,斜率陡然增大,对应系统压力增幅也随之增大,说明随着含水率进一步增大,系统的压缩能耗将明显增加。污泥输送泵实际可达到的最高压力通常为9.6 MPa左右,此时对应含水率89.15%。再考虑实际运用中存在的管道压力损失,认为本系统处理的污泥含水率不宜超过89.1%。

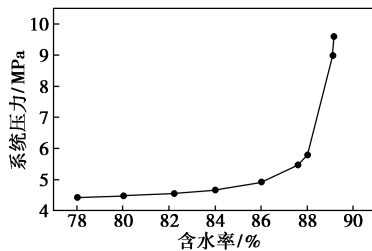


图3 含水率与系统压力

### 1.3.2 污泥热值

市政污泥干基热值范围通常在11~16 MJ/kg,进气为纯氧的情况下,维持系统自热,利用设计规定进行迭代计算,得到实验优选温度条件下不同热值对应的系统压力,结果见图4。可以看出,随着污泥热值的增大,系统所需的压力是降低的。在热值12 MJ/kg附近,斜率陡变。可以看出,热值高于12 MJ/kg时,随着热值减小,系统所需压力变化趋于平缓,而随着热值减小系统所需压力增幅明显。

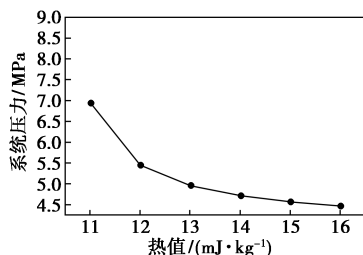


图4 热值与系统压力

考虑污泥泵的实用性,从图中可知,11~16 MJ/kg 污泥热值在本系统下均适合处理。

### 1.3.3 进气含氧量

维持系统自热,利用设计规定进行迭代计算,得到实验优选条件下,从空气到纯氧范围对应的系统压力,结果见图5。可以看出,随着氧气浓度增大,系统所需压力是减小的。在氧气含量40%的点附近,斜率最大,当氧气含量再减小时,系统压力增加较快。可以看到,空气条件下系统压力比纯氧条件下高了约3 MPa,整个系统能耗高。使用空气会有大量氮气携带水蒸汽的蒸发潜热离开反应器,不利于反应体系自热维持。使用高氧浓度的气体可以减少压缩机功耗,但需要同时综合考虑制氧成本和增压机的成本。

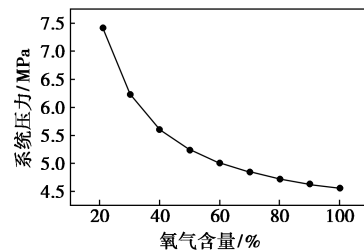


图5 氧气含量与系统压力

## 2 20 t/d 处理量的污泥湿式氧化工艺系统流程

基于某污水处理厂20 t/d的污泥湿式氧化项目的流程描述如下。

来自污水处理厂的市政污泥由皮带送入储料罐,储料罐中的脱水污泥在自重和污泥运输泵的作用下被送至预处理罐,经预处理后的污泥在加压泵的作用下被送至反应器。由输气系统产生的富氧空气与被预处理后的污泥一同进入反应器在高温高压的条件下进行反应。反应器出来的灰水产物流经2次减压闪蒸分离,最终进入沉降溢流槽,溢流清液回污水处理厂,沉降部分经压滤机压滤,产生的含水约40%的滤饼可用于园林苗圃堆肥施用或外送用于燃煤锅炉掺烧和水泥窑炉掺烧或填埋。大渣经锁斗收渣,再回收至污泥储料罐重复处理。输气系统中空气压缩机产出高压空气作为锁斗充压介质,低压空气在开工或停工时用来吹扫系统。利用高温气相产物和闪蒸气的余热对进料污泥进行预热,产生的冷凝液排放至污水处理厂,乏汽排空。

利用流程模拟软件建立了该工艺的稳态模型,如图6。

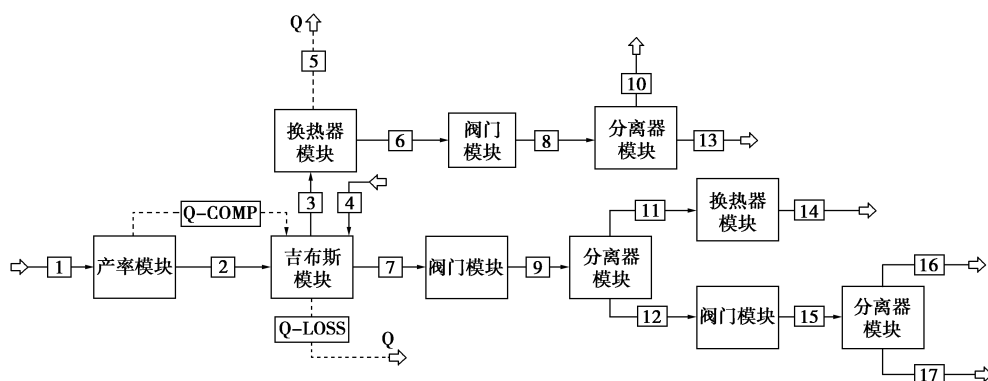


图 6 20 t/d 处理量污泥湿式氧化工艺模型

模块搭建的思想及前提与上述基础模型基本相同。由于此污泥的热值偏低,故进气采用高氧浓度的气体,且考虑了对热量的利用。增加的换热器模块用于计算高温气相产物和闪蒸气对进料污泥进行预热的过程中所能提供的热量。本模型从预处理罐出口的污泥物流开始执行计算。

模拟计算的污泥工业分析和元素分析见表 2。

表 2 某污水厂污泥工业分析和元素分析

含水 76.75%	工业分析/%				元素分析/%					高位热 值/(MJ· kg <sup>-1</sup> )
	M	A	V	FC	C	H	N	St	O	
干燥基	0	63.62	35.14	1.24	15.93	2.4	2.9	0.695	14.5	7.1

### 2.1 模型验证

以反应器为例进行能量分析。

进反应器模块的焓值 =  $Q(\text{IN} - \text{REACT}) + Q(\text{Oxygen}) + Q(\text{COMP}) = (-3\,375.6 \text{ kW}) + (0.8 \text{ kW}) + (-70.4 \text{ kW}) = -3445.2 \text{ kW}$ ; 出反应器模块焓值 =  $Q(\text{气相产物}) + Q(\text{液固产物}) + Q(\text{损失}) = (-880.7 \text{ kW}) + (-2\,581.8 \text{ kW}) + (17.4 \text{ kW}) = -3\,445.1 \text{ kW}$ 。

可见,进出反应器焓值守恒。本系统整个过程不需外部补充能量,可满足系统自热维持。

从计算结果可知,本系统中用于预热的蒸汽可提供热量为 101 kW,用于预热的高温气相产物可提供热量为 113 kW。

对于气相产物,通常关注有无 NO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等二次污染。针对所关注的气体组分,将课题组以往实验中烟气分析仪检测的结果和本系统对应的模拟数据进行对比,见表 3。

表 3 典型气体成分实验结果与模拟结果的对比

气体组分	体积分数	实验数据	模拟计算数据
NO	L/L	0	$1.2 \times 10^{-10}$
NO <sub>2</sub>	L/L	0	$8.2 \times 10^{-9}$
SO <sub>2</sub>	L/L	0	$1.3 \times 10^{-8}$

结果显示,模拟得到的气相中基本无 NO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等二次污染气体。

从以上分析和对比的情况,说明本系统模型的搭建过程和模拟结果均可获得验证。

### 2.2 系统经济性分析

20 t/d 城市污泥湿式氧化装置的系统总投资和运行成本预测数据分别见表 4 和表 5。

表 4 城市污泥湿式氧化装置的系统总投资

工程费用名称		成本/ 万元
第一部分工程费用		
设备购置费	总设备购置费	589.61
建筑、安装工程费	安装费;设备、管道、阀门	62
	运输费	8
	土地使用费、废水回流费	—
	土建费	31.43
	电气仪控费	65
第二部分工程建设其他费用		
总间接投资成本	工程管理费	33.17
	建设单位管理费	9.07
	工艺调试费	11.34
	工程监理费	10.58
	工程保险费	0.83
	设计费、施工图、竣工图编制费	—
	相应的法律和合同产生的费用	—
	生产员工培训费	2.27
	办公和生活购置费	3.79
第三部分		
预备费用(其他费用)	基本预备费(包含首次试车费)	49.63
	涨价预备费	—
建设期贷款利息		41.64

注:①此装置建设在原污水厂厂区内,园区升级费暂未考虑;②土地使用、废水回流均不产生费用;③除安装费、运输费、土建费、电气仪控费,其他项费用参考工程投资比例估算,工程管理费按系数法估算<sup>[14-15]</sup>。

表5 城市污泥湿式氧化装置的运行成本测算

费用项目	物料消耗量/ a	单价/ 元	费用/ (万元·a <sup>-1</sup> )	处理成本/ (元·t <sup>-1</sup> )
电	5.86×10 <sup>5</sup> kWh	0.75	43.98	66
水	200 t	3.3	0.066	0.1
维护保养	—	—	18.37	27.6
滤饼处理	—	—	27.36	41.1

注:①装置年开车 333 d,每天运行 24 h,年运行小时数 8 000 h;②本系统污泥不属于燃料,采用制氧机产生富氧空气,只需设备投入和电费,所以本系统无燃料费支出;③人工驻守,系统运行按 2 人考虑,承担生产、控制、维护、应急和值夜班等任务,人员来自污水处理厂,本系统无劳务费支出;④上述运行成本未考虑涨价、利息、设备折旧等因素。

由表 4 和表 5 的统计结果可以看出处理量为 20 t/d 的市政污泥湿式氧化装置系统总投资约为 918 万元,运行成本约 134.8 元/t。整个装置正常运行时可以实现自热维持,无需补充任何辅助燃料,只需消耗部分电能,这部分电能主要用于启动开工、动力输送设备、制氧系统。反应后只需将少量无害化滤饼运输处理,家庭养花栽培基质以及园林利用是其可以考虑的途径<sup>[16]</sup>。

西安交通大学课题组 2.5 t/d 城市污泥超临界水氧化示范装置投资约 215 万元,运行成本约 550 元/t<sup>[17]</sup>。高标准处理处置污泥并使之达到无害化,至少需 500 元/t<sup>[18]</sup>,一般焚烧费用为 400~500 元/t<sup>[19]</sup>。以上海石洞口污水处理厂为例,处理量 40 万 t/d 的污泥焚烧装置总投资 8 000 万元,运行费用 533 元/t<sup>[20]</sup>。

污泥湿式氧化处理装置的总投资和运行成本相比污泥超临界水氧化系统和焚烧装置在相同处理规模条件下都更低,且能达到减量无害稳定的效果<sup>[13]</sup>。

### 3 结论

完成了污泥湿式氧化的基础过程模拟,此基础模型未涉及能量利用。模拟计算的结果表明,此工艺方案可自热处理热值 11~16 MJ/kg 的普通市政污泥。可处理的污泥含水率可达 89.1%,同时随着含水率增大,系统压力增大。具体方案设计对于进气含氧浓度的选择,需考虑其带来的压力增幅及对应设备带来的系统费用的增加。

某城镇污水处理厂热值 7.1 MJ/kg 脱水污泥 20 t/d 的模拟结果表明,采用高氧浓度的进气,考虑热量利用的湿式氧化处理方案也可以实现自热维持。可见,上述过程的模拟对方案设计能起到实际

的指导作用。

污泥本身的热值、处理规模以及污泥补贴对湿式氧化处理的总投资、运行费用以及盈利情况都有直接影响,随着污泥简单粗暴处理方式的摒弃和对无害化处理的重视,湿式氧化处理的优势将会更加明显。

### 参考文献

- [1] 中国水网.2020 年需无害化污泥量将达 5000 万吨,十三五市场空间有多大? [EB/OL]. [2018-02-09]. <http://www.h2o-china.com/news/270582.html>.
- [2] 周芊慧.城市污泥处置技术探析[J].环境科学:科技风.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.201801104.
- [3] 庄修政,黄艳琴,阴秀丽,等.污泥水热处理制备清洁燃料的研究进展[J].化工进展,2018,37(1):311-318.
- [4] Hii K, Baroutian S, Parthasarathy R, et al. A review of wet air oxidation and Thermal Hydrolysis technologies in sludge treatment[J]. Bioresource Technology, 2014, 155:289-299.
- [5] Garrido-Baserba M, Molinos-Senante M, Abelleira-Pereira J M. Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107:410-419.
- [6] 国家发展改革委,住房城乡建设部.“十三五”全国城镇污水处理及再利用设施建设规划[EB/OL]. [2016-12-31]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201701/t20170122-836133.html>.
- [7] 中国环境网.污泥减量化处置迫在眉睫[EB/OL]. [2017-03-14]. <http://www.cenews.com.cn/qy/201703/t20170314-824696.html>.
- [8] 雄飞,陈玲,王华,等.湿式氧化技术及其应用比较[J].环境污染治理技术与设,2003,4(5):66-69.
- [9] 宋新南,徐惠斌,房仁军,等.基于 Aspen Plus 的生物质燃烧 NO<sub>x</sub> 生成模拟[J].环境科学学报,2009,29(8):1696-1700.
- [10] 袁言言,黄瑛,张冬,等.污泥焚烧能量利用与污染物排放特性研究[J].动力工程学报,2016,36(11):934-940.
- [11] 霍小华.基于 Aspen Plus 平台的污泥富氧氧化模拟[J].山西电力,2014,(1):48-50.
- [12] 赵晓,王青,程乐明.基于 Aspen Plus 的超临界水氧化污泥处理工艺建模[J].计算机与应用化学,2017,34(12):973-978.
- [13] 李维成,覃小刚,房慧,等.污泥湿式氧化试验研究及经济性分析[J].动力工程学报,2018,38(1):69-73.
- [14] 姜壮.新建污水处理厂投资估算[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [15] 中华人民共和国建设部,标准定额研究所.市政工程投资估算编制办法(建标[2007]164号)[S].北京:中国计划出版社,2007.
- [16] 陈祥,徐福银,包兵,等.污泥处理产物和产品园林利用的分析[J].给水排水,2017,43(6):41-44.
- [17] 徐东海,王树众,公彦猛,等.城市污泥超临界水氧化技术示范装置及其经济性分析[J].现代化工,2009,29(5):55-61.
- [18] 肖琼.处置一吨污泥要花多少钱?[J].环境经济,2015,(S7):36.
- [19] 闫笑炜.污泥处理市场乱象调查[J].能源,2016,(3):64-69.
- [20] 道客巴巴网.污泥焚烧处理技术及工程实例[EB/OL]. [2015-03-11]. <http://www.doc88.com/p-0337214314570.html>. ■