

城镇污水处理厂污泥处理处置问题及资源化利用探讨*

——以 HTU 技术研究与应用为例

王 耘^{1,2} 曹敏颖³

(1. 拜耳材料科技(中国)有限公司, 上海 201507; 2. 澳思(上海)环境科技咨询有限公司, 上海 200120;

3. 上海张江(集团)有限公司, 上海 201203)

摘要 以 HTU 技术为代表的污泥热解技术, 因其产物热值可观、能源转化率较高, 以及其在技术和成本上的优势, 具备良好的发展潜力和应用前景。借助“中澳太湖项目”, 选择江苏省苏州市一家城镇污水处理厂作为研究样本, 采集污泥样品进行 HTU 技术试验, 并分析试验的技术可行性和经济合理性。结果表明, 中国的污泥初步具备了应用 HTU 技术的条件。热解反应后, 气/液态产物占整个产物的 35%(质量分数, 下同)~40%, 产物平均热值达 30 165 kJ/kg, 能源转化率为 77.7%~83.1%。其中, 在 300 ℃、8.5 MPa、停留时间>15 min 下, 产气率达 8.0%, 产物热值达 31 496 kJ/kg, 结果较理想。气/液态产物可进一步加工成液态燃料和能源气。污泥中的大部分重金属、氮和磷等都进入固态产物, 在一定条件下可加工成化肥添加剂。

关键词 污泥 处理处置 资源化利用 HTU 技术

截至“十一五”期末, 中国投入运营的各类城镇污水处理厂超过 2 000 座, 年污水处理量超过 300 亿 m³, 产生污泥超过 2 000 万 t/a, 并将很快突破 3 000 万 t/a。面对如此大规模的污泥量, 解决污泥处理处置问题已成为环保和城市管理工作的一大挑战。

污泥处理处置分为 2 个阶段。一般先对污泥进行浓缩和脱水等(厂内处理), 将污泥含水率控制在 80% 左右, 然后外运进行填埋、焚烧、堆肥、建材利用等处置。传统的污泥处理费用约占污水处理厂运行费用的 20%~50%, 费用昂贵^[1]。目前, 填埋仍是大多数污泥的最终处置方式, 占到 85% 以上。焚烧、堆肥和建材利用等方式, 在一些大城市和发达地区有一定比例的应用。必须看到, 污泥随意抛弃或采用不科学的处置方式进行处置的问题仍然存在, 污泥不处置或处置不当而造成的环境污染时有发生。传统的填埋方式处置成本不足 150 元/t, 且因土地资源日益紧张而备受挑战。污泥资源化是新技术开发与应用的核心之一, 而污泥热解技术是资源化的代表, 其特点是将污泥处理与处置结合起来, 通过热解方式一次性地完成, 真正实现“变废为宝”。

HTU 技术旨在将生物质通过高温热解手段转化为有价值的能源。澳大利亚和荷兰等国已尝试将其运用于污泥处理处置。借助“中澳太湖项目”, 选择江苏省苏州市一家城镇污水处理厂作为研究样本, 采集污泥样品进行 HTU 技术试验, 并分析试验

的技术可行性和经济合理性。笔者担任了中方项目经理, 直接参与并负责试验方案的设计、采样、HTU 试验、数据分析汇总和报告书编制等工作。

1 污泥处理处置主要问题

目前, 中国城镇污水处理基本实现全覆盖, 污水处理任务基本完成。然而, 伴随而来的是污泥处理处置的技术滞后和管理无序化, 污泥污染环境事件呈持续上升之势。中国污泥的处理处置问题主要体现在 3 个方面: (1) 由于资金、技术、政策和土地等多方面原因, 处理处置工作严重滞后, 导致污泥严重“积压”; (2) 处理处置的设施和技术标准较低, 已不能满足现有需求; (3) 过度依赖市场化机制下的企业, 政府监管和保障力度不够, 应对突发性环境污染事件能力不强。

污泥的处理处置问题可进一步归纳为技术和管理 2 个层面: (1) 技术层面。近年来虽发展了很多处理处置技术, 但在应用中暴露出不少问题, 如污泥处理中脱水效果不佳, 造成填埋作业环境恶化; 厌氧消化处理中产生砂砾堆积和运行稳定性差等问题; 填埋场易发滑坡、崩塌事故; 好氧发酵堆肥处置臭味大、占地面积大、重金属难去除、发酵产物质量不稳定; 污泥焚烧高投入和高能耗问题; 污泥热干化工艺高能耗和设备磨损问题等。所有这些问题都极大限制了污泥处理处置技术的快速推进。 (2) 管理层面。国家已颁布了较完整的宏观政策, 一系列的法律法

第一作者: 王 耘, 男, 1981 年生, 硕士, 工程师, 主要从事环境保护工作。

* 中澳环境发展伙伴项目; 中澳太湖水污染治理试点项目。

表1 国内外污泥资源化利用的主要途径

资源化利用	途径	简述
建材利用	制砖	含水率为60%~80%的污泥,与粘土和草木灰混合(掺混质量分数为30%~40%)后,可烧制成砖,砖的性质与掺入的污泥存在密切的关系 ^[2]
	水泥辅料	污泥作为水泥辅料,重金属可彻底固化在水泥熟料中。日本建立了世界上第一家掺入污泥的生态水泥生产线 ^[3-5]
	制陶粒	美国建成了世界上首家利用污泥生产陶粒的工厂,实现了较好的经济和社会效益 ^[6] 。广东成功将脱水污泥和粘土等混合,制成轻质陶粒 ^[7]
热解利用	制生化纤维板	利用污泥中所含有机物能被酶分解这一性质,在碱性条件下加热,制成活性污泥树脂,再压制成板材 ^[8]
	Enersludge技术	澳大利亚珀斯一工厂通过无氧加热污泥至约500℃,使其转化为油、水、不凝性气体和碳等,处理能力达25 t/d ^[9-11]
	HTU技术	在300~350℃、10~18 MPa条件下,通过热化学反应将生物质投料转化为粗生物燃料或其他相似的热解过程 ^[12]
环保利用	制活性炭	污泥中含有较多的碳,可在其中添加无机盐等活化剂,在一定温度下热解炭化制得活性炭 ^[13]
	制粘结剂	污泥本身具有一定热值,可将其作为粘结剂将无烟粉煤加工成型煤 ^[14]
	制生物塑料	污泥可合成可降解生物塑料聚羟基烷酸(PHAs) ^[15]
农林利用	降解毒性物	污泥对毒性极强的氯化化合物具有一定的降解作用 ^[16]
	好氧堆肥	污泥可作为土壤改良剂和肥料进行再利用。去除有毒重金属,提高堆肥质量并控制臭气是难点,氮、磷等物质是否污染地下水也是问题 ^[17-18]

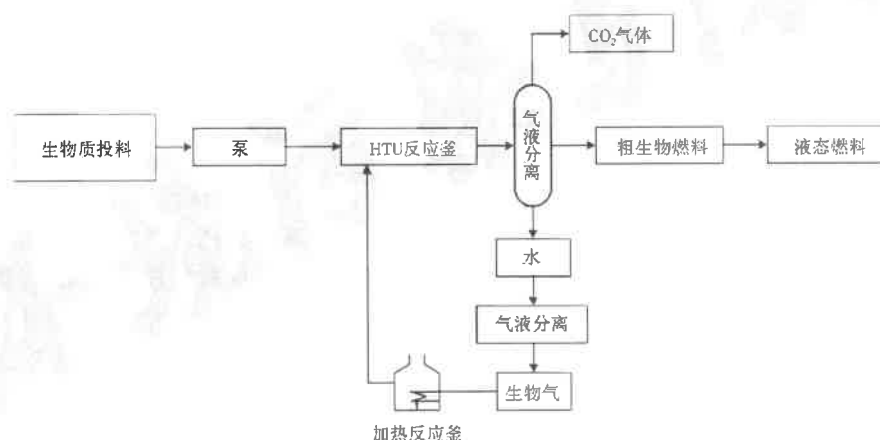


图1 HTU技术简易原理

规和标准陆续出台。然而,政府和企业往往单从经济角度出发,致使处理处置呈现单一化的特征,处置的环境和社会效应不佳。在考虑引进新技术时,往往因其高投入、高运行成本而望而却步。同时,在管理环节上,存在一系列的结构性矛盾并造成连锁效应。如污泥厂内处理不到位,达不到填埋处置要求,造成污泥无法外运;因考虑成本而使得污泥资源化利用受阻等。另外,大部分污水处理厂将污泥处置与污水处理分开,污水处理费中并不完全包含污泥处置费,因而造成处置资金不足。

2 污泥资源化利用

污泥资源化利用在中国尚处于起步阶段。随着未来技术水平和能力的不断提高,资源化利用将进一步得到重视。国外相关的研究和应用已持续

了30多年。部分发达国家已能够系统而有针对性地进行污泥资源化利用,配套的技术也日趋成熟和多样化。国内外污泥资源化利用的主要途径如表1所示。

3 污泥处理处置新技术研究与应用——以HTU技术为例

3.1 HTU技术

HTU技术适用于处理含水率大于50%的生物质投料。相比其他技术省去了污泥脱水和干化等处理,节省了能源和处理成本。国外相关研究表明,经热化学反应得到的粗生物燃料可进一步加工为液态燃料,约占整个产物的20%(质量分数)。HTU技术的简易原理见图1。

HTU技术诞生于荷兰,经过将近30年的不断

表 2 试验的工作计划、目的和方法学介绍

序号	工作计划	目的	方法
1	现场污泥采样	研究中国城镇污水处理厂典型污泥	直接采集未经脱水的含水率为 80% 以上的污泥, 采样分 2 组进行。第 1 组: 分别采集 100 g 左右的 2 个平行样, 用于污泥主成分分析; 第 2 组: 采集 1 000 g 左右的样品, 用于污泥 HTU 技术试验
2	污泥主要成分分析	比较中国污泥与国外污泥的成分, 为分析提供数据支撑	分析指标包括: 氢、氧、重金属、干质量(固定碳、总有机碳、挥发分、灰分)、总氮、总磷和含水率等
3	干污泥样品准备	为将样品送 CSIRO 实验室, 必须在国内对样品进行干化, 脱去污泥中的水分	干污泥样品准备在中国完成, 经出入境检验合格, 寄送至澳大利亚
4	HTU 技术试验	在实验室中将来自中国的污泥样品, 投加至 HTU 反应釜中进行反应	试验设定条件: 300 °C、8.5 MPa 和 340 °C、14.5 MPa。分别进行 2 组不同停留时间(短停留时间 < 10 min, 长停留时间 > 15 min) 的反应
5	技术可行性分析	综合试验结果, 探讨 HTU 技术在中国应用的技术可行性	运用气相色谱和质谱等分析气/液态产物组成
6	经济合理性分析	计算经济投入和产出	依据国外经验, 假设和控制边界条件
7	试验结果交流	向中方相关机构和专家报告试验结果	召开专题研讨会, 介绍 HTU 技术及试验结果

发展, 已经在荷兰、法国、澳大利亚、加拿大等国相继建立了实验室、试验工厂等。

3.2 HTU 技术试验

3.2.1 工作计划和目的

本次试验是项目的重点研究领域之一。试验采集的污泥样品, 先后送中国通标标准技术服务有限公司(SGS)和澳大利亚联邦科学和工业化研究所(CSIRO)的实验室, 分别进行主要成分分析和 HTU 技术试验。试验的工作计划、目的和方法如表 2 所示。

3.2.2 主要成分分析

污泥主要成分分析结果如表 3 所示。

表 3 污泥主要成分分析结果

指标	分析结果
重金属	砷(7.9 mg/kg)、钡(0.4 mg/kg)、镉(1.43 mg/kg)、铬(30.6 mg/kg)、铜(98.2 mg/kg)、镍(19.3 mg/kg)、铅(38.4 mg/kg)、锑(3.0 mg/kg)、硒(2.8 mg/kg)、锌(532 mg/kg)、汞(2.05 mg/kg)。另外, 银和铊未检出
含水率	82.7%
干质量	17.3%, 其中灰分 8.6%、固定碳 4.8%(总有机碳 3.3%), 挥发分 3.9%
氢	0.7%(质量分数)
氧	10.8%(质量分数)
总氮	42 500 mg/kg
总磷	13 500 mg/kg
热值	4 920 kJ/kg

根据分析结果, 结合污水处理厂特点, 可得到以下结论: (1) 样品能较好代表中国城镇污水处理厂污泥特点, 污泥含水率达 80% 以上; (2) 相比国外污泥, 污泥中有机物的含量和热值相对较低, 但氮和磷的含量较高; (3) 污泥产自主要处理生活污水的污水处理厂, 接纳的工业废水有限。

3.2.3 HTU 试验

HTU 反应釜容积为 129.4 mL, 可连续加热加压至 350 °C、18.5 MPa。HTU 试验的主要方法为:

(1) 每次试验时, 取 5~6 g 干污泥样品, 溶解于 50~60 g 蒸馏水中, 保持投料的质量分数在 9%~10%; (2) 将污泥投料于 HTU 反应釜中密封, 向釜内充入氩气(150 mL/min, 约 15 min) 去除釜内的残余空气; (3) 加压 HTU 反应釜至 2.0 MPa 以去除釜内水蒸气, 并再次检查 HTU 反应釜密封性; (4) 分别连续加热加压反应釜至 300 °C、8.5 MPa 和 340 °C、14.5 MPa, 控制停留时间; (5) 当经过停留时间后, 停止加热并冷却至室温, 此时釜内包括气/液态产物, 釜内压力高于加热前压力, 通过压力变化可推算出气态产物产量; (6) 将气态产物直接导入由热导检测器(TCD)和火焰电离检测器(PID)组成的气相色谱, 分析气态产物组成; (7) 打开 HTU 反应釜, 通过过滤的方法分离液态产物和固体; (8) 质谱分析液态产物组成; (9) 固体经称量后, 分析其无机物(重金属)组成。图 2 列举了 340 °C、14.5 MPa 下, 污泥样品的反应过程。

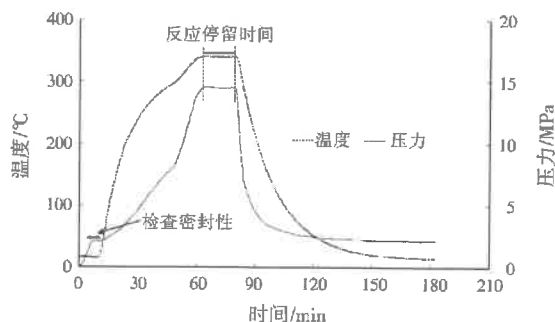


图 2 340 °C、14.5 MPa 下污泥 HTU 试验过程

3.3 技术可行性分析

经气相色谱分析, 设定条件下的气态产物组成如表 4 所示。气态产物中 CO_2 所占比例最大, 且该比例随着停留时间的延长而升高, 这是由气态产物中的 CO 转化而来; H_2 所占比例在 340 °C、14.5

MPa 下相对更高。

表4 气态产物组成及体积分数 %

项目	340 °C、14.5 MPa		300 °C、8.5 MPa	
	<10 min	>15 min	<10 min	>15 min
H ₂	3.78	3.06	2.73	2.24
CO	4.49	3.32	4.02	3.69
CO ₂	83.33	86.26	81.28	87.91
CH ₄	1.06	1.09	5.21	0.57
C ₂ H ₄	0.78	0.71	2.17	0.48
C ₃ H ₆	2.07	1.68	1.60	1.66
C ₃ H ₈	0.23	0.24	0.20	0.10
C ₄ H ₈	3.12	2.48	2.33	2.71
C ₄ H ₁₀	0.13	0.17	0	0.08
C ₅ H ₁₀	1.01	0.99	0.46	0.55

液态产物分析结果表明:液态产物主要为碳原子数在3~6的烷烃和烯烃,如C₃H₆、C₄H₁₀、C₆H₁₄、C₅H₁₀等,且在300 °C、8.5 MPa下得到的比例相对较高;液态产物中包含一定比例的丙酮、丁酮等,且比例随着停留时间的延长而升高。

各条件下的平均产气率为6.8%,在300 °C、8.5 MPa、长停留时间下,产气率最高达8.0%。气/液态产物平均热值为30 165 kJ/kg,且在300 °C、8.5 MPa、长停留时间下,产物热值最高,达31 496 kJ/kg。各条件下的能源转化率为77.7%~83.1%。

残余固体中大部分为灰分,占残余固体干质量的82%~85%,碳约占7%~8%,SiO₂占51.8%。在300 °C、8.5 MPa下,超过90%(质量分数)的汞仍在残余固体中;而在340 °C、14.5 MPa下,只剩不到50%。同时,各条件都发现了类似含量的金属氧化物,如氧化铝、氧化铜等。此外,在温度较低时,硝酸盐、磷酸盐、硫化物、钙、镁和锌等无机物的含量较高。

根据设定的条件,可得到以下结论:(1)来自中国城镇污水处理厂的污泥初步具备应用HTU技术的条件。有价值的气/液态产物包括烷烃、烯烃、酮类、H₂和CO等,约占整个产物的35%(质量分数,下同)~40%,产物平均热值30 165 kJ/kg,能源转化率为77.7%~83.1%。产量虽比国外同类污泥略低,但产物组成较理想,可加工成液态燃料、能源气等。在300 °C、8.5 MPa、长停留时间下,产物最为理想,产气率达8.0%,产物热值达31 496 kJ/kg。(2)污泥中的有毒重金属、营养物等绝大部分存在于残余固体中,便于收集并可作为化肥添加剂,实现残余固体资源化。(3)试验中,随着停留时间的延长,产物中酮类化合物的比例显著升高,有助于将液态

产物进一步加工成液态燃料。(4)由于本次试验规模较小,因而只能在一定程度上说明结果。试验中未投加催化剂,反应速率相对较慢。同时,未考虑单位时间内的反应效率。

3.4 经济合理性分析

由于在世界范围内HTU技术仍处于研究和试验阶段,商业化应用的实例有限。因而,为便于进行分析,需要假定如下条件:(1)假定在中国一座人口约500万的城市;(2)假定该市城镇污水处理厂产生含水率为80%的污泥量为400 t/d;(3)假定该污水处理厂目前污泥填埋处置费用为200元/t,未来每年以2%~4%的速度增长,该笔费用将来全部支付给HTU装置;(4)假定在商业化应用HTU技术时,约有20%(质量分数)的产物可作为液态燃料销售,20%(体积分数)左右产物为生物气,用于加热HTU装置;(5)假定暂不考虑残余固体作为化肥添加剂的收益;(6)假定项目周期为30年,液态燃料销售价格和装置运营成本以年均2%~4%的速度增长;(7)假定不考虑税收因素。

根据国外HTU试验工厂经验,进行计算并分析,结果如表5所示。

表5 经济合理性分析结果

主要经济指标	分析结果
污泥投料规模	15万 t/a
投资成本	5亿~7亿元
主营收入	液态燃料销售:6 000元/t×6 000 t=3 600万元(第1年) 原污泥处置费用:200元/t×15万 t=3 000万元(第1年)
运营成本	1 500万元/年(第1年)
年投资回报率	约7.3%~10.2%
回收成本	约11~13年

在保证主营收入的前提下,HTU技术具备较好的投资回报率,并能在项目中期开始实现盈利。基于以上假定条件初步判断,该技术在中国应用基本可行。需要指出的是:由于条件限制,本次分析的结果仅具有初步导向性意义。未来随着HTU技术商业化应用的增多,必将能提供更多实例参考,也将有助于更加全面准确地分析该技术的经济合理性。

4 结 语

(1)当前,中国城镇污水处理厂污泥处理处置现状决定了资源化利用将是未来解决污泥问题的重要途径之一。以HTU技术为代表的污泥热解利用等新技术,因其产物热值可观、能源转化率较高,以

及其在技术和成本上的优势,具备良好的发展潜力和应用前景。

(2) 中国的污泥初步具备了应用 HTU 技术的条件。经 HTU 反应后,气/液态产物占 35%~40%,产物平均热值达 30 165 kJ/kg,能源转化率为 77.7%~83.1%。在 300 ℃、8.5 MPa、长停留时间下,产气率达 8.0%,产物热值达 31 496 kJ/kg,结果较为理想。气/液态产物可进一步加工成液态燃料和能源气。同时,污泥中的大部分重金属、氮和磷等都进入固态产物中,在一定条件下可进一步加工成化肥添加剂。

(3) 基于假定条件的经济合理性分析表明,HTU 技术未来在中国应用基本可行。在假定投料规模 15 万 t/a、投资 5 亿~7 亿元、保证主营收入的前提下,项目年投资回报率约 7.3%~10.2%,并能在项目中期开始实现盈利。

参考文献:

- [1] 唐小辉,赵力.污泥处置国内外进展[J].环境科学与管理,2005,30(3):68-70.
- [2] 任伯帆,田胜海.城市给水厂给水污泥用于烧制粉煤灰-粘土砖的试验[J].城市环境与城市生态,2003,18(5):98-102.
- [3] 张光明,张信芳,张盼月.城市污泥资源化技术进展[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [4] ONAKA T. Sewage can make Portland cement; a new technology for ultimate reuse of sewage sludge wet air oxidation[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(8): 93-98.
- [5] 王世忠.日本生态水泥的发展动向[J].中国建材科技,2001(3):36-38.
- [6] 谢容珍.国内城市污水厂污泥的资源化利用[J].广东化工,2008,35(8):110-112.
- [7] 黄德志,何少先,江映翔.污水处理厂脱水污泥制作轻质陶粒添加剂的研究[J].环境科学学报,2000,20(1):130-132.
- [8] 尹军,谭学军.污水污泥处理处置与资源化利用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [9] 何品品,顾国维,邵立明,等.低温热化学转化污泥制油技术[J].环境科学,1996,17(5):82-86.
- [10] HUDSON J A, CCEM LOWE P. Current technologies for sludge treatment and disposal[J]. Water and Environment Journal, 1996, 10(6): 436-441.
- [11] 刘龙茂,陈建林,李娣,等.城市生活污水污泥低温催化热解实验研究[J].环境科学与技术,2009,22(1):64-69.
- [12] DJAFER M, LUCK F, ROSE J P, et al. Transforming sludge into a recyclable and valuable carbon source by wet air oxidation[J]. Water Science and Technology, 2000, 41(8): 77-83.
- [13] 邵瑞华,房平,司金印.污水处理厂污泥制备活性炭的研究[J].安徽农业科学,2010,38(31):17632-17635.
- [14] 唐黎华,朱子彬,赵庆祥,等.活性污泥作为气化用型煤粘结剂[J].华东理工大学学报,1998,24(5):506-509.
- [15] 张波,张泽滨.利用剩余活性污泥合成生物塑料及其工艺与参数的研究[J].西南民族大学学报:自然科学版,2011,37(1):114-118.
- [16] 郝丽芳,周岳溪,张寒霜.厌氧颗粒污泥对五氯酚(PCP)的吸附、解吸及生物降解[J].中国环境科学,1999,19(1):5-8.
- [17] 丁永伟.活性污泥和生物膜复合工艺的特性及运行效能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [18] 朱开金,马忠亮.污泥处理技术及资源化利用[M].北京:化学工业出版社,2007.

编辑:黄 苇 (修改稿收到日期:2011-11-08)

(上接第 78 页)

纸黑液资源化多产品工业共生方案进行了物质流、能量流的分析计算,通过环境、经济、技术和市场诸因素的综合评价,提出了碱法造纸-黑液-氧化铝联产的工业共生模式。该工业共生模式不仅消除了传统造纸黑液的处理方法对环境的污染,而且将造纸黑液变废为宝,由污染源直接变成生产原料加以利用,为造纸黑液资源化提供一种可以借鉴的发展模式,同时也为我国造纸工业提供了一条清洁生产可持续发展之路。

参考文献:

- [1] 兰泽金,马汉鹏.造纸黑液治理利用技术现状[J].工业水处理,2008,28(7):9-13.
- [2] 王性仁.蒸发燃烧一体化草浆黑液碱回收系统[J].中华纸业,2008,29(2):61-66.
- [3] NAQVI M, YAN J, DAHLQUIST E. Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills; a critical review[J]. Biore-source Technology, 2010, 101(21): 8001-8015.
- [4] ZAIEDA M, BELLAKHAL N. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(2/3): 995-1000.
- [5] 洪源.造纸黑液资源化——麦草碱法制浆黑液处理新途径[J].水资源保护,2000(4):27-30.
- [6] 王宏斌.造纸黑液资源化全回收技术的应用[J].山西化工,2005,25(2):76-78.
- [7] ZHOU Mingsong, KONG Qian, PAN Bing, et al. Evaluation of treated black liquor used as dispersant of concentrated coal-water slurry[J]. Fuel, 2010, 89(3): 716-723.
- [8] 郭海军,王首旗,陈东.碱法化学制浆——氧化铝联产处理黑液新工艺[J].中华纸业,2008,29(13):58-61.
- [9] 符言,张阳春.氧化铝厂设计[M].北京:冶金工业出版社,2008.
- [10] 杨长付.烧结法生产氧化铝硅渣处理方法的工艺探讨[J].世界有色金属,2001(3):41-44.
- [11] 周茂贤.苛化白泥用于蒸压灰砂砖生产的探讨[J].中华纸业,2006,27(11):66-67.
- [12] 赵仕明,胡英明,董克锋.造纸污泥制作大棚番茄专用肥的研究[J].中华纸业,2010,31(13):62-65.

编辑:黄 苇 (修改稿收到日期:2011-11-09)