

循环流化床一体化污泥干化焚烧工艺的冷态实验研究

李云玉¹, 吕清刚², 朱建国², 朱治平²

(1. 中国科学院研究生院, 北京市 海淀区 100190;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190)

Cold Tests on Drying and Incineration Integration Technology of Sewage Sludge in a Circulating Fluidized Bed

LI Yunyu¹, LÜ Qinggang², ZHU Jianguo², ZHU Zhiping²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: A new technique integrating drying and incineration of sewage sludge in a circulating fluidized bed (CFB) was applied, and cold experiments were conducted. The diameter of main bed which coupled with the fluidized bed dryer was 150 mm, and the height was 3 500 mm; the pneumatic control valve used in the tests was asymmetric. The results show that the key factor which influences the system's safe and steady operation is the coupling performance of pressure in two circulation circuits: the solids were returned to the main bed directly and the solids were returned through fluidized bed dryer; The influence of main bed fluidization velocity on circulation flow rate of the system and returning flow rate of pneumatic control valve in two sides is similar, but the variation rate of flow rate in these two sides is different. The pressure balance pipe connecting the main bed side and fluidized bed dryer side on the pneumatic control valve is important for the steady operation of the system of the integration of drying and incineration of sewage sludge in a CFB.

KEY WORDS: circulating fluidized bed (CFB); sewage sludge; integration; drying; incineration; cold tests

摘要: 采用一种新型的循环流化床污泥干化焚烧一体化工艺, 设计建造了冷态实验装置, 进行实验研究。实验装置中, 鼓泡流化床干化器与直径 150 mm、高 3 500 mm 的循环流化床主床耦合, 实验用气动控制阀为左右非对称结构。实验结

果表明: 系统中直接返回主床和通过干化器返回主床两个循环回路之间的压力耦合关系是系统稳定运行的关键; 主床流化速度的变化对系统循环流率及气动控制阀两侧返料流率的影响趋势一致, 但干化器侧与主床侧的循环流率的变化速率不同; 气动控制阀两侧返料管所连压力平衡管对循环流化床一体化污泥焚烧系统稳定运行非常重要。

关键词: 循环流化床; 污泥; 一体化; 干化; 焚烧; 冷态实验

0 引言

目前, 我国污水处理厂每年排放的污泥量(干重)约 140 万吨, 且以每年 10% 以上的速度增长^[1]。污泥的成分非常复杂, 很难通过沉降进行彻底地固液分离。污泥的处理成为污水处理工作面临的重大挑战之一^[2-4]。在众多的污泥处置方法中, 焚烧处理可以在高温燃烧状态下有效地去除污泥中的有毒物质, 灰渣可以作为建筑原材料使用^[3-5], 实现污泥减量化、稳定化和无害化处理, 是当前国际上污泥热处理的主要形式^[4]; 而流化床焚烧技术以气固掺混好、焚烧彻底及污染物排放低等优点被广泛研究和采用^[2-14]。污泥干化焚烧是指将机械脱水污泥先进行加热干燥, 减少污泥焚烧过程的辅助燃料消耗量, 但现有工艺中干化和焚烧由两套基本独立的系统来完成, 工艺比较复杂, 设备初投资高^[2, 13-16]。

中国科学院工程热物理研究所吕清刚^[17]等提出了循环流化床一体化污泥焚烧技术工艺, 并在此基础上开展了相关研究^[9-10]。这个新工艺将污泥与床料的混合、干化、焚烧相结合, 最大限度利用了

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX07317-003004)。

National Major Special Science and Technology Project (2009ZX07317-003004).

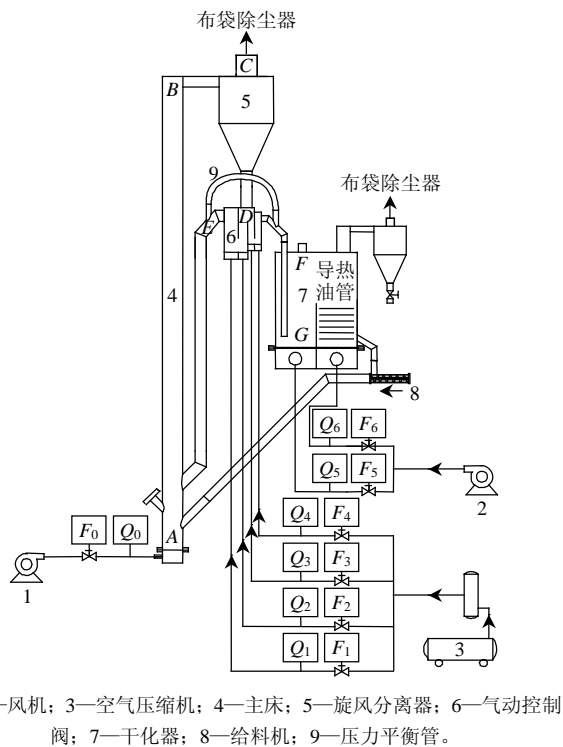
污泥焚烧产生的热量。该工艺中,从干化器排出的干污泥在循环流化床焚烧炉焚烧产生的高温烟气经过旋风分离器,分离下的循环灰通过气动控制阀,一部分进入干化器;含水率80%的湿污泥通过污泥给料装置加入干化器,在流化状态下干化,从干化器中连续排出的污泥含水率降低到20%以下,直接被送入循环流化床焚烧炉中焚烧。中国科学院工程热物理研究所建立了一个循环流化床一体化污泥干化焚烧冷态实验台,进行了一系列流动模拟实验,以期掌握该工艺的关键技术之一——物料循环、流动控制和压力分布特性,验证并完善循环流化床一体化污泥干化焚烧工艺,为热态实验台设计和运行及工程设计提供参考。

1 实验

1.1 实验装置

循环流化床一体化污泥焚烧冷态实验系统见图1,包括主床及旋风分离器、气动控制阀、干化器、供风系统和测量系统等。为了便于观察物料流动特性,气动控制阀和干化器均采用有机玻璃制造。主床直径150 mm,高3500 mm。

旋风分离器分离下来的物料经气动控制阀,一部分返入主床,另一部分返入干化器,经干化器的给料装置再返回主床。气动控制阀为带隔板、左右



1、2—风机; 3—空气压缩机; 4—主床; 5—旋风分离器; 6—气动控制阀; 7—干化器; 8—给料机; 9—压力平衡管。

图1 循环流化床一体化污泥焚烧冷态实验台系统图
Fig. 1 Schematic diagram of the experiment system

非对称结构。隔板未完全将气动控制阀分成两部分,见图2,与公开资料^[18-23]中的结构不同。主床侧水平孔口面积 A_1 与立管横截面积 A_0 之比 $\lambda_1 = A_1/A_0 \approx 2$,干化器侧水平孔口面积 A_2 与立管横截面积 A_0 之比 $\lambda_2 = A_2/A_0 \approx 0.8$ 。气动控制阀的调节风由4个独立的布风管提供。

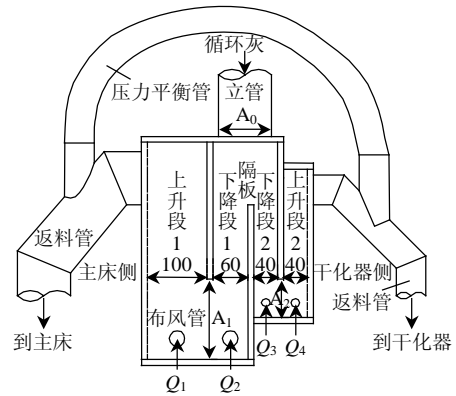


图2 气动控制阀结构图(单位: mm)

Fig. 2 Diagram of the pneumatic control valve (mm)

送入气动控制阀的各调节风流量用流化数表示: $N_i = (Q_i/A_i)/u_{mf}$, 式中: N_i 为流化数; Q_i 为调节风量; A_i 为调节风量对应的横截面积, $i=1,2,3,4$, 分别对应气动控制阀主床侧上升段1、主床侧下降段1、干化器侧下降段2、干化器侧上升段2, 如图2所示; u_{mf} 为循环物料的临界流化速度。

干化器的横截面尺寸为600 mm × 320 mm, 高700 mm, 见图3。其下部由高320 mm的隔板分割成两部分, 右侧部分有若干错列布置的塑料管, 模拟导热油管。流化风由底部风室进入干化器, 隔板两侧风室完全隔离。干化器顶部出口接旋风分离器和布袋除尘器。

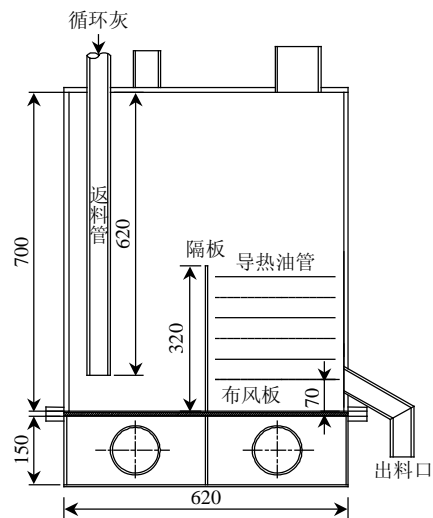


图3 鼓泡流化床干化器结构图(单位: mm)

Fig. 3 Diagram of the fluidized bed dryer (mm)

1.2 实验物料

实验物料为 0~0.7 mm 的河砂，50% 切割粒径 d_{50} 为 0.298 mm。实验测得其临界流化速度为 0.084 m/s。

1.3 实验方法

通过大量的预备实验，利用循环流化床压力平衡的原理^[18-19]，掌握了系统的压力平衡调节方法。通过调节干化器出口和主床的旋风分离器出口的压力关系，实现系统内合理的压力分布。

王伟和吕清刚等^[20-21]对带气动控制阀的循环流化床多联供系统进行了冷态试验，本文所用的气动控制阀的原理与其相同。同样，主床流化速度在合理范围内变化对系统的压力平衡分布及系统的物料循环和流动控制有一定影响，为此，本文固定气动控制阀各调节风流化数分别为 $N_1=1.3$ 、 $N_2=0.5$ 、 $N_3=0.8$ 、 $N_4=1.2$ ，重点研究主床流化速度对系统压力分布及气动控制阀的影响特性。

假设气动控制阀的左右两个下降段内循环物料的流动为柱塞流，在下降段表面标上坐标刻度，用秒表记录特定颗粒向下流动特定长度所需时间，计算出相应下降段的物料流率。气动控制阀左右两侧的循环物料流率之和为系统总循环流率。

吕清刚等^[21]的实验结果表明：气动控制阀两侧出口压力相同时，气动控制阀的调节风对循环物料流率的控制和调节作用较好。为此，在气动控制阀主床侧和干化器侧返料管(见图 2)顶部连接压力平衡管。

实验中的压差采用差压变送器(精度 0.25 级)进行测量；气动控制阀各调节风流量与主床、干化器流化风量分别采用质量流量控制器(精度 0.2 级)和气体涡轮流量计(精度 1 级)进行测量；螺旋给料机转速通过变频器进行调节。测量中的不确定度主要来源为同一条件下被测量的各种随机影响与变化。对所得实验结果的重现性进行了检验，检验结果表明重现性良好。

实验数据全部经 Agilent 设备采集，用计算机显示并实时记录。

2 实验结果与分析

2.1 系统的压力分布

循环流化床一体化污泥焚烧冷态实验系统的物料流动路线与常规循环流化床的有较大区别。从旋风分离器分离下来的物料，一部分由气动控制阀一侧直接返入主床，这与常规循环流化床是相同

的；另一部分物料由气动控制阀另一侧送入干化器，从干化器排出后给入主床。系统的压力平衡必须在这两个循环回路上同时满足。本文两个循环回路的压力关系。

1) 主床侧循环回路。

循环流化床中的物料沿循环回路流动，为了保持循环流化床的正常运行并维持一定的循环流率，循环回路必须满足合适的压力关系。在主床侧循环回路中，主床、气动控制阀、旋风分离器各部分压降和等于 0(符号对应位置见图 1)，即

$$\Delta P_{AB} + \Delta P_{BC} + \Delta P_{CD} + \Delta P_{DE} + \Delta P_{EA} = 0 \quad (1)$$

2) 干化器侧循环回路。

干化器侧循环回路由主床、旋风分离器、气动控制阀与干化器等组成。在循环回路中，各部分压降和等于 0，即

$$\Delta P_{AB} + \Delta P_{BC} + \Delta P_{CD} + \Delta P_{DE} + \Delta P_{EF} + \Delta P_{FG} + \Delta P_{GA} = 0 \quad (2)$$

这两个循环回路的压力之间的耦合关系非常重要，是循环流化床一体化污泥焚烧工艺的关键特性之一。

图 4 为系统的压力分布图，可以看出，系统的压力循环回路呈“叠 8 字”形。干化器顶部压力略高于压力平衡管处压力，说明气动控制阀干化器侧的调节风不会通过返料管(见图 3)进入干化器，而是通过压力平衡管进入气动控制阀主床侧的返料管(见图 2)，和主床侧的调节风及物料一起进入主床。图 4 中亦显示，压力平衡管处的压力高于同高度主床中的压力，这说明主床中不会有“烟气”通过气动控制阀主床侧返料管进入气动控制阀或通过压力平衡管进入干化器侧。压力平衡管平衡气动控制阀两侧的压力，保证气动控制阀两侧压力差别对其返料特性的影响及对系统稳定运行的影响降至最小。

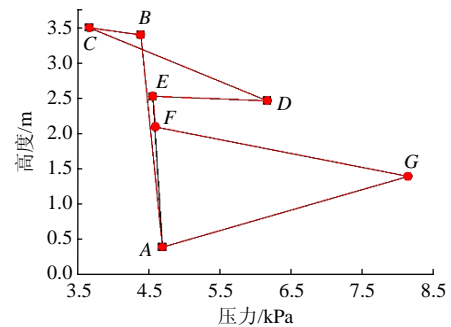


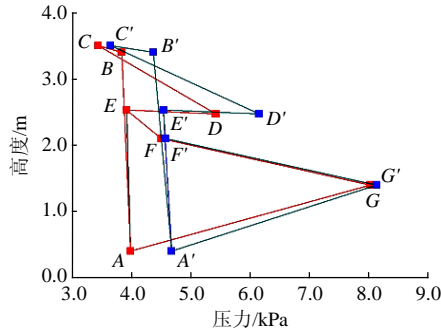
图 4 系统压力分布图

Fig. 4 Diagram of the pressure distribution

2.2 主床流化速度对系统压力分布的影响

在保持气动控制阀各调节风量及干化器流化

速度不变的条件下,主床流化速度不同时,循环流化床一体化污泥焚烧冷态实验系统内压力变化见图5。



A—G: 主床流化风量 190 m³/h 时系统压力分布;
A'—G': 主床流化风量 220 m³/h 时系统压力分布;

图5 主床流化速度对压力分布的影响

Fig. 5 Effect of the fluidization velocity in the main bed on the pressure profile

主床流化速度升高,主床密相区的高度降低,主床上下的物料浓度趋于均匀,旋风分离器的入口物料浓度升高,系统的物料循环流率增加,主床的压降、旋风分离器压降、立管压降及气动控制阀的压降均增大。通过调整干化器底部出口给料机的给料频率,保持干化器内料层高度基本稳定,干化器的流化风量不变,因此通过干化器床层的压降基本不变(图5中F点和G点基本不变)。由图5中可看出,除F、G点外,随着主床流化速度的增大,系统压力平衡分布出现了平移特性。

2.3 主床流化速度对循环流率及气动控制阀返料特性的影响

主床流化速度对系统循环流率及干化器侧、主床侧循环流率的影响对比如图6所示(图中循环流率的计算基准截面为立管横截面)。由图6可见,主床流化速度对系统物料流动控制及干化器侧、主床侧物料流动控制均可以分为两种模式。一种是在主床流化速度较低时(3.0~3.3 m/s),随着主床流化速度

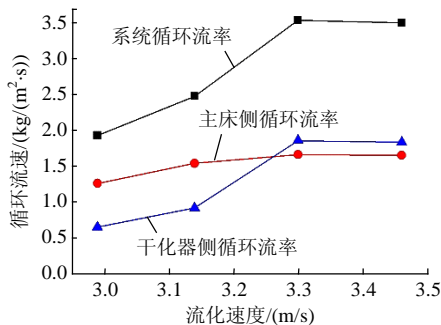


图6 主床流化速度对各循环流率的影响

Fig. 6 Effect of fluidization velocity in the main bed on each circulation flowrate

的增加,系统、干化器侧及主床侧的物料循环流率均不断增大;此时调整主床流化速度可以较好地实现对系统物料流动的控制。另一种是当主床流化速度较大时(>3.3 m/s),主床流化速度继续增大,气动控制阀的各返料流率均趋于平缓;此时主床流化速度对系统物料流动的控制作用不明显。可见,主床流化速度增大到一定程度,主床流化速度对系统物料流动控制作用减弱。但主床流化速度的变化过程中气动控制阀表现出较好的自平衡返料特性,能够实现连续稳定的返料。在确定的调节风量下,这种物料的自平衡返料特性主要是通过立管中的料位高度及物料空隙率的自动调整来实现的^[24]。

由图6亦可看到,在主床流化速度为3.3 m/s时,干化器侧的物料循环流率已经超过主床侧的物料循环流率,即随着主床流化速度的增大,干化器侧物料循环流率的增加速率大于主床侧物料循环流率的增加速率。分析原因为,在主床流化速度较小时,随着主床流化速度的增大,循环物料流率增加,立管内料位高度增大,因此料位高度产生的较高压力使一部分下降段的调节风进入上升段,从而使物料循环流率增大^[25-26]。由于本实验用气动控制阀,其干化器侧下降段2比主床侧下降段1的流通面积小(见图2),水平孔口面积与立管横截面积之比 $\lambda_2 < \lambda_1$,因此干化器侧返料对立管内料位高度即主床流化速度的变化较敏感,所以干化器侧物料循环流率的生长速率较大。

随着主床流化速度的继续增大,更多的物料通过主床进入旋风分离器,立管内料位高度增大较大,物料空隙率减小,此时气动控制阀两下降段调节风量的物料松动能力均相对较弱,致使气动控制阀两侧的物料输运能力受限,系统的物料循环流率趋于平缓,干化器侧返料流率占总循环流率比亦趋于平缓,如图7所示。由图7可见,主床流化速度

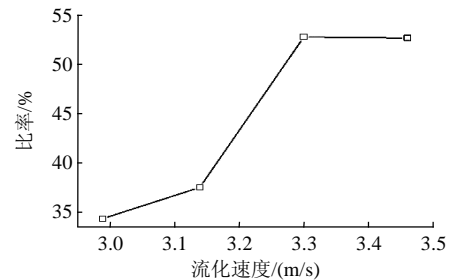


图7 主床流化速度对干化器侧循环物料流率占系统总物料流率比率的影响

Fig. 7 Effect of fluidization velocity in the main bed on the ratio of circulation flowrate on the fluidized bed dryer side to the system

对干化器侧物料循环流率占系统总循环流率的百分比的控制作用亦可分为两种模式。其形式和原因与前述主床流化速度对系统物料流动的控制相同。

3 结论

通过对实验结果分析, 得出如下结论:

1) 循环流化床一体化污泥焚烧系统中存在两个压力平衡回路, 一路为常规循环流化床压力平衡回路, 一路为干化器压力平衡回路。两个循环回路间的压力耦合关系是系统稳定运行的关键。

2) 主床流化速度的改变不仅影响系统循环物料流率, 还会影响气动控制阀的两侧物料循环流率分配。系统物料循环流率及主床侧、干化器侧物料流率均随着主床流化速度的增加分成两种控制模式; 主床流化速度在一定范围时可以较好地实现对系统及气动控制阀两侧的物料流动与分配的控制; 干化器侧受气动控制阀左右非对称结构的影响, 物料流率随主床流化速度增大的增加速率比主床侧大。

3) 气动控制阀两侧返料管所连压力平衡管的存在一方面使气动控制阀各调节风的调节特性受两侧压差的影响较小, 实现灵活调控; 一方面保证了循环流化床一体化污泥焚烧系统的安全、稳定运行。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 污水处理厂污泥处理处置最佳可行技术导则(编制研究报告)[EB/OL]. 2008-11-28[2010-02-01]. http://www.zhb.gov.cn/info/bgw/bbgt/200811/t20081128_131764.htm. Ministry of Environment Protection of the People's Republic of China. Guidelines for best available techniques of sludge treatment and disposal in sewage treatment plant (the preparation of research reports)[EB/OL]. 2008-11-28[2010-02-01]. http://www.zhb.gov.cn/info/bgw/bbgt/200811/t20081128_131764.htm(in Chinese).
- [2] 徐强, 张春敏, 赵丽君. 污泥处理处置技术及装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-10.
Xu Qiang, Zhang Chunmin, Zhao Lijun. Treatment and disposal technologies and devices of sewage sludge[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 1-10(in Chinese).
- [3] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion[J]. Progress in Energy And Combustion Science, 1999, 25(1): 55-116.
- [4] Fyttili D, Zabanitout A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(1): 116-140.
- [5] Otero M, Diez C, Calvo L F, et al. Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS[J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 22(4): 319-329.
- [6] Besma K, Frederic M, Fethi Z, et al. Use of a transient model to simulate fluidized bed incineration of sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 135(1-3): 200-209.
- [7] 吕清刚, 李志伟, 那永洁, 等. CFBC 混烧城市污泥与煤: N_2O 和 NO 的排放[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 339-342.
Lü Qinggang, Li Zhiwei, Na Yongjie, et al. N_2O and NO emissions from co-firing sewage sludge with coal on CFBC[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(1): 339-342(in Chinese).
- [8] 吕清刚, 范晓旭, 那永洁, 等. 城市下水污泥和煤/LPG 在循环流化床上的混烧实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 163-166.
Lü Qinggang, Fan Xiaoxu, Na Yongjie, et al. Co-combustion of wet sewage sludge and coal/LPG in a pilot scale circulating fluidized bed[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 163-166(in Chinese).
- [9] 侯风云. 城市下水污泥流化床干化特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
Hou Fengyun. Reserch on the drying and characteristics of sewage sludge in a fluidized bed[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2007(in Chinese).
- [10] 李大庆. 城市下水污泥的干化焚烧一体化技术实验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
Li Daqing. Experimental studies on drying and incineration integration technology of municipal sewage sludge[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009(in Chinese).
- [11] 李晓东, 岑宇虹. 污泥流化床焚烧技术的研究及应用[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(2): 159-162.
Li Xiaodong, Cen Yuhong. Study of sludge fluidized bed incineration technology and its application[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8(2): 159-162(in Chinese).
- [12] 矫维红, 那永洁, 郑明辉, 等. 城市下水污泥焚烧过程中二次污染物排放特性的实验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(42): 74-77.
Jiao Weihong, Na Yongjie, Zheng Minghui, et al. Experimental study on pollutant emissions of sewage sludge incineration[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(42): 74-77(in Chinese).
- [13] Sängera M, Werther J, Ogada T. NO_x and N_2O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge[J]. Fuel, 2001, 80(2): 167-177.
- [14] Besma K, Frederic M, Fethi Z. Transient mathematical modelling of a fluidized bed incinerator for sewage sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(2): 178-191.
- [15] Murakami T, Suzuki Y, Nagasawa H, et al. Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(6): 778-783.
- [16] Cammarota A, Chirone R, Salatino P. Attrition phenomena during fluidized bed combustion of granulated and mechanically dewatered sewage sludges[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 3017-3024.
- [17] 吕清刚, 那永洁, 高鸣, 等. 一种带复合干燥器的循环流化床湿污泥干化焚烧处理方法: 中国, CN200510077292.X [P]. 2006-12-27.
Lü Qinggang, Na Yongjie, Gao Ming, et al. A method for drying and incineration the wet sludge with the combined dryer: China, CN200510077292.X [P]. 2006-12-27 (in Chinese).
- [18] 王擎, 骆仲泱, 岑可法, 等. 循环流化床锅炉循环回路流体流动过程动态模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 31-35.
Wang Qing, Luo Zhongyang, Cen Kefa, et al. A overall fluid flow process dynamic model of circulating loop for circulating fluidized

- bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 31-35(in Chinese).
- [19] Kim S W, Kim S D, Lee D H. Pressure balance model for circulating fluidized beds with a loop-seal[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 41(20): 4949-4956.
- [20] 王伟, 范晓旭, 那永洁, 等. 循环流化床多联供试验台的冷态试验研究[J]. 锅炉技术, 2006, 37(4): 40-43.
Wang Wei, Fan Xiaoxu, Na Yongjie, et al. Cold Experiment on a circulating fluidized bed multi-generation system[J]. Boiler Technology, 2006, 37(4): 40-43(in Chinese).
- [21] 吕清刚, 王斌, 那永洁, 等. 循环流化床多联供试验台调节特性的试验研究[J]. 化学工程, 2009, 37(12), 75-78.
Lü Qinggang, Wang Bin, Na Yongjie, et al. Experimental study on control characteristics of circulating fluidized bed multi-generation system[J]. Chemical Engineering(China), 2009, 37(12), 75-78(in Chinese).
- [22] 骆仲泱, 王勤辉, 方梦祥, 等. 煤的热电气多联产技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 61-74.
Luo Zhongyang, Wang Qinhuai, Fang Mengxiang, et al. Multi-generation technology and engineering projects of heat, power and gas of coal[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 61-74(in Chinese).
- [23] 高鸣, 吕清刚, 贺军. 循环流化床物料气动控制阀结构的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 51-57.
Gao Ming, Lü Qinggang, He Jun. An experiment study on pneumatic control valve in circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 51-57(in Chinese).
- [24] Basu P, Butler J. Studies on the operation of loop-seal in circulating fluidized bed boilers[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1723-1731.
- [25] Yang S, Yang H R, Zhang H, et al. Impact of operating conditions on the performance of the external loop in a CFB reactor[J]. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48(4): 921-926.
- [26] Kim S W, Kim S K. Effects of particle properties on solids recycle in loop-seal of a circulating fluidized bed[J]. Powder Technology, 2002, 124(1-2): 76-84.



李云玉

收稿日期: 2010-04-02。

作者简介:

李云玉(1984), 男, 博士研究生, 主要从事湿污泥循环流化床一体化干化焚烧技术研究, liyunyu@iet.cn;

吕清刚(1963), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事多种燃料循环流化床高效低污染燃烧技术的研究和开发工作。

(责任编辑 王庆霞)