

旋风降膜反应器中降膜流动特性试验研究

朱玉雯, 高继慧, 苏伟, 杜谦, 秦裕琨

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Characteristics of Falling Liquid Film Along the Surface of a Centrifugal Water-film Reactor

ZHU Yu-wen, GAO Ji-hui, SU Wei, DU Qian, QIN Yu-kun

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: The characteristics of falling liquid films flowing down a vertical cylinder of the centrifugal reactor were studied experimentally. The film thickness was measured by wire conductance technique, and the obtained data were statistically processed. The mean film thickness and variance were used to describe the characteristics of film thickness and fluctuation. The results show that the rotating gas has interference to the falling film prominently, especially on gas inlet section. The water distributes unevenly as a result of falling film flowing inflection. With an increase of the inlet gas velocity, the inflection gets obviously. When inlet gas velocity gets to 20 m/s at the flow rate of 0.16 L/(m·s), the mean film thickness at thin film region on gas inlet section is about 0.65 mm, which is broken-up approximately. Then the attention was given to the characteristics of falling films on the main section. The data show the inflection on the inlet section directly affects the downstream water distribution.

KEY WORDS: de-dust; falling film; rotating gas; film thickness; fluctuation

摘要: 应用电导法测量壁面降液膜厚度, 研究降膜反应器中液膜附着于壁面的均匀性和稳定性。采用平均膜厚及方差分别描述液膜厚度与波动特征, 得到降膜反应器中表面受旋转气体剪切作用时液膜流动状态。以进口风速为试验因素, 结果表明: 表面气体剪切力对降膜流动形态产生显著影响, 使水膜在筒体不同侧面及高度分布不均, 进口段尤为明显, 降膜流动急剧偏折。进口风速越大, 干扰越显著。在液膜流率为 0.16 L/(m·s), 进口风速达 20 m/s 时, 矩形进口管与圆筒相切处出现明显的三角形薄液膜区, 平均膜厚为 0.65 mm, 接近破断。进口段液膜分布不均将直接导致下部主体段不同

侧面液膜分布不均。

关键词: 除尘; 降膜流动; 旋转气体; 液膜厚度; 波动性

0 引言

煤燃烧过程中产生的粉尘、SO₂是主要的大气污染物。针对中小型燃煤工业锅炉, 为节约成本、降低能耗, 除尘脱硫一体化技术的研发一直备受关注^[1-9]。径向分级双流程烟气除尘脱硫一体化工艺是依据旋风分离原理和降膜技术^[10-17], 并结合喷淋洗涤脱硫工艺研发的新型烟气净化工艺。该工艺通过双流程设计使除尘、脱硫过程相对独立进行, 实现了脱硫前除尘, 克服了传统一体化设备的灰浆混合问题, 有效消除粉尘对脱硫过程的负面影响, 提高工艺稳定性。除尘单元降液膜在壁面附着的均匀性和稳定性是保证高效除尘的重要前提。由于一体化装置结构的特殊要求, 气体进口布置在筒体上部, 对降液膜稳定性产生较大干扰, 本文主要研究不同进口风速对液膜流动状态的影响, 为实现高效除尘提供保障, 为进一步工程结构设计和运行参数选择提供依据。

1 试验系统和测量方法

1.1 试验台系统

本文建立了模拟烟气量为 750 m³/h 的试验平台, 针对一体化装置除尘单元的降膜流动特性开展相关研究, 如图 1 所示。一体化装置材料为有机玻璃, 主要由 2 个同轴圆筒组成, 内外圆筒直径分别为 250 和 400 mm, 除尘单元有效高径比为 2.8。试验采用洁净的冷空气, 自外筒体上部切向引入, 夹层间螺旋向下流动, 至底部进入内筒, 向上运动, 内筒顶部侧向排出。降膜从筒体上部两溢流槽自由

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划重大项目 (2006 BAA01B04)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (2006 BAA01B04)。

流出,在内筒体外壁及外筒体内壁形成内、外水膜,捕集撞击在壁面上的粉尘。降膜沿壁面落下,由夹层底部出水口流出,进入水箱,后经水泵、流量计等分别回到顶部2个溢流槽,循环使用。

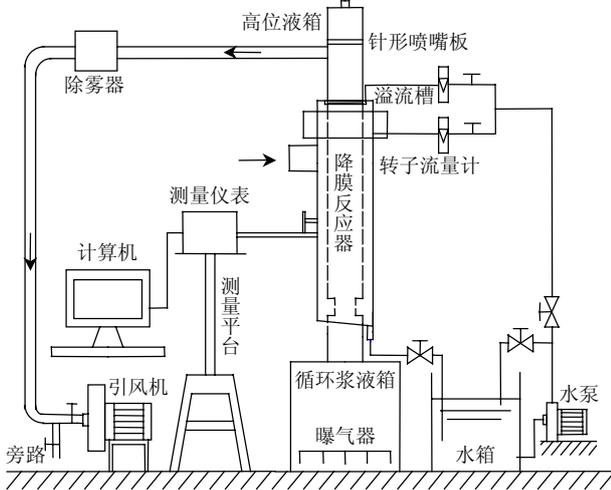


图1 试验系统
Fig. 1 Test system

试验测试得到,旋转气体对内水膜干扰较小,而对外水膜,尤其气体进口处外水膜干扰显著。因此,试验针对外水膜流动状态进行研究。研究过程中将外筒体分为3段:降膜溢流段(100 mm),即顶部溢流槽所在区段;气体进口段(300 mm),即气体切向进口所在区段;降膜流动主体段(1 200 mm),即气体进口段以下至降膜结束区段。在气体进口段和降膜流动主体段布置电导测点,以获得液膜厚度变化。

1.2 电导法测量系统

试验中将若干对金属探针垂直嵌入壁面,探针直径为2 mm,每对相距50 mm。对于降液膜,当探针几何尺寸及它们之间的距离一定,只有液膜厚度未知时,液膜厚度与测得电阻值相互关联。

电导与电阻呈倒数关系,将测得电阻值转化为液膜电导。电导正比于膜厚,通过水平液膜测量对结果进行标定,可以获得电导-液膜厚度关系式,最终计算得到液膜厚度。

数字万用表型号为DM3064,6位半读数分辨率,高达50 K/s的采样速率,实现对液膜厚度的实时测量。2 M采样点的存储深度,记录试验数据,以进一步处理分析。

1.3 液膜厚度标定

用水平静止的液膜标定电阻测量装置^[18]。在底面积为 F 的圆柱形透明容器中,用分度为0.02 mL的微量滴定管加入一定量体积为 V 的液体,由此即可

算出液膜的厚度 $h=V/F$ 。为了保证液膜厚度的精确度,在有机玻璃平板上粘结一个内径为 $\varphi 99.5$ mm的有机玻璃圆筒作为承受容器,有机玻璃圆筒在精密车床上膛光,保证圆底面积 F 的正确度。用牙膏把内壁擦亮,尽可能减小液体表面张力引起月牙形液面造成附加误差。安放容器的平台用水平尺找平。将实验用的一对探针垂直固定,嵌入有机玻璃平板,进行液膜厚度标定。

对标定结果进行拟合,得到液膜厚度和电导的线性关系,如图2所示,即

$$G=0.919h \quad (1)$$

式中: G 为液膜电导,S; h 为水平液膜厚度,mm。

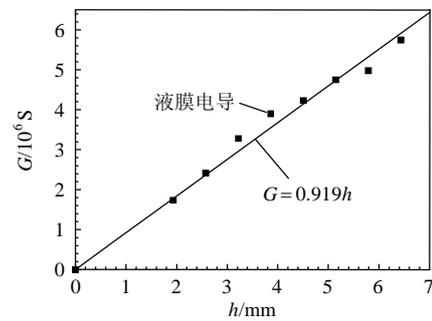


图2 膜厚与电导的关系

Fig. 2 Relation between film thickness and conductance

2 试验结果分析

2.1 试验条件

试验工况参数如表1。试验首先将溢流槽调平,水膜沿壁面均匀分布,保持一定流率,不发生自然破断。

表1 试验工况

Tab. 1 Test condition

进口风速/(m/s)	液膜体积流率/(L/(m·s))	矩形进口高宽比
20	0.16	2.5
17	0.16	2.5
14.5	0.16	2.5

2.2 统计方法

对于降液膜流动状态的描述,通常采用统计学方法^[19-21]。将液膜厚度特征以平均膜厚衡量,波动特征以方差描述,计算式分别为式(2)和(3)。方差表达了瞬时膜厚与平均膜厚的偏离程度,若测得瞬时膜厚比较集中,则方差较小,说明降液膜的波动性较小;反之,若测得瞬时膜厚比较分散,则方差较大,反映降液膜波动性较强。

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h(n) \quad (2)$$

式中: \bar{h} 为平均液膜厚度,mm; $h(n)$ 为某一位置瞬

时液膜厚度, mm; N 为数据采样总数。

$$s^2 = E\{[h(n) - \bar{h}]^2\} \quad (3)$$

式中 s^2 为瞬时降液膜的方差, mm^2 。

2.3 气体进口段降膜流态

试验用数码相机记录了气体进口段降膜流态。以矩形进口管与圆筒相切处为零度, 沿气体旋转方向, 取不同侧面的壁面降膜流动图像。图 3 分别表示 20° 、 70° 、 160° 、 230° 等 4 个侧面的降膜流态, 此时进口风速保持在 20 m/s 。观察得到, 距离进口较近的侧面, 表面气体剪切作用使降膜流动方向发生了急剧改变, 流动向气体旋转方向迅速偏折, 大量水沿圆周方向运动, 少部分倾斜流下, 出现三角形薄膜液区。随周向距离增大, 偏折程度逐渐减小, 直至消失。试验观察, 大于 160° 侧面, 降液膜受气体影响程度明显减弱, 偏折现象基本消失, 降膜自溢流口向气体旋转方向倾斜流下。

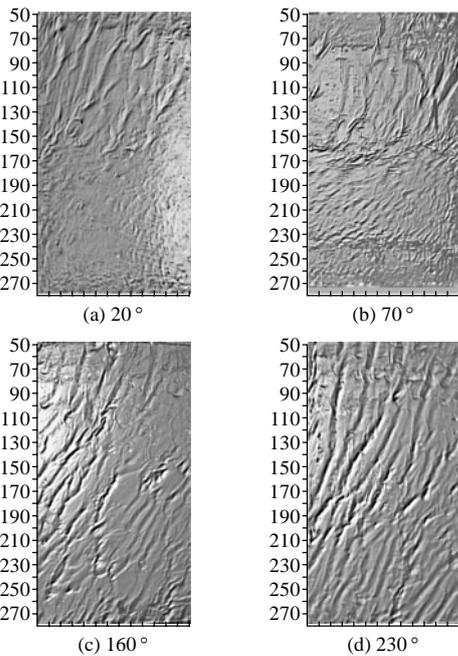


图 3 进口段不同侧面降液膜受气体影响流动形态
Fig. 3 Images of falling film under surface shear on inlet section

电导法测量时, 分别取 20° 、 70° 、 160° 、 230° 等 4 个侧面, 各侧面沿竖直方向布置 3 对探针, 对出流距离分别为 $35\sim 85$ 、 $135\sim 185$ 、 $235\sim 285 \text{ mm}$ 的液膜状态进行研究。

图 4、5 分别为 20° 、 70° 侧面, 降液膜平均厚度及方差。

数据显示, 不同进口风速均对 20° 侧面降膜流动产生显著影响, 与自由降膜状态相比, 平均液膜厚度明显降低。受气体剪切作用影响, 水量沿竖直方

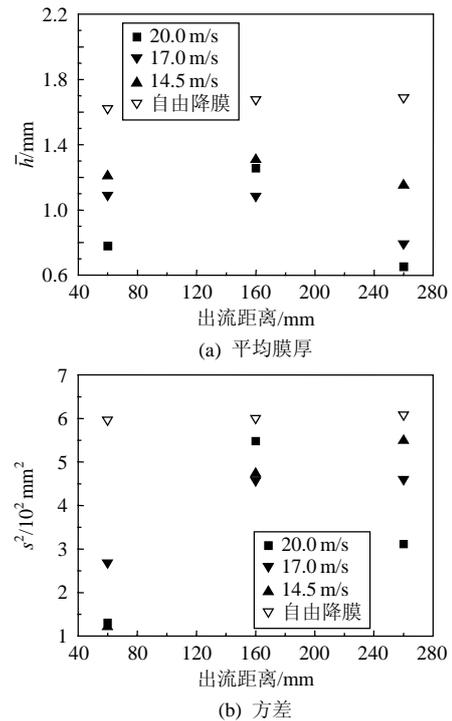


图 4 20° 侧面进口风速对降液膜平均厚度及方差的影响
Fig. 4 Longitudinal distributions of mean film thickness and variance at 20° side

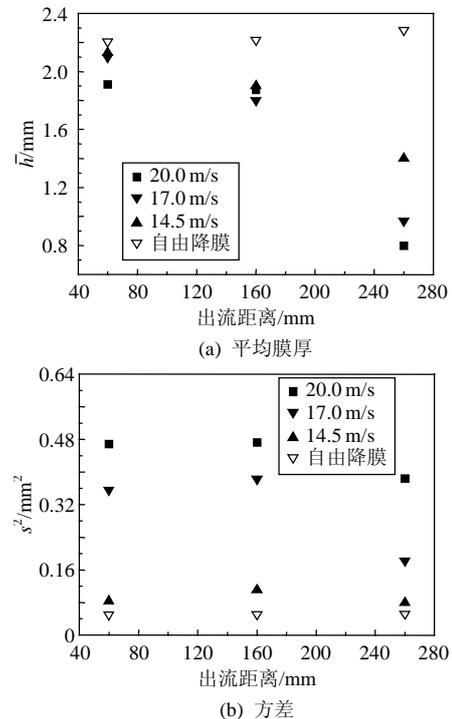


图 5 70° 侧面进口风速对降液膜平均厚度及方差的影响
Fig. 5 Longitudinal distributions of mean film thickness and variance at 70° side

向分布不均。进口风速越大, 这种不均匀性越明显。

图 4(a) 所示, 当进口风速达到 20 m/s 时, 平均膜厚差别显著, 流动偏折使大量水沿圆周运动, 且发生于 $135\sim 185 \text{ mm}$ 处, 故此位置平均膜厚较大。

而其下部 235~285 mm处, 只有少量水流下, 位于薄液膜区内, 平均膜厚仅为 0.65 mm, 接近破断。与之相比, 2 种较小气速影响较弱, 水量分布相对均匀, 且进口气速越小, 平均膜厚越接近自由降膜。

值得注意的是, 降膜初始形成区域, 即 35~85 mm处, 平均厚度明显较自由降膜薄, 说明进口气体对出流产生干扰, 气速越大, 干扰越大。故设计溢流槽高度时, 应与气体进口上沿保持一定距离, 以保证稳定出流。

图 4(b)所示, 不同出流距离处液膜波动性也有较大差别。流动偏折位置波动性最大, 但因降液膜厚度较薄, 均低于自由降膜的波动性。

图 5(a)所示, 70°侧面平均膜厚分布规律与 20°侧面有相似之处。发生偏折处, 即 135~185 mm, 水量连续, 液膜厚度较大, 而其下部液膜仍然相对较薄, 但较 20°侧面明显增厚, 薄液膜区逐渐消失。此外, 此侧面出流情况明显较 20°侧面稳定, 降膜初始形成区域平均膜厚接近自由降膜厚度。

由图 5(b)可得, 此侧面各位置波动性均大于自由降液膜波动性, 且进口气速越大, 波动越剧烈。

图 6、7 分别为 160°、230°侧面, 降液膜平均厚度及方差。

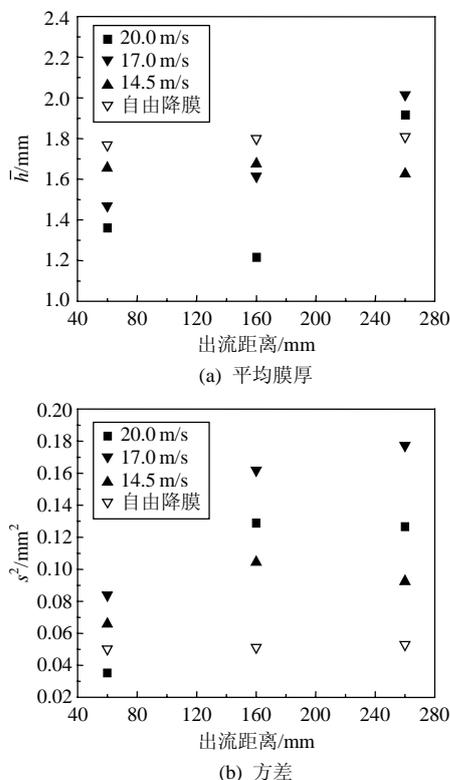


图 6 160°侧面进口气速对降液膜平均厚度及方差的影响
Fig. 6 Longitudinal distributions of mean film thickness and variance at 160° side

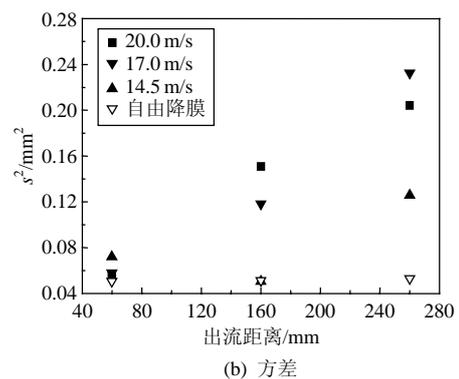
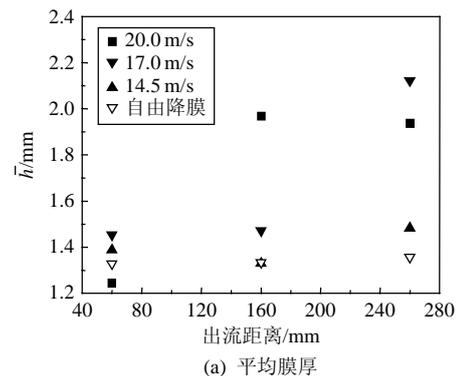


图 7 230°侧面进口气速对降液膜平均厚度及方差的影响
Fig. 7 Longitudinal distributions of mean film thickness and variance at 230° side

160°侧面, 降液膜沿竖直方向的水量分布较前 2 个侧面发生了明显变化, 且不同进口气速下分布趋势不尽相同。进口气速为 14.5 m/s 时, 液膜流动受气体影响明显减弱, 水量分布均匀, 平均膜厚接近自由降膜, 但波动性与自由降膜相比仍然较大。与之相比, 2 种较大进口气速工况下, 235~285 mm 处的平均膜厚明显变厚, 并超过上部液膜。这是由于进口气体影响强度降低, 之前周向运动的水膜自此倾斜流下, 使该区域液膜变厚, 且波动剧烈。数据显示, 此侧面各竖直位置处液膜厚度均达到 1.2 mm 以上, 薄液膜区消失。

230°侧面降液膜受气体直接影响明显减弱, 出流稳定, 35~85 mm 处平均膜厚与自由降膜相近, 波动性也相近。而受之前圆周运动的水膜影响, 距出流 135~185、235~285 mm 处膜厚较厚, 且波动剧烈。

2.4 主体段降膜流态

图 8 为进口气速保持在 20 m/s 时, 出流距离为 370~540、690~840、990~1 140 mm 处降液膜流动状态图像。图像显示, 降膜向气体旋转方向倾斜流动, 随出流距离增加, 倾斜程度减弱, 流动至 990~1 140 mm 处, 倾斜已不明显。

研究主体段降液膜流动特征时, 每对探针在距

溢流口竖直方向 500 mm 处水平布置, 对 20°、120°、200°、290° 4 个侧面进行测量, 如图 9 所示。

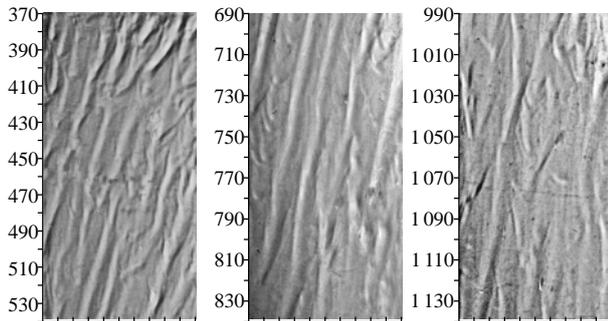
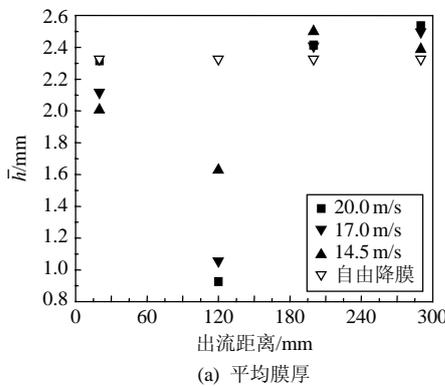
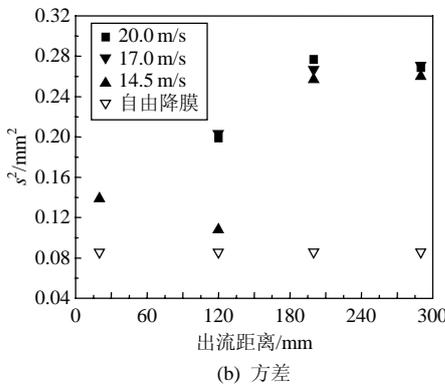


图 8 主体段不同出流距离降液膜流动形态

Fig. 8 Images of falling film under surface shear on the main section



(a) 平均膜厚



(b) 方差

图 9 出流距离 500 mm 处进口风速对降液膜平均厚度及方差的影响

Fig. 9 Distributions of mean film thickness and variance at different sides on the main section

图 9(a)所示, 液膜在主体段仍然存在薄液膜区域, 与进口段相比, 此区域发生周向转移, 由 20° 侧面转移到 120° 侧面。这是由于降液膜受气体剪切作用, 流动向气体旋转方向倾斜, 薄液膜区域也随之沿圆周方向发生转移。数据显示, 进口风速越大, 薄液膜区的平均膜厚越小, 当进口风速为 20 m/s 时, 平均厚度仅为 0.8 mm 左右。而在 200°、290° 2 个侧面, 由于进口段流动偏折现象带来较大的水量, 平均膜厚较自由降液膜稍厚。

由图 9(b)可得, 受表面剪切作用影响, 降液膜波动性变大, 且进口风速越大, 波动越剧烈。

分析得到, 降膜主体段水量分布, 与上部气体进口段水量分布密切相关。气体进口段液膜流动受气体干扰越大, 下部水量分布不均越明显。

3 结论

1) 应用电导法, 研究了降膜反应器内受旋转气体剪切作用降液膜流动状态。旋转气体造成液膜在壁面分布不均, 且具有较大的波动性。

2) 随进口风速增大, 气体对降膜流动的影响愈显著。气体进口处降膜流动急剧偏折。进口风速达到 20 m/s 时, 进口处出现明显的薄液膜区域。随进口风速增大, 此区域扩大。

3) 气体对进口段降液膜的影响, 直接导致下部壁面液膜水量分布不均, 存在液膜较薄的侧面。进口风速越大, 这种现象越显著。

4) 实际工程中应控制进口风速, 避免因同时存在壁面凹凸不平等问题, 造成液膜破断或雾滴飞溅的现象。

参考文献

- [1] Wecker A. Multipurpose active coke absorbers: clean exhaust gas from waste incineration[J]. ASME FACT, 1994(18): 165-174.
- [2] 李立清, 曾光明. 锅炉烟气脱硫除尘一体化装置的开发与应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, 1(2): 39-43.
Li Liqing, Zeng Guangming. Development of the integrated equipment of dust removal and desulfurization of flue gas for coal-burning boiler[J]. Techniques and Equipments for Environmental Pollution Control, 2000, 1(2): 39-43(in Chinese).
- [3] 王琿, 宋蕾, 姚强, 等. 电厂湿法脱硫系统对烟气中细颗粒物脱除作用的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 1-7.
Wang Hui, Song Qiang, Yao Qiang, et al. Experimental study on removal effect of wet flue gas desulfurization system on fine particles from a coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(5): 1-7(in Chinese).
- [4] 徐娟, 郭静, 郭斌, 等. 高效湿式脱硫除尘一体化装置的研究[J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(4): 51-52.
Xu Juan, Guo Jing, Guo Bin, et al. Integrated wet dust-removal and desulfurization equipment with high efficiency[J]. Urban Environment and Urban Ecology, 2002, 15(4): 51-52(in Chinese).
- [5] 储嘉铭, 江智贤, 周建新, 等. 多管文丘里烟气除尘脱硫装置[J]. 环境工程, 2006, 24(1): 38-41.
Chu Jiaming, Jiang Zhixian, Zhou Jianxin, et al. Development of a novel multi-tube venture scrubber for desulphurization and dust removal of flue gas[J]. Environmental Engineering, 2006, 24(1): 38-41(in Chinese).
- [6] 卢平, 冯斌, 李大骥. 管道喷射烟气脱硫性能及其脱硫产物分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 142-146.
Lu Ping, Feng Bin, Li Daji. Desulphurization properization and

- products analysis using in-duct injection of calcium-based sorbent[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 142-146(in Chinese).
- [7] 向晓东. 现代除尘理论与技术[M]. 北京, 冶金工业出版社, 2002: 98-112.
- [8] 秦裕琨, 吴少华, 高继慧, 等. 内循环多级喷动流态化烟气脱硫塔: 中国, 200520021113. 6.[P]. 2005-7-19.
- [9] 黄种买, 胡将军. 燃煤电厂脱硫——除灰系统一体化工艺研究[J]. 动力工程, 1999, 19(4): 314-317.
Huang Zhongmai, Hu Jiangjun. Study on technology of FGD system running together with ash conveying system in coal fired power plant [J]. Power Engineering, 1999, 19(4): 314-317(in Chinese).
- [10] 金国森. 除尘设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 121-135.
- [11] Avci A, Karagoz I. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators[J]. Aerosol Science, 2003, 7(34): 937-955.
- [12] Chen Weibo, Richard N. Inlet subcooling effect on heat and mass transfer characteristics in a laminar film flow[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2000, 43(2): 167-177.
- [13] Takahama H, Kato S. Longitudinal flow characteristics of vertically falling liquid films without concurrent gas flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1980, 6(2): 203-215.
- [14] Hughes D T, Bott T R. Minimum thickness of liquid film flowing down a vertical tube[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1998, 41(2): 253-260.
- [15] Nguyen L T, Balakotaiah V. Modeling and experimental studies of wave evolution on free falling films[J]. Physics of Fluids, 2000, 12(11): 2236-2256.
- [16] Schagen A, Modigell M, Dietze G. Simultaneous measurement of local film thickness and temperature distribution in wavy liquid films using a luminescence technique[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(25): 5049-5061.
- [17] Karimi G, Kawaji M. An experimental study of freely falling films in a vertical tube[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(20): 3501-3512.
- [18] 葛自忠. 用激光技术测定液膜厚度[J]. 化工学报, 1982(3): 285-290.
Ge Zizhong. Measuring the thickness of fluid film by laser beam[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 1982(3): 285-290(in Chinese).
- [19] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 109-129.
- [20] Drosos E I P, Paras S V, Karabelas A J. Characteristics of developing free falling films at intermediate Reynolds and high Kapitza numbers [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 30(7): 853-876.
- [21] 阎维平, 李洪涛, 叶学民, 等. 垂直自由下降液膜厚度的瞬时无接触测量研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(4): 380-384.
Yan Weiping, Li Hongtao, Ye Xuemin, et al. A study of the transient non-contact measurement of vertical free-falling liquid-film thickness [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(4): 380-384(in Chinese).



朱玉雯

收稿日期: 2008-12-16。

作者简介:

朱玉雯(1983—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为烟气污染控制, zhuyuwen4009@163.com;

高继慧(1971—), 男, 副教授, 主要从事烟气污染控制组方面的研究;

苏伟(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事烟气污染控制方面的研究。

(编辑 张媛媛)