

煤粉工业锅炉底部粉煤灰沉降速度试验研究

罗伟^{1,2,3}, 贾东亮^{1,2,3}, 李殿新^{1,2,3}

(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:为了加快煤粉工业锅炉底部粉煤灰的沉降速度和除灰速度,保障锅炉的稳定运行,采用试验的方法研究了粉煤灰特性、粉煤灰燃烧状况和落灰斗结构对粉煤灰沉降速度的影响,重点研究了粉煤灰颗粒的粒径、粉煤灰的燃烧充分性、落灰斗的高度和侧壁倾斜度对沉降速度的影响。结果表明:粒径较小的粉煤灰颗粒沉降速度较慢,粒径小于0.009 mm的粉煤灰颗粒容易造成炉底刮板机内细泥积聚;当煤粉不完全燃烧时,粉煤灰有少部分不溶于水且下降速度慢;粉煤灰的沉降速度随落灰斗侧壁倾斜度的增大和落灰斗高度的减小而减小,因此,设计的落灰斗在空间允许的情况下侧壁倾斜度应为10°以内,并且应该尽量加大落灰斗的垂直高度。

关键词:煤粉工业锅炉;粉煤灰;沉降速度;燃烧状况;落灰斗

中图分类号:TK227.3 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)04-0030-04

Settlement velocity of fly ash under industrial pulverized coal boiler

LUO Wei^{1,2,3}, JIA Dongliang^{1,2,3}, LI Dianxin^{1,2,3}

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

Abstract: In order to accelerate settlement velocity and discharge speed of fly ash under industrial pulverized coal boiler, ensure stable operation of boiler, the influence of fly ash characteristics, combustion condition of fly ash and structure of ash hopper on settlement velocity of fly ash was investigated. Particle size of fly ash, combustion adequacy of fly ash, ash hopper height, side wall's inclination of ash hopper were the research emphases. The results showed that, smaller particles had slower settlement velocity, thin mud accumulated in scraper chain conveyor was mainly composed by particles whose diameters were less than 0.009 mm. When the coal couldn't burn completely, a minority of fly ash couldn't dissolve in water and the descent velocity was slow. Settlement velocity of the fly ash got slower by increasing the side wall gradient or decreasing ash hopper height. Thus, the inclination of side wall should be in 10° and the vertical height of ash hopper should be designed as high as possible.

Key words: industrial pulverized coal boiler; fly ash; settlement velocity; combustion condition; ash hopper

0 引言

在高效煤粉工业锅炉系统中,炉底除灰系统包括吹灰炮、声波吹灰器、炉底落灰斗、刮板机等,它们在煤粉锅炉系统中起到清除炉底积灰、密封、防爆泄

压等重要作用^[1]。炉底除灰系统运转是否正常,直接影响锅炉能否持续、安全运行。炉底除灰系统存在的主要问题包括:落灰停留于气-水相界面难以沉降^[2-3],刮板机停机时间稍长易被卡死、持续运行时不出灰^[4]等,在锅炉长期运行中属于故障频发

收稿日期:2016-03-22;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.04.007

基金项目:煤炭科学技术研究院科技发展基金资助项目(2014JC02)

作者简介:罗伟(1982—),男,湖北武汉人,助理研究员,硕士,研究方向为煤炭洁净燃烧。E-mail:luoweinky@163.com。通讯作者:贾东亮,助理研究员,硕士,研究方向为煤炭洁净燃烧。E-mail:jdl19863@sina.com

引用格式:罗伟,贾东亮,李殿新.煤粉工业锅炉底部粉煤灰沉降速度试验研究[J].洁净煤技术,2016,22(4):30-33.

LUO Wei, JIA Dongliang, LI Dianxin. Settlement velocity of fly ash under industrial pulverized coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4):30-33.

的设备,增大了司炉人员的工作量和设备配件的损耗。因此,有必要研究影响粉煤灰沉降速度的因素,保障煤粉工业锅炉的稳定运行。

目前国内关于粉煤灰沉淀的研究多集中于沉淀池和除尘器,有学者曾对静电除尘器中收集的粉煤灰进行过分析,认为其在形态上大体可分为球形和非球形颗粒2种,密度均大于水,但其中颗粒较大、空心、薄壁的“漂珠”一般浮于沉淀池表面难于下沉^[5]。然而,除尘器中的粉煤灰通常燃烧完全,含碳量很低,而落入炉底落灰斗中的煤灰由于燃烧时间短,其形态和煤灰中的残余煤粉量均与除尘器、沉淀池中的煤灰有所差异。除粉煤灰特性和燃烧状况外,落灰斗的结构也会影响粉煤灰进入相界面的初速度和有效沉降面积,从而影响粉煤灰的沉降速度。因此,本文研究了粉煤灰特性、粉煤灰燃烧状况和落灰斗结构对粉煤灰沉降速度的影响,以期加快粉煤灰的沉降速度和炉底的除灰速度。

1 炉底粉煤灰特性对沉降速度的影响

1.1 煤粉工业锅炉炉底粉煤灰特性

粉煤灰的物理特性参数主要包括堆积密度、细度、比表面积、需水量等^[6-7]。在煤粉工业锅炉中,炉膛内部的燃烧区域分为引燃区、燃烧区和燃烬区,炉膛内不同区域的温度有很大差别,燃烧区的温度

达1 000~1 300℃,而引燃区的温度仅500℃。即使在同一温度区,由于煤粉粒度、灰熔点、水分、冷却时间等参数的差别,形成的粉煤灰颗粒形态也不同。粉煤灰是以颗粒形态存在的,王华等^[8]、张令茂^[9]用扫描电子显微镜观察粉煤灰颗粒的形态,将其分类为空心玻璃珠、实心玻璃珠、磁珠、炭粒和玻璃体5种。粉煤灰的粒径与煤粉的细度有关,煤粉越细,灰中的细颗粒越多^[10],取补连塔锅炉房的粉煤灰进行化验,得到粉煤灰的粒径分布见表1。

表1 煤粉工业锅炉炉底粉煤灰粒径分布

Table 1 Size distribution of fly ash in pulverized coal industry boiler furnace bottom

灰样	粉煤灰样粒径分布/ μm			体积平均 粒径/ μm
	$d(0.1)$	$d(0.5)$	$d(0.9)$	
保德灰	9.566	45.588	98.607	49.458
补连塔灰	9.099	41.684	97.998	48.557

粉煤灰密度的计算方法是:用粉煤灰的质量除以没有空隙状态下粉煤灰的体积,我国粉煤灰的密度在1.9~2.9 g/cm³^[11-12]。当使用的煤种、煤粉的细度和燃烧工况不同时,形成的粉煤灰化学成分也有较大差异。但是,对粉煤灰进行化验分析可知,粉煤灰中比例较高的成分一般是氧化硅、氧化铝和氧化钙。在2个锅炉房取粉煤灰的灰样进行化验,粉煤灰的化学成分见表2。

表2 煤粉工业锅炉炉底粉煤灰的化学成分

Table 2 The chemical composition of fly ash in pulverized coal industry boiler furnace bottom

灰样	灰成分/%								
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂
保德灰	39.46	28.16	13.97	6.63	0.65	2.49	1.04	0.95	0.23
补连塔灰	42.40	22.33	11.79	7.03	0.48	0.78	1.23	0.67	0.261

1.2 粉煤灰特性对沉降速度的影响

粉煤灰颗粒在介质中运动时,受到布朗运动和重力的综合作用^[13]。当粉煤灰的颗粒较小时,颗粒的运动主要受布朗运动的支配;当颗粒较大时,颗粒的运动主要受重力作用的支配。在只考虑介质阻力和重力的情况下,粉煤灰颗粒的沉降速度可以采用Stokes沉降定律^[14-15]计算:

$$v = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta} \quad (1)$$

式中, v 为颗粒的沉降速度,cm/s; r 为颗粒的半

径,cm; ρ 为颗粒的密度,g/cm³, ρ_0 为介质的密度,g/cm³, η 为介质的黏度,pa·s, g 为重力加速度,m/s²。

根据式(1)可知,粉煤灰颗粒的沉降速度与粒径的平方、颗粒的密度成正比,但与介质的黏度成反比。当炉底粉煤灰形成比较小的颗粒时,由于粒径较小,沉降速度变慢;当炉底粉煤灰形成空心玻璃珠时,由于颗粒的密度变小,沉降速度也变慢。当粉煤灰密度在2.35~2.40 g/cm³时,使用表1中的试验结果和式(1)计算得到粉煤灰的自由沉降速度,结

果见表3。由表3可以看出:粒径大于0.09 mm的粉煤灰颗粒沉降速度较快,主要受重力影响;粒径在0.09~0.009 mm的粉煤灰颗粒沉降速度受重力和布朗运动的综合影响,在凝聚或絮凝状态下沉降;粒径小于0.009 mm的粉煤灰颗粒沉降速度很慢,主要受布朗运动的影响,粉煤灰颗粒处于均匀分散状态,容易造成炉底刮板机内细泥积聚。

表3 炉底粉煤灰自由沉降速度

Table 3 Free settling velocity of fly ash under boiler

颗粒粒径/mm	0.1	0.09	0.048	0.009
自由沉降速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.76	0.65	0.13	0.002

2 粉煤灰燃烧状况对沉降速度的影响

在20 t/h的卧式煤粉锅炉中,煤粉经过燃烧器点燃后进入炉膛燃烧,会出现以下情况:在炉底刮板机前部落入的粉煤灰燃烧不充分含有大量煤粉、在炉底刮板机中部落入的粉煤灰燃烧较充分含有少量煤粉、在炉底刮板机后部落入的粉煤灰燃烧充分基本不含煤粉。图1是炉底粉煤灰落入刮板机位置的示意图。

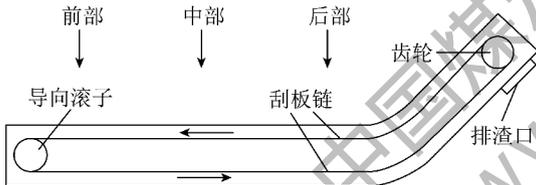


图1 炉底粉煤灰落入刮板机位置示意

Fig. 1 Furnace bottom ash falling into a scraping plate location

根据以上情况,为便于观察制作了与刮板机等比例大小的玻璃材质的试验装置,并且通过在粉煤灰中掺入煤粉来实现燃烧充分性对炉底粉煤灰沉降的影响试验。本试验分别取样纯粉煤灰、纯煤粉、含5%煤粉的粉煤灰以及含10%煤粉的粉煤灰,其中掺入粒度为0.074 mm、过筛率为75%的煤粉。将以上各样品分别投入到试验装置中,观察其浸润特点和沉降速度,最终得到的试验结果见表4。由表4可知,纯煤灰全部溶于水并且以0.08 m/s的速度下降,纯煤粉基本不溶于水并且与水之间形成一层膜阻隔了煤粉的下降,当煤灰中含有的煤粉增多时,不溶于水的煤灰增多,下降速度减慢。因此可知,燃烧状况对粉煤灰沉降速度的影响为:当完全燃烧时(即全部为粉煤灰时),粉煤灰全部溶于水且下降速度快;当不完全燃烧时(即粉煤灰内含有一部分煤

粉时),粉煤灰有少部分不溶于水且下降速度慢。

表4 燃烧充分性对粉煤灰沉降影响

Table 4 Combustion adequacy on settlement velocity of fly ash

样品	浸润特点	沉降速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
纯煤灰	10 s	0.08
纯煤粉	大部分不溶于水	—
含5%煤粉的灰	12 s	0.065
含10%煤粉的灰	少部分不溶于水	0.048
含20%煤粉的灰	少部分不溶于水	0.040

3 落灰斗结构对粉煤灰沉降速度的影响

煤粉锅炉炉底落灰斗是一个连接锅炉和刮板机的过渡段,粉煤灰经过落灰斗收集后落入刮板机中,其三视图如图2所示。粉煤灰在经过落灰斗进入刮板机水面时具有了垂直速度,这使得粉煤灰在进入水面时更易下沉,因此落灰斗的高度对粉煤灰沉降速度有一定影响。另外,落灰斗侧壁的倾斜度使粉煤灰进入水面时具有水平方向的速度,因此落灰斗的侧壁倾斜度对粉煤灰沉降速度也有一定影响。

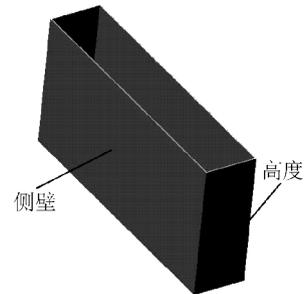


图2 炉底落灰斗三维结构

Fig. 2 Three-dimensional structure of ash hopper

针对以上情况,分别取侧壁倾斜度为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 的4个落灰斗,分别在0.5、1、1.5、2 m的4个高度上将纯粉煤灰投放进落灰斗,观察粉煤灰在刮板机内的沉降时间,得到的数据见表5。由表5可知,当落灰斗侧壁倾斜度为 0° ,高度为2 m时,粉煤灰由刮板机水面落到底部的时间最短为17 min;当落灰斗侧壁倾斜度为 15° ,高度为0.5 m时,粉煤灰由刮板机水面落到底部的时间最长为35 min。因此可得出:落灰斗侧壁的倾斜度越大,粉煤灰的沉降时间越长;落灰斗的高度越低,粉煤灰的沉降时间越长。因此,为了更好地收集粉煤灰,设计的落灰斗侧壁倾斜度应在 10° 以内,并且在空间允许的前提下尽量加大其垂直高度。

表5 落灰斗结构对粉煤灰沉降影响

Table 5 Structure of ash hopperon settlement velocity of fly ash

倾斜度	沉降时间/min			
	0.5 m	1 m	1.5 m	2 m
0°	24.5	22.0	19.8	17.0
5°	25.0	23.5	21.0	20.0
10°	30.0	27.5	26.0	22.6
15°	35.0	30.0	30.0	27.0

4 结 论

1) 粉煤灰特性对粉煤灰沉降速度的影响是: 粒径大于 0.09 mm 的粉煤灰颗粒沉降速度较快, 主要受重力影响; 粒径小于 0.009 mm 的粉煤灰颗粒沉降速度较慢, 主要受布朗运动的影响, 容易造成炉底刮板机内细泥积聚。

2) 燃烧状况对粉煤灰沉降速度的影响是: 当完全燃烧时, 粉煤灰全部溶于水且下降速度快; 当不完全燃烧时, 粉煤灰有少部分不溶于水且下降速度慢。

3) 落灰斗结构对粉煤灰沉降速度的影响是: 粉煤灰的沉降速度随落灰斗侧壁的倾斜度增大和落灰斗高度的减小而减小。在实际应用中, 落灰斗的侧壁倾斜度应在 10° 以内, 并且尽量加大落灰斗的垂直高度。

参考文献 (References):

[1] 宋春燕. 高效煤粉锅炉系统技术的工程化应用[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(2): 89-92, 96.
Song Chunyan. Industrialization of efficient pulverized coal boiler system technology[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 89-92, 96.

[2] Cao Yijun, Gui Xiahui, Ma Zilong, et al. Process mineralogy of copper-nickel sulphide flotation by a cyclonic-static micro-bubble flotation column[J]. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(6): 784-787.

[3] 李相鹏, 汪蓉梅, 蓝立伟. 超音速吹灰及其引起的锅炉管束磨损模拟分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3179-3185.
Li Xiangpeng, Wang Rongmei, Lan Liwei. Simulation analysis of tubes erosion induced by supersonic soot blowing in boiler[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3179-3185.

[4] 罗 林. 除尘器灰斗刮板排灰技术[J]. 水泥工程, 2012(6): 77-78.
Luo Lin. Dust ash hopper scraper ash discharge technology[J]. Ce-

ment Engineering, 2012(6): 77-78.

[5] 王立成, 董宪姝. 东河矿选煤厂高泥化煤泥水沉降特性研究[J]. 选煤技术, 2009(5): 17-20.
Wang Licheng, Dong Xianzhu. Dong he mine coal preparation plant high mud slurry settlement characteristics research[J]. Coal Preparation Technology, 2009(5): 17-20.

[6] 张敬东, 张家骅. 粉煤灰在水中沉降规律研究[J]. 电力环境保护, 1999, 9(3): 19-21.
Zhang Jingdong, Zhang Jiaye. Settlement of fly ash in water law research[J]. Electric Power Environmental Protection, 1999, 9(3): 19-21.

[7] 胡小龙. 粉煤灰利用分析技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 3-6.

[8] 王 华, 宋存义, 张 强. 粉煤灰改性吸附材料及其吸附机理[J]. 粉煤灰综合利用, 2000(4): 37-41.
Wang Hua, Song Cunyi, Zhang Qiang. Modified fly ash adsorption materials and adsorption mechanism[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2000(4): 37-41.

[9] 张令茂. 粉煤灰颗粒特征参数的相关性研究[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1987(4): 59-70.
Zhang Lingmao. A study on correlation between particle characteristic parameters of fly ash[J]. Journal of XI'AN Institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1987(4): 59-70.

[10] 冯 莉, 刘炯天, 张明青, 等. 煤泥水沉降特性的影响因素分析[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 671-675.
Feng Li, Liu Jiongtian, Zhang Mingqing, et al. Analysis on influencing factors of sedimentation characteristics of coal slime water[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(5): 671-675.

[11] 张东晨, 张明旭, 陈清如. 煤泥水处理中絮凝剂的应用现状与发展展望[J]. 选煤技术, 2004(2): 1-3.
Zhang Dongchen, Zhang Mingxu, Chen Qingru. State-of-art of application of flocculent in coal slurry treatment and its development prospect[J]. Coal Preparation Technology, 2004(2): 1-3.

[12] 张明青, 刘炯天, 刘汉湖, 等. 水质硬度对煤和蒙脱石颗粒分散行为的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 114-118.
Zhang Mingqing, Liu Jiongtian, Liu Hanhu, et al. Effects of water hardness on the dispersion of fine coal and montmorillonite[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(1): 114-118.

[13] 谢俊彪, 张明峰, 祁新萍. 煤泥水沉降特性的影响因素分析[J]. 化学工程与装备, 2015(6): 196-198.
Xie Junbiao, Zhang Mingfeng, Qi Xinping. Analysis on influencing factors of sedimentation characteristics of coal slime water[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(6): 196-198.

[14] 解海卫. 粉煤灰浓浆管道流动特性与阻力特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.

[15] 侯晓博. 基于煤泥表面性质的沉降特性研究与吸附建模构建[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.