

煤粉工业锅炉运行数据与供料参数的相关性研究

刘振宇^{1,2,3}

(1.煤科院节能技术有限公司,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:供料参数的定量测量是锅炉实现自动调节的重要前提。目前直接测量设备受浓度测量范围、成本等因素影响,对工业锅炉适用性有限,而锅炉现有各传感器的部分数据与供料系统关系密切。为了探究根据传感器数据计算供料参数的可行性,以 1 Hz 频率收集了天津华苑 1 台 58 MW 锅炉的传感器数据,在控制其他变量的条件下筛选中间仓重量、一次风总压、锁气阀转速、炉膛压力、烟气氧含量等与供料相关的数据,通过最小二乘法、决定系数等分析方法,定量计算变量绝对值、标准差与供料参数的关系。结果表明,当中间仓进料阀关闭时,可通过中间仓称重以高准确度计算供料器 300 s 内的平均供料量;使用供料锁气阀转速计算供料量,基于锁气阀填充率和填充密度为定值的假设,低转速下供料曲线符合该假设。但随着锁气阀转速提高,供料量随转速的增长速率以二次曲线规律边际递减,且递减规律存在个体差异;一次风总压计算供料量属于差压法,用于计算供料量时,调整后的决定系数 $R_{Adj}^2 > 0.98$,具有较高的准确性,但需要根据每台设备的累计运行数据计算系数 k ;炉膛负压波动可较好反映供料波动,但准确性低于使用一次风总压,取样时间为 30 s 时,供料量标准差-炉膛压力标准差 R_{Adj}^2 达到最大值,为 0.890 1;供料量-耗氧量的 R_{Adj}^2 在取样时间 200 s 时达到最大值 0.296 1,供料量标准差-耗氧量标准差 R_{Adj}^2 在取样时间 10 s 时达到最大值 0.640 8,说明耗氧量用于推断供料波动的可靠性中等,推断供料量的可靠性较差,这可能与该锅炉煤粉的掺混比例不稳定使单位质量煤粉热值波动较大有关。

关键词:煤粉锅炉;供料;锁气阀;氧含量;炉膛压力;一次风总压;中间仓称重

中图分类号:TK229 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2020)02-0145-07

Study on the correlation between operation data and feed parameters of pulverized coal industrial boiler

LIU Zhenyu^{1,2,3}

(1.China Coal Research Institute Company of Energy Conservation,Beijing 100013,China;2.State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013,China;3.National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control,Beijing 100013,China)

Abstract:The quantitative measurement of feeding parameters is an important prerequisite for automatic regulation of boiler. At present, most kinds of direct measuring equipment have limited applicability to industrial boilers due to the influence of concentration measuring range, cost and other factors. However, some of the sensor data of boiler have a significant relationship with the feeding system. In order to explore the feasibility of using these sensor data to calculate feed parameters, the sensor data of a 58 MW boiler in tianjin huayuan were collected at a frequency of 1 Hz. Under the condition of controlling other variables, the data related to the feed such as the weight of the intermediate bin, the total pressure of the primary air, the speed of the air lock valve, the pressure of the furnace and the oxygen content of the flue gas were screened out, and the relationship between the absolute value and standard deviation of the above variables and the feed parameters were quantitatively calculated by the least square method and the determination coefficient method. The results indicate that When the feeding valve of the intermediate bin is closed, the average feeding quantity within 300 s of the feeder can be calculated.

收稿日期:2020-01-10;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20011002

基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目面上项目(2019-TD-MS010)

作者简介:刘振宇(1987—),男,江苏徐州人,助理研究员,硕士,主要研究方向为煤粉流动与输送。E-mail:lzy_13579@139.com

引用格式:刘振宇.煤粉工业锅炉运行数据与供料参数的相关性研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):145-151.

LIU Zhenyu. Study on the correlation between operation data and feed parameters of pulverized coal industrial boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 145-151.



移动阅读

ed by weighing the middle bin with high accuracy. If the filling rate and filling density of the air lock valve are fixed, the feeding quantity can be accurately calculated by using the feeding speed of the air lock valve. The feeding curve at low speed conforms to this assumption. With the increase rate of the rotational speed, the marginal value of the feed decreases at the edge of the quadratic curve, and there are individual differences in the decline rule. The calculation of the total primary air pressure is a differential pressure method, and when the total primary air pressure is used to calculate the feed quantity, the adjusted determination coefficient $R_{Adj}^2 > 0.98$, and the calculation accuracy is very high. The disadvantage is that the coefficient k needs to be calculated based on the cumulative operation data of each device. The fluctuation of negative pressure in furnace can better reflect the fluctuation of feed, but the accuracy is lower than the total pressure of primary air. When the sampling time is 30 s, the standard deviation of supply—the standard deviation of furnace pressure R_{Adj}^2 reaches its maximum value of 0.890 1. The R_{Adj}^2 of the feedstock—oxygen consumption reached a maximum value of 0.296 1 at the sampling time of 200 s, and the R_{Adj}^2 of the standard deviation of feed—standard deviation of oxygen consumption reached its maximum value of 0.640 8 at the sampling time of 10 s. It indicates that oxygen consumption is of medium reliability in inferring feed fluctuation, while inferring feed quantity is of poor reliability, which may be related to the instability of the boiler pulverized coal mixing ratio is not stable, resulting in the unit weight of pulverized coal calorific value fluctuations.

Key words: pulverized coal boiler; feed; air lock valve; oxygen content; furnace pressure; total pressure of primary air; intermediate chamber weighing

0 引言

在煤粉工业锅炉中, 供料系统通过气力输送, 将煤粉定量送入燃烧器中供给燃烧。供料的稳定性对锅炉的稳定运行影响很大。定量计量供料量和供料波动是锅炉实现自动调节的重要前提。目前煤粉质量流量的直接测量困难^[1], 现有的直接测量方法包括电容法、静电法、摩擦电法、微波法、 γ 射线法、差压法等。其中, 电容法^[2-3]对传感器固有的检测场分布要求较高, 且由于固相浓度变化引起的电容量变化甚微, 对电容分辨率和抗杂散电容的能力要求严格, 使其对空气湿度等参数变化敏感, 需频繁标定。静电法^[4-6]由于阵列式静电传感器存在局部敏感特性, 仅适用于小管径的密相流测量。摩擦电法^[7-8]可测量的煤粉浓度上限很低, 目前仅能做到上限 45 g/m³。微波法^[9-10]的检测范围和精度较广, 但受限于设备成本, 中小型锅炉难以采用。 γ 射线法^[11]利用 γ 射线吸收原理, 可达到 5% 以内的测量精度^[12], 但 γ 放射源的危险性及成本限制了其使用范围。差压法利用压力传感器, 测量供料系统两点间的压力差, 利用煤粉浓度—差压的对应关系^[13]测量煤粉流量, 一般包括文丘里法和弯管法, 文丘里法测量精度较高, 具有较高的阻力。由于煤粉工业锅炉一次风沿程经过文丘里混合器, 因而具有应用差压法的基础。

除了直接测量, 锅炉各种与供料相关的间接参数也可用于衡量供料参数, 有学者使用不同方法研究了炉膛压力与供料量的关系^[14-15]。但以往研究重点关注炉膛压力, 对于其他参数, 如中间仓称重、供料锁气阀转速、一次风总压、烟气氧含量等与供料

参数的关系鲜有报道。本文通过对工业运行数据的分析, 对上述参数用于供料参数间接测量时的可靠性及限制进行探讨。

1 研究对象及方法

1.1 研究对象

本文数据取自天津华苑 58 MW 双燃烧器中储式煤粉工业锅炉。煤粉经由制粉站通过气力输送储存于大粉仓中。锅炉运行时, 大粉仓中的煤粉通过中间仓进料阀分别进入中间仓 1 和中间仓 2, 随后通过中间仓出口的供料锁气阀进入煤粉混合器中, 与来自一次风机(罗茨风机)的空气混合, 形成均匀的气—固两相流送入燃烧器。

在锅炉运行过程中供料锁气阀持续运行, 通过变频电机控制转速, 进而调整供料量。中间仓使用自动料位控制, 当中间仓称重降低到 900 kg 时, 中间仓进料阀开启, 将煤粉由大粉仓送入中间仓, 直到中间仓称重升至 1 100 kg, 中间仓进料阀停止。锅炉结构及测点布置如图 1 所示。各传感器中, 中间仓称重位于中间仓下侧, 型号为 BK-1680, 量程上限 1 680 kg; 一次风总压测点位于一次风沿程的混合器入口处, 传感器型号 ABB-2600T, 量程 0~60 kPa, 共设置 3 个, 取其中 2 个数值差较小的测量值, 取平均作为有效数据。采用威尔巴流量计测量二次风量和三次风量, 压力上限 7 000 Pa, 传感器具有温度矫正功能, 自动矫正为 Nm³/h, 对应空气密度 1.293 kg/m³; 炉膛压力传感器量程 -1 000~1 000 Pa; 烟气氧含量传感器量程 0~21%, 各传感器数据的更新频率 ≥ 1 Hz。数据获取时间为 2019-11-01—11-30, 数据记录频率均为 1 Hz。

卸料周期,采用2.1节的方法计算每个周期的供料量,并计算5个周期供料量的均值和标准差,结果如图3所示。

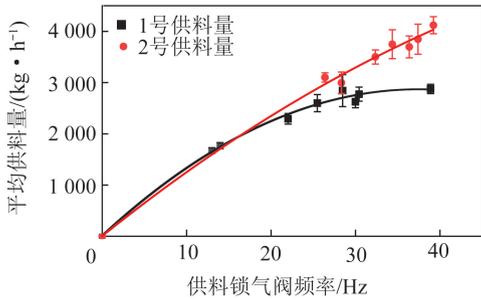


图3 锁气阀频率-供料量的关系

Fig.3 Relationship between frequency of air lock valve and feed quantity

若将煤粉填充密度视为定值,则锁气阀频率-供料量呈线性关系,对1号和2号锁气阀频率-供料量进行线性拟合, R_{Adj}^2 分别为0.8764和0.9865。但若按二次曲线方程进行拟合,则 R_{Adj}^2 分别为0.9910和0.9916,高于线性方程拟合度。说明随着转速提高,锁气阀供料量的增长速率符合二次曲线规律的边际递减,其原因包括:①转速提高使锁气阀入口的有效进料时间缩短,导致内部凹槽填充度下降;②锁气阀出口的有效卸料时间缩短,导致部分煤粉无法及时卸出;③供料量提高使一次风管阻力增加,锁气阀出口压力增大,出现由锁气阀出口指向入口的压力梯度,从而产生向上的气流,阻碍煤粉的填充^[17]。

不同锁气阀的的衰减规律存在差异,该锅炉2个锁气阀的供料曲线在低频下较接近理想值,且差距很小,但在20 Hz以上开始出现差异,其原因有待进一步探究。

2.3 一次风总压

一次风从罗茨风机出口依次经过混合器、一次风管、回流帽进入燃烧器。从物理意义角度,风机出口气流的总能量损耗,等于沿程煤粉-空气-管壁之间的摩擦、煤粉加速、文丘里加速-扩散等作用造成的能量损失之和,该损耗可用一次风压总压进行表征。

当供料量为0时,一次风沿程阻力计算公式为

$$\Delta P_a = \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 \right) \frac{\rho u^2}{2} \quad (3)$$

其中, ΔP_a 为无煤粉时的一次风总阻力,Pa; λ 为直管段的摩擦因数; ζ_1 为弯管的局部阻力系数; ζ_2 为文丘里混合器的局部阻力系数; l 为一次风管长度,m; d 为一次风管直径,m; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; u 为

次风速, m/s 。 λ 、 l 、 d 、 ζ_1 、 ζ_2 属于结构参数,在不改变文丘里喷口口径的情况下为定值。在输送煤粉时,沿程阻力上升,导致风机出口空气密度 ρ 上升, u 降低,两者反向变化,且由于罗茨风机属于恒容积式风机,风量下降速率较平缓,因此在压力变化不大的情况下, ρu^2 可近似按照定值处理。因此 ΔP_a 可取煤粉输送量为0的工况下一次风总压的平均值,结果为:1号供料器 $\Delta P_{a1} = 20.54 \text{ kPa}$,标准差0.69 kPa;2号供料器 $\Delta P_{a2} = 21.64 \text{ kPa}$,标准差0.74 kPa。

供料量 >0 时,一次风沿程阻力增加,此时一次风总压和空载一次风总压关系^[16]为

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_a} = 1 + k\mu = 1 + k \frac{m_s}{m_a} \quad (4)$$

式中, ΔP 为气固混合物通过文丘里时的总阻力,Pa; k 为未知系数; μ 为固气比, kg/kg ; m_s 为煤粉质量流量, kg/s ; m_a 为一次风空气质量流量, kg/s 。

供料系统结构固定时,在理想状态下,若假设 ΔP_a 、 k 、 m_a 为定值,则 ΔP 与 m_s 呈线性相关。根据2.2节中15个工况下所有数据的拟合结果, ΔP 与 m_s 的线性拟合 $R_{Adj}^2 = 0.9891$,说明按照该假设处理与实际数据符合很好。因此以下3个系数均按定值处理。

根据式(4),确定 k 值后,可通过供料量 >0 时一次风总压 ΔP 计算煤粉流量,即

$$k = \frac{\Delta P - \Delta P_a}{\Delta P_a} \frac{m_a}{m_s} \quad (5)$$

根据式(5)计算2.2节中1号供料器8个工况和2号供料器7个工况下的一次风总压均值(k_1 和 k_2),结果如图4所示。

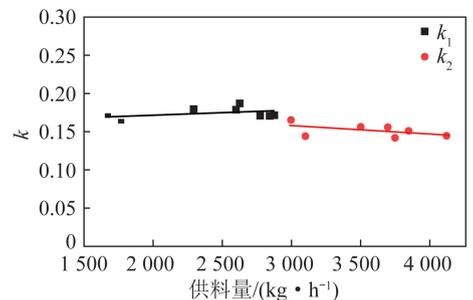


图4 系数k计算值

Fig.4 Calculated value of coefficient k

由图4可知, k_1 均值为0.1741,标准差为0.0072, k_2 均值为0.1513,标准差为0.0085,离散系数约为5%,精度可满足工业计算要求。

式(5)中质量流量 m_s 的计算方法为:空气温度 $(41 \pm 4) \text{ }^\circ\text{C}$,空气密度 $1.124 \text{ kg}/\text{m}^3$,一次风管内径135 mm,平均风速25 m/s,空气质量流量 $0.402 \text{ kg}/\text{s}$

(或 1 447 kg/h),代入式(5)得到

$$m_{s1} = 0.404 \ 6\Delta P_1 - 8 \ 310 \quad (6)$$

$$m_{s2} = 0.441 \ 8\Delta P_2 - 9 \ 564 \quad (7)$$

式中, m_{s1} 、 m_{s2} 分别为供料锁气阀 1、2 的供料量,kg/s; ΔP_1 、 ΔP_2 分别为供料系统 1、2 的一次风总阻力,Pa。

根据式(6)和式(7),可得到锅炉总供料量 m_{ss} 为

$$m_{ss} = 0.404 \ 6\Delta P_1 + 0.441 \ 8\Delta P_2 - 17 \ 874 \quad (8)$$

2.4 炉膛压力

根据理想气体状态方程

$$PV = nRT \quad (9)$$

其中, P 为压力,Pa; V 为体积, m^3 ; n 为气体摩尔数; R 为常数; T 为温度,K。其他参数不变、供料量增加时,若燃料燃尽率无明显下降,则煤粉放热量增加,炉膛温度 T 升高,由于炉膛体积 V 和助燃风量 n 均不变,因此炉膛压力 P 升高。要得到供料量-炉膛压力绝对值的关系,需要确定与热态相同二次风量、三次风量、引风机频率等相同工况下的冷态炉膛压力空白值。由于锅炉长期处于运行状态,缺少可供参照的冷态数据,因此难以分析供料量-炉膛压力的关系,仅可通过热态炉膛压力和一次风总压的波动,推断炉膛压力波动-供料波动的关系。

选取 93 组取样时间为 300 s、频率 1 Hz 的数据,每组数据取样时锅炉各设备参数保持不变,根据式(8)计算瞬时供料量,结果如图 5 所示。

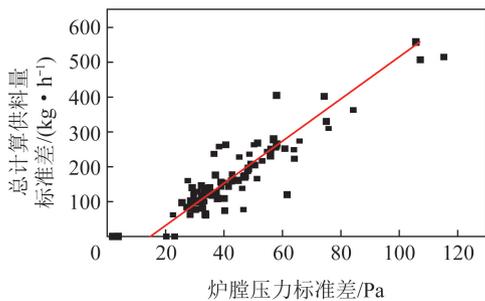


图 5 供料量标准差-炉膛压力标准差

Fig.5 standard deviation of feed quantity-standard deviation of furnace pressure

由图 5 可以看出,炉膛压力与供料量之间呈明显的线性相关性,因此 R_{Adj}^2 可用于反映 2 个参数的相关程度。此外, x 轴截距为 14 Pa,说明当供料波动为 0 时,炉膛压力仍存在其他因素导致的 14 Pa 波动值。

由供料量变化引起的炉膛压力变化存在滞后性,因此取样时间也是影响两者相关性计算结果的重要因素。以取样时间为横轴,供料量标准差-炉

膛压力标准差的 R_{Adj}^2 为纵轴,绘制关系曲线如图 6 所示,图 5 中的 R_{Adj}^2 对应图 6 中的一个点。为便于对比,将对炉膛压力有显著影响的配风量参数以同样方式计算,结果如图 6 所示。

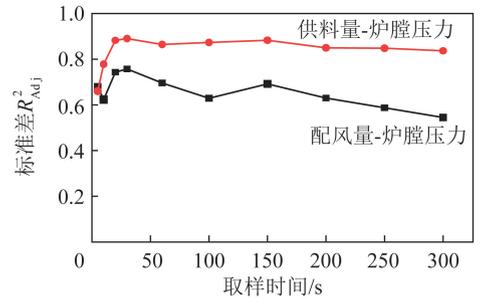


图 6 配风量/供料量波动-炉膛压力波动 R_{Adj}^2

Fig.6 Distribution air volume/feed volume fluctuation-furnace pressure fluctuation R_{Adj}^2

由图 6 可知,配风量标准差-炉膛压力标准差、供料量标准差-炉膛压力标准差的线性相关程度均显著受取样时间影响,当取样时间为 30 s 时,两者相关性达到最大值, R_{Adj}^2 分别为 0.757 2、0.890 1,此时使用炉膛负压波动可较好推断供料波动,但准确性低于使用一次风总压的计算结果。

2.5 烟气氧含量

氧含量和供料量、二次风量、三次风量、煤粉燃尽率等参数关联较大,与炉膛压力不同,锅炉氧含量有固定的空白值,即空气中的氧含量 0.21。因此可使用烟气氧含量推断供料量和供料波动,耗氧量的计算公式为

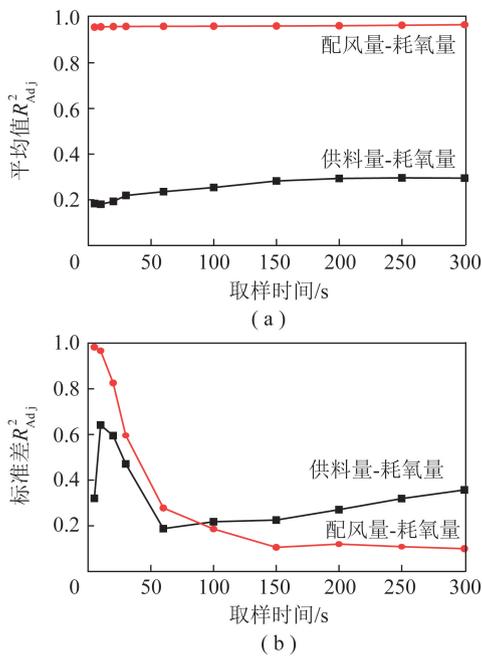
$$Q(O_2) = (A_1 + A_2 + A_3) [0.21 - w(O_2)] \quad (10)$$

式中, $Q(O_2)$ 为锅炉耗氧量, Nm^3/h ; A_1 、 A_2 、 A_3 为总一次风量、总二次风量、总三次风量, Nm^3/h ; $w(O_2)$ 为氧含量。

取 53 组数据,采用 2.4 节的方法依次确定 2 个参数是否符合线性关系,计算不同取样时间下配风量-耗氧量、供料量-耗氧量的 R_{Adj}^2 ,如图 7(a)所示,配风量标准差-耗氧量标准差、供料量标准差-耗氧量标准差的 R_{Adj}^2 ,如图 7(b)所示。

由图 7(a)可知,配风量-耗氧量 R_{Adj}^2 受取样时间影响很小,均大于 0.955 7,说明耗氧量可较好反映配风量。供料量-耗氧量 R_{Adj}^2 在取样时间超过 200 s 后达到最大值,仍小于 0.296 1,说明采用耗氧量推断配风量可靠性较高、推断供料量的可靠性较差。

由图 7(b)可知,取样时间为 5 s 时,配风量标准差-耗氧量标准差线性相关程度最高, $R_{Adj}^2 =$

图7 耗氧-供料/配风 R^2_{Adj} Fig.7 oxygen consumption-feed/air distribution R^2_{Adj}

0.982 2; 取样时间为 10 s 时, 供料量标准差-耗氧量标准差线性相关程度最高, $R^2_{Adj} = 0.640 8$, 说明采用耗氧量波动推断配风量波动的可靠性很高、推断供料量波动的可靠性中等。

在较长时间跨度上, 该锅炉同样供料量下的耗氧量有较大变化, 主要是由于该锅炉煤粉为 2 种热值相差较大的煤粉掺混而成, 说明 2 种煤粉的掺混比例控制可能较差, 导致成品煤粉的热值/元素组成存在较大波动。

3 结 论

1) 中间仓进料阀关闭时, 可通过中间仓称重数据进行线性回归, 以高准确度计算供料器 300 s 周期内的平均供料量。但受限于称重传感器的分辨率及局部干扰数据, 中间仓称重无法用于瞬时供料量或供料波动。

2) 采用供料锁气阀转速计算供料量, 需假设锁气阀凹槽填充率和填充密度为定值, 锁气阀低转速下供料曲线符合该假设。但随着锁气阀转速增加, 有效进料/出料时间的缩短和出口压力的提高, 使供料量随转速的增长率以二次曲线边际递减, 且不同锁气阀的供料量递减规律存在个体差异。

3) 采用一次风总压计算供料量, 一次风总压-供料量 $R^2_{Adj} > 0.98$, 具有较高的计算准确性, 缺点是需要根据每台设备的累计运行数据计算系数 k 。

4) 使用炉膛负压波动可较好反映供料波动, 当

取样时间为 30 s 时, 供料量标准差-炉膛压力标准差 R^2_{Adj} 达到最大值, 为 0.890 1, 但该方法准确性低于使用一次风总压的计算结果。

5) 供料量-耗氧量 R^2_{Adj} 在取样时间 200 s 时达到最大值, 为 0.296 1; 供料量标准差-耗氧量标准差 R^2_{Adj} 在取样时间 10 s 时达到最大值, 为 0.640 8。说明使用耗氧量推断供料量、供料波动的可靠性相对较低, 这可能是由于该锅炉燃料煤粉的掺混比例波动较大导致。

参考文献 (References):

- [1] 柳行, 姚著, 王浩然. 基于风煤比煤质校正的锅炉燃烧自动调整[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 75-80.
LIU Xing, YAO Zhu, WANG Haoran. Auto combustion adjustment in boiler based on coal quality correction using air to coal ratio [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 75-80.
- [2] 金锋, 陆增喜, 吴恩庚, 等. 电容式传感器在高炉喷吹煤粉质量流量测量中的应用[J]. 钢铁, 1999, 34(10): 56-59.
JIN Feng, LU Zengxi, WU Engeng, et al. Application of capacitance transducers to mass flow measurement of pulverized coal injection to the blast furnace [J]. Iron and Steel, 1999, 34(10): 56-59.
- [3] 刘仁学, 金锋, 陆增喜, 等. 高炉喷吹煤粉总管质量流量的在线连续测量[J]. 钢铁, 2000, 35(1): 9-12.
LIU Xteren, JIN Feng, LU Zengxi. On-line continuous measurement of pulverized coal mass flow rate in main pipe for injection into blast furnace [J]. Iron and Steel, 2000, 35(1): 9-12.
- [4] CHENG Y, LIME W C, WANG C H, et al. Electrostatic characteristics in a large-scale triple-bed circulating fluidized bed system for coal gasification [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 75: 435-444.
- [5] XUE L, WANG S M, TANG G H, et al. Sensing characteristics of electrostatic inductive sensor for flow parameters measurement of pneumatically conveyed particles [J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(9): 582-592.
- [6] XUE L, LI J, WANG S M. A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 26: 68-78.
- [7] MURNANE S N, BARNES R N, WOODHEAD S R, et al. Electrostatic modeling and measurement of airborne particle concentration [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1996, 45: 488-492.
- [8] 赵延军, 陆勇, 朱伯友. 浓相气固两相流质量浓度摩擦电法测量研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2002, 32(6): 941-943.
ZHAO Yanjun, LU Yong, ZHU Boyou. Measuring mass concentration of gas-solid multiphase flow by triboelectricity [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32(6): 941-943.
- [9] 李学颜, 王勇. 应用在线测量技术实现大型电厂煤粉锅炉节能减排 [J]. 中国电力, 2009, 42(2): 92-95.
LI Xueyan, WANG Yong. On-line measurement technology is ap-

- plied to realize energy saving and emission reduction of pulverized coal boiler in large power plant[J]. *Electric Power*, 2009, 42(2): 92-95.
- [10] 江华东.微波固体流量计在煤粉测量中的应用[J]. *石油化工自动化*, 2009(3): 54-55.
JIANG Huadong. Application of microwave solid flowmeter in pulverized coal measurement[J]. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2009(3): 54-55.
- [11] 王祝翔.核物理探测器及其应用[M].北京:科学出版社, 1964: 5-28.
WANG Zhuxiang. Nuclear physics detectors and applications [M]. Beijing: Science Press, 1964: 5-28.
- [12] 李朝阳,孙普男.用于火力发电厂的一种新型煤粉流量计的研制[J]. *传感器技术*, 2000, 19(5): 35-38.
LI Zhaoyang, SUN Punan. Development of new flowmeter of coal powder for power stations[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2000, 19(5): 35-38.
- [13] 吴占松,谢菲.用于管道煤粉流量测量的文丘里管型设计及优化[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(5): 666-669.
WU Zhansong, XIE Fei. Optimization of Venturi tube design for pipeline pulverized coal flow measurements [J]. *J. of Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2007, 47(5): 666-669.
- [14] 刘鑫屏,孟令虎.大型煤粉锅炉炉膛压力波动特性分析[J]. *热力发电*, 2019, 48(4): 77-83.
LIU Xinpeng, MENG Linghu. Fluctuation characteristics of furnace pressure in large-scale pulverized coal boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(4): 77-83.
- [15] 田亮,刘鑫屏,王琪,等.基于多尺度相关和机理建模的炉膛压力分析[J]. *动力工程学报*, 2012, 32(11): 853-858.
TIAN Liang, LIU Xinpeng, Wang Qi. Analysis of furnace pressure based on multi-scale correlation and mechanism modeling [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012, 32(11): 853-858.
- [16] 杨兴森,尹静.用文丘里测量风粉混合物的浓度和流量[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(8): 121-122.
YANG Xingsen, YIN Jing. Flow measuring of gas-solid mixture using an venturimeter [J]. *Journal of Instrumentation*, 2005, 26(8): 121-122.
- [17] 陶顺龙,陆海峰,郭晓镭,等.煤粉料仓通气下料流动行为[J]. *化工学报*, 2014, 65(4): 1186-1193.
TAO Shunlong, LU Haifeng, GUO Xiaolei, et al. Flow behavior of aerated discharging of pulverized coal from hopper [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(4): 1186-1193.