

循环流化床锅炉循环流率在线测量方法研究

刘贤东¹, 吴玉新¹, 张 扬¹, 周 帅², 杨海瑞¹, 张 海¹, 吕俊复¹, 张 凯²

(1. 清华大学 能源与动力工程系 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 太原锅炉集团有限公司, 山西 太原 030023)

摘要: 高温床料的循环流率是循环流化床锅炉的重要参数, 但目前鲜有能应用于实际锅炉中的测量技术。为此, 笔者提出了一种新型冲击式循环流率的在线测量方法, 并研制了原理样机; 建立了测量过程的理论模型并进行了实验室冷态试验, 将新型循环流率测量方法应用于某 116 MW_{th} 循环流化床锅炉中进行热态试验。测量装置具有悬臂梁式几何结构, 其整体布置于循环流化床锅炉立管底部。悬臂梁型装置的一端固定于锅炉外壁面, 另一端固定有靶片并伸入至立管密相区中。装置通过测量立管物料下落时冲击靶片而造成的形变来计算颗粒冲击力并反推颗粒冲击速度, 进而获得循环流率。同时, 通过仪表风吹扫冷却装置并防止堵塞。该方法具有耐受高温、可在线测量和不影响锅炉正常运行等优点。冷态试验测量得到不同冲击速度下的气固两相流绕流阻力和阻力系数, 随着冲击速度增大, 气固绕流阻力随之增大而阻力系数减小, 且存在“剪切变稀”现象。在实际锅炉的热态测试中, 该测量装置能较好地捕捉到锅炉起停炉、变负荷时循环流率变化趋势。通过量级分析并利用炉膛稀相区压差与炉膛截面风速之积校核测量结果, 验证了该方法在实际循环流化床锅炉中在线应用的可行性。

关键词: 循环流化床; 循环流率; 冲击法; 在线测量; 流量计

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)03-0009-07

Research on in-situ measurement method for ash circulating rate of circulating fluidized bed

LIU Xiandong¹, WU Yuxin¹, ZHANG Yang¹, ZHOU Shuai², YANG Hairui¹, ZHANG Hai¹, LYU Junfu¹, ZHANG Kai²

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and

Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Taiyuan Boiler Group Co., Ltd., Taiyuan 030023, China)

Abstract: The ash circulating rate of high-temperature bed material is a crucial parameter for circulating fluidized bed (CFB) boilers, while there is no measurement technology that can be applied to the industrial boiler at present. Therefore, an *in-situ* impact measurement method for solid particle circulation rate of CFB boilers was proposed in this paper, and its prototype equipment was built. The theoretical model of the measurement process was established and the cold state test was carried out in the laboratory. The proposed measurement method of circulating flow rate measurement was also applied to a 116 MW_{th} CFB boiler for a hot state test. The prototype equipment had the geometry structure of cantilever, which was arranged at the bottom of standpipe in circulating fluidized bed. One end of the prototype was fixed with the outer wall surface of the boiler and the other end carrying a target piece was inserted into the dense phase area of standpipe. The device calculated the impact force of particles and reversed the impact velocity of particles by measuring the deformation caused by the impact on the target plate when the materials in the riser fell, so as to obtain the circulating flow rate. Meanwhile, instrument air is supplied to cool equipment and prevents it from blocking. This measurement method has the advantages of high-temperature resistance, the ability of in-situ measurements and no disturbances to the boiler operation. The results indicate that the resistance and resistance coefficient of gas-solid flow at different impacting velocity are measured in cold state experiment. As the increase of impact velocity,

收稿日期: 2020-04-26; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20042601

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFF0216002); 清华大学山西清洁能源研究院创新项目种子基金资助项目

作者简介: 刘贤东(1996—), 男, 湖南岳阳人, 博士研究生, 主要从事循环流化床燃烧研究。E-mail: liuxd18@mails.tsinghua.

edu.cn。通信作者: 张扬, 助理教授, 主要从事燃烧技术研究。E-mail: yang-zhang@tsinghua.edu.cn

引用格式: 刘贤东, 吴玉新, 张扬, 等. 循环流化床锅炉循环流率在线测量方法研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 9-15.

LIU Xiandong, WU Yuxin, ZHANG Yang, et al. Research on in-situ measurement method for ash circulating rate of circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 9-15.



移动阅读

the gas-solid flow resistance increases and the resistance coefficient decreases and the phenomenon of shear shinning appears. In hot state test in real boiler, the measuring method is capable of capturing the variation of the ash circulating rate when the boiler starts, shuts-down and the load changes. Based on the magnitude analysis and the checking calculation with the product of pressure drop of dilute phase area in furnace and average velocity in furnace, the feasibility of the *in-situ* utilization of the proposed method in CFB boilers is verified.

Key words: circulating fluidized bed; circulating rate; impact method; *in-situ* measurement; flowmeter

0 引言

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)锅炉燃烧技术一种高效低污染的燃煤技术,近些年来发展迅猛^[1-4]。目前我国在建以及投运的CFB锅炉累计4 000余台,总装机容量也超过1亿kW^[5]。循环流率(G_s , kg/(m²·s))是循环流化床设计与运行的重要参数,定义为CFB炉膛中单位截面内循环灰的质量通量。不同 G_s 值对应于不同流动状态,只有当炉膛内 G_s 超过饱和携带率时,炉膛内才能达到快速流态化状态^[6],进而获得较好的燃烧状态和传热能力^[7]。新近研究^[8]表明,如果炉膛内流态设计合理,CFB锅炉可在不使用选择性催化还原、选择性非催化还原等烟气脱硝技术条件下,达到原始NO_x排放低于50 mg/Nm³的超低排放水平。循环流率 G_s 是流态的表征变量, G_s 的实时在线监控对CFB锅炉流态优化与调整,乃至CFB锅炉整体性能提升具有重要意义。

虽然 G_s 备受关注,但目前尚无成熟的可应用于实际锅炉中的 G_s 在线监测技术^[9]。部分学者在实验室开发了一些测量CFB的 G_s 值方法,但大多受限于锅炉内高温环境和强烈的颗粒磨损而不能直接应用于真实CFB锅炉的在线实时测量。Burkell等^[10]总结了CFB循环流率测量中常用的5种方法:孔板流量计、量热法、蝶阀法、下降时间法和冲击式流量计法。对于孔板流量计而言,低流率时示数太小难以检测,高流率时波动太大,且对流动的干扰破坏比较严重。蝶阀法常用于冷态试验,但高温时该方法会破坏锅炉正常循环且难以对物料堆积速率进行观测^[11]。量热法测量精度受限于传热系数估计的准确性,会为锅炉带来额外热损失^[12]。下降时间法是通过测量示踪颗粒的下降速度来估算床料速度,但高温下难以对示踪颗粒进行测量^[13]。冲击式流量计法是将冲击片放入立管中,并通过悬臂梁的结构将颗粒冲击信号转化为受力信号后进行测量。该方法已在冷态试验台上得到应用^[14],该方法的机械测量特性使其有望推广到高温测量。

此外,一些学者提出其他方法。Davies等^[15]对声学方法测量固体循环流率进行总结,但这些方法

均无法耐受高温环境。Medrano等^[16]采用颗粒提取、粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)及数字图像分析(digital image analysis, DIA)、压降法3种方法测量循环流率,但颗粒取样法会破坏锅炉正常运行、PIV/DIA方法需要透明壁面用于观测。压降法是将提升管中稀相区压降与循环流率关联,但该关联公式参数与锅炉设计有关,只能对同一台锅炉进行定性估计,不具有可推广性。

总之,目前尚未有能够成熟应用于工业CFB锅炉中的循环流率测量方法。理想测量方法应具有能在线测量、对流场影响小、能耐受高温等特点,而通过对现有方法的比较与分析,冲击式流量计法有潜力满足以上需求。本文基于冲击法的原理,提出了一种CFB锅炉 G_s 在线测量方法,并开发出了原理样机在实际CFB锅炉上进行工业试验,验证了其可行性。本文的研究成果是该方法的初步探索,为 G_s 测量技术的进一步开发提供了理论指导。

1 CFB锅炉循环流率 G_s 的冲击式测量原理

流体绕流掠过物体时,会对物体产生一定的作用力,作用力大小与流体掠过物体的速度有关。冲击式流量计就是利用这种原理实现对循环流率的测量。冲击式流量计测量示意如图1(a)所示。该流量计的原理性核心部件有靶片、靶杆和固定端3部分。靶片即为放入流场中的物体,可为圆盘、圆柱、圆球状;固定端与外壁面相连且保持稳定,不随流速变化而发生位移;靶杆是一根金属细长杆,将靶片和固定端相连,在靶杆靠近固定端的一侧安装应变传感器,用来测量靶杆当地的应变。测量时,此装置应安装在分离器下方立管密相区中靠上的位置。靶杆穿过壁面和保温层,将靶片放置在立管下方密相区中(图1(b))。锅炉运行时,立管密相区内气固两相流可视为拟流体^[17],处在单向黏性流动状态^[18]。此密相区靠下的部分受到返料阀结构和返料风的影响,横截面速度分布较为复杂。而此密相区靠上的部分处在近似最小流态化状态^[19]。除去壁面附近边界层内固体颗粒流速较慢外,其余部分流速分布均匀,且流速较小(量级0(0.1), m/s),若获得了该截面上某个点的流速,则可视为平均速度并以此计

算得到立管整个横截面的质量流速,进而推出 CFB 锅炉炉膛内的 G_s 值。基于上述分析,本文提出 G_s 测量方法。

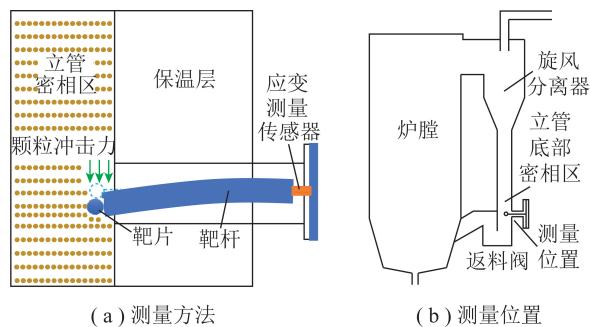


图1 冲击式流量计测量原理

Fig.1 Measurement principle of impact flowmeter

立管密相区内颗粒向下流动并冲击靶片,该冲击力可根据流体理论与冲击速度、冲击投影面积相关联(式(1))^[20]。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_s v^2 A_i \quad (1)$$

其中, F 为颗粒对靶片冲击力, N; C_D 为气固绕流阻力系数; ρ_s 为立管底部密相气固两相流表观密度(固体颗粒主导), kg/m^3 ; v 为冲击速度, m/s ; A_i 为靶片在受力方向的投影面积, m^2 , 由靶片结构及布置方向决定。立管中的固体颗粒质量流率可表示为

$$f = \rho_s v \quad (2)$$

式中, f 为立管内物料颗粒向下运动的质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

该冲击式流量计整体呈悬臂梁结构,故施加在靶片上的颗粒冲击力 F 与靶片本身重力(mg)的合力会造成靶杆弯曲,产生形变,被安装在靶杆根部的应变传感器感知,进而根据应变大小、靶杆几何结构和材料性质计算出冲击力大小(式(3))^[21]。

$$(F + mg)L = W_z \sigma = W_z E \varepsilon \quad (3)$$

其中, L 为靶片至靶杆根部应变传感器间距, m ; W_z 为靶杆根部截面抗弯截面系数, m^3 , 由靶杆几何结构决定; σ 为靶杆在应变传感器布置位置处所受应力, Pa ; E 为靶杆材料的弹性模量, Pa ; ε 为传感器所测应变值。基于式(3),可根据传感器所测应变值得到颗粒冲击力 F 大小,即为式(1)中气固绕流阻力。

锅炉处在稳态运行时,锅炉内的物料近似符合连续性方程(式(4))为

$$G_s A_r = f A_s \quad (4)$$

式中, A_r 、 A_s 分别为炉膛(提升管)和立管的横截面面积, m^2 。

联立式(1)~(4)可以得到 G_s 值。确定气固绕

流阻力系数 C_D 是准确获得 G_s 值的关键。本文通过实验室直接测量的方法确定 C_D 值和靶片的受力情况,进而使用 C_D 值开展该方法在实际 CFB 锅炉上的应用研究。

2 试验研究方法装置

本文试验研究分 2 个层次:一是在开展实验室规模的研究工作,确定气固流动的绕流阻力系数 C_D ;二是开展工程试验应用,确定该方法的可行性。

2.1 气固流动绕流阻力研究

阻力系数 C_D 与气固绕流雷诺数、靶片形态有关,其影响因素较为复杂,故本文通过试验进行标定。根据式(1)测量原理,密度 ρ_s 表征气固两相流表观密度,考虑到立管密相区内气固流态为最小流化状态^[19],该密度值可对循环灰取样后测量得到。

阻力系数测量试验装置如图 2 所示。考虑到直接采用气固两相流冲击靶片较难实现,因此试验中转换研究对象,将固体颗粒流化至最小流化状态,控制冲击式流量计以不同速度冲击“静止”颗粒并测得其受力 F (图 2(a))。由式(1)计算得到不同冲击速度下的气固绕流阻力系数。试验所用物料为石英砂,密度约为 $2\,600\text{ kg}/\text{m}^3$ 。对物料进行窄筛分(图 2(b)),其平均粒径为 $187.23\ \mu\text{m}$ 。实际锅炉运行过程中循环灰密度约为 $2\,800\text{ kg}/\text{m}^3$,粒径为 $80\sim 200\ \mu\text{m}$,冷态试验与实际锅炉中物料具有一致性,与实际锅炉中循环灰粒径相近。装置中料层厚度为 300 mm ,试验过程中将靶片完全没入料层中,并控制靶片以不同速度冲击流化后的颗粒。根据以往运行经验,立管内气固流动速度在 $0.1\sim 0.2\text{ m}/\text{s}$,试验中将覆盖该速度范围。实际锅炉运行时靶杆为水平放置且靶片受竖直冲击力,而本试验中靶杆为竖直放置且靶片并受水平冲击力,因此需要考虑二者不同对试验结果的影响。靶杆水平放置时,计算靶片受力时需要额外考虑靶片重力和气固两相流浮力带来的影响,但靶片重力在实际计算中将予以修正(式(3)),而气固两相流浮力 F_b 可根据式(5)计算。

$$F_b = \rho_s V g \quad (5)$$

式中, V 为靶片体积, m^3 ; g 为重力加速度, kg/m^3 。

计算得到浮力 F_b 仅为颗粒冲击力 F 的 2% 左右,实际计算中可忽略。因此,修正重力后的实验室测量结果可以应用于实际工业过程中的测量。

2.2 G_s 在线测试方法在实际 CFB 锅炉中的试验研究

在线 G_s 测试系统如图 3 所示。整个系统分为冲击式 G_s 传感系统、送风系统和电控系统(图 3

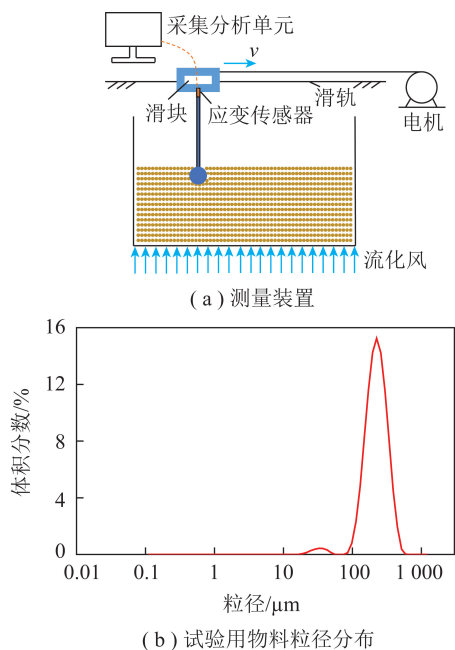
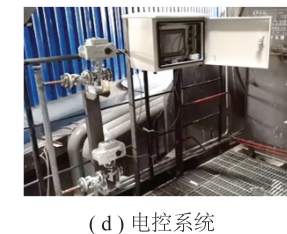
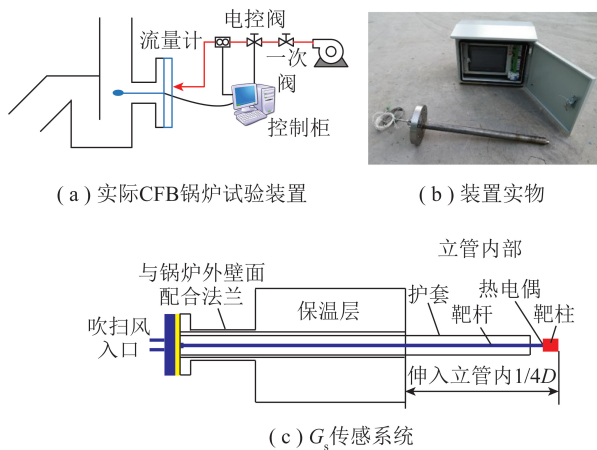


图2 气固两相流绕流阻力测量系统

Fig.2 Gas-solid flow resistance measurement system

(a)。冲击式 G_s 传感系统能够将靶片位置的 f 值转化为电压信号;送风系统为测量装置提供仪表风;控制电控系统能够进行信号处理,输出 G_s 数据,同时对数据采集过程、送风阀门等进行控制。

图3 G_s 在线测试系统Fig.3 G_s in-situ measurement system

G_s 传感系统设备安装位置选择立管底部密相区上部。实际使用过程中,考虑到颗粒冲击力的测量通过靶杆弯曲实现,因此需要为靶杆安装护套,护套为圆筒形,正好包裹住靶杆。护套仅使柱状靶片暴

露于颗粒冲击下,提高测量精度。同时向护套内空隙处以流量 $0.5 \sim 1.0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 送入仪表风,风量选取的原则是既能够对靶杆进行有效冷却,又防止高温物料沿靶杆反窜以保证靶杆的弯曲空间,同时防止气流量过大对靶片附近的气固流动特征产生影响。仪表风从锅炉压缩空气母管引出,通过电控阀门调节流量后送入循环流率测量装置内。在测量位置处提前在保温层内开孔,并在外壁面焊好配合法兰。靶片伸入立管内 $1/4D$ 深度 (D 为立管直径),以避免流动边界层。此外,在靶柱内侧安装热电偶测量靶柱处温度。

为实现高温下测量需求,该样机全部采用 2520 钢加工制作。应变传感器采用 BHB120-4AA250 型中温应变片,耐温 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该装置长度为 600 mm,其中伸入立管内 150 mm。利用前文所测阻力系数预估颗粒冲击力,以此作为靶片尺寸设计依据。其几何结构采用圆柱形式,尺寸为 $\phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。该靶片尺寸下,靶片投影面积与立管横截面投影面积之比为 0.28%,故可认为该装置的放置不会对立管内气固流场造成影响。由于密相区内会随机产生一些气泡对传感器读数产生干扰,控制系统采取了滤波处理,去掉测量曲线上的毛刺。

测量方法的优势在于将感受器和传感器分开:靶片作为感受器布置于立管内,接收颗粒冲击信号,该信号通过机械方式传递给位于靶杆根部的应变传感器。该测量形式使相对脆弱的传感器远离立管高温区,且信号的机械传递方式也易于在高温下实现。该方法能够解决实际炉内高温、磨损等问题,也能实现实际锅炉的在线测量。

3 结果与讨论

3.1 气固绕流流动阻力测量

气固两相流绕流阻力 F 和阻力系数 C_D 测量试验结果如图 4 所示。试验所测冲击速度为 $0.12 \sim 0.22 \text{ m/s}$,基本涵盖了立管内物料流速波动范围。试验中气固流态接近最小流化状态。随着速度 v 的增加,靶球的受力 F 也单调增加。根据式(1)计算得到的阻力系数 C_D 在测试范围内随着 v 的增加而减小。文献[22]研究表明 C_D 与雷诺数和表观黏度有关,而气固两相“拟流体”存在显著的“剪切变稀”现象,即表观黏度随剪切率的增加而减小。这与图 4 的测量现象一致。试验表明该气固两相流中绕流阻力系数较大,为后续装置设计提供了数据参考。

3.2 实际锅炉中 G_s 在线测量

样机在某 116 MW_{in} 循环流化床锅炉进行试验,

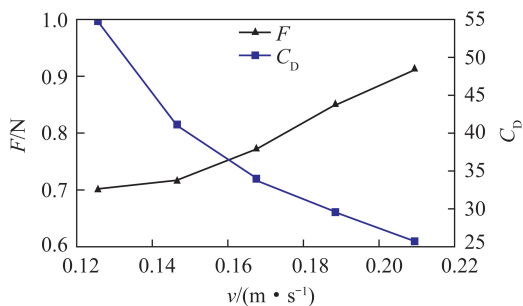


图4 气固两相流绕流阻力系数测量结果

Fig.4 Measurement results of resistance coefficient of gas-solid flow

考虑到立管密相区处于正压,因此本装置安装在起炉前进行,锅炉运行后保持装置密封。本文选取了该锅炉起炉后 60 h 内数据开展分析,该段时间内锅炉运行参数与装置测量应变值如图 5 所示。初始时炉膛截面风速 v_r 和炉膛稀相区压差 Δp 不为 0,这是由于压火期间一次风全关,而二次风关小。但二次风布置位置较高,起不到流化作用,因而此时实际循环流率为 0。在起炉阶段,一次风迅速全开,因而炉膛截面风速上升,锅炉负荷随之上升。由于系统惯性较大,稀相区压差缓慢上升。在停炉阶段应变测量信号不变,这是由于装置所测信号为靶杆弯曲应变,停炉时靶杆会随机停留在某一弯曲状态,因此此时虽然测量信号值不为 0,但系统识别一段时间内信号值无变化,即判定此时处于停炉状态,循环流率为 0。而起炉时存在一个明显的脉冲信号,且该脉冲信号缓慢减小至稳定后继续增长。这是由于刚起炉阶段立管内堆积物料从静止开始运动,转变初始时有较大的冲击力,导致了明显的脉冲信号。由于停炉时物料堆积于立管内,因而在刚起炉时立管物料流率 f 较大,且物料流出值大于炉膛物料返回量。

随着立管内堆积物料逐渐流入炉膛,装置所测立管物料流率逐渐减小,这与图 6 规律一致。而随着炉膛内风速增加且开始投煤,炉膛返回立管的物料量增加,导致立管内物料流率又开始上升。同时,炉膛内截面风速较短时间内即达到设定值并基本稳定,但装置测量信号值上升速度较慢。这是因为:一方面,截面风速达到设定值后,通过持续投煤炉膛内 G_s 才能开始上升;另一方面,由于系统惯性,炉膛内 G_s 与立管内物料流率 f 缓慢达到平衡。锅炉运行一段时间后,降低二次风风量并降低负荷,此时 G_s 下降,但由于系统状态改变不大,因而系统延迟较小,立管响应较快,而装置测量信号也捕捉到此时物料流率的瞬时变化。

根据前文所述测量原理可计算出该段时间内循

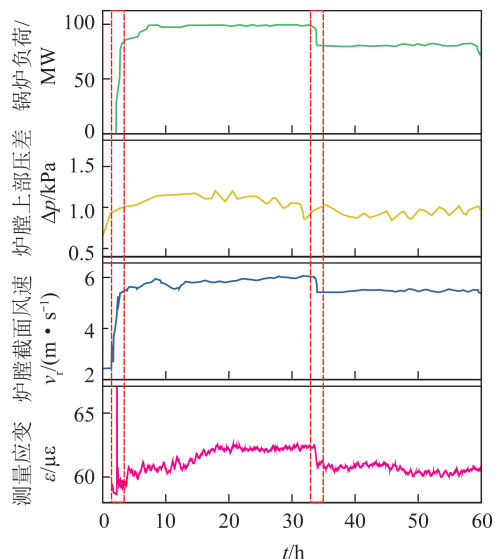


图5 60 h内锅炉运行参数与应变信号值的变化

Fig.5 Change of boiler operating parameter and measured strain signal in 60 hours

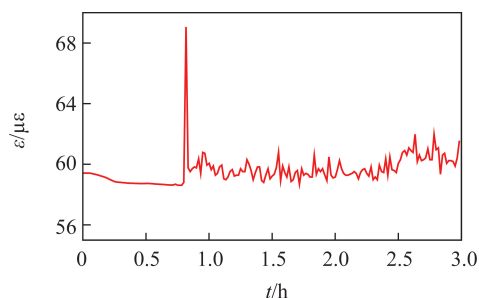


图6 起炉阶段测量信号的变化

Fig.6 Change of strain signal in the boiler start-up process

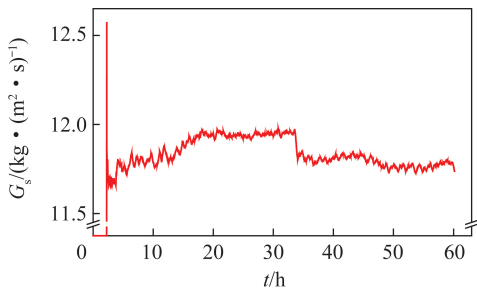
环流率 G_s 实时变化值,如图 7 所示,该 G_s 值在量级上与锅炉定态设计相符^[23]。目前尚未有成熟的工业循环流率测量方法,实际锅炉中常用炉膛截面风速 v_r 与稀相区压差 Δp 对循环流率进行估算。炉膛截面风速 v_r 与固体颗粒终端速度正相关,而炉膛上部稀相区压差可认为近似等于气固两相流重力压降。

$$\Delta p = \rho_r g \Delta h \quad (6)$$

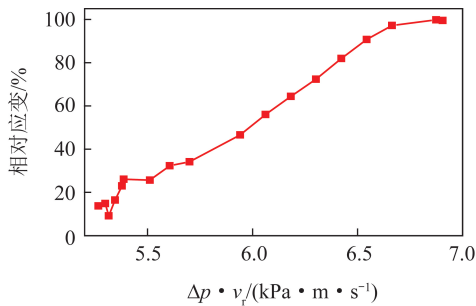
其中, Δp 为炉膛上部稀相区压差, Pa; ρ_r 为炉膛气固两相流密度, kg/m^3 ; Δh 为炉膛中部压力测量点至炉膛顶部高度, m。考虑到炉膛出口压力近似为大气压,因此认为炉膛中部压力测量点所测差压即为炉膛上部稀相区压差。

由式(6)可知,炉膛稀相区压差 Δp 与炉膛内气固两相流密度正相关,因此可以用 $\Delta p \cdot v_r$ 估算炉膛 G_s 值。

考虑到刚起炉阶段立管与炉膛内尚未达到流动平衡,因此选取流动稳定后 24 h 内运行数据(包含降负荷过程)并研究该时间段内 $\Delta p \cdot v_r$ 与相对测量

图7 G_s 随时间变化Fig.7 Change of G_s with time

应变值间对应关系,如图8所示。 $\Delta p \cdot v_r$ 与所测应变信号有较好的单调对应关系,进一步证明了本测量方法的可行性。

图8 $\Delta p \cdot v_r$ 与测量过程内相对应变对应关系Fig.8 Relationship between $\Delta p \cdot v_r$ and relative strain

由前文分析可知,该新型冲击式循环流率测量方法能较好地捕捉锅炉起停炉、降负荷等过程中的循环流率变化趋势。对测量结果进行量级分析且利用 $\Delta p \cdot v_r$ 估算并校核 G_s 的测量结果,证明了该测量方法的可行性。但目前仍缺乏精确测量循环流率方法,因此本装置测量数据暂时无法精确标定。后续工作中将进一步分析冲击式流量计测量过程中测量应变信号与循环流率的转换关系,进一步提高该测量方法的精度。

4 结 论

1) 本文提出了一种循环流率的冲击式在线测量方法,该方法可在实际循环流化床锅炉高温环境中运行,能实现在线实时测量且不会对锅炉运行造成干扰。建立了该冲击式流量计的理论模型,利用冷态试验完善模型并在热态锅炉中进行测试。通过实验室冷态试验测量得到了不同冲击速度下的气固两相流绕流阻力 F 和阻力系数 C_D ,为后续装置设计提供了数据参考。

2) 基于该方法开发了 G_s 在线测量装置样机并在某 116 MW_{th} 循环流化床锅炉中进行了热态测试,结果表明该方法能够快速及时地捕捉到起炉、停炉、

变负荷等过程中 G_s 变化情况。

3) 在热态测试中,根据量级分析,利用 $\Delta p \cdot v_r$ 估算 G_s 并标定装置,证明了本测量装置的测量准确性。目前仍缺乏精确的循环流率测量方法,因此暂无法对测量信号进行精准标定。在后续工作将进一步分析装置测量中物理过程并开发标定方法。

参考文献 (References):

- [1] KE Xiwei, CAI Runxia, ZHANG Man, et al. Application of ultra-low NO_x emission control for CFB boilers based on theoretical analysis and industrial practices [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 181(1): 252-258.
- [2] 苗苗, 张曼, 吕俊复, 等. 流化床燃烧中 N_2O 生成机理与减排技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(6): 507-517. MIAO Miao, ZHANG Man, LYU Junfu, et al. N_2O formation mechanism and control in circulating fluidized bed [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(6): 507-517.
- [3] ZHANG Yi, ZHANG Man, YAO Xuan, et al. The exit impact on segregation of binary particles in the CFB system [J]. Powder Technology, 2018, 339: 930-938.
- [4] ZHU Shahong, ZHANG Man, HUANG Yiqun, et al. Thermodynamic analysis of a 660 MW ultra-supercritical CFB boiler unit [J]. Energy, 2019, 173(15): 352-363.
- [5] 蔡润夏, 吕俊复, 凌文, 等. 超(超)临界循环流化床锅炉技术的发展[J]. 中国电力, 2016, 49(12): 1-7. CAI Runxia, LYU Junfu, LING Wen, et al. Development of super (super) critical circulating fluidized bed boiler technology [J]. China Power, 2016, 49(12): 1-7.
- [6] CAI R X, ZHANG H, ZHANG M, et al. Development and application of the design principle of fluidization state specification in CFB coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 174: 41-52.
- [7] SUN S C, LU X F, ZHOU S L, et al. Investigation on heat exchange feasibility of internal solids circulation for an ultra-supercritical CFB boiler [J]. Powder Technology, 2018, 339: 223-231.
- [8] 柯希玮, 蔡润夏, 杨海瑞, 等. 循环流化床燃烧的 NO_x 生成与超低排放[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 390-396, 669. KE Xiwei, CAI Runxia, YANG Hairui, et al. Formation and ultra-low emission of NO_x for circulating fluidized bed combustion [J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(2): 390-396, 669.
- [9] DIANA Carolin, GUÍO-PÉREZA Florian Dietrich, JORGE Nicolay Ferreira Cal, et al. Estimation of solids circulation rate through magnetic tracer tests [J]. Powder Technology, 2017, 316: 650-657.
- [10] BURKELL J, GRACE J, ZHAO J, et al. Measurement of solids circulation rates in circulating fluidized beds [C]//Circulating Fluidized Bed Technology, Proceedings of the Second International Conference on Circulating Fluidized Beds. Compiègne, France: [s. n.], 1988: 501-509.
- [11] XU J, LU X F, ZHANG W Q, et al. Effects of superficial gas velocity and static bed height on gas-solid flow characteristics in a

- 60-meter-high transparent CFB riser[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334:545-557.
- [12] RAHMAN M H, BI Xiaotao T, GRACE John R, et al. Measurement of solids circulation rate in a high-temperature dual fluidized bed pilot plant [J]. *Powder Technology*, 2017, 316:658-669.
- [13] DIANA Carolina Gufo-Pérez, FLORIAN Dietrich, JORGE Nicolay Ferreira Cala, et al. Estimation of solids circulation rate through magnetic tracer tests [J]. *Powder Technology*, 2017, 316:650-657.
- [14] 胡南,姚宣,晁俊楠,循环流化床循环流率冲击法在线测量方法[J]. *动力工程学报*, 2011, 31(7):485-490.
HU Nan, YAO Xuan, CHAO Junnan. Impacting method for on-line measurement of solid circulating rate in CFB [J]. *Journal of Chinese Society of Powder Engineering*, 2011, 31(7):485-490.
- [15] DAVIES C E, TALLON S J, WEBSTER E S. Applications of active acoustics in particle technology [J]. *Particuology*, 2010, 8(6):568-571.
- [16] MEDRANO J A, NORDIOA M, MANZOLINI G, et al. On the measurement of solids circulation rates in interconnected fluidized beds: Comparison of different experimental techniques [J]. *Powder Technology*, 2016, 302:81-89.
- [17] KADYROV T, LI F, WANG W. Impacts of solid stress model on MP-PIC simulation of a CFB riser with EMMS drag [J]. *Powder Technology*, 2019, 354:517-528.
- [18] 刘贤东, 张扬, 杨海瑞, 等. 循环流化床返料阀结构对循环流率动态响应特性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(3):94-99.
LIU Xiandong, ZHANG Yang, YANG Hairui, et al. Effect of loop seal structure of circulating fluidized bed on the dynamic response characteristics of circulating flow rate [J]. *Clean Coal Technology*, 2019, 25(3):94-99.
- [19] KIM K S, PEELER P, CLOSE R, et al. Pressure balance model for circulating fluidized beds with loop-seal profiles [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41(20):4949-4956.
- [20] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2015.
ZHANG zhaoshun, CUI guixiang. *Fluidynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [21] 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
FAN qingshan, YIN Yajun. *Mechanics of material* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [22] COLAFIGLI A, MAZZEI L, LETTIERI P, et al. Apparent viscosity measurements in a homogeneous gas-fluidized bed [J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64:144-152.
- [23] YUE Guangxi, CAI Runxia, LU Junfu, et al. From a CFB reactor to a CFB boiler: The review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China [J]. *Powder Technology*, 2017, 316:18-28.