

基于传热系数的高温循环流率测量方法研究

张杨鑫^{1,2}, 王志宁², 张 扬³, 程 璐¹, 樊保国¹, 张 海³, 吕俊复³

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 清华大学山西清洁能源研究院, 山西 太原 030032;

3. 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)

摘要: 循环物料流率是循环流化床锅炉中重要的设计和运行参数, 但其热态在线测量一直是难点。基于换热原理进一步改进和完善了在线测量循环流率的方法, 通过热态试验研究了影响高温颗粒与管壁之间传热系数的因素, 并且利用热态试验数据和 Borodulya 等提出的对流传热系数预测模型进行了关联式推导, 从而将传热系数和颗粒流率相关联。结果发现, 传热系数的影响因素包括颗粒流率、颗粒温度、颗粒粒径等; 热态试验测量得到的物料流率值与预设值的误差在 $\pm 25\%$ 内; 在实际流率工况下, 该方法可以将物料流率和传热系数一一对应, 在较宽的流率变化范围内都具有良好的预测能力。根据研究结果, 测量中传热系数确定后, 由计算模型可以获得物料流率, 即实现高温物料流率的测量。换热法测量循环流率的原理简单, 成本低廉, 通过研究进一步提升了其实用性, 在循环流化床锅炉的循环流率测量领域具有广阔的应用前景。

关键词: 循环流化床(CFB); 循环物料流率; 传热系数; 气固两相流; 特征数方程

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)03-0016-07

Study on the measuring method of high-temperature circulating flow rate based on heat transfer coefficient

ZHANG Yangxin^{1,2}, WANG Zhining², ZHANG Yang³, CHENG Lu¹, FAN Baoguo¹, ZHANG Hai³, LYU Junfu³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Research Institute for Clean Energy Tsinghua University, Taiyuan 030032, China; 3. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Circulating material flow rate is an important parameter for the design and operation of circulating fluidized bed(CFB) boilers, but the hot-state in-situ measurements of it is still difficult. In the present study, the measurement method of circulating flow rate based on the heat transfer process was further improved. The effects on heat transfer coefficient between the high temperature solids and the tube surface were studied in hot state tests. The high temperature test data and the prediction model of the convective heat transfer coefficient proposed by Borodulya et al were used to establish the correlation between heat transfer coefficient and solid circulation rate. The results show that the influencing factors of the heat transfer coefficient include the solid circulation rate, particle temperature and the particle size. The error between the measured material flow rate and the preset value is within $\pm 25\%$. The method can match the circulating material flow rate and heat transfer coefficient in pairs, and has good prediction in a wide range of flow rate. According to the research results, once the heat transfer coefficient is determined in the measurement, the solid circulation rate can be obtained by using the proposed model, and thereby the measurement of high temperature solid circulation rate is achieved. The heat transfer method is simple and has the advantages of low manufacturing cost. Based on the research, it has further improved practicability. It is a promising method of the measurement of circulating flow rate in CFB boilers.

Key words: circulating fluidized bed; circulating material flow rate; heat transfer coefficient; gas-solid flow; equation of characteristic numbers

收稿日期: 2020-05-11; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20051110

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFF0216002); 华能集团总部科技项目(HNKJ20-H50 KTHT-U20YYJC08)。

作者简介: 张杨鑫(1994—), 男, 陕西韩城人, 硕士研究生, 研究方向为循环流化床燃烧理论及技术。E-mail: 15536603711@163.com。通信作者: 张扬(1986—), 男, 助理教授, 研究方向为清洁燃烧技术。E-mail: yang-zhang@tsinghua.edu.cn

引用格式: 张杨鑫, 王志宁, 张 扬, 等. 基于传热系数的高温循环流率测量方法研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 16-22.

ZHANG Yangxin, WANG Zhining, ZHANG Yang, et al. Study on the measuring method of high-temperature circulating flow rate based on heat transfer coefficient[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 16-22.



移动阅读

0 引言

循环流化床(CFB)锅炉是一项发展潜力巨大的煤清洁燃烧技术,具有燃料适应性广、燃烧效率高、低成本脱硫脱硝等优势^[1-3]。在 CFB 锅炉中,循环物料流率 G_s 是表征炉内物料平衡和压力平衡的重要参数^[4-5],可以反映循环流化床锅炉炉内传热和传质、炉内温度的均匀性^[6]。在 CFB 定态设计理论中, G_s 是确定炉膛内物料流态的重要参数,而炉内物料流动状态又影响炉内的燃烧过程,进而影响污染物的生成^[7-8]。因此,准确获得 G_s 对于循环流化床锅炉的设计和运行十分重要。

测量管道中固体流率的方法主要分为两类:① 间接式测量法,包含静电传感器^[9]、数字成像技术^[10]、示踪粒子^[11]等方法,其精度高,不会破坏管道内气固流动,但成本高、操作环境要求高,在高温测量环境中无法正常使用;② 直接式方法,包括冲击法^[12]、叶轮法^[13]和振动探针法^[14]等,其制造成本较低,环境适应性强。其中,冲击法流量测量装置在解决了磨损和堵塞问题的前提下,可实现实际工业 CFB 锅炉上的在线测量^[15]。

由于 CFB 锅炉中物料温度超过 800 °C, Burkell 等^[16]针对这种高温物料,提出了一种以计量热交换量来测量 G_s 的方法。该方法通过在 CFB 锅炉料腿增设一段水冷壁,同时测量此段水冷壁进出口水温温差、冷却水流量以及经过水冷段前后高温物料平均温差的方式,利用热交换量推算循环流量。该方法能够实现 800 °C 左右的高温测量,并在实验室规模的试验中得到验证。但该热交换量法应用于实际 CFB 锅炉中仍存在困难:① 该方法要求水冷段内无内热源,但实际 CFB 锅炉的料腿中常存在“后燃”现象,使该方法的条件不成立;② 实际 CFB 锅炉的料腿尺寸较大,使用水冷壁会破坏料腿横截面的温度均匀性,使高温物料的温度测量不具有代表性,造成较大的测量误差。

基于 CFB 锅炉内受热面的传热系数与固体物料浓度和运动速度等有关^[17-19],本文提出一种基于传热原理的高温物料循环流率测量方法。不同于文献^[16]中直接测量换热量,本文提出的方法仅通过测量冷却水温差计算传热系数 k ,建立传热系数 k 和 G_s 的关联式来计算物料流率。本文的换热法使用结构简单的换热套管,通过测量物料与管壁之间传热系数 k 的变化得到 G_s ,克服了高温测量的难点,且由于冷却介质在换热装置内部不断冲刷降温,可减轻高温固体颗粒对测量装置表面的烧蚀磨损。

本方法采用传热原理,无需计算整体热平衡,因此无需考虑测量段内是否有内热源的影响。本方法也无需采用水冷壁的设计,不会破坏料腿内横截面温度的均匀性,因此仅需在料腿内布置少量体积较小的换热表面测量 k 值,对于下降管内的气固流动影响较小,同时结合物料流动的截面分布规律,即可“以点代面”的推算出 G_s 。因此,该方法原理简单,且制造成本低,具有实现大型化系统测量的潜力,对于测量环境较差的应用场合,更具优势。为了适应不同温度和实际工况,本文获得了料腿中下降流换热关联式,并研究了计算关联式的通用性。研究结果将对 CFB 锅炉高温循环物料流率测量技术的发展提供理论指导。

1 试验

1.1 G_s 换热式测量方法原理

G_s 换热式测量的基本原理如图 1 所示,由于循环流化床锅炉料腿内的物料流动方向是单向下行,不存在类似于提升管中复杂的返混情况,因此测量位置选定在料腿中。本文改进的换热法测量装置可分为外套管和中心管,外套管的前端伸入料腿中与高温的固体物料直接接触,中心管中通入冷却水,冷却水管路上采用流量计记录水流量,采用热电偶记录进出口水温变化,待换热过程稳定后,根据水流量和进出口水温即可得到该换热过程的换热量,炉内物料温度可从中控室采集,根据固体物料温度和冷却水的定性温度,可计算出高温颗粒和装置表面之间的传热系数 k ,仅需通过建立的 G_s 与 k 的关联式,即可得到 G_s 。

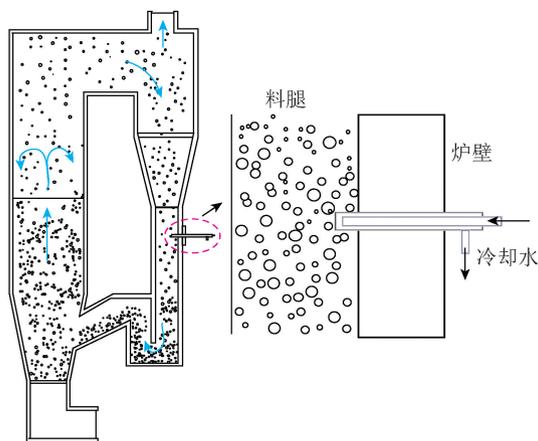


图 1 G_s 的换热式测量方法示意

Fig.1 Schematic diagram of G_s measurement method using heat transfer process

1.2 热态试验系统

本文搭建的热态试验系统如图 2 所示,主要包

括加热系统、物料分布装置、测量段、换热管、温度采集系统、计量水泵和物料计量系统。加热系统包括一台管式炉和不锈钢加热管,固体物料装在不锈钢管中加热,加热管材质为不锈钢 310s,最高承受温度为 900 ℃,加热管的加热部分长 2.2 m,最大固体物料容量为 6.5 kg,试验中采用 2 种粒径范围的固体物料——石英砂,其物理性质见表 1。

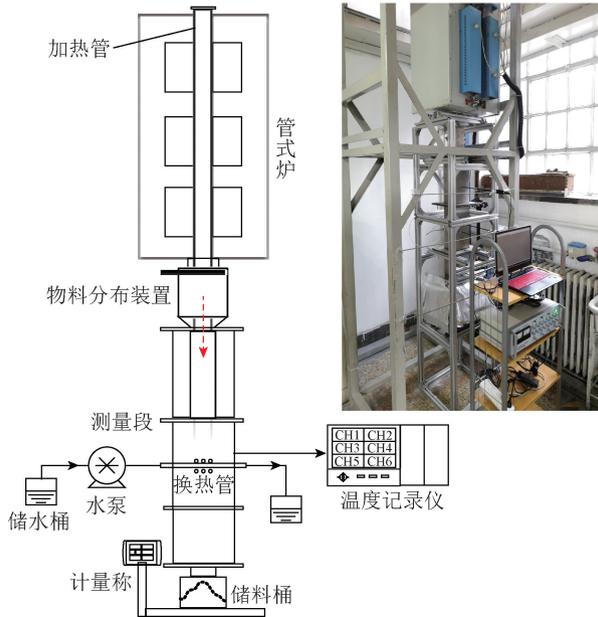


图2 热态试验系统

Fig.2 Thermal experimental apparatus

表1 石英砂物性参数

Table 1 Physical properties of quartz sand

石英砂	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	粒径/ μm	$d_{50}/\mu\text{m}$
1	2 650	106~212	171
2	2 650	212~500	339

物料分布装置用于改变试验中的物料流率,在水平和侧面方向上分别设有一块可活动的水平挡板和 2 块侧挡板,通过控制侧挡板位置形成不同的开度,装置的底部设计为缩口,确保物料能够顺利进入测量段中,图 2 中虚线箭头方向为物料下落路径。在测量段上方设有物料的分布装置,让物料下落时横截面分布均匀。

测量段整体分为中心的方管和保温外壳,两层之间填充保温棉,防止高温固体颗粒热量散失,内部方管的横截面积为 $(0.04 \times 0.06) \text{ m}^2$,侧面中心位置处开贯通的小孔放置换热管。换热管尺寸为总长 20 cm,外径 4 mm,壁厚 0.2 mm,与高温物料接触的换热段为方管内 6 cm 段,换热管材质为紫铜,导热系数为 $400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。温度采集系统中 Pt100 热电阻测量进出口水温,铠装 K 型热电偶测量颗粒温

度,热电阻的精度为 A 级,热电偶的精度为 I 级,响应时间均小于 0.2 s,温度数据由 MIK-9600 智能温度记录仪采集,采集通道数为 18,采集频率为 1 s。物料计量系统由小型电子秤和不锈钢储料桶组成,计量秤可记录物料下落的质量变化,储料桶承接落下的高温物料。

试验中将石英砂加入到加热管中,水平抽板保持关闭状态,通过调整侧面挡板形成不同的开度,对应不同的物料流率。打开管式炉,按照目标温度设置升温程序,一般以 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温,升温程序结束后继续在设定温度下加热一段时间,确保颗粒温度达到设置温度。加热完成后,打开计量水泵,设定水流量,水流量稳定后,打开水平抽板使高温颗粒落下,当颗粒冲刷过换热管时,出口水温开始迅速变化,温度记录仪采集颗粒温度和进出口水温,颗粒下落后全部进入储料桶中,根据颗粒下落期间的质量变化,物料实际流率为下落物料质量随时间变化的斜率和方管横截面积的比值。

根据试验温度数据和水流量可计算传热系数(式(1))。由于换热管的导热系数很大,且壁厚仅 0.2 mm,经计算,管外的传热系数与管内相差 2 个数量级以上,因此在本文试验条件下,由式(1)计算的传热系数即为高温颗粒与换热管表面之间的传热系数。

$$k = \frac{q_m C_{p,w} (t_{\text{out}} - t_{\text{in}})}{A (t_s - t_f)} \quad (1)$$

式中, q_m 为冷却水流量, kg/s ; $C_{p,w}$ 为水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t_{out} 为出口水温, $^\circ\text{C}$; t_{in} 为进口水温, $^\circ\text{C}$; A 为颗粒与换热管接触面积, m^2 ; t_s 为石英砂颗粒温度, $^\circ\text{C}$; t_f 为冷却水的定性温度, $t_f = (t_{\text{in}} + t_{\text{out}})/2$, $^\circ\text{C}$ 。

2 试验结果与讨论

试验颗粒温度分别设置为 300、400、600 和 800 $^\circ\text{C}$,颗粒流率为 $20 \sim 90 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,2 种颗粒平均粒径分别为 171、339 μm 。试验出口水温变化为初始数据,所有工况中,虽然出口水温的绝对数值变化较大,但变化规律类似,因此只选取 400 $^\circ\text{C}$ 部分工况的出口水温变化进行分析。图 3 为颗粒温度 400 $^\circ\text{C}$ 时 3 种不同 G_s 下出口水温变化。高温颗粒开始接触换热管表面时,换热管出口水温迅速升高,表明高温物料与换热管表面发生强烈的换热,冷却水吸收热量后,温度迅速上升,当出口水温升高到某一定值后基本不再变化,表明换热过程达到相对稳定的状态,可认为冷却水与高温颗粒之间达到了稳态,颗粒完全落下后,出口水温下降。计算传热系数时,仅需

对达到稳态的数据进行分析。

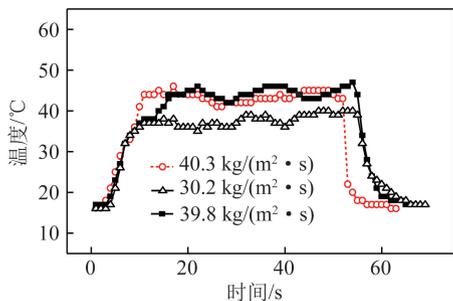


图3 出口水温的变化

Fig.3 Variations of outlet water temperature

对稳态段的数据进行计算后,可得到一组瞬态传热系数值,需要对数据进行粗大误差别除和误差分析。式(1)敏感性分析如图4所示,可见进出口水温的测量是对 k 测量结果影响较大的2个参数。由于进口水温不变,主要基于格拉布斯准则,对出口水温和颗粒温度进行粗大误差别除,剔除后颗粒温度和出口水温最大偏差分别为3.31℃和2.24℃,换算百分比为3%和4%。

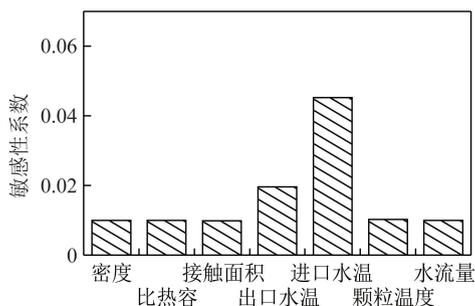


图4 敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis

利用误差分布原理对传热系数 k 进行误差计算,即

$$\sigma_k = \sqrt{\left(\frac{\partial k}{\partial t_s}\right)^2 \sigma_s^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial t_{out}}\right)^2 \sigma_{out}^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial t_{in}}\right)^2 \sigma_{in}^2} \quad (2)$$

其中, σ_k 为传热系数 k 的标准偏差; σ_s 、 σ_{out} 、 σ_{in} 分别为颗粒温度 t_s 、出口水温 t_{out} 、进口水温 t_{in} 的标准偏差。计算结果表明,所有计算的瞬态 k 值最大标准误差不超过±20%。取每组工况瞬态传热系数的平均值作为该组工况对应的传热系数进行分析。

2.1 颗粒流率对传热系数的影响

为了研究颗粒流率与传热系数之间的关系,在同一颗粒温度和颗粒粒径工况下,颗粒温度400℃时平均传热系数与物料流率之间的关系如图5所示。可以看出,当颗粒温度和颗粒粒径一定时,随 G_s 增大, k 增大,二者呈正相关关系。

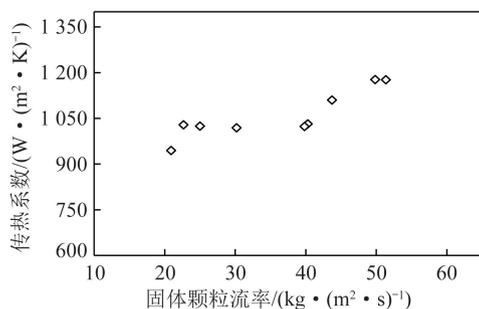


图5 传热系数 k 随颗粒流率的变化

Fig.5 Variation of k with particle flow rate

k 增大的主要原因是由于 G_s 的增大造成测量段截面上颗粒浓度增大,在颗粒下落过程中高温颗粒与换热管表面的碰撞几率增加,高温颗粒和换热壁面的换热过程更加强烈,从而使颗粒与换热管表面之间的 k 增大。

2.2 颗粒温度对传热系数的影响

颗粒粒径相同,300、400、600℃下温度对传热系数的影响规律如图6所示。可以看出,在颗粒流率和颗粒粒径相同时,传热系数随颗粒温度的升高而增大。对比300℃和400℃的传热系数平均值,二者相差近一倍,表明温度与传热系数呈正相关关系,且随温度的升高,传热系数显著增大。400℃和600℃时,传热系数数值增大幅度不大,其原因可能是在600℃时颗粒下落的速度比对应流率下400℃时的速度大,虽然温度高使传热系数增大,但是由于颗粒速度大,换热管表面的颗粒更新快,停留时间减少,导致换热强度减小,因此传热系数增加幅度不大。

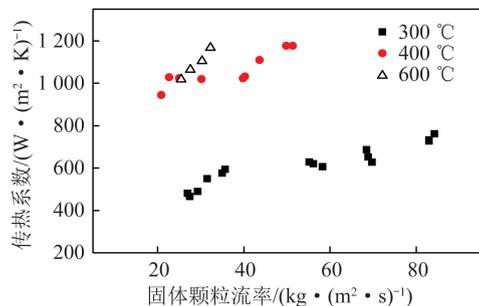


图6 传热系数 k 随颗粒温度的变化

Fig.6 Variation of k with particle temperature

2.3 颗粒粒径对传热系数的影响

为了探究高温条件下颗粒粒径对传热系数的影响,800℃下改变物料粒径,选用 $d_{50} = 339 \mu\text{m}$ 的颗粒进行试验。图7为在600、800℃时2种不同粒径颗粒的传热系数变化。虽然颗粒温度从600℃升至800℃,且800℃的流率更大,但800℃的传热系数小于600℃。小粒径颗粒在600℃下的传热系数最

大数值可达 10^3 左右,而大粒径颗粒的传热系数较之减小了近 50%,表明颗粒粒径与传热系数呈负相关,随着颗粒粒径增大,传热系数减小。其主要原因可能是由于大颗粒与换热管表面的接触面积较小,且颗粒粒径增大导致颗粒速度增大,颗粒在管壁的停留时间减少,换热强度减弱,使传热系数减小。

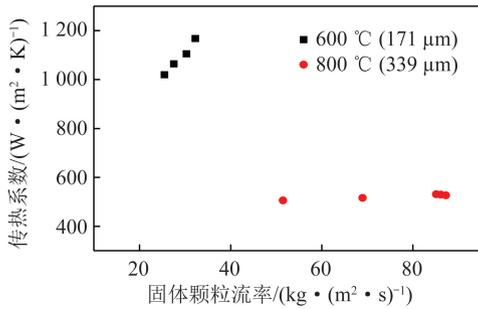


图7 传热系数 k 随颗粒粒径的变化

Fig.7 Variation of k with particle size

2.4 颗粒流外掠圆管对流换热特征数方程

根据上述分析,可认为颗粒流与换热管表面之间的传热系数与颗粒流率、颗粒温度、颗粒粒径等有关,且颗粒速度影响颗粒浓度和停留时间,从而影响传热系数。由于传热系数的影响因素较多,且不同温度下,颗粒流率与物料流率之间的函数关系无法统一形式,因此采用特征数方程表示,并找出传热系数和物料流率之间的关系。根据文献[19-20]以及热态试验的测量数据可知,将各影响因素归纳为颗粒流的无量纲参数中:如阿基米德数 Ar 、努塞尔数 Nu 、雷诺数 Re 和普朗特数 Pr 组成的关系式。

Borodulya 等^[20]提出了一种在试验条件下具有较高精度的预测传热系数经验关联式,即

$$Nu = 0.74Ar^{0.1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0.14} \left(\frac{C_s}{C_g} \right)^{0.24} (1 - \varepsilon)^{0.67} + 0.46RePr \frac{(1 - \varepsilon)^{0.67}}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中, ρ_s 为固体颗粒密度, kg/m^3 ; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 ; C_s 为固体颗粒的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; C_g 为气体的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ε 为空隙率,计算公式为

$$\varepsilon = 1 - \varphi = 1 - \frac{G_s}{\rho_s u} \quad (4)$$

式中, φ 为颗粒体积分率; u 为通道来流速度, m/s 。

阿基米德数 Ar 为

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (5)$$

式中, d_p 为颗粒粒径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ_g 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

努塞尔数 Nu 为

$$Nu = \frac{kd_p}{\lambda_g} \quad (6)$$

式中, λ_g 为气体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

颗粒流的雷诺数 Re 为

$$Re = \frac{\rho_g u d_p}{\mu_g} \quad (7)$$

颗粒流的普朗特数 Pr 为

$$Pr = \frac{\mu_g C_g}{\lambda_g} \quad (8)$$

图8为模型预测值和试验值对比,可以看出,试验值都在模型预测值的 $\pm 25\%$ 内,可以认为模型式(3)能够较好地预测热态条件下的传热系数,模型适用条件为: $0.1 \text{ mm} \leq d_p \leq 6.0 \text{ mm}$, $0.1 \text{ MPa} \leq p$ (压力) $\leq 10.0 \text{ MPa}$, $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_s \leq 1440 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

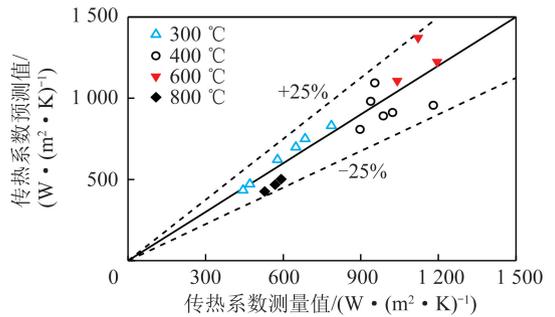


图8 传热系数 k 预测值与测量值比较

Fig.8 Comparison between the predicted values and the measured values of k

将式(4)代入(3)可得到传热系数 k 与物料流率 G_s 之间的关联式,即

$$\frac{kd_p}{\lambda_g} = 0.74Ar^{0.1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{0.14} \left(\frac{C_s}{C_g} \right)^{0.24} \left(\frac{G_s}{\rho_s u} \right)^{0.67} + 0.46RePr \frac{\left(\frac{G_s}{\rho_s u} \right)^{0.67}}{1 - \frac{G_s}{\rho_s u}} \quad (9)$$

根据式(9),选取实际料腿中的 G_s 变化范围和灰渣参数进行传热系数计算。料腿中 G_s 在 $100 \sim 1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,传热系数的计算值如图9所示。可以看出,随着 G_s 增大,传热系数 k 单调增大,说明通过计算模型得到的传热系数 k 和 G_s 之间可一一对应,本文改进的换热法原理适用于测量 G_s ,不存在多解的情况。

本文得到的换热法计算公式对传热系数的测量值进行计算,得到对应的颗粒流率值,并与设定的颗粒流率进行对比,结果如图10所示。式(9)计算得到的流率值在 $\pm 25\%$ 范围内可以预测颗粒流率 G_s 试

验值,说明该计算模型可较准确地测量颗粒流率 G_s 。

但温度较高时 ($>800\text{ }^\circ\text{C}$),辐射和对流换热对整体传热起重要作用。式(1)中的 k 为总传热系数,当辐射传热占比较高时,式(3)~(9)需辐射修正。

在实际流化床下降管内,管道内的速度并非均匀分布。因此,后续需要进一步获得截面物料分布规律,在特征点布置测点,从而推断出截面平均 G_s 值。

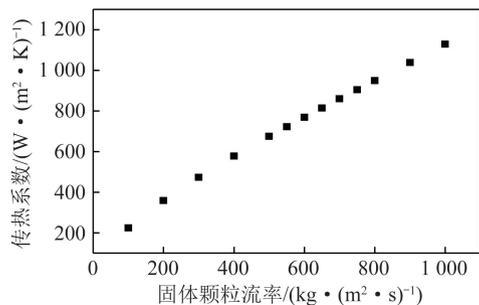


图9 传热系数 k 随 G_s 的变化

Fig.9 Variation of k with G_s

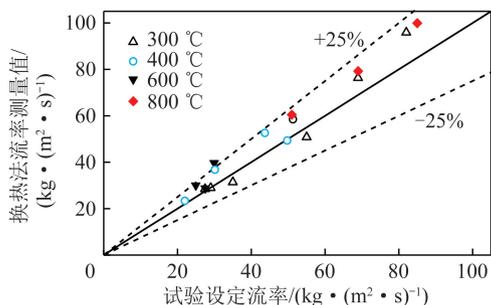


图10 设定流率值与换热法测量得到流率值比较

Fig.10 Comparison between the pre-set values and the measured values using the heat transfer method

3 结 论

1) 高温物料和管壁之间传热系数 k 的影响因素主要有颗粒流率、颗粒温度、颗粒粒径等,主要表现为颗粒温度和颗粒粒径一定时,随着颗粒流率增加, k 增大;颗粒流率和颗粒粒径相同时, k 随着温度的升高显著增大;颗粒粒径与 k 呈负相关关系,当大粒径物料温度和流率均高于小粒径物料时,大粒径物料的 k 显著减小。

2) 本文推导出颗粒流外掠圆管对流换热的计算模型,其中包含颗粒流率、颗粒粒径、颗粒流速度等参数,可更好地预测传热系数。热态试验测量值可完全落入计算模型预测值的 $\pm 25\%$ 以内,模型中 Nu 与 Re 和 Pr 呈正相关关系,模型的适用条件为

$0.1\text{ mm} \leq d_p \leq 6.0\text{ mm}$, $0.1\text{ MPa} \leq p \leq 10.0\text{ MPa}$, $20\text{ }^\circ\text{C} \leq t_s \leq 1440\text{ }^\circ\text{C}$, 可满足常压、高温工况下传热系数的预测。

3) 建立了传热系数 k 和循环物料流率 G_s 之间具有通用性的关联式,确保 G_s 和 k 之间存在单调对应关系,且关联式在 $\pm 25\%$ 范围内可以对实际的 G_s 进行较好地预测。本文研究结果改进和完善了换热式测量方法,为后续换热式流量计的样机在实际大型锅炉中的应用提供了新的研究方向和思路。

参考文献 (References):

- [1] 岳光溪,吕俊复,徐鹏,等. 循环流化床燃烧发展现状 & 前景分析[J]. 中国电力,2016,49(1):1-13.
YUE Guangxi, LYU Junfu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 1-13.
- [2] 程乐鸣,许霖杰,夏云飞,等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉关键问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5520-5532.
CHENG Leming, XU Linjie, XIA Yunfei, et al. Key issues and solutions in development of the 600 MW CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5520-5532.
- [3] 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. Progress of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology [J]. Electric Power, 2016, 49(12): 1-7.
- [4] 杨海瑞,岳光溪,王宇,等. 循环流化床锅炉物料平衡分析[J]. 热能动力工程,2005,20(3):291-295.
YANG Hairui, YUE Guangxi, WANG Yu, et al. Analysis of mass balance in a circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(3): 291-295.
- [5] 姚宣,杨石,晁俊楠,等. 循环流率对循环流化床回路压降影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(20):1-6.
YAO Xuan, YANG Shi, CHAO Junnan, et al. Experiment study of solids circulating rate's effect on the pressure loop in circulating fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(20): 1-6.
- [6] 陈鸿伟,杨新,贾建东,等. 双循环流化床颗粒循环流率实验研究[J]. 热力发电,2018,47(2):56-62.
CHEN Hongwei, YANG Xin, JIA Jiandong, et al. Experimental study on particle circulating rate of double-circulating fluidized bed[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 56-62.
- [7] 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.
- [8] 李金晶,赵振宇,李媛园,等. 基于流态分析的循环流化床锅炉能耗诊断技术[J]. 热力发电,2020,49(5):14-20.
LI Jinjing, ZHAO Zhenning, LI Yuan Yuan, et al. Energy-consumption diagnosis technology for CFB boiler based on state specification design theory[J]. Thermal Power Generation, 2020,

- 49(5):14-20.
- [9] LI J, FU F F, LI S, et al. Velocity characterization of dense phase pneumatically conveyed solid particles in horizontal pipeline through an integrated electrostatic sensor[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 76:198-211.
- [10] QIAN X C, YAN Y, WANG L J, et al. An integrated multi-channel electrostatic sensing and digital imaging system for the on-line measurement of biomass-coal particles in fuel injection pipelines[J]. *Fuel*, 2015, 151:2-10.
- [11] GUÍO-PÉREZ D C, DIETRICH F, Cala J N F, et al. Estimation of solids circulation rate through magnetic tracer tests[J]. *Powder Technology*, 2017, 316:650-657.
- [12] 胡南, 姚宣, 晁俊楠, 等. 循环流化床循环速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, et al. Impacting method for on-line measurement of solid circulating rate in CFB[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2011, 31(7):485-490.
- [13] LUDLOW J C, MONAZAM E R, SHADLE L J. Improvement of continuous solid circulation rate measurement in a cold flow circulating fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 2008, 182:379-387.
- [14] WANG C, YU H Y, ZHAN N, et al. A vibration probe sensor for mass flow rate measurement of gas-solid two-phase flow [J]. *Sensor Review*, 2016, 36(2):200-206.
- [15] 刘贤东, 吴玉新, 张扬, 等. 循环流化床锅炉循环速率在线测量方法研究[J/OL]. *洁净煤技术*, 2020, 26(3). [2020-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200521.1737.003.html>.
- LIU Xiangdong, WU Yuxin, ZHANG Yang, et al. Research on in-situ measurement method for ash circulating rate of circulating fluidized bed [J/OL]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(3). [2020-05-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20200521.1737.003.html>.
- [16] BURKELL J J, GRACE J R, ZHAO J, et al. Measurement of solids circulation rates in circulating fluidized beds[C] // *Proceedings of the Second International Conference on Circulating Fluidized Beds*. France, 1988:501-509.
- [17] 丛堃林, 李清海, 韩峰, 等. 多流程卧式循环流化床气固流动的传热特性[J]. *燃烧科学与技术*, 2018, 24(4):315-322.
CONG Kunlin, LI Qinghai, HAN Feng, et al. Gas-Solid convective heat transfer in the multi-pass horizontal circulating fluidized bed furnaces [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2018, 24(4):315-322.
- [18] 张瑞卿. 涵盖不同流型的气固床层与壁面换热研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
ZHANG Ruiqing. The study of heat transfer between gas-solid bed and wall surface with different flow patterns is covered[D]. Beijing:Tsinghua University, 2014.
- [19] BAO Z K, DUAN L B, WU K, et al. An investigation on the heat transfer model for immersed horizontal tube bundles in a pressurized fluidized bed [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 170:1-10.
- [20] BORODULYA V A, TEPLITSKY Y S, MARKEVICH I I, et al. Heat transfer between a surface and a fluidized bed; consideration of pressure and temperature effects[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(1):47-53.