

煤粉浓度与风量的热探头测量方法研究

刘磊, 王燕, 周芳德, 钱华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 开发了长弦为 10 mm、短弦为 5 mm 的椭圆型热探头, 用于煤粉浓度与风量的测量. 将热探头放入煤粉-空气输送管中, 热探头 1 的长弦平行于来流, 热探头 2 的短弦平行于来流. 研究发现: 热探头 1 对煤粉浓度反应迟钝; 热探头 2 对煤粉浓度反应比较敏感. 分析了气固两相流中的弛豫效应, 提出了热探头 1 和热探头 2 在气固两相流中的换热准则关系式. 将热探头 1 和热探头 2 的换热准则关系式相耦合, 可用于测量煤粉浓度和风量, 测量结果的相对偏差分别在 20% 和 10% 以内.

关键词: 两相流; 热探头; 煤粉; 风量; 测量

中图分类号: TK39 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)01-0023-04

Measurement of Air Flow and Concentration of Pulverized Coal with Two Ellipse-Shaped Thermal Probes

LIU Lei, WANG Yan, ZHOU Fangde, QIAN Hua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Two ellipse-shaped thermal probes are developed to measure the pulverized coal concentration and the air flow rate in a horizontal pneumatic pipe. The longer chord is 10 millimeter and the shorter chord is 5 millimeter for the thermal probes. The probe 1 is mounted in the pipe with its longer chord parallel to flow direction and the probe 2 is mounted with the shorter chord parallel to flow direction. It is found that the probe 1 has obscure response to the concentration of pulverized coal, while the probe 2 gets remarkable. The momentum response and the thermal response in gas-solid two-phase flow are analyzed for the probes. The revised Reynolds number and the revised Nusselt number are put forward. The dimensionless correlations are obtained for description of the heat transfer performances of the probes. The results show that the flow rate of air and the concentration of pulverized coal can be measured with these two coupled thermal probes. The relative biases are within 20% and 10% for coal concentration and air flow, respectively.

Keywords: two-phase flow; thermal probe; pulverized coal; air flow; measurement

煤粉浓度与风量的在线监控是电厂锅炉燃烧与流程控制的重要技术问题^[1]. 电厂锅炉燃烧过程通常是将粉粒用空气输送至炉膛进行燃烧, 该过程中空气与煤粉输送管道中煤粉浓度与风量的大小、不同输送管中煤粉浓度与风量的均匀性分配等问题关系到炉内燃烧的稳定性 and 烟气中污染物的可控性, 并且对提高能源利用率、降低污染物排放有重要意

义. 燃烧过程的调控要求对煤粉浓度实现在线测量, 粉体与一次风的混合输送涉及多相流体计量学和多相流体动力学^[2]. 本文研究不同布置形式下椭圆型热探头对煤粉浓度与空气流速的响应特性, 探索热探头测量煤粉浓度与风量的可行性, 为煤粉浓度与风量的测量提供新方法.

1 双椭圆型热探头的耦合测量原理

热探头测量方法的基本原理与热膜风速仪的测量原理类似,都是利用流动与换热的相关性测量流动参数,其对流换热应满足以下归一化关系式的一般形式^[3]

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{\epsilon}{D}, Gr, Ec, \theta) \quad (1)$$

式中: Nu 、 Re 、 Pr 、 Gr 和 Ec 分别为努塞尔数、雷诺数、普朗特数、格拉晓夫数和埃克特(Eckert)数; θ 为迎角; ϵ 为粗糙度; D 为管径. 对于强制对流换热, 式(1)中 Gr 与 Ec 可忽略. 通常, 式(1)中 ϵ/D 对传热的影响也可忽略. 对于布置形式不同的热探头, 式(1)可简化为

$$Nu = f(Re, Pr, \theta) \quad (2)$$

热探头测量系统的结构如图1所示, 热探头1与热探头2是相同尺寸的椭圆截面管, 长弦为10 mm、短弦为5 mm. 每个热探头内置2个热电阻和1个15 W的加热元件, 释放的热量被流体吸收. 温度传感器为直径5 mm的圆管, 用于测量来流温度. 热探头与温度传感器组成桥式电路, 测量流体与热探头壁面的温差.

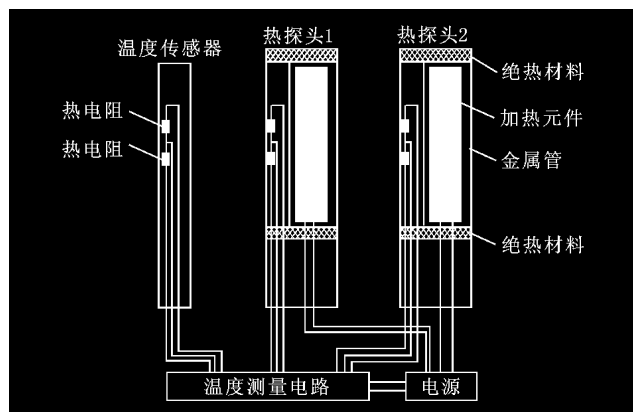
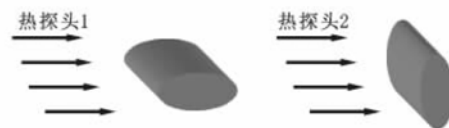


图1 双椭圆型热探头耦合测量系统的结构

如图2所示, 在煤粉-空气两相流中, 热探头1的长弦平行于来流, 热探头2的短弦平行于来流, 这2种布置形式即为式(2)中的 θ 分别为 0° 和 90° 的情况. 由于迎角不同, 2种布置形式具有2个不同的换热关系式.

2 试验装置

在常温常压下, 以煤粉-空气两相流模拟电厂送粉系统中一次风与煤粉的混合流动, 在内径为75 mm的水平直管中研究了热探头1和热探头2的传热特性. 试验装置见图3, 煤粉由螺杆式给粉机供



(a)长弦平行于来流 (b)短弦平行于来流
图2 双椭圆型热探头在气固两相流中的布置形式

给, 流量大小由变频电机控制, 空气流量由孔板测量. 煤粉与空气通过负压混合器混合, 在试验段中形成煤粉-空气两相流, 试验压力近似为大气压. 煤粉的粒径由筛选法测定, 平均粒径为 $65 \mu\text{m}$. 煤的密度为 1220 kg/m^3 , 导热系数为 $0.26 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$, 比热容为 $960 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$.

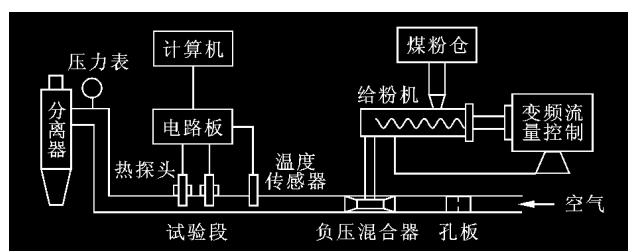


图3 试验装置示意图

3 结果与讨论

3.1 热探头的传热效果

采用热探头测量煤粉浓度和风量时, 由于两相流动的复杂性, 热探头的讯号既不会简单地依赖于煤粉浓度, 也不会简单地取决于流体的质量通量. 图4与图5分别是额定加热功率下, 热探头1(壁温为 T_{p1})和热探头2(壁温为 T_{p2})与煤粉-空气两相流(温度为 T_f)的温差, 其中煤粉浓度定义为

$$\omega_s = \frac{m_s}{m_g} \quad (3)$$

式中: m_s 和 m_g 分别为煤粉与空气的质量流量.

从图4与图5可以看出, 煤粉的加入使两相流绕流椭圆型短管的对流换热效果偏离单相空气流 ($\omega_s=0$) 绕流椭圆型短管的换热曲线, 其中热探头1的偏离程度较小, 而热探头2的偏离程度较大, 这表明, 对应于相同的空气流速与煤粉浓度, 热探头1对煤粉浓度反应迟钝, 而热探头2对煤粉浓度反应比较敏感, 两者的传热特性存在比较明显的差异.

3.2 悬浮颗粒的弛豫与准则数的修正

气固两相流与单相气流的不同之处在于: 悬浮颗粒与气体对流场与温度场变化的响应不同步, 存在弛豫过程. 斯托克斯数描述了颗粒对流场变化的响应特性, 定义为^[4]

$$Sk = \tau_v / \tau_F \quad (4)$$

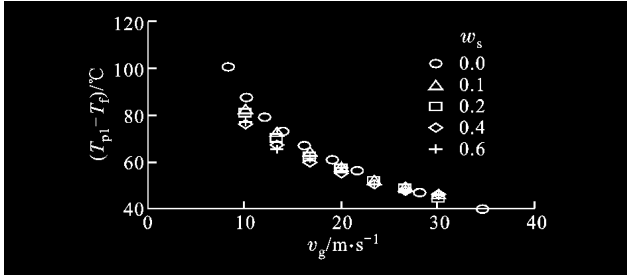


图4 额定加热功率下热探头1的传热特性

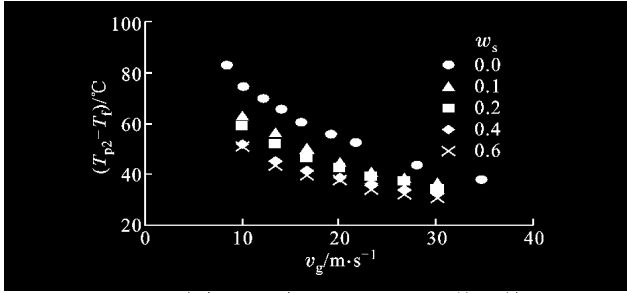


图5 额定加热功率下热探头2的传热特性

式中: τ_v 为颗粒的动量弛豫时间; τ_F 为流场的特征时间,定义为

$$\tau_F = L_F/v_s \quad (5)$$

其中 L_F 为热探头沿流场方向的特征长度。

如果 $Sk \leq 1$, 则颗粒的动量弛豫时间远小于流场的特征时间,为平衡流动;如果 $Sk \geq 1$, 则颗粒没有充分的时间响应流场的变化,为非平衡流动。动量弛豫时间可由单颗粒在气流中的运动方程导出,即

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{18\mu_g}{\rho_s d_s^2} \frac{C_D Re_s}{24} (v_g - v_s) \quad (6)$$

式中: v_s 、 ρ_s 与 d_s 分别为固体颗粒的流速、密度和粒径; v_g 与 μ_g 分别为气体的流速和黏度; C_D 为阻力系数; t 为时间。定义

$$\tau_v = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_g} \frac{24}{C_D Re_s} \quad (7)$$

式中: Re_s 为固体颗粒的雷诺数,定义为

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s (v_g - v_s)}{\mu_g} \quad (8)$$

同样,煤粉颗粒的温度弛豫时间与流场特征时间的相对大小影响两相流绕流椭圆型管的对流换热。煤粉单颗粒对流传热的能量方程为^[4]

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Nu_s}{2} \frac{12\lambda_g}{C_s \rho_s d_s^2} (T_g - T_s) \quad (9)$$

式中: C_s 为固体颗粒的比热容; Nu_s 为固体颗粒的努塞尔数; λ_g 为气体的导热系数; T_g 为气相温度; T_s 为固体颗粒的温度。定义

$$\tau_T = \frac{2}{Nu_s} \frac{\rho_s d_s^2 C_s}{12\lambda_g} \quad (10)$$

式中: τ_T 为颗粒的热弛豫时间,是气固两相间达到

热平衡的特征时间。如果热弛豫时间大于流场特征时间,则颗粒与气体间来不及达到热平衡;若热弛豫时间小于流场特征时间,则颗粒与气体间可达到热平衡。对于两相速度近似相等的稀相气固两相流, $Nu_s \approx 2$, 式(10)可作简化,则 τ_T 仅是固体颗粒物性的函数。

在雷诺数中引入斯托克斯数以考虑动量弛豫对热探头换热的影响,在努塞尔数中引入热弛豫时间和流场特征时间以考虑热弛豫对热探头换热的影响,则气固两相流的修正雷诺数和努塞尔数分别为

$$Re_D = \frac{v_g \rho_g D (1 + w_s (1 - e^{-\tau_F/\tau_v}))}{\mu_g} \quad (11)$$

$$Nu_D = \frac{hD}{(\lambda_g + \lambda_s w_s (\rho_g/\rho_s) (1 - e^{-\tau_F/\tau_T}))} \quad (12)$$

式中: D 为热探头的当量直径; λ_s 为固体颗粒的导热系数。对流换热系数 h 由如下关系式计算

$$h = q/(A(T_p - T_f)) \quad (13)$$

式中: q 为加热功率; A 为热探头的换热面积。

对于热探头1, $D=5$ mm, $L_F=10$ mm。对于热探头2, $D=10$ mm, $L_F=5$ mm。由式(2)知,热探头1与热探头2的迎角不同。由式(4)可知,热探头1和热探头2的斯托克斯数不同。由式(11)和式(12)知,对于不同布置形式的热探头,煤粉浓度对雷诺数和努塞尔数的影响不同。以上因素致使热探头1对煤粉浓度反应迟钝,热探头2对煤粉浓度反应比较敏感。

3.3 准则关系与测量结果

如图6所示,应用修正的雷诺数和努塞尔数,对于椭圆型热探头1与热探头2在煤粉-空气两相流中的换热,分别得到如下归一化准则关系

$$Nu_D = 0.136 Re_D^{0.64} \quad (14)$$

$$Nu_D = 0.734 Re_D^{0.51} \quad (15)$$

在已知温差和热功率的条件下,式(14)和式(15)包含空气流速与煤粉浓度2个未知量,联立求解式(14)和式(15),可得出空气流速与煤粉浓度的计算值。图7与图8是计算值与实际值的比较, δ_v 与 δ_T 分别表示空气流速与煤粉浓度的测量结果的相对偏差。图7表明,空气流速测量结果的相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内。图8表明,煤粉浓度测量结果的相对偏差在 $\pm 20\%$ 以内。测量结果满足流程监控的需要,表明双椭圆型热探头耦合测量方法应用于煤粉浓度与风量的监测是可行的。

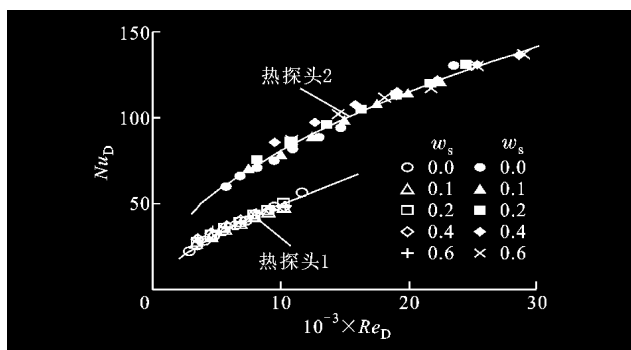


图6 热探头强制对流换热的归一化准则关系

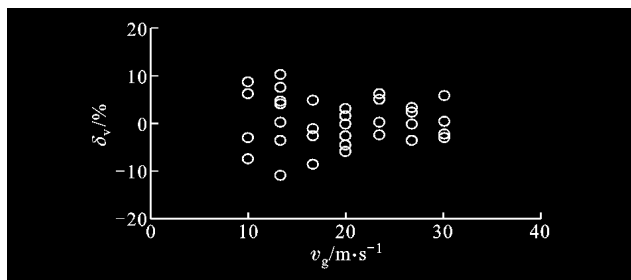


图7 空气流速测量结果的相对偏差分布

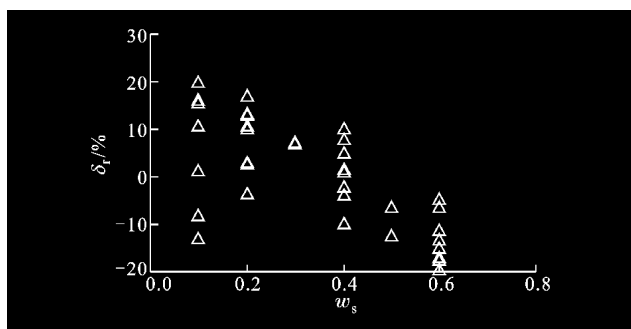


图8 煤粉浓度测量结果的相对偏差分布

4 结 论

将尺寸完全相同的2个椭圆型热探头放入煤粉

(编辑 王焕雪)

-空气输气管中,在煤粉-空气两相流中分别作长弦平行于来流和短弦平行于来流布置,其传热特性不同.长弦平行于来流的热探头1对煤粉浓度反应迟钝,而短弦平行于来流的热探头2对煤粉浓度反应比较敏感.气固两相流的动量弛豫效应与热弛豫效应影响热探头的传热特性.通过修正雷诺数和努塞尔数,对热探头1和热探头2提出了不同的换热准则关系式.将热探头1和热探头2的换热准则关系式相耦合,可用于测量煤粉浓度和风量,测量结果的相对偏差分别在20%和10%以内.

参考文献:

- [1] 廖宏楷,周昊,杨华,等. 风煤在线测量的锅炉燃烧优化系统[J]. 动力工程, 2004, 25(4): 559-562.
LIAO Hongkai, ZHOU Hao, YANG Hua, et al. Optimization system of boilers with online measurement of coal and air[J]. Power Engineering, 2004, 25(4): 559-562.
- [2] TORTORA P R, CECCIO S L, TRUJILLO S M, et al. Capacitance measurements of solid concentration in gas-solid flows[J]. Powder Technology, 2004, 148(2/3): 92-101.
- [3] WHITE F M. Heat Transfer[M]. Massachusetts, USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1984.
- [4] CROWE C T, SOMMERFELD M, TSUJI Y. Multi-phase flows with droplets and particles[M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 1998.

我校能源与动力工程学院内燃机研究所在“二会一展”获奖

2007年10月9日—12日,“中国内燃机学会第七届学术年会”、“国际内燃机学术研讨会”和“国际内燃机及制造装备展览会”(简称“二会一展”)在上海举行.这是中国内燃机学会每3年举办1次的重要的综合性学术活动.在这次会议上,我校能源与动力工程学院汽车工程系教授、博士生导师周龙保荣获中国内燃机学会授予的突出贡献奖,以表彰他在清洁代用燃料发动机和发动机燃烧与排放基础理论研究上的突出成就.

另外,我校能源与动力工程学院汽车工程系博士研究生王金华的论文《直喷发动机燃用天然气掺氢混合燃料掺氢比优化试验研究》(指导教师为我校长江学者黄佐华教授)荣获年会会议优秀论文一等奖.

我校能源与动力工程学院内燃机研究所蒋德明教授也曾因在内燃机燃烧与排放基础理论研究领域的杰出成就而获得2005年“二会一展”突出贡献奖,内燃机研究所的多位博士研究生也曾获其他年度的年会会议优秀论文一等奖和二等奖.

(来源:交大新闻网 <http://xjtunews.xjtu.edu.cn>)