

气—固两相流微粒浓度、速度的 光电测量法影响因素分析

陈元迪 (广东机械学院)

温 龙 (西安交通大学)

[摘要]用光纤做探头的光电检测法可用于气—固两相流中固体微粒浓度、速度的测量,但光纤探头结构及被测固体微粒粒径的变化都会对测量、计算结果产生明显影响。本文介绍了几种不同结构的光纤探头及其测量性能,并分析了固体微粒粒径对测量的影响机制,提出了有效的修正方法。

关键词 气—固两相流 光电检测 光纤探头结构 固体微粒粒径

分类号 TK229.66

1 引言

众所周知,循环流化床燃烧技术的发展能充分利用劣质矿物燃料、有效地降低 SO_2 和 NO_x 对环境的污染。所以如何能方便、准确和快速地测量气—固两相流中固体微粒速度、浓度及其分布状态,从而正确了解气—固两相流的各种性质,是实现循环流化床锅炉正确设计和运行控制所必须。实践证明应用光电检测法测量气—固两相流中固体微粒浓度、速度是一种简便有效并能保证一定测量精度的测量方法。它用光纤做探头,把光束引入测量区,测得运动微粒对光的感应信号,再将该信号经光—电转换,模—数转换后即可进行计算、分析,最终得到微粒的速度、浓度值。目前常用的光纤探头结构有:两组光纤探头分离式,两组并列组合式,发光与接收光纤随机混合分布式,两组光纤并列端面错位组合式等。在研制和应用这种测量仪

中发现:光纤探头的结构、被测微粒的直径对测量结果影响很大。所以必须正确分析各种光纤探头的结构性能和正确设计测量探头,并找出被测微粒粒径变化对测量准确性的影响原因和它们内在关系而加以修正,才能使光电检测法在气—固两相流浓度、速度测量中在不同工况下都能方便准确的应用。

2 光纤探头结构与测量特性

2.1 微粒速度测量

微粒运动速度的测量是运用如图 1 所示的相关测量原理,认为当同一颗粒在经过 A、B 两探头时产生的反射光感应信号 $X(t_0)$ 与 $Y(t_0 + L/V)$ 应该有相关性。其相应的相关函数为:

$$R_{xy}(\tau) = 1/T \int_0^T X(t)Y(t + \tau)dt \quad (1)$$

收稿日期 1993 12-03 二稿 1994-01-18 三稿 1994-04-05

本文联系人 陈元迪 男 37 讲师 510643 广东机械学院材料系金工教研室

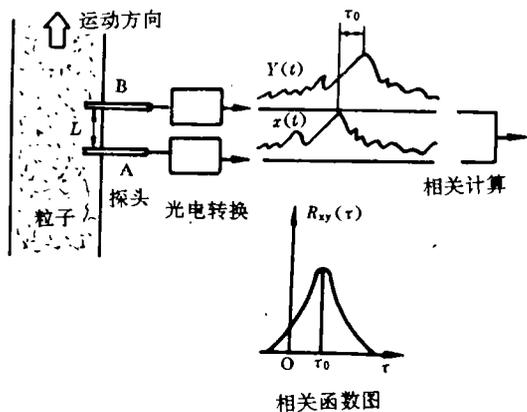


图1 相关检测原理示意图

如果 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 是相关的, 则 $R_{xy}(\tau)$ 必将有一个最大值, 即在 $\tau_0 = L/V$ 处出现一个最大值, 通过测定 τ_0 就可算出微粒运动速度 $V (V = L/\tau_0)$ 。在测量中, 为保证 A、B 两探头测得的信号有很好的相关性, 就必须尽可能的使 A、B 两探头测得的是同一颗微粒的光感应信号。

(1) 现考虑图 2 所示反射式光纤探头, 采用 3 根直径为 $\phi 0.5$ mm 光纤并列密排式, 数值孔径为 0.75, 中间发光, 两边接收光。光源为 2 mW 的 He - Ne 激光器。由图可知, 光纤探头端面前部只有一部分区域是有效受光区, 即运动微粒只有在光纤端面前 1 ~ 3 mm 的区域内通过才会有足够强的反射光信号被

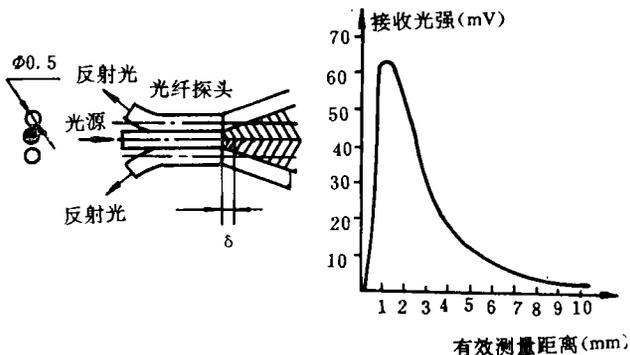


图2 反射式光纤探头有效测量范围

接收光纤接收。这一特性很适合实际测量要求。

(2) 如图 3 所示, 两根光纤探头距 L 放开。如果微粒在通过 A 光纤后方向偏移了一个角度 α , 当到达 B 光纤探头时, 微粒的运动轨迹已不在 B 光纤照射区内, 或已在光照区边缘。B 光纤将接收不到这一微粒的光感应信号或感应信号很弱, 甚至测到了另一颗微粒的信号, 使 A、B 两光纤探头测到的信号没有相关性或相关性很差。

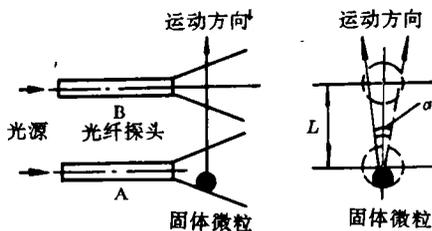


图3 两侧点间距与微粒运动方向对相关性的影响

根据上述分析, 为保证两组光纤测到的信号有良好相关性, 应尽可能使光纤直径等于或小于被测微粒直径, 减少无关信号的干扰。如图 4(a) 所示是实际测量所得的光纤探头直径对测量信号的影响, 图 4 探头直径明显

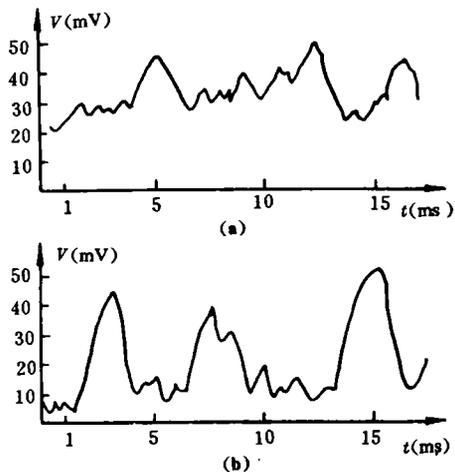


图4 光纤探头直径对测量信号的影响

大于被测微粒直径光照面积较大,信号的相关性差。图4(b)是探头直径等于被测微粒直径时的测量信号,因光照面积小,信号主次分明,则两个信号的相关度可靠性提高,相关运算的精度就高。但光纤直径太小又会使光照面积减小信号捕捉率下降,特别是在低浓度区测量时尤为突出。所以在选择光纤直径时应综合考虑。在实际应用中可取光纤直径等于被测微粒平均直径或略大一点。

另一方面,如两束光纤探头的间距太大,将使测量信号相关性下降。在流化床中微粒总体运动方向是一定的,但在局部短距离内由于微粒间的相互碰撞,使微粒运动方向瞬时小角度的改变时常发生。实验证明,当两光纤探头间距小于3~4 mm时是比较合适的。间距愈小,采样信号的相关程度愈高。

2.2 浓度测量

在浓度测量时,光纤探头直径通常要比测速光纤的大一些,以便有足够大的光照面积,使测到的信号是一个局部多颗微粒的集合反映。目前采用的两种基本形式有:反射式和透射式。先考虑反射式,气—固两相流中固体微粒的浓度应该是一个体积内的微粒所占比例值,浓度测量光纤采用发光和接收光多股光纤随机混合分布式。这种结构的光纤探头有效测量区在端面前0.2~2.5 mm之间,有效测量区很接近光纤探头端面,这对高浓度测量很有利。如图5(a)所示是在中、低浓度时测量情况示意图,由于这时还有较大的空隙率,在测量有效区内前层和后层微粒都能被光照射,其光反射信号都能很好地被接收光纤所接收。测量信号较真实地反映了一个小体积内微粒的浓度。然而在高浓度流化床中测量时,如图5(b)所示,由于浓度高空隙率很小。微粒几乎是密排的,测量时只能测到前排一个平面内的微粒反射信号,而后排微粒无法测到。这时反映的只是一个平面而不是一个体积内的情况。如果采用如图6

所示结构的组合光纤探头,利用随机混合分布式光纤有效测量区很靠近端面这一特点,把两束这样的光纤端面前后错开一定距离,就能使两束光纤一束测前排微粒,一束测后排微粒。这样测量信号就较真实的反映了高浓度区的实际情况。例如在循环流化床的边壁流处,浓度就可高达100 kg/m³以上,采用上述结构光纤探头测量就能使测量值更加真实可靠。



图5 不同空隙率光纤测量情况示意

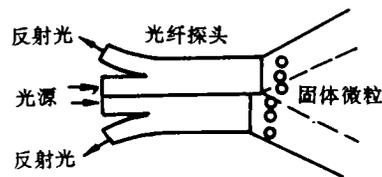


图6 端面错位式组合光纤探头

另一方面,当气—固两相流中的固体微粒直径小于100 μm、光反射率又很低时(如极细微粒的煤粉)。在使用反射式光纤探头测量时,接收到的反射光信号就很弱,以致影响了测量的可靠性。如图7所示是透射式光纤探头。当有微粒通过相对的一对发光与接收光光纤探头之间时,就会对接收光纤产生一个“减光”作用,使接收到的光强减弱。微粒密度愈高,则减光作用愈大,测到的光强愈弱。实验证明,这种结构的光纤探头应用于反射率很低的超细微粒气—固两相流化床中浓度测量时,效果比反射式光纤探头好,能更真实的反映浓度值。

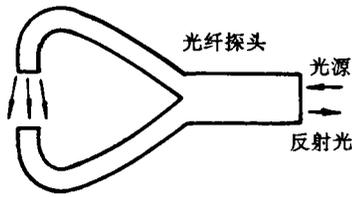


图 7 透射式光纤探头

3 微粒粒径对测量影响原因分析

当一束光照射到固体微粒上时,可把气-固两相流中的固体微粒看成一个弥散系。根据弥散系的辐射特性,当光辐射照射到一个微粒上应考虑绕射问题、通常用绕射参数 ρ 来衡量, ρ 是粒径 d 和投入光辐射波长 λ 的比值、 $\rho = \pi d / \lambda$ 。在我们的实验中、光源是 He-Ne 激光, $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ 。而通常循环流化床锅炉中的固体微粒直径多在几十到上千微米。因 $d \gg \lambda$ 、故可不考虑绕射。对于大多数固体来说透射率为零。而主要体现为反射和吸收,若用反射率 β 和吸收率 α 来表示,则它们之间的关系为: $1 = \alpha + \beta$ 、或 $\beta = 1 - \alpha$ 。如果流化床中固体微粒是单一物质,当光纤探头、光源强度一定时其测量有效厚度也一定。这时反射率 β 可认为只是固体微粒直径 d 和密度 μ 的单值函数: $\beta = f(d, \mu)$ 、而反射光强度 E 是反射率 β 的函数: $E = f(\beta)$ 或: $E = f(d, \mu)$ 。反射光强度 E 可通过实测得到、微粒直径 d 在工况一定时,也可用取平均值的方法得到一个定值,只要找出测量反射光强度与微粒直径之间相互影响的关系,并加以修正,就可得到一个比较接近真实状态的固体微粒浓度值。

现先考虑光反射的单纯几何现象。当有微粒运动到光纤端面前的有效光照区内被光照射时,固体微粒表面的一部份面积将把投

射到上面的光反射出去,并被接收光纤接收。浓度高(空隙率低)时,总反射光面积增大而使接收到的光强度增大,光-电转换后的电平值就高,在同一粒径时、浓度与测量电平值成正比线性关系。但当微粒直径变化时,这一正比关系发生了变化,在同一空隙率下,随粒径增大、测量电平值明显增高。从反射式测量原理分析,表明大粒径时参与反光的有效面积比小粒径时增大了。

现考虑图 8(a) 所示,单一大粒径的反射光情况,先假设固体微粒是一理想球型,当一束光投射到球体上时,对接收光纤来说球体上有效反射面积只是一个局部球面,即只有 α 张角以内的球冠面积是光反射有效面积。 α 角之外的球面反射光已超出光纤的接收有效角度而不被接收。

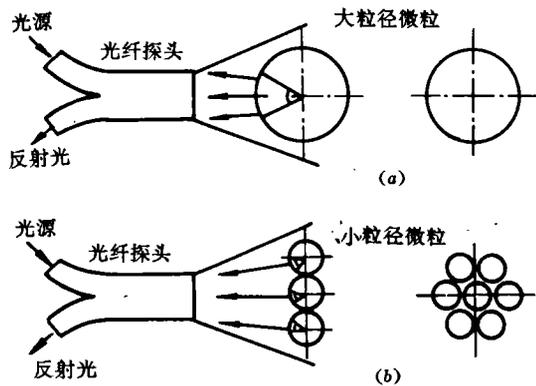


图 8 不同粒径时,反射式光纤测量示意图

如图 8(a) 所示,由几何学可知球面有效反射面面积为:

$$S = 2\pi r^2(1 - \cos\alpha/2) \quad (2)$$

再考虑图 8(b) 所示多颗小粒径微粒反射情况。假设图 8(a) 中大颗粒直径截面积内正好能密排七颗小颗粒,如果取小球体有效反射面积对应的张角 α 与大粒径球体相等,取大球体半径为 r ,则小粒球体的半径为三

分之一 τ 。这时七颗小粒径球体有效反射面积总和为 $S = 7 \times 2\pi(r/3)^2(1 - \cos\alpha/2) = 14/9\pi r^2(1 - \cos\alpha/2)$ ，大粒径球体有效反射面积 $S = 2\pi r^2(1 - \cos\alpha/2)$ ，故大颗粒有效反射面积要比七颗小粒径球体有效反射面积总和还大。而实际上当球体直径变小时有效反射面对应的张角 α 要比大球体的小，所以小球体的实际有效反射面积比上述计算值还小。

上述几何计算的分析，从有效光反射面积角度充分说明了在同一空隙率下，粒径变化引起光-电测量法的测量误差原因所在。所以在实际应用中应把不同粒径的有效反射面积之间的差值引入计算中加以修正，以减少粒径对测量值的影响。

但是上述的修正存在两个问题，一是把微粒理想化为球体模型，实际固体微粒往往是无规则的多面体。二是在做大、小粒径微粒有效反射面积计算时，假设小粒径微粒是以最紧密方式排列。而实际流化床中，微粒之间的排列在随气流运动过程中是无规则随意排列的，且浓度不同时这种随意排列的紧密程度也在变化。这都使得上述有效光反射面积修正法还不能很好的解决微粒粒径的影响。而这些实际状态又很难用一个精确的数学式子来分别表示并做出精确计算而加以修正。我们采用了数据信号处理中的多元回归方法，对由定标系统测量的较准确的微粒浓度值 c 与光-电测量法所得的电平值 s (经有效光反射面积修正) 和粒径 d 三个参数进行多元回归分析，从大量实测数据组中找出三个参数之间的关系，并进行修正。

由大量实验发现，这三者的变化关系并非线性变化的。现设三个参数之间的函数表达式为：

$$C = AS^{n_1}d^{n_2} \quad (3)$$

当等式两边取对数后，可把多元非线性问题化为多元线性问题来处理，使得计算过程

可简化。式(3)可表示为：

$$Y = a_0 + n_1x_1 + n_2x_2 \quad (4)$$

y, x_1, x_2 可由实验得出，并可写成两个数组，其矩阵形式为：

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12} & X_{22} \\ X_{13} & X_{23} \\ \dots & \dots \\ X_{1m} & X_{2m} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \dots \\ Y_m \end{bmatrix}$$

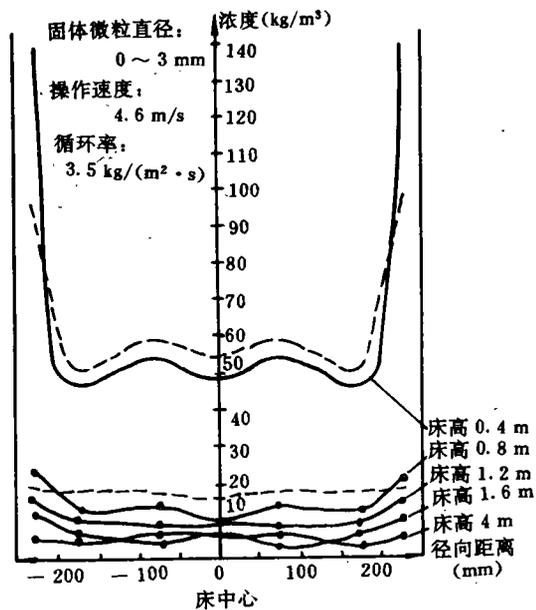


图9 微粒浓度沿流化床不同高度横截面上的分布图

根据最小二乘法原理，可把式(4)中的回归系数 a_0, n_1, n_2 求出，并反代回式(4)，再取反对数，最终再得到式(3)的表达式。这时的式(3)中 a_0, n_1, n_2 都是已知常数，即修正系数，这就是一个修正公式。经式(3)修正后所得到的测量值就比较真实地反映了实际流化床中固体微粒浓度值。实验证明这样的修正是符合实际情况的。

图9所示是由光—电测量仪在高4 m、横截面为 $0.3 \times 0.4 \text{ m}^2$ 的循环流化床试验台上测得的不同床高度处微粒浓度沿横截面分布曲线图,图中虚线是由传统的等速抽气采样法测得的,可以看出两者在中低浓度场测量时是很吻合的,而在床底部边壁流处的极高浓度区,光电测量法的测量值比等速抽气法测量值大,这是符合真实情况的。测量结果与理论计算结果也是很吻合的。这充分说明了由上述分析并提出的对微粒粒径影响进行的修正合理和可信的。

4 其它因素的影响

测量时运动颗粒对探头端面有一定冲刷作用探头端面尺寸又很小、端面上灰垢沉积很快达到动平衡且厚度很薄、并与灰浓度大小没有显著的关系。在密相区颗粒尺寸较大灰垢层比稀相区时还要薄。所以可通过定标及后期数据处理加以考虑并给出较正确的测量值。

采用玻璃光纤和使探头端面光纤略内缩的结构,可降低灰灰对探头的磨损,并在较长时间内不会影响测量的精度。

目前国内光纤一般只允许工作在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下,如采用耐高温光纤就完全可实现流化床锅炉中热态下的测量。此外流化床中固体颗粒的运动是随机的,所以任一空间点上的颗粒浓度和速度的测量都可在该点直接用光

纤探头测得。

5 结论

通过分别对几种典型结构的光纤探头的测光性能分析和对微粒有效光反射面积随微粒粒径变化的分析以及大量实验证明,光纤探头的结构对测量结果有很大影响,必须根据微粒运动速度、 A/D 采样速度及微粒直径、表面反射率等因素合理选用不同结构的光纤探头,而在随后对采样信号的分析、计算过程中,必须考虑粒径变化、多颗微粒有效光反射面积变化等对测量结果的影响。并得出综合修正式对原始采样值加以修正后,使测量结果更接近实际情况。

参 考 文 献

- 1 陈元迪、温龙等. 采用光纤—激光技术对循环流化床内气—固两相流的颗粒浓度和速度分布的研究. 动力工程, 1993, (5): 55—58
- 2 徐秉铮、欧阳景正. 信号分析与相关技术. 科学出版社, 1981, P113—143, P186—201
- 3 川田则. Studies on solid-gas two-phase flow measurement by optical fibers. 三菱重工技报, 1985, 22(1)
- 4 W. B. 艾伦著, 甘子光等译. 纤维光学理论和实践. 轻工业出版社, 1981, P4—43, P74—96
- 5 A. T. 布洛赫著, 贾鸿祥等译. 锅炉炉内换热. 西安交通大学出版社, 1988, P54—94
- 6 牛长山等. 试验设计与数据处理. 西安交通大学出版社, 1988, P270—318

工程消息

泰国将建核电站

据《Энергия: Экон., техн., экол.》1993年10月号报道,为了满足日益增加的电力需要(年增加10%),泰国计划建设总装机电功率为6000 MW的6个核电站,前两个核电站(每个电站的装机电功率为1000 MW)应该在2006年以前投入运行。在制定核电站建设计划时,特别注意到安全性、经济性、放射性废料埋藏等问题,并且主要的是要得到居民对实现上述计划的赞同。

(学生 供稿)

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1995 Vol. 10 No. 1

- △The Present status and Future Prospects of Nuclear Power Generation Technology……Ji Guiming, Li Jie(*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 1~7

This paper briefly describes the development and application of nuclear power generation both in China and around the world. Taking the former Soviet Union as an example, the authors list the main technico-economic characteristics of some major nuclear power plant equipment. In conclusion, a projection is given of the future advancement and potential development of nuclear power engineering projects. **Key words:** *nuclear power station, nuclear reactor, steam turbine, equipment*

- △The Development of the Test Stand of a Saturator, a Key Component in HAT Cycle……Jin Haiming(*Xi'an Jiaotong University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 8~12

The necessity of studying the properties of a saturator in HAT cycle has been pointed out by the author. The establishment of the saturator performance test stand at its preliminary stage created the experimental conditions for gaining an in-depth understanding of the saturator properties and undertaking the further study of the HAT cycle. **Key words:** *HAT cycle, saturator, Properties*

- △The Analysis of Factors Exercising an Influence on a Photoelectric Method Used for Measuring the Minute Solid Particle Concentration and Velocity in Gas-Solid Dual Phase Flows……Chen Yuandi, Wen Long(*Xi'an Jiaotong University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 13~18

A photoelectric detection method with the use of an optical fibre probe can be employed to measure the minute solid particle concentration and velocity in gas-solid dual phase flows, but both the construction of the optical fibre and the variation of the minute solid particle diameter may significantly affect the result of measurement and calculation. This paper gives a brief description of several types of optical fibre probes and their measurement performance and analyses the effect of minute solid particle on measurement outcome with an effective method for correcting invalid results being presented. **Key words:** *gas-solid dual phase flow, photoelectric detection, optical fibre probe construction, minute solid particle diameter*

- △Operating Characteristics of PFBC Pneumatically Controlled L Valve Slag Removal Mechanism……Rong Degang(*Thermal Energy Engineering Institute under South-Eastern University*)*Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 1995, 10(1): 19~24

PFBC(pressurized fluidized bed combustion)combined gas-steam turbine plant power generation is a new type of coal-fired power generation system noted for its high efficiency and low environmental pollution. Against the background of the continuous slag removal version of a home-made PFBC-CC intermediate-test power station the author makes an exploratory study of the effect of system pressure, L valve inlet-outlet differential pressure, continuous and pulsating feeding of vibrating air