

数字全息在线监测 300 MW 机组煤粉细度试验研究

金其文¹, 关 键², 吴学成^{1*}

- (1. 浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;
2. 浙江省能源集团有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘 要: 煤粉细度是燃煤电厂运行过程中的关键参数之一, 与锅炉燃烧效率、制粉系统功耗以及设备磨损等问题息息相关。文中对数字全息技术在线监测电厂煤粉细度进行了试验研究。搭建了基于脉冲数字同轴全息的在线测量系统, 系统包括取样、测量、收集和数据处理四个主要部分。将测量系统应用于某 300 MW 机组两根一次风管道内的煤粉细度监测, 两根管道内煤粉流来源于不同的两台磨煤机, 采用自行开发的重建软件对煤粉全息图进行实时处理并输出煤粉细度结果。对系统收集的经过系统测量后的煤粉样品进行实验室筛分, 将筛分结果与现场全息结果进行对比, 以验证测量系统的可行性和准确性。结果表明, 采用面积分布的全息结果与筛分结果基本一致, 平均绝对细度偏差在 4% 以内。同时诊断出了一台磨煤机煤粉细度与设计值偏离较大, 证明所建测量系统用于燃煤电厂煤粉细度的在线监测有较大的应用潜力。

关键词: 数字全息; 煤粉细度; 在线监测; 颗粒测量

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200456

Experimental study on on-line monitoring pulverized coal fineness of 300 MW coal-fired plant by digital holography

Jin Qiwen¹, Guan Jian², Wu Xuecheng^{1*}

- (1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Zhejiang Energy Group Co., Ltd, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Pulverized coal fineness is one of the key parameters in the operation of coal-fired power plant, which is closely related to the combustion efficiency of boiler, power consumption of pulverizing system and equipment wear. In this paper, an experimental study on on-line monitoring of pulverized coal fineness by digital holography was carried out. An on-line measurement system based on pulse digital in-line holography was established. The system included four main parts: sampling, measuring, collecting and data processing. The measurement system was applied to the pulverized coal fineness monitoring in two primary air pipes of a 300 MW unit. The pulverized coal flow in the two pipes were from two different mills. The self-developed reconstruction software was used to process the holograms in real time and output the fineness results. The pulverized coal samples collected by the system were sieved in the laboratory, and the sieving results were compared with the holographic results to verify the feasibility and accuracy of the measurement system. Results show that the holographic results of area distribution are basically consistent with the sieving results, and the average absolute deviation is less than 4%.

收稿日期:2020-11-26; 修订日期:2021-03-26

基金项目:国家自然科学基金(51576177, 91741129)

作者简介:金其文,男,博士生,主要从事数字全息颗粒场测量方面的研究。

通讯作者:吴学成,男,博士生导师,博士,主要从事多相流光学诊断方面的研究。

The test also diagnose that the coal fineness of one mill deviates greatly from the designed value, proving that the measurement system has great application potential for on-line monitoring of pulverized coal fineness in coal-fired power plants.

Key words: digital holography; pulverized coal fineness; on-line monitoring; particle measurement

0 引言

燃煤电厂以煤炭为燃料进行发电,原煤经过磨煤机研磨为煤粉颗粒后由管道气力输送至锅炉炉膛燃烧。煤粉细度是电厂运行过程中的重要参数之一,对燃烧效率、燃烧特性、制粉系统功耗、污染物排放^[1-2]以及设备磨损等有重要的影响,深刻影响着电厂运行的经济性、安全性和环保性。对煤粉细度进行有效监测是运行优化的基础。

目前对煤粉细度的测量应用最广泛的是离线的机械筛分法,这也是中国电力行业标准《DL/T 467—2019 电站磨煤机及制粉系统性能试验》中所规定的方法。然而筛分法由于测量周期长,从取样到得到细度结果至少是小时级的耗时,对燃烧系统和制粉系统的实时优化指导意义非常有限。因此亟需具备在线测量、实时反馈能力的测量技术。已经有一些学者对煤粉细度的在线测量技术进行了研究,主要有光学法^[3-4]、声学法^[5-6]、电学法^[7-8]和图像法^[9-10]四大类。上海理工大学蔡小舒等^[3,11]对光脉动法在线测量煤粉粒度进行了深入的研究,而且开发出了探针型原位测量装置,在电厂现场环境下进行了试验,在光脉动法基础上发展的光脉动谱法则实现了粒度分布的测量。Gu 等^[6]利用双频超声波测量了电厂煤粉管道内的煤粉浓度和粒径,测量结果与图像法的平均偏差在 15% 左右。Qian 等^[8]利用多通道静电传感器结合数字图像方法对实验室尺度下的煤粉和生物质混合颗粒流的平均速度、浓度以及粒径分布进行了测量。总体来看,光学法、电学法和声学法一般都需要经过复杂的标定过程,而且测量还可能受到被测对象性质的影响。而图像法则一般不受测量对象性质的影响,但通常图像法受到测量景深的限制,只能测量位于二维平面内的颗粒。数字全息技术作为一种三维测量技术^[12],不仅可反演颗粒形貌,还能测量颗粒三维位置甚至三维速度,在颗粒场和流场测量领域得到了广泛的应用^[13-17]。

文中基于数字全息技术,设计搭建了一套具备现场在线测量能力的煤粉细度监测系统,并于某 300 MW 燃煤电厂开展了现场测量试验,对两台磨煤机磨制的煤粉分别进行了全息测量,对收集的煤粉样品进行离线筛分。比较全息测量结果和筛分结果发现两种方法基本一致,同时诊断出了一台磨煤机煤粉细度偏离了设计值,证明了该测量系统的准确性和应用潜力。

1 理论基础

1.1 数字全息技术

如图 1 所示,数字全息技术包括记录和重建两个过程。在记录过程中,平面波激光束照射三维颗粒场,被颗粒散射的光波作为物光,未经颗粒干扰的部分作为参考光,物光和参考光在成像平面干涉形成全息图。在重建过程中,用计算机模拟光的传播,重建距离与记录距离相等时得到颗粒的聚焦图像。

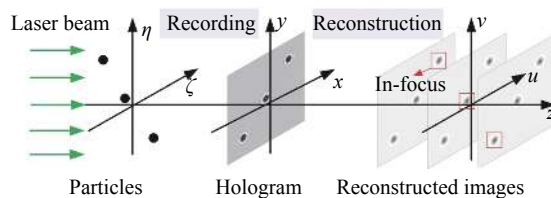


图 1 数字全息的记录和重建

Fig.1 Recording and reconstruction of digital holography

若光强为 $O(\xi, \eta)$, 全息记录平面 (x, y) 距颗粒的距离为 z_0 。根据标量衍射理论, CCD 记录的干涉条纹即颗粒全息图光强 $I_{\text{holo}}(x, y)$ 可表示为:

$$I_{\text{holo}}(x, y) = 1 - \frac{2}{\lambda z_0} O(\xi, \eta) \otimes \sin\left(\frac{\pi}{\lambda z_0} (\xi^2 + \eta^2)\right) \quad (1)$$

式中: λ 为激光波长; \otimes 表示二维卷积运算。

采用小波重建方法 (WTM) 对全息图进行重建^[18]。颗粒三维光场可由全息图 $I_{\text{holo}}(x, y)$ 与小波函数 $\psi_z(x, y)$ 的卷积得到:

$$I(x, y, z) = 1 - I_{\text{holo}}(x, y) \otimes \psi_z(x, y) \quad (2)$$

其中, 小波函数 $\psi_z(x, y)$ 为线性调啾函数:

$$\psi_z(x, y) = \frac{\pi}{\lambda z} \left[\sin \left(\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z} \right) - M_\psi \right] \times \exp \left(-\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z^2} \right) \quad (3)$$

式中: $M_\psi = \sigma^2 / (1 + \sigma^4)$ 为调零参数, 使得 $\psi_z(x, y)$ 平均值为零; σ 为窗函数 $\exp(-\pi(x^2 + y^2)/\lambda z^2)$ 的带宽因子。

在不同深度进行重建, 获得一系列重建图像, 再经过图像融合、颗粒识别、颗粒定位等操作, 可得到全息图中颗粒的三维位置、二维形貌以及颗粒粒径参数, 结合 PIV/PTV 技术, 还可获得颗粒三维速度信息。其中对于粒径的求取, 若颗粒占据的像素数量为 N , 相机像素大小为 Δx , 平面波作为光源成像放大倍率为 1, 则颗粒粒径 d (等效面积圆直径) 为:

$$d = 2 \sqrt{\frac{N \Delta x^2}{\pi}} \quad (4)$$

1.2 煤粉细度表征

在国家标准中, 煤粉细度表示一定粒级的煤粉含量的百分比, 用煤粉在筛孔尺寸为 x 微米筛子上筛后剩余质量占总质量的百分比 $R_x(\%)$ 表示。煤粉细度 R_x 与煤粉粒度 x 之间的关系可以用 Rosin-Rammler 方程表示:

$$R_x = 100e^{-bx^n} \quad (5)$$

式中: b 为表示煤粉粗细程度的常数; n 为煤粉均匀性指数。通常在电厂实际运行过程中采用 R_{90} 和 R_{200} 参数来表征煤粉细度。值得注意的是, 煤粉是三维不规则颗粒, 其粒径测量具有不确定性, 筛分法得到的粒度实际上是筛子的孔径, 煤粉颗粒经过平动、旋转等运动通过筛孔, 只要煤粉颗粒在某个维度上的尺寸小于筛孔尺寸即可通过筛孔。筛分法获取 R_{90} 参数的公式可表示为:

$$R_{90} = \frac{\sum_{90}^{\infty} M(d)}{\sum_0^{\infty} M(d)} \quad (6)$$

式中: d 为颗粒粒径; $M(d)$ 为颗粒质量。而全息技术或其他图像方法获得的是煤粉颗粒二维投影形状, 由此得到的粒径会与筛分粒径有一定的偏差。在计算粒度分布时, 除了确定颗粒粒径, 还需计算颗粒体积, 这里假设不同粒径的煤粉颗粒密度相同, 因此可以用体积代替质量。体积计算最简单的方式为 $V(d) = 1/6\pi d^3$, 即把煤粉颗粒当成球体。利用体积分布获取 R_{90} 参数的公式可表示为:

$$R_{90} = \frac{\sum_{90}^{\infty} d^3}{\sum_0^{\infty} d^3} \quad (7)$$

也有学者利用二维投影的面积分布求取煤粉细度, 即 $S(d) = 1/4\pi d^2 = N\Delta x^2$, 计算公式为:

$$R_{90} = \frac{\sum_{90}^{\infty} d^2}{\sum_0^{\infty} d^2} \quad (8)$$

文中在数据处理过程中对两种表征方式都进行了计算和对比, 且以筛分得到的质量分布作为参考依据。

2 现场试验

2.1 试验装置

气力输运过程中颗粒相的在线测量一般可分为取样测量和原位测量两种方式。取样测量即先将颗粒样本从管道中取出, 再送至测量区域进行测量, 测量后的颗粒可以收集下来或者再返送至管道中; 原位测量即测量发生在管道内, 无需取样过程, 测量装置为探针形式插入管道或者直接作为管道的一部分。取样测量的关键是要保证取样的代表性, 一般需要等速取样, 根据伯努利方程维持取样装置和管道内的压力平衡即可实现。而原位测量虽然可以有效避免取样带来的误差, 但由于气力输运管道内的高浓度、高流速、高温等特性, 另外还要保证装置对流场的影响不可太大, 因此测量装置需要解决冷却、耐磨、小型化等问题。文中应用数字全息技术在线监测燃煤电厂煤粉细度, 设计的测量装置采用的是取样测量形式。试验装置示意图及实物图如图 2 所示, 装置主要可以分为如图 3(a) 所示的气路系统和如图 3(b) 所示的光路系统, 试验的流程为取样、测量、结果输出、收集。取样枪进行煤粉等速取样并稀释, 稀释后的煤粉流进入测量腔由全息系统记录全息图并由计算机上的重建软件实时处理反馈结果, 旋风分离器将测量后的煤粉收集用于实验室离线分析作为结果的对比。

气路系统主要由取样枪、测量腔、旋风分离器、引射器和流量计、阀门等辅助仪表组成, 如图 3(a) 所示。取样枪的设计根据电厂经验运行参数, 同时参考电力行业标准《DLT 942—2005 直吹式制粉系统的煤粉取样方法》。煤粉管道内煤粉浓度取 0.5 kg/kg 空

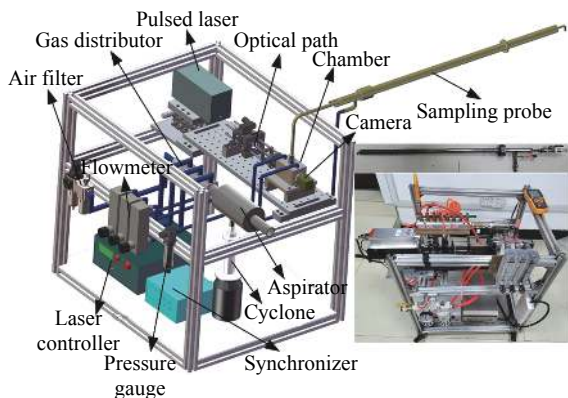


图 2 装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the measurement equipment

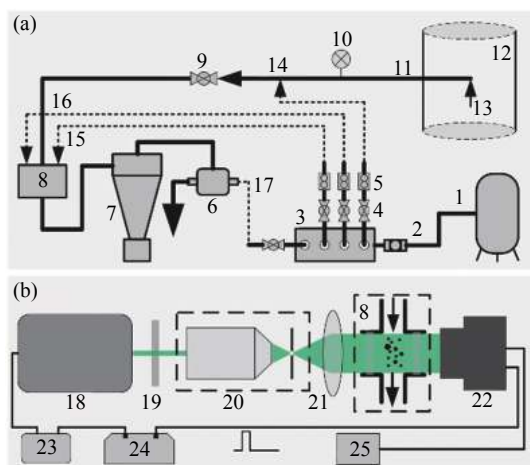


图 3 (a) 测量装置气路系统; (b) 测量装置光路系统。1-气源, 2-空气过滤器, 3-气体分配器, 4-球阀组, 5-流量计组, 6-引射器, 7-旋风分离器, 8-测量腔, 9-球阀, 10-压力计, 11-取样枪, 12-煤粉管道, 13-取样煤粉流, 14-稀释气, 15 和 16-保护气, 17-引射气, 18-激光器, 19-衰减片, 20-空间滤波器, 21-透镜, 22-相机, 23-激光控制器, 24-同步器, 25-计算机

Fig.3 (a) Gas system; (b) Light path system. 1-Gas source, 2-Air filter, 3-Gas distributor, 4-Ball valve group, 5-Flowmeter group, 6-Aspirator, 7-Cyclone, 8-Chamber, 9-Ball valve, 10-Pressure gauge, 11-Sampling probe, 12-Pipe, 13-Sampled coal flow, 14-Dilution gas, 15 and 16-Protection gas, 17-Ejector gas, 18-Laser, 19-Attenuator, 20-Spatial filter, 21-Lens, 22-Camera, 23-Laser controller, 24-Synchronizer, 25-Computer

气, 流速取 23 m/s, 取样枪入口内径设计值为 4 mm。等速取样状态下, 图 3(a) 中 13-取样煤粉流的流量可通过计算得到, 为 1.05 m³/h, 由于高浓度的煤粉难以直接进行全息测量, 因此向取样枪内通入稀释气(图 3(a) 中 14) 将煤粉浓度降至适宜浓度, 稀释气流量

为 3 m³/h, 即稀释倍率为 2.87。随后煤粉流进入测量腔, 流速为 9.94 m/s, 雷诺数达到 8000 以上, 处于湍流状态, 为了防止煤粉颗粒在湍流的作用下对测量腔两侧的光学窗口造成沾污, 向测量腔两侧注入保护气(图 3(a) 中 15 和 16), 根据实验测试, 保护气流量在 3 m³/h 下已能达到防沾污效果。测量后的煤粉流总流量为 10.05 m³/h, 据此设计旋风分离器的尺寸, 需要说明的是, 旋风分离器实际上不能将煤粉颗粒完全分离下来, 会有微量的细煤粉逃逸, 校核的分离效率为 95%。引射器根据引射原理产生负压为系统提供动力。整个系统消耗的压缩空气由电厂的气源提供, 气体分配器将压缩空气分为引射气、稀释气和保护气, 球阀组和流量计组用于测量和调节各部分的流量。

光路系统即脉冲同轴数字全息系统, 如图 3(b) 所示。由于测量腔内煤粉颗粒流速过快, 连续激光器已不再适用, 为了避免拖影等问题, 采用脉冲激光器(Bright Solutions, Wedge-HF-532) 作为光源, 激光波长为 532 nm, 最大输出功率 1.5 W, 脉宽小于 800 ps。激光束首先经过衰减片减弱激光强度, 后经空间滤波器和透镜滤波、扩束、准直为平行光, 空间滤波器由 20 倍的显微物镜和 10 μm 的针孔组成, 透镜的焦距为 120 mm。平行光照射测量腔内的煤粉颗粒流, 另一侧的相机(Basler, Aca2040-90 μm) 记录煤粉全息图, 相机像素大小为 5.5 μm, 最大分辨率为 2 040×2 040, 最小曝光时间 28 μs, 最大帧速为 90 fps。由于相机曝光时间远大于激光脉宽, 为了保证激光发射期间相机已处于曝光状态, 利用同步器设置相机曝光和激光器出光的时序, 其中激光器的延迟设置为 5 μs, 相机延迟为 0。相机记录全息图传输至装有自主开发的实时重建软件的计算机, 计算机处理后反馈煤粉细度数据。实际测量过程中受限于重建速度, 相机帧速设置为 10 fps, 另外为了避免边缘衍射的影响, 分辨率设置为 1 200×1 200, 这样可以保证全息图的质量。

2.2 数据处理

采用前述的重建软件处理全息图并输出结果, 软件结构如图 4(a) 所示, 软件基于 Qt 平台由 C++语言编写。整体架构由相机控制、图像处理、结果数据三个部分组成。相机控制部分通过调用相机厂家提供的 SDK 设置相机参数和控制全息图的采集, 参数包括曝光时间、分辨率和帧率, 实际上由于采用的是脉

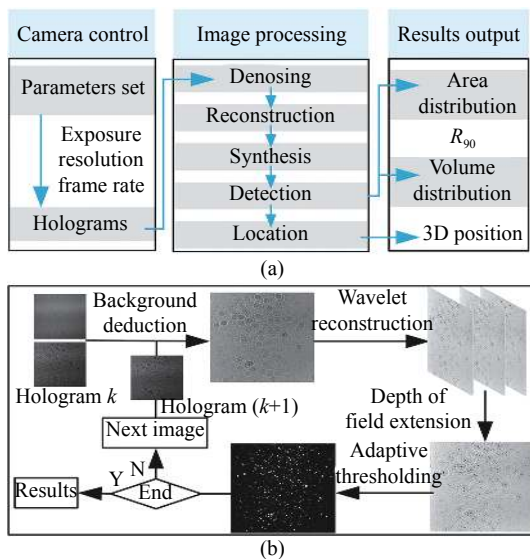


图 4 (a) 软件框架; (b) 算法流程

Fig.4 (a) Framework of the software; (b) Flow chart of holograms processing

冲光源, 曝光时间默认最小值即可, 计算机通过 USB 接口采集相机记录的煤粉颗粒全息图。

批量煤粉颗粒全息图采集后由图像处理部分进行颗粒信息解析, 主要过程为去噪、小波重建、景深拓展、颗粒识别和颗粒定位。全息图处理的详细算法流程如 图 4(b) 所示, 在去噪过程中首先记录在没有颗粒通过测量区域时的背景图片 $I_{bg}(x, y)$, 作为后续系列全息图的去噪背景图, 采用背景相减法进行去噪处理:

$$I_{bd}(x, y) = I_{or}(x, y) - I_{bg}(x, y) \quad (9)$$

式中: 下标“bd”表示去噪后的全息; “or”表示原始全息图; “bg”表示背景图片。

去噪后的全息图 $I_{bd}(x, y)$ 由公式 (2) 小波方法重建得到一系列不同深度的重建图 $I(x, y, z)$, 利用基于小波融合的景深拓展方法将位于不同深度的颗粒聚焦图像融合到一张图片上, 对每张重建图进行小波分解得到 HH、HL、LH 和 LL 四个子图。利用 Sobel 算子计算子图的梯度:

$$\begin{aligned} G_{(x,h)} &= HL \otimes S_x + HH \otimes S_x \\ G_{(y,h)} &= LH \otimes S'_x + HH \otimes S'_x \\ G_{(x,l)} &= LL \otimes S_x \\ G_{(y,l)} &= LL \otimes S'_x \end{aligned} \quad (10)$$

式中: Sobel 算子 $S_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。高频子图和低频子图的亮度梯度为:

$$\begin{aligned} G_h &= \sqrt{G_{(x,h)}^2 + G_{(y,h)}^2} \\ G_l &= \sqrt{G_{(x,l)}^2 + G_{(y,l)}^2} \end{aligned} \quad (11)$$

亮度梯度的局部方差为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{H,z} &= \sum_n \sum_m [G_h(n, m) - \overline{G_h(n, m)}]^2 \\ \varepsilon_{L,z} &= \sum_n \sum_m [G_l(n, m) - \overline{G_l(n, m)}]^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\overline{G_{(h,l)}(n, m)}$ 为 $G_{(h,l)}$ 在区域 $n \times m$ 内的平均值。根据局部方差 $\varepsilon_{H,z}$ 和 $\varepsilon_{L,z}$ 的最大值确定聚焦位置, 利用小波逆变换获得景深拓展图 I_{efi} 。

再利用阈值方法对景深拓展图进行二值化操作, 将所有颗粒识别出来, 获得颗粒二维形貌, 单张全息图的颗粒信息作为中间量保存。设定一个亮度阈值 I_{th} , 对 I_{efi} 进行二值化处理:

$$I_{bw}(x, y, z) = \begin{cases} 1, & I_{efi}(x, y, z) > I_{th} \\ 0, & I_{efi}(x, y, z) \leq I_{th} \end{cases} \quad (13)$$

最后利用 OpenCV 图像处理库中的 Connected Components WithStats 函数对二值化图 I_{bw} 中的颗粒进行识别, 每个颗粒作为一个连通域, 根据连通域占据的像素数量计算颗粒粒径 d (公式 (4))。一张全息图处理完成后, 判断系列全息图处理的完成状态, 继续处理下一张全息图, 直至所有图片处理完成。结果输出部分根据颗粒形貌统计所有全息图中颗粒信息, 计算颗粒的粒径分布和 R_{90} 、 R_{200} 信息, 可输出面积和体积分布两种粒径分布 (公式 (7)、(8))。关于全息图处理、颗粒信息提取的实施过程可参考文献 [18]。

2.3 试验工况

现场测量试验在某电厂的 4 号机组 (300 mW) 进行, 如图 5 所示, 测量点位于磨煤机 B 和 D 对应的一次风管, 磨煤机型号为 ZGM95N, 设计煤粉细度 R_{90} 为 15%~40%。通过电厂 DCS 系统对两台磨煤机对应制粉系统的运行参数进行多次记录取平均值, 计算得到两根煤粉管道内的关键参数如表 1 所示, 一次风速在 21 m/s 左右, 煤粉浓度在 0.45 kg/kg 空气左右。试验中对两台磨煤机进行了多次测量, 同时进行了较长时间的在线监测。试验过程中的操作流程为:

- (1) 调整脉冲同轴全息光路, 记录背景图片, 用于后续的去噪操作;
- (2) 调整气路系统, 分别开启引射气、保护气和稀

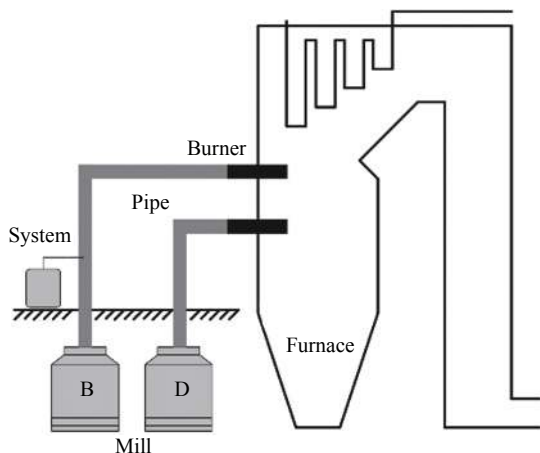


图 5 试验示意图

Fig.5 On-site experiments

表 1 一次风管道内煤粉参数

Tab.1 Parameters of coal powder flow in primary pipes

Parameter	Unit	Value	
		B	D
Air flowrate	t/h	49.88	50.28
Coal flowrate	t/h	23.1	22.05
Diameter of pipes	mm	460	460
Temperature	°C	80.03	80.05
Pressure	kPa	1.21	1.41
Velocity	m/s	20.59	20.90
Concentration	kg/kg air	0.46	0.44

释气, 调节保护气和稀释气流量, 关闭取样枪阀门 (图 3(a) 9), 将取样枪内残留煤粉反吹出枪体;

(3) 将取样枪伸入至煤粉管道, 调节引射气量达到等速取样状态;

(4) 系统流量稳定后, 开始全息图采集和处理, 每个工况持续 10 min;

(5) 测量结束, 取出取样枪, 分别关闭稀释气、保护气和引射气;

(6) 将分离器分离的煤粉颗粒装袋保存, 用于后续的对比如分析。

3 结果与分析

3.1 测量结果

试验过程中采集的 B 磨和 D 磨煤粉颗粒典型全息图及其重建结果如图 6 所示。图 6(a) 和 (d) 分别

为 B 和 D 磨煤粉全息图, 对其进行重建、融合、识别、定位后, 获得所有煤粉颗粒的粒径信息, 重建范围为 8~9 cm, 重建间隔为 1 mm。两幅全息图中的煤粉颗粒数目分别为 484 和 501。由图 6(c) 和 (f) 的粒径大小分布可以看出, B 磨中 50 μm 以上的颗粒明显多于 D 磨, 平均粒径分别为 24.08 μm 和 21.46 μm, 说明 B 磨煤粉细度大于 D 磨, 这在后面的统计结果中也得到了验证。煤粉颗粒的重建图表明颗粒在测量区域内的分布较为均匀, 颗粒流动方向为全息图中所示的自上而下, 大多数颗粒分布于相机靶面中间区域, 两侧边缘区域分布极少。由于煤粉颗粒的气流跟随性与其尺寸有关, 小颗粒的跟随性好, 当测量区域内流场紊乱时, 大小颗粒的分布可能不均匀, 会造成测量的代表性不足。因此图 6(b) 和 (e) 可以说明测量系统的视场范围覆盖了煤粉流动区域, 能够保证测量的代表性。

对两台磨煤机对应一次风管道内的煤粉颗粒分别进行 5 次测量, 同时采用体积分布和面积分布计算煤粉细度 R_{90} 和 R_{200} 参数, 将旋风分离器分离并收集的煤粉样品进行筛分, 统计结果如图 7 所示。从统计结果可以看出, 两台磨煤机煤粉细度差异较大, 其中 B 磨平均 R_{90} 为 20.63%, 在设计值范围内, 而 D 磨平均 R_{90} 为 8.82%, 比设计值偏小, 说明 D 磨的运行可能不正常。采用体积分布得到的煤粉细度与筛分结果相比严重偏大, 筛分得到的 D 磨 R_{90} 平均为 8.82%, R_{200} 平均为 0.15%, 而体积分布得到的平均值分别为 33.67% 和 2.37%, 绝对误差分别高达 24.85% 和 2.22%, 而对于 B 磨两者的绝对偏差更是达到了 30.75% 和 6.56%。这说明采用体积分布并不适用于以筛分方法为基准的煤粉细度表征。主要原因是煤粉颗粒形貌的不规则性。筛分法得到的是质量分布, 要获得更接近于筛分法的结果, 不仅要得到准确的筛分粒径, 即颗粒能通过的最小孔径, 还要得到准确的颗粒质量或体积。一般等效面积圆直径会大于筛分直径, 因此采用等效面积圆直径计算粒度分布, 必然会使测量的细度结果偏大。

相比于体积分布结果, 采用面积分布和筛分结果更为接近, 虽然结果也略为偏大, 但基本能够满足测量需求。面积分布得到的 D 磨平均 R_{90} 和 R_{200} 分别为

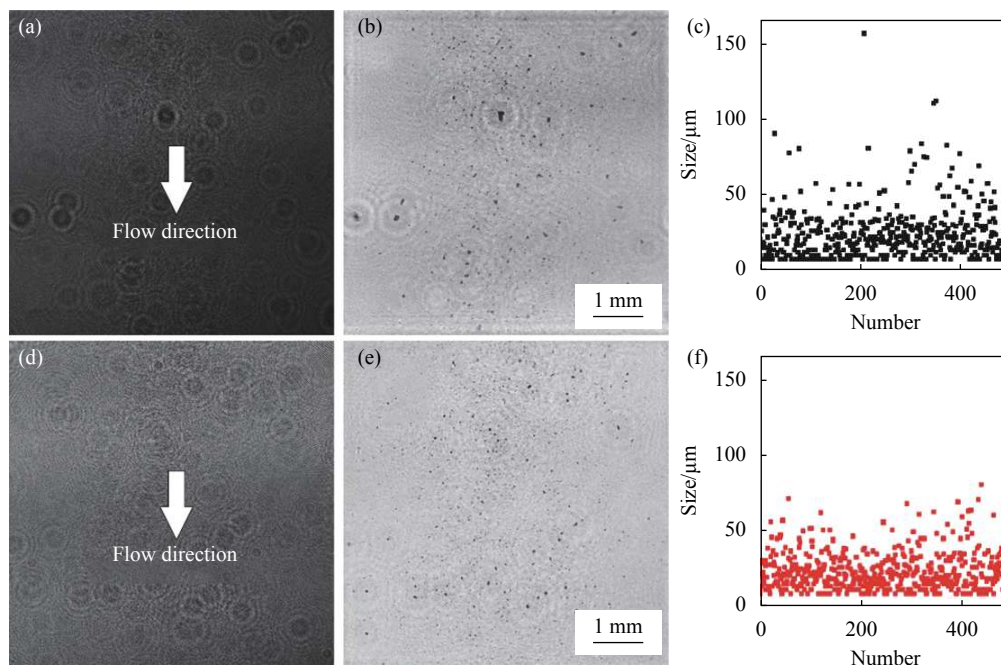


图 6 (a) 为 B 磨典型全息图; (b) 为 (a) 重建图像; (c) 为 (a) 中煤粉颗粒粒径大小分布; (d) 为 D 磨典型全息图; (e) 为 (d) 重建图像; (f) 为 (d) 中煤粉颗粒粒径大小分布

Fig.6 (a) and (d) are typical holograms of coal powders from mill B and D; (b) and (e) are reconstructed images of (a) and (d), while the particle size information are plotted in (c) and (f) respectively

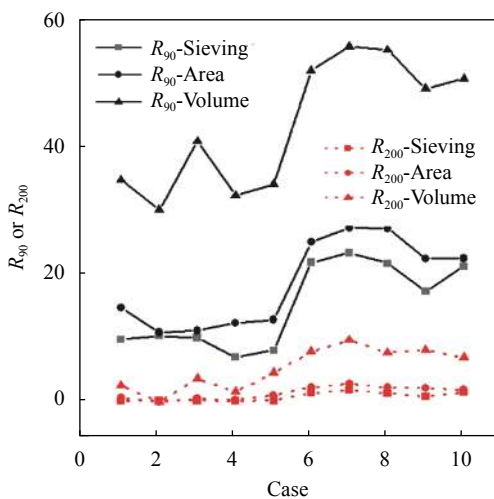


图 7 不同方法得到的 R_{90} 和 R_{200} 结果

Fig.7 R_{90} and R_{200} results obtained by different methods

12.11% 和 0.44%，偏差为 3.30% 和 0.29%，得到的 B 磨平均 R_{90} 和 R_{200} 分别为 24.35% 和 2.20%，偏差为 3.72% 和 0.90%，测量结果基本可以反映出两台磨煤机煤粉细度的差异。D 磨第二个工况，无论是采用面积分布还是体积分布，得到的 R_{200} 参数都为 0，这主要是由于煤粉颗粒中大于 200 μm 的颗粒本身数量极少，而测

量系统测量的是煤粉样品中的极小一部分，出现这样的小概率事件是可能的。

利用筛分得到的平均 R_{90} 和 R_{200} ，根据 Rosin-Rammler 公式，可得到煤粉的理论粒度分布。数字全息由于基于每个颗粒的粒径信息进行统计计算，也可方便地得到粒度分布。将筛分理论分布、全表面积分布和全身体积分布绘制于如图 8 所示的条形图中，其中图 7(a) 和 (b) 分别为 B 磨和 D 磨的结果。从对比图中可以看出，在 0~50 μm 范围内，面积分布和体积分布均与筛分理论分布差异较大，筛分理论分布的峰值粒径在 10~20 μm ，面积分布的峰值粒径在 20~30 μm ，体积分布的峰值粒径在 50 μm 左右。这主要是由于全息技术会受到相机像素大小的限制，颗粒越小测量误差也就越大，例如对于 10 μm 的颗粒，往往只占据两三个像素点，带来了很大的测量不确定性。在 50~200 μm 范围内，面积分布与筛分理论分布比较一致，且下降趋势明显陡于体积分布，而体积分布在此范围内分布值较大，这也造成了其 R_{90} 和 R_{200} 结果明显偏大，这说明当采用等效面积圆直径作为煤粉颗粒的筛分粒径时，用等效球体积近似颗粒真实体积的方

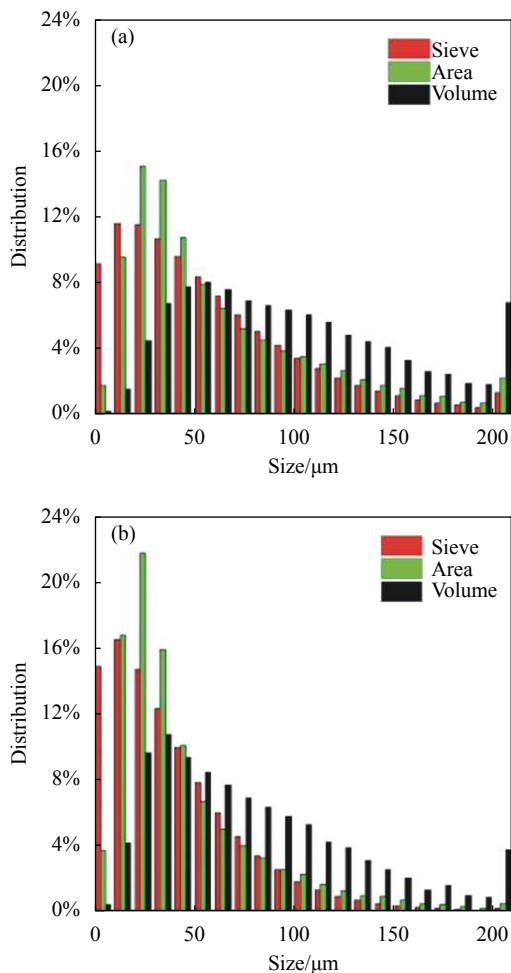


图 8 不同方法得到的全粒径分布结果对比。(a) B 磨; (b) D 磨
Fig.8 Comparison of PSD of different methods. (a) Mill B; (b) Mill D

式是不可靠的。

3.2 长时间在线监测

对 B 磨和 D 磨分别进行了 1 h 的在线监测, 获得的煤粉细度 R_{90} 参数如图 9 所示, 测量结果表明 B 磨 R_{90} 在 23% 左右波动, D 磨 R_{90} 在 10% 左右波动。测量过程中每间隔 2 min 计算并输出此时间段内的 R_{90} 结果, 由于单张全息图煤粉颗粒数目约为 500 颗, 全息图的处理速度约为 2 s/张, 因此 2 min 内可测量颗粒数 30000 为左右, 已经具备一定的代表性。长时间在线监测结果说明此电厂 D 磨的运行与设计参数偏离较大, 煤粉过细, 可能与给煤量、一次风量、液压加载力和分离器转速等因素有关, 电厂可根据本实验装置的测量结果进行运行优化和调整。结果表明基于数字全息技术的煤粉细度在线监测系统具备较大的应用潜力。

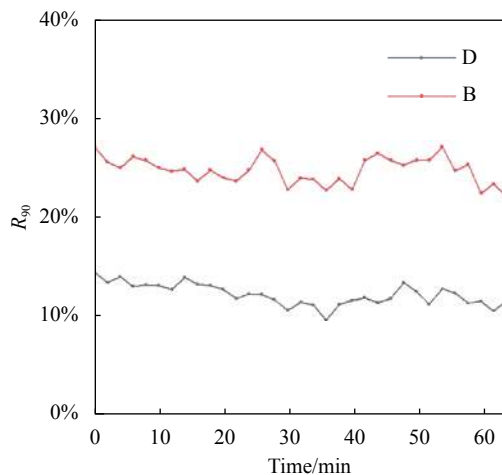


图 9 1 h 煤粉细度在线监测

Fig.9 Online monitoring of pulverized coal fineness within 1 hour

4 结论

文中设计搭建了一套基于数字全息技术的煤粉细度在线监测系统, 并于 300 MW 燃煤机组展开了现场试验。对机组两台磨煤机的测量结果表明:

(1) B 磨和 D 磨的煤粉细度有较大差异, 其中 D 磨煤粉细度值明显低于设计值, 设计的数字全息在线测量系统诊断出了这一差异;

(2) 采用全息技术测量煤粉细度, 用面积分布和体积分布表征煤粉细度 R_{90} 和 R_{200} 的结果差异巨大, 以筛分结果为基准, 体积分布得到的 B 磨和 D 磨 R_{90} 绝对误差分别达到 24.85% 和 30.75%, 面积分布结果更为准确, 绝对误差分别为 3.30% 和 3.72%;

(3) 实现了 1 h 的长时间测量, 证明基于数字全息技术的煤粉细度在线监测系统具备较大的工业应用潜力。

参考文献:

[1] Sung Y, Moon C, Eom S, et al. Coal-particle size effects on NO reduction and burnout characteristics with air-staged combustion in a pulverized coal-fired furnace [J]. *Fuel*, 2016, 182: 558-567.
[2] Li Q, Jiang J, Zhang Q, et al. Influences of coal size, volatile matter content, and additive on primary particulate matter emissions from household stove combustion [J]. *Fuel*, 2016, 182: 780-787.
[3] Cai X S, Li J F, Xin O Y, et al. In-line measurement of pneumatically conveyed particles by a light transmission fluctuation method [J]. *Flow Measurement and*

- Instrumentation*, 2005, 16(5): 315-320.
- [4] Liang Liang, Tang Shoufeng T, Tong Minming T, et al. Study on the detection method of the granularity of pulverized coal based on THz time-domain chaos features [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(5): 1392-1397. (in Chinese)
- [5] Zhang G, Yan Y, Hu Y, et al. On-line size measurement of pneumatically conveyed particles through acoustic emission sensing [J]. *Powder Technology*, 2019, 353: 195-201.
- [6] Gu J F, Su M X, Cai X S. In-line measurement of pulverized coal concentration and size in pneumatic pipelines using dual-frequency ultrasound [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 138: 163-170.
- [7] Gao L, Yan Y, Carter R M, et al. On-line particle sizing of pneumatically conveyed biomass particles using piezoelectric sensors [J]. *Fuel*, 2013, 113: 810-816.
- [8] Qian X, Yan Y, Wang L, 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.
- [9] Ulusoy U, Igathinathane C. Particle size distribution modeling of milled coals by dynamic image analysis and mechanical sieving [J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 143: 100-109.
- [10] Wu X C, Wu Y C, Zhang C C, et al. Fundamental research on the size and velocity measurements of coal powder by trajectory imaging [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2013, 14(5): 377-382.
- [11] Qin S, Cai X. Online measurement of size distribution of pulverized coal with light fluctuation method [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(4): 272-277.
- [12] Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Cen Kefa. Development of digital holography in particle field measurement [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0601001. (in Chinese)
- [13] Wu X, Jin Q, Zhao L, et al. Digital holographic sizer for coal powder size distribution measurement: preliminary simulation and experiment [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(12): 124001.
- [14] Wu X C, Lin X D, Yao L C, et al. Primary fragmentation behavior investigation in pulverized coal combustion with high-speed digital inline holography [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(9): 8126-8134.
- [15] Wu Y C, Wu X C, Yao L C, et al. 3D boundary line measurement of irregular particle with digital holography [J]. *Powder Technology*, 2016, 295: 96-103.
- [16] Li H, Riefler N, Wriedt T, et al. Reference data set for three-dimensional measurements of double droplet combustion of p-xylene [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2020, 38(2): 3151-3158.
- [17] Kemppinen O, Laning J C, Mersmann R D, et al. Imaging atmospheric aerosol particles from a UAV with digital holography [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 16085.
- [18] Wu Y C, Wu X C, Yang J, et al. Wavelet-based depth-of-field extension, accurate autofocusing, and particle pairing for digital inline particle holography [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): 556-564.