

高速摄影法测量颗粒直径及其撞击动力学参数¹⁾郑志敏 张宁豪 高欣晴 邵艺群 刘小芳²⁾

(安徽工业大学能源与环境学院, 安徽马鞍山 243002)

摘要 锅炉受热面积灰和结渣问题是影响其安全和经济运行的重要因素. 为了缓解这些问题, 深入研究颗粒撞击动力学特性, 理解颗粒黏附和反弹机制显得尤为重要. 文章搭建了一个高温环境下的单颗粒撞击壁面动力学测试平台, 并运用粒子阴影图像测速 (PSV) 技术, 对微米级颗粒撞击壁面的动力学特性进行了深入研究. 针对高速摄影中球形颗粒直径难以精确测量的难题, 开发了一套基于 MATLAB 的颗粒图像处理程序, 并提出了一种亚像素插值与最大内切圆相结合的测量方法, 该方法经过实验验证, 证实了其可靠性. 基于此方法, 显著提高了颗粒撞击动力学参数的测量精度. 另外, 研究结果表明, 在本实验条件下, Otsu 阈值分割算法在测量颗粒直径时效果更佳. 亚像素插值方法和插值倍数对测量结果有显著影响, 且存在窗口效应; 颗粒的法向恢复系数随着撞击速度的增加而降低, 撞击和反弹过程中颗粒速度的减小趋势也表明流场效应对颗粒动力学特性有一定影响, 这一点在测量结果中也需予以考虑. 随着颗粒的法向恢复系数增加, 颗粒的反弹角度总体上呈现出逐渐减小的趋势. 这些发现不仅加深了我们对单颗粒撞击动力学的理解, 而且为复杂多颗粒系统的研究提供了坚实的基础, 对于颗粒材料冲击过程的离散元模型的建立和分析具有重要的意义.

关键词 颗粒撞击动力学, 颗粒法向恢复系数, 高速摄影法, 颗粒直径测量, 亚像素插值

中图分类号: TK31

文献标识码: A

DOI: 10.6052/0459-1879-24-476

CSTR: 32045.14.0459-1879-24-476

STUDY ON THE MEASUREMENT OF THE DIAMETERS AND THEIR IMPACT DYNAMICS PARAMETERS FOR THE PARTICLES USING HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY¹⁾Zheng Zhimin Zhang Ninghao Gao Xinqing Shao Yiqun Liu Xiaofang²⁾

(School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, Anhui, China)

Abstract The presence of fouling and slagging on the boiler heat transfer surface is a significant factor affecting the safe and economical operation of the boiler. In order to address these issues, it is imperative to investigate the impact dynamics of particles and to comprehend the mechanisms of particle adhesion and rebound. In this study, a dynamic test platform for single-particle impact on walls under high-temperature conditions was constructed to study the impact dynamics of micrometer-scale particles on walls by using particle shadow velocimetry (PSV) technology. Meanwhile, a MATLAB-based particle image processing program, utilizing sub-pixel interpolation in conjunction with the maximum

2024-10-14 收稿, 2024-12-23 录用, 2024-12-26 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目(52176148, 51606001).

2) 通讯作者: 刘小芳, 教授, 主要研究方向为系统节能和燃烧污染物控制. E-mail: xfliu2003@163.com

引用格式: 郑志敏, 张宁豪, 高欣晴, 邵艺群, 刘小芳. 高速摄影法测量颗粒直径及其撞击动力学参数. 力学学报, 2025, 57(2): 399-412

Zheng Zhimin, Zhang Ninghao, Gao Xinqing, Shao Yiqun, Liu Xiaofang. Study on the measurement of the diameters and their impact dynamics parameters for the particles using high-speed photography. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 57(2): 399-412

inscribed circle method, has been proposed as a reliable measurement technique. This approach has been empirically validated, addressing the challenges associated with accurately measuring the diameter of spherical particles in high-speed photography. Based on this method, the measurement accuracy of the particle impact dynamics parameters has been significantly enhanced. Additionally, the study further revealed that, under these experimental conditions, the Otsu threshold segmentation algorithm exhibited superior performance in measuring particle diameters. Additionally, it was observed that both the sub-pixel interpolation method and the interpolation multiplier significantly influenced the measurement outcomes, with a notable window effect being detected. The normal restitution coefficient of particles demonstrated a decreasing trend with increasing impact velocity, and the decreasing trend of particle velocity during impact and rebound indicated that the flow field effect had a certain influence on the particle dynamics characteristics, which also needs to be further considered in the measurement results. As the normal restitution coefficient of the particles increased, the rebound angle generally tended to decrease gradually. These findings not only deepen our understanding of the impact dynamics of single particles but also provide a solid foundation for the study of complex multi-particle systems. They hold significant importance for the establishment and analysis of discrete element models in the impact processes of particulate materials.

Key words particle impact dynamics, particle restitution coefficient, high-speed photography, particle diameter measurement, sub-pixel interpolation

引 言

锅炉受热面积灰和结渣问题一直是影响锅炉稳定运行的关键因素^[1]. 为了深入探求其形成机理及其控制策略, 飞灰颗粒撞击壁面的反弹和黏附特性一直是研究学者所关注的一个重要方面^[2-5]. 锅炉在运行过程中会产生大量飞灰, 这些颗粒在高温烟气的作用下以一定的速度撞击到换热器表面. 其中, 大多数飞灰颗粒在撞击后会发生反弹, 而少数颗粒则会黏附在换热器表面, 逐渐形成积灰层. 这种由飞灰颗粒惯性碰撞引起的灰沉积现象, 是燃煤电站锅炉中灰沉积层形成的主要途径之一^[6]. 因此, 深入研究飞灰颗粒的撞击动力学特性, 对于揭示积灰层的形成机理、预测其发展趋势以及开发减少灰沉积的策略具有至关重要的作用.

在早期的研究中, Tabakoff 等^[7] 利用激光多普勒测速仪 (LDV) 系统观察了煤灰颗粒撞击不锈钢材质壁面的反弹特性. 研究发现, 煤灰颗粒的恢复系数是随入射角度的增加而降低的. Dong 等^[8] 基于高速摄影法研究了温度对 SiO_2 颗粒法向撞击壁面的动力学参数的影响. 结果表明, 随着温度从 20 °C 升高到 190 °C, SiO_2 颗粒的临界反弹速度由 0.5 m/s 增加到 0.8 m/s. Xie 等^[9] 基于高速摄影法在常温常压条件下考察了煤灰颗粒撞击液面后的运动行为: 下沉、反弹和振荡. 可见, 相比颗粒撞击固体表面, 其运动行为显得更为复杂. Wilson 等^[10] 和 Cen 等^[11]

的研究表明, 非球形颗粒的反弹特性与球形颗粒的反弹特性存在明显的差异性. Li 等^[12] 的研究表明, 颗粒的法向恢复系数随着表面粗糙度的增加而减小, 而通过理论模型计算显示黏附力具有相反的变化趋势. Yu 等^[13] 采用弹塑性理论模型来模拟微米颗粒撞击粗糙表面的过程也得出了相似的结论. Reagle 等^[14] 采用粒子追踪速度测量法 (PTV) 测量了高速气流作用下颗粒的法向恢复系数, 同时考虑了颗粒运动到撞击平台附近时会受到气流曳力的影响, 结合 CFD 方法对颗粒的撞击速度进行修正. 由此可见, 影响飞灰颗粒的撞击动力学特性的因素错综复杂, 主要包括颗粒的入射速度和撞击角度, 颗粒的温度, 颗粒的尺寸及其形貌以及撞击壁面的表面条件等因素.

进一步分析, 可以获悉构建满足真实条件的微米级别的飞灰颗粒撞击壁面动力学行为, 需要应用到先进的测量技术. 目前, 3 种主要的测量技术分别为粒子图像测速 (PIV)、PTV 和粒子阴影测速 (PSV) 各具特色, 适用于不同的研究场景. PIV 技术因其其在流场测量中的广泛应用和成熟的设备而广为人知^[15-16]. PTV 技术则更适用于颗粒浓度较低的环境^[17-18]. 而 PSV 技术, 以其成本效益高和使用 LED 光源的优势^[19-20], 通过捕捉颗粒的阴影来追踪其运动轨迹. 这 3 种技术均能用于测量颗粒直径及其撞击动力学参数. 然而, 在实际应用中, 实现这些参数的快速且高精度测量仍然面临着不少问题和挑战.

综合前人的研究结果发现^[4,11,14], 颗粒的撞击动力学参数如法向恢复系数往往具有随机性特征, 即测量结果具有明显的分散性. 初步分析, 除了测量参数的影响因素复杂外, 很难保证实验条件的完全一致性, 增加了测量误差, 另外一个主要的原因可能是颗粒直径的差异性造成. 这是因为颗粒的直径对撞击动力学参数测量具有显著的影响^[9,21], 然而在高速摄影条件下, 精确测量微米级颗粒的直径存在挑战. 主要问题在于, 高速摄影条件下颗粒的图像分辨率通常较低, 且颗粒所占据的像素数量较少, 加之环境因素的干扰, 这些因素共同导致测量误差较大^[22-23]. 但目前关于在高速摄影法下如何准确测量颗粒直径的研究还相对缺乏. 所以我们借鉴了在相关领域, 关于采用数字图像处理技术来测量颗粒直径及其运动信息方面的研究经验. 在利用数字图像技术测量颗粒直径时, 常会遇到一个现象: 尽管颗粒在现实世界中呈现为球形, 但在数字图像处理中, 它们的形状往往不再是完美的圆形. 这种形貌特征的偏差在非球形颗粒中尤为显著. 为了应对这一挑战, 实际测量过程中通常会采用等效粒径的概念来估算颗粒的粒径分布. 然而, 这种方法可能会导致单个颗粒粒径的测量结果不够精确^[24]. 许潇等^[25]提出了一种基于圆形拟合辅助识别算法对 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的球形颗粒的直径进行自动测量, 但这些测试颗粒图片是经由电子显微镜 (TEM 和 SEM 等) 或光学显微镜成像后获得图片, 颗粒图像的分辨率较高, 干扰因素也相对较少. 任世龙等^[26]采用远心照相多相测量仪对搅拌槽中几种不同形貌的颗粒群运动进行拍照测量, 研究发现, 在对颗粒图像进行处理时, 先采用阈值分割方法将图像中的颗粒与背景分离, 随后应用边缘检测算法, 可以获得最小的测量误差. 张琼昌等^[27]采用结合激光器和工业 CCD 开发一套在线测量煤粉颗粒速度和粒径的装置和方法, 主要是通过图像技术处理颗粒的运动轨迹图来计算颗粒的直径, 即颗粒的直径 = 轨迹的面积/轨迹的长度. 研究表明, 这种测量方式的准确性依赖于颗粒的直径大小. 张翔云等^[28]针对双相机成像系统所获取的颗粒离焦图像, 提出了一种卷积神经网络 (CNN) 的颗粒粒径与位置同步预测模型. 应用该模型测量了循环样品池内流动的粒径为 $120\text{ }\mu\text{m}$ 的标准颗粒, 测量的颗粒直径的相对误差范围为 $\pm 8\%$. 此外, 考虑到研究参数的测量误差可能会较大, 实验研究中通常需要采集大量单个颗粒撞击壁面的数据, 以期发现某种趋势. 但是这一

过程依赖于一系列复杂的图像处理算法. 因此, 如何通过实验手段快速且有效获取颗粒撞击动力学数据, 并能高效处理大量的颗粒图像, 也成为了研究中的关键挑战之一.

针对这些问题和挑战, 本研究采用 PSV 技术, 自主研发了一套高温条件下的颗粒撞击试验台, 专注于研究单颗粒撞击动力学特性. 同时, 利用 MATLAB 软件, 开发了一整套图像处理程序来高效处理颗粒的图像, 并提出了一种结合亚像素插值和最大内切圆算法的方法, 以实现颗粒直径的高精度测量. 以标准的微米级玻璃微珠颗粒为研究对象, 进行了测试和验证. 本研究的成果不仅加深了对单颗粒撞击动力学的理解, 而且为复杂多颗粒系统的进一步研究提供了有力的工具.

1 实验部分

1.1 试验台的介绍

本文自主搭建了高温条件下颗粒撞击壁面的动力学测试试验平台, 其示意图如图 1 所示. 本实验系统主要由五大系统组成: (1) 单颗粒给料系统; (2) 加热系统; (3) 配气系统; (4) 撞击平台系统; (5) 烟尘处理系统.

其中, 单颗粒给料系统的操作过程如下: 首先, 将预定量的颗粒与水混合, 形成一种均匀的混合物. 接着, 在磁力搅拌器的辅助下, 混合物被转化为稳定的悬浊液, 然后通过微量蠕动泵精确控制输出量, 以确保只有少量悬浊液被输送到给料管. 在高温环境

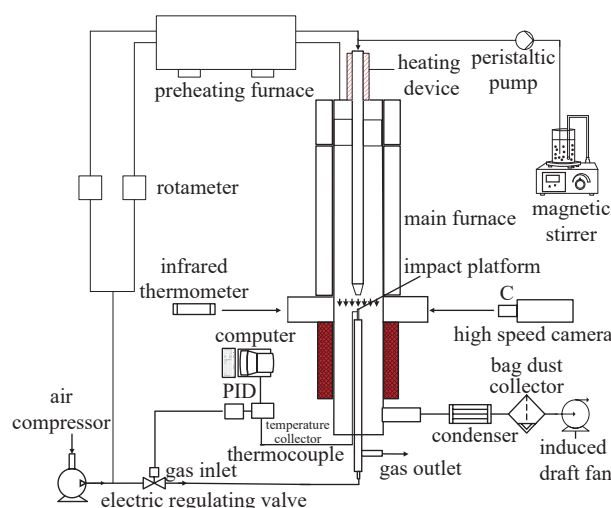


图 1 高温颗粒撞击动力学测试试验台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the high-temperature impact dynamics test rig for the particles

下, 悬浊液中的水分会迅速蒸发, 而颗粒则在气体的携带作用下, 通过喷嘴以一定的速度喷射出来, 并与撞击平台发生碰撞. 这种给料方式的优势在于其对悬浊液中颗粒浓度的精确控制能力. 通过调整携带气体的流量和给水量, 不仅可以精确控制颗粒的释放速度, 还能确保颗粒以单颗粒的形式进行喷射, 从而便于单颗粒撞击动力学的研究.

该试验台的加热系统主要有三部分. (1) 用于蒸发给料系统携带水的加热装置: 这一装置专门用于蒸发给料系统中携带的水分, 4 根电热管通过玻璃纤维带牢固地固定在顶部给料管上, 并与独立的温度控制器相连. 控制器的温度设置范围精确在 $295^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 之间, 确保水分在进入主体炉之前被及时蒸发, 从而保证了颗粒的干燥状态; (2) 用于预热空气的预热炉: 预热炉的作用是为进入主体炉的保护气和携带气提供预热, 确保气体在与悬浊液混合后, 能够更有效地促进其水分的蒸发, 为颗粒的喷射提供必要的热能; (3) 提供主要实验环境的主体炉: 主体炉提供了主要的热态条件, 内置的给料管在主体炉的加热作用下, 显著提升了喷嘴出口的烟气温度和颗粒温度, 为颗粒撞击实验创造了理想的热力学环境. 石英管长达 1890 mm , 内径 50 mm , 确保了气体流动的顺畅和均匀加热. 主体炉上部为加热区, 由智能温控系统控制, 包含两个独立的加热段, 每个加热段都配备了功率为 1.5 kW 的镍铬合金电炉丝, 能够达到高达 1200°C 的温度. 主体炉加热区的下部为非加热区, 专门用于研究颗粒撞击壁面的过程. 该区域四周前后与左右安装了 4 个视窗, 提供了全方位的观察角度. 前后视窗采用石英玻璃材料, 一端用于高速数字摄像机捕捉颗粒撞击壁面的过程, 另一端则用于提供拍摄所需的背景光源. 左右视窗则作为备用观察窗口.

撞击平台系统由撞击平台和其配套的控温系统组成. 撞击平台设计为一个直径 2 mm 、高度 33 mm 的圆柱体, 其底部牢固地嵌入一个厚度为 5 mm 的圆饼中央的凹槽内. 为了确保撞击平台在长期高温环境下的稳定性, 减少氧化和腐蚀, 撞击平台采用耐腐蚀的 316L 不锈钢材质. 撞击平台表面的光滑程度是通过美国 Filmetrics 公司生产的 Profilm 三维光学轮廓仪在室温下进行测量的. 测量结果显示, 撞击平台表面的粗糙度轮廓 (Ra) 的算术平均值仅为 $0.03\text{ }\mu\text{m}$, 这一数值远低于工件镜面粗糙度的标准

($<0.8\text{ }\mu\text{m}$), 确保了试样表面的微观平整性. 其 3D 轮廓的测量结果如图 2 所示.

颗粒撞击平台温度的控制是由 PID 温度控制器和电动调节阀共同实现的, 其原理图如图 3 所示. 基本原理: PID 温度控制器负责设定并监控撞击平台壁面的温度. 一旦检测到温度超出预设范围, 系统会自动响应, 如果温度过高, 则增加冷却介质的流量; 如果温度过低, 则减少流量.

实验台气路总共有两路. 其中一路作为携带气将物料送入炉膛给料管内, 另一路作为保护气进入炉膛. 流经主体炉出口的烟尘首先会经过一个高频焊翅片管冷凝器进行冷却, 冷凝器方案设计如图 3 所示. 然后, 再经过布袋除尘器除去烟尘中的颗粒, 最后由小型引风机排出到实验室烟尘管道中. 其他实验细节可以参考文献 [29].

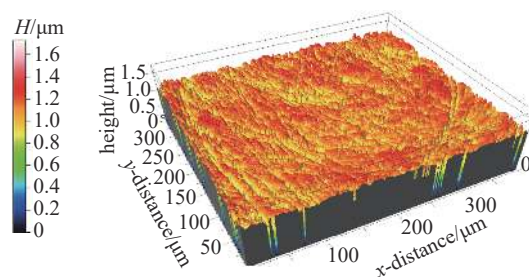


图 2 基于 Profilm 3D 撞击平台的表面粗糙度的测量结果

Fig. 2 Measurement results of the surface roughness of the impact platform based on the Profilm 3D

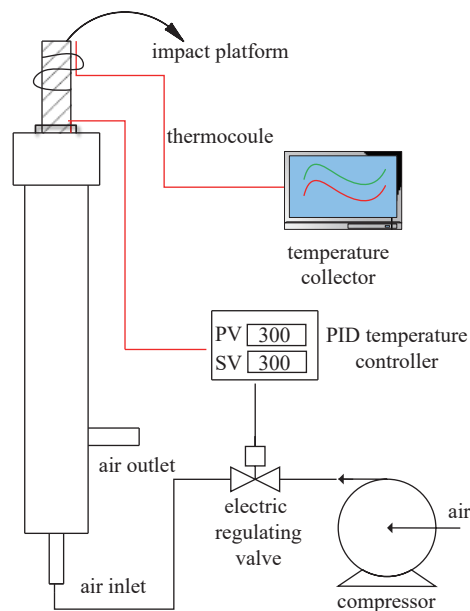


图 3 颗粒撞击平台的控温系统

Fig. 3 Temperature control system of the impact platform for the particles

1.2 高速 PSV 图像采集系统

该试验台采用了先进的 PSV 技术来追踪颗粒的运动轨迹. 这一技术结合了高速数字摄像机, 构成了一个高效的高速 PSV 图像采集系统. 该系统的原理图如图 4 所示.

从图 4 中可知, 装配有微距镜头的高速摄像机通过观察视窗, 精确记录颗粒撞击壁面的过程, 而氙气灯则作为背景光源, 拍摄角度与光源维持同一水平线垂直于颗粒入射方向, 最后将颗粒以阴影的形式清晰成像.

高速视频摄像机是日本奥林巴斯公司 (Olympus) 生产的 i-speed 716 型, 并且配置了日本图丽公司 (Tokina) 生产的 AT-X M100 PRO D 100 mm F2.8 MACRO 型微距镜头. 背景光源则是东莞市明倬光电科技有限公司提供的 XD-300 型内窥镜氙灯冷光源.

基于所搭建的系统, 可以捕捉到单颗粒撞击壁面的整个过程. 这里, 列举一组单个颗粒在撞击阶段和反弹阶段的原始图片, 如图 5 所示.

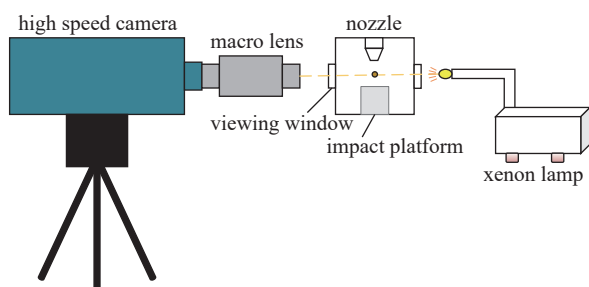
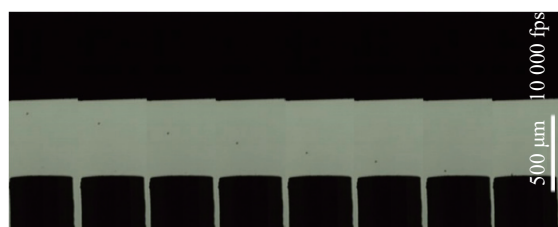


图 4 高速 PSV 图像采集系统的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the high-speed PSV image acquisition system



(a) 撞击阶段
(a) Impact stage



(b) 反弹阶段
(b) Rebound stage

图 5 单个颗粒撞击壁面过程中的原始图像

Fig. 5 Original image of a single particle impacting on a wall

1.3 实验材料

在本实验中, 选用的颗粒材料是微米级玻璃微珠标准颗粒, 这些颗粒由上海市计量测试技术研究院生产. 所采用的颗粒型号为 SB040107, 平均粒径为 $56.9 \pm 2.2 \mu\text{m}$, 由特种硅酸盐材料制成, 确保了其性能的稳定性和可靠性. 利用扫描电子显微镜对其进行了放大观察, 观察结果如图 6 所示. 从图中可以明显看出, 玻璃颗粒展现出极高的球形度, 表面光滑细腻, 没有任何破损或缺陷.

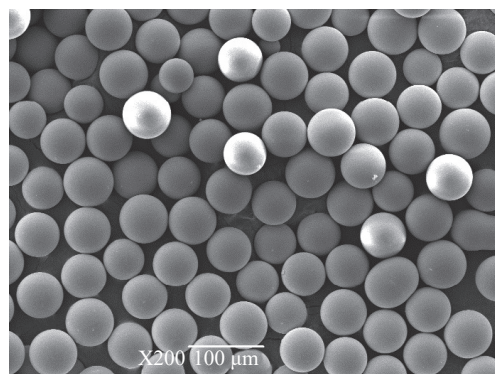


图 6 微米级玻璃微珠颗粒的 SEM 图

Fig. 6 SEM image of the micron-sized glass microspheres

1.4 主要的测量参数

颗粒撞击壁面过程中的运动轨迹示意图如图 7 所示. 从图中可以看出, 颗粒以一定的速度撞向壁面, 然后发生反弹. 本实验中, 需要测量的参数是颗粒的直径及其撞击动力学参数, 如颗粒的撞击速度 (V_i), 撞击角度 (α), 反弹速度 (V_r), 反弹角度 (β) 以及法向恢复系数 (e_n).

在颗粒撞击壁面的过程中, 由于光线照射的影响, 颗粒产生的阴影会有明显的变化. 为了准确测量颗粒的直径, 针对每次撞击事件, 记录颗粒在不同位置的直径测量值, 并计算这些测量值的平均值代表

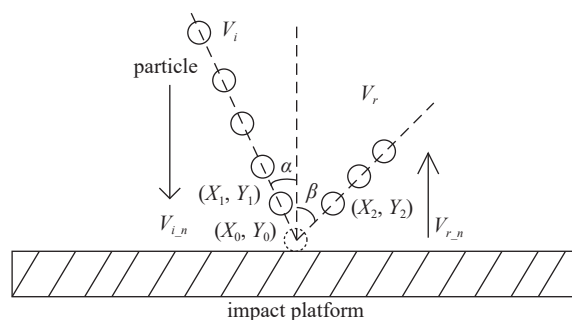


图 7 颗粒在撞击壁面过程中的运动轨迹示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the particle motion trajectory during its impacting on the wall

颗粒的实际直径, 即

$$\bar{D} = \frac{D_1 + D_2 + \cdots + D_n}{n} \quad (1)$$

式中, $\bar{D}$ 和 D_i 分别表示被测颗粒的平均直径和第 i 张图片中被测颗粒的直径, μm ; n 表示颗粒图片的数量.

颗粒的运动速度是测量连续两帧图像中颗粒的质心坐标, 并结合两帧之间的时间差, 计算出颗粒在两点间的平均运动速度. 其数学表达如下

$$\bar{V} = \frac{|S_2 - S_1|}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, $\bar{V}$ 表示颗粒在两点间平均速度, m/s ; S_1 和 S_2 分别表示颗粒的运动过程中两个连续位移点; Δt 表示两个位移点经过的时间, 即两帧之间的时间差.

通过上述表达式, 可以计算出颗粒的法向撞击速度和法向反弹速度. 进一步, 计算颗粒的法向恢复系数, 其数学表达式如下

$$e_n = \frac{|V_{r_n}|}{|V_{i_n}|} \quad (3)$$

其中, e_n 表示法向恢复系数; V_{i_n} 和 V_{r_n} 分别为颗粒的法向入射速度和法向反弹速度, m/s .

如图 7 所示, 假设颗粒撞击到壁面时的质心坐标为 (X_0, Y_0) , 撞击到壁面时的前一点和后一点的质心坐标点分别 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) , 则颗粒的撞击角度和反弹角度的计算表达式为

$$\tan\alpha = \frac{|X_1 - X_0|}{|Y_1 - Y_0|} \quad (4)$$

$$\tan\beta = \frac{|X_2 - X_0|}{|Y_2 - Y_0|} \quad (5)$$

1.5 实验条件

本研究的实验条件如表 1 所示.

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Items	Value
main furnace temperature/ $^{\circ}\text{C}$	900
preheater temperature/ $^{\circ}\text{C}$	500
particle temperature/ $^{\circ}\text{C}$	550
particle velocity/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4 ~ 20
impact platform temperature/ $^{\circ}\text{C}$	300

2 颗粒图像处理流程

基于高速摄影技术, 我们获得了大量记录颗粒运动的视频文件. 为方便后续分析, 这些视频首先被转换为独立的文件夹, 每个文件夹代表一个颗粒撞击壁面的图片集. 接着, 我们对每个文件夹中的图像序列进行处理, 以提取颗粒撞击壁面的动力学参数. 本文基于 MATLAB 软件平台, 开发了相应的程序对颗粒图像进行一系列处理. 每张图片处理的流程如图 8 所示.

具体过程如下: 首先, 加载单张图像, 然后识别并截取颗粒撞击壁面的特定区域. 若该区域中确实存在颗粒, 我们将进一步根据颗粒位置, 截取一个更小的窗口, 这个窗口被称为颗粒的捕捉窗口. 接下来, 对捕捉窗口进行亚像素插值处理, 以提高图像分辨率. 同时, 利用图像处理技术, 进一步识别颗粒的直径和质心坐标. 最后经过计算, 获得颗粒的法向撞击速度、法向反弹速度和法向恢复系数等撞击动力学参数.

在颗粒直径的测量方面, 本文考虑到标准颗粒为球形, 其阴影也应该是标准的圆形, 所以本文提出了一种新颖的颗粒直径测量方法, 即首先对捕捉窗

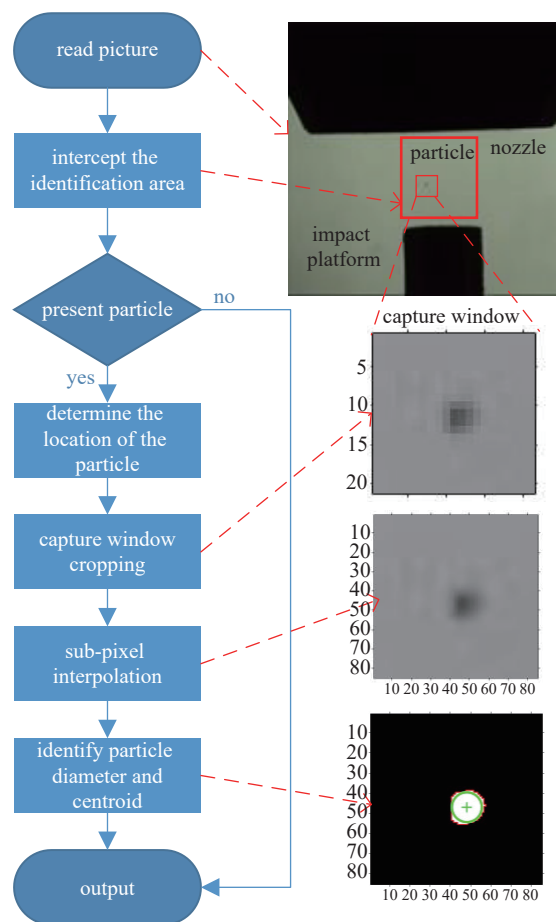


图 8 颗粒图像处理的流程图

Fig. 8 Flowchart of the particle image processing

口进行亚像素插值处理, 然后计算颗粒二值化图像中所占的区域的最大内切圆的直径, 即为颗粒的直径, 如已经二值化的捕捉窗口中绿色圆所示。

在颗粒图像处理流程中, 几个关键步骤至关重要: 图像阈值分割算法的选择, 亚像素插值方法的应用以及捕捉窗口的类型和大小的选择。下面, 我们将深入探讨这关键步骤对测量结果的影响。

3 结果与讨论

3.1 图像处理中主要参数的影响

3.1.1 图像阈值分割算法

关于图像阈值分割算法有很多种, 这些方法各有优缺点, 适应场景也有所不同。根据本研究的场景特点, 选择了 3 种较为适宜的阈值分割算法进行对比和分析。这 3 种算法分别为大津法^[30](Otsu)、迭代法^[31](IsoData) 和模式间阈值法^[32](Th_intermodes)。其中, Otsu 法是一种自适应阈值分割方法, 它通过最小化类内方差来确定最佳阈值。该方法假设图像的像素值分布是双峰的, 即图像的直方图有两个明显的峰值, 分别代表前景和背景。IsoData 是一种基于聚类的自适应阈值分割方法, 它通过迭代方式不断调整阈值以适应图像中的变化。Th_intermodes 是一种基于图像直方图的统计特性来确定阈值的方法。它通过寻找直方图中的谷值 (即模式之间的最低点) 来确定分割的阈值。

本文分别采用这 3 种阈值分割算法对图 5 中标准颗粒撞击壁面中的第 5 张图片进行了二值化处理, 其结果如图 9 所示。从图中可以看出, 3 种阈值分割算法下颗粒所占的像素仅占若干个像素, 而且形态不一, 难以测量颗粒的直径。

为了深入比较 3 种阈值分割算法对颗粒图像分割效果的影响, 本文进一步提取了颗粒在撞击过程中所有颗粒图像的一些特征参数, 如颗粒质心、周长、面积和圆形度等, 结果如图 10 所示。

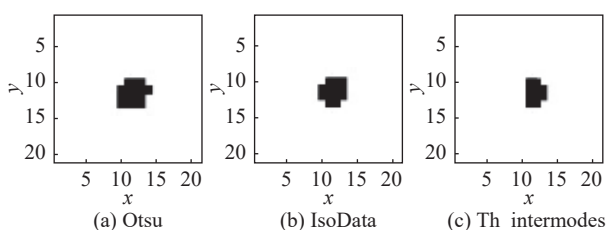


图 9 3 种阈值分割算法下颗粒的二值化图像

Fig. 9 Binary images of the particle under the three threshold segmentation algorithms

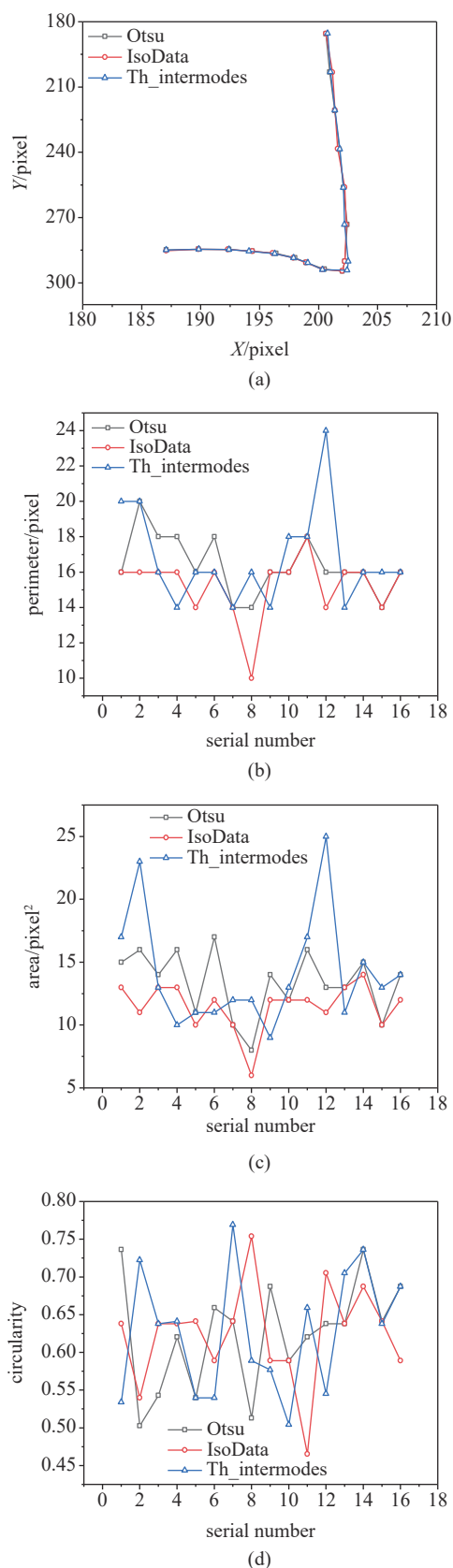


图 10 3 种阈值算法下颗粒在撞击过程中特征参数的测量结果

Fig. 10 Measurement results of the particle characteristic parameters during impact process under the three threshold algorithms

通过捕捉颗粒的质心获得颗粒的运动轨迹图,如图 10(a) 所示. 从图中可以看出颗粒的运动轨迹仅有轻微差异性. 进一步比较了 3 种阈值分割算法下颗粒的面积, 周长和圆形度的变化情况, 如图 10 所示. 从图中可以看出, 在颗粒的撞击过程中颗粒的面积, 以所占有的像素值表示, 在 3 种阈值算法下均有所波动. 而且发现在 Th_intermodes 下算法下波动相对较大, 且出现了两个明显的峰值. 在颗粒的周长方面, 相似的现象同样出现了, 在 IsoData 和 Th_intermodes 算法下计算的颗粒的周长变化相对较大. 在圆形度方面, 3 种算法下结果均呈现较大的波动, 且圆形度均在 0.45 ~ 0.78 之间波动.

针对已经二值化的图像, 通常采用等效直径法来估算颗粒的粒径^[8]. 具体的计算表达式为

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} L_0$$

(6)

其中, d 表示等效直径, μm ; A 为颗粒所占的像素面积, pixel; L_0 为单位像素所代表的值, $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

基于这种等效直径法, 分别采用 3 种阈值分割算法来计算颗粒的直径及其撞击动力学参数, 结果列举在表 2 中. 从表中可以获悉, 3 种算法下测量的颗粒直径有较大的区别, 而且都明显大于标准颗粒的平均粒径.

这是因为等效直径法是建立在颗粒的形状接近圆形的假设上. 如果颗粒的形状与圆形相差较大, 这种方法的准确性可能会受到影响. 而撞击动力学参数中, 除了反弹角度差别较大外, 其他撞击动力学值的差异性并不显著. 这是因为反弹角度对颗粒的位置坐标的变化更加敏感一些, 而且越是靠近撞击

面, 不同阈值算法下测量的颗粒质心坐标的差异性会愈加明显.

从上述的测量结果来看, 在高速摄像条件下, 由于高速摄像机的分辨率限制, 通过阈值分割算法获得的颗粒二值化图像, 其形态变化迥异, 并且圆形度普遍不足. 这是导致采用传统的等效直径法测量颗粒在撞击过程中的直径时, 结果波动较大, 且与标准颗粒的直径的平均值存在显著偏差的主要原因.

3.1.2 亚像素插值方法

在处理图像测量和分析时, 亚像素插值技术的应用可以显著提升测量的精度. 本文通过对捕捉窗口采用亚像素插值处理, 成功地获取了具有亚像素级精度的测量结果. 在本研究中, 我们选取了 3 种典型的阈值分割算法, 采用 3 倍的亚像素插值倍数以及 spline 插值方法, 对特定颗粒进行了识别, 最终得到的二值化图像如图 11 所示. 从图中可以观察到, 在亚像素插值条件下, 颗粒所占的像素数量呈现倍数级增长. 此外, 颗粒图像整体的圆形度显著提高, 并且颗粒的边缘呈现出锯齿状, 这是由于插值过程中图片灰度值的局部变化造成的.

同样, 我们也关注了在亚像素插值条件下, 颗粒在撞击过程中特征参数的变化情况, 测量结果如图 12 所示. 从图中可以观察到, 3 种阈值分割算法下, 颗粒的质心坐标仅有细微差异, 但在周长、面积和圆形度等参数上却表现出显著的差别. 值得注意的是, 尽管采用了不同的阈值分割方法, 这些参数的变化趋势却显示出了一致性. 这种一致性可以归因于亚像素处理技术, 它使得颗粒图像的边缘更加平滑, 从而减少了由不同阈值分割算法引起的图像识别差异. 特别是在第 8 点, 颗粒位于壁面时, 其识别出的直径明显小于那些位于壁面上方的颗粒. 这是因为颗粒与壁面接触, 难以将两者区分开, 导致有较大的测量误差. 而位于两侧的颗粒的特征参数值以这一点为中心, 表现出明显的对称分布.

表 2 3 种阈值分割算法颗粒撞击动力学参数的测量结果

Table 2 Measurement results of the particle impact dynamics parameters under three threshold segmentation algorithms

Items	Threshold segmentation algorithm		
	Otsu	IsoData	Th_intermodes
$\bar{D}/\mu\text{m}$	73.60 ± 2.0	68.53 ± 2.56	69.45 ± 3.12
$V_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5.92	5.88	5.90
$\alpha/(^{\circ})$	0.72	0.46	1.08
$V_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.10	1.12	1.12
$\beta/(^{\circ})$	26.14	28.08	36.46
e_n	0.19	0.19	0.19

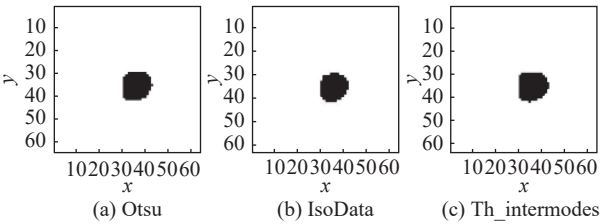


图 11 亚像素插值条件下 3 种阈值分割算法下颗粒的二值化图像

Fig. 11 Binary images of the particle under the three threshold segmentation algorithms with the sub-pixel interpolation condition

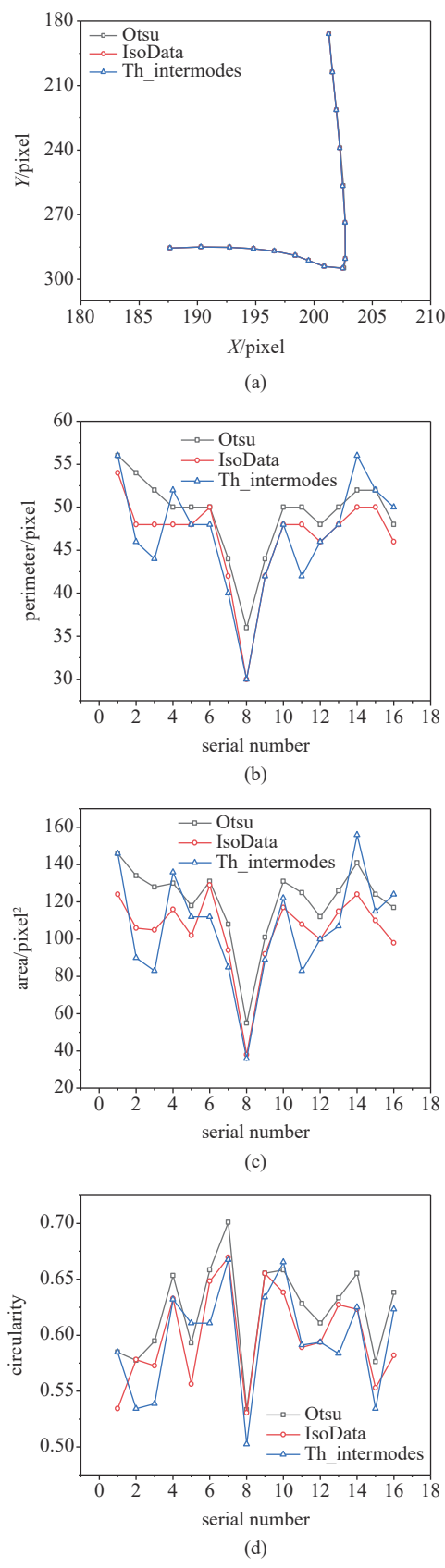


图 12 基于亚像素插值方法 3 种阈值分割算法下颗粒特征参数的测量结果

Fig. 12 Measurement results of the characteristic parameters of the particle under the three threshold segmentation algorithms with the sub-pixel interpolation method

这一现象表明, 在颗粒撞击壁面的过程中颗粒的特征参数识别在一定程度上与颗粒所处的位置有关系.

基于亚像素插值方法, 颗粒的直径以及撞击动力学参数的测量结果, 如表 3 所示. 从表中可以看出, 与传统的等效直径测量方法相比, 采用新开发的颗粒直径测量技术所得到的结果, 在准确性上有了显著的提升, 更贴近颗粒的平均直径. 而且 3 种阈值分割算法下, 颗粒的撞击动力学参数仅有较小的差别. Otsu, IsoData 和 Th_intermodes 这 3 种阈值分割算法下所测量的平均直径分别为 59.35 ± 1.72 , 53.65 ± 1.82 和 $52.03 \pm 3.13 \mu\text{m}$. 由此可见, Otsu 阈值分割算法下相比其他两种算法在本实验条件下具有更高可信度.

然而, 值得注意的是, 实际的测量效果与所选用的亚像素插值倍数和插值方法紧密相关. 因此, 本文

表 3 基于亚像素插值方法 3 种阈值分割算法下撞击动力学参数的测量结果

Items	Threshold segmentation algorithm		
	Otsu	IsoData	Th_intermodes
$\bar{D}/\mu\text{m}$	59.35 ± 1.72	53.65 ± 1.82	52.03 ± 3.13
$V_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5.88	5.87	5.86
$\alpha/(^{\circ})$	0.16	0.10	0.46
$V_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.01	1.01	1.01
$\beta/(^{\circ})$	32.09	32.81	34.19
e_n	0.17	0.17	0.17

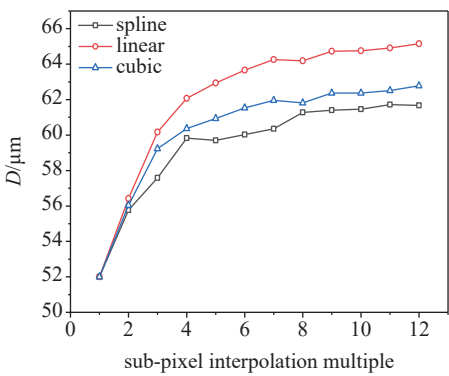


图 13 亚像素插值方法和倍数对直径的测量结果的影响

Fig. 13 The impact of the sub-pixel interpolation methods and multiples on the measurement results of diameters

基于 Otsu 阈值分割算法,考察了亚像素的插值方法以及其倍数对颗粒直径的影响,结果如图 13 所示.当亚像素插值倍数超过 2 时,3 种插值方式所计算的颗粒直径大小顺序为:线性 (linear) > 立方 (cubic) 插值 > 样条 (spline). 同时发现, spline 插值方式,测量的颗粒直径更接近于颗粒的平均粒径. 随着亚像素倍数的进一步增加,3 种亚像素插值方法下颗粒直径的测量逐渐趋于稳定. 这是因为随着亚像素倍数的增加,颗粒边缘的平滑度得到了显著提升,颗粒的形貌也从不规则逐渐趋向于近圆形或近椭圆形形状. 这种变化趋势表明, 尽管增加亚像素插值倍数有助于改善颗粒图像的轮廓清晰度和形状规整性. 然而,其最大内切圆的直径也是关键的颗粒尺寸参数,并没有因为亚像素倍数的持续增加而发生

显著变化.

同时,基于 Otsu 阈值分割算法和 spline 插值方式,进一步考察了插值倍数对颗粒撞击动力学参数的影响,测量结果如表 4 所示. 从表中可以看出,随着插值倍数的增加,颗粒的平均直径呈逐渐增加的趋势. 相比无亚像素插值情况,测量的颗粒直径及其撞击动力学参数存在显著差异,但亚像素插值条件下,插值倍数的增加对颗粒的撞击动力学参数的影响相对较小. 由此可见,亚像素技术可以弥补硬件的不足,在软件上提高颗粒图像的分辨率和测量精度,但在一定程度上对颗粒图像进行了像素重构,由此可能会带来更多的误差,尤其是在颗粒直径的测量方面,所以亚像素的插值方式和插值倍数需要选择合适的值.

表 4 亚像素插值倍数对颗粒撞击动力学参数的影响

Table 4 The effect of the sub-pixel interpolation multiples on the impact dynamics parameters of the particle

Items	Subpixel difference multiple					
	1	3	5	7	9	11
$\bar{D}/\mu\text{m}$	73.60 ± 2.0	59.35 ± 1.72	62.16 ± 2.08	62.87 ± 1.84	63.63 ± 1.55	63.21 ± 1.72
$V_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	5.92	5.88	5.90	5.90	5.90	5.90
$\alpha/(^{\circ})$	1.10	1.00	1.00	1.01	1.02	1.02
$V_r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.72	0.16	0.18	0.25	0.19	0.20
$\beta/(^{\circ})$	26.13	32.09	33.58	33.68	33.71	33.76
e_n	0.19	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17

3.1.3 捕捉窗口

在颗粒图像处理流程中,可以发现,分别对颗粒的图片进行了二次剪切,第一次剪切的图片是用于确定测量区域,而第二次剪切的图片,是以颗粒为中心,剪切出一定的区域,用于测量颗粒的质心以及其粒径等信息,即为颗粒的捕捉窗口. 捕捉窗口的大小和形状可能会影响到测量结果,所以本文对其进行了重点考察. 在颗粒撞击壁面的过程中,颗粒的位置在不断变化,当颗粒所处的位置离边界较远的时候,采用正方形的捕捉窗口,而且颗粒基本处于窗口的正中心,简称中心窗口,这样颗粒图像的像素信息具有明显的对称性,有利于获得较为准确的测量结果,而当颗粒比较接近边界时,捕捉窗口依然采用正方形,但是受固定边界条件的限制,颗粒不再能处于窗口的正中心,而是发生了偏移,该窗口简称为偏心窗

口. 关于捕捉窗口的选择的示意图如图 14 所示.

进一步,本文考察了窗口的尺寸大小对其测量结果的影响,结果如表 5 所示. 需要说明的是,本结果是基于 Otsu 算法以及亚像素放大倍数为 3 以及插值方式为 spline 方式获得的.

从表中可以看出窗口的尺寸的变化对颗粒直径

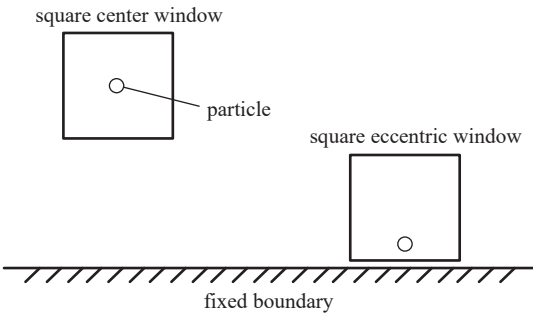


图 14 关于捕捉窗口的示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the capture window

表 5 窗口的变化对颗粒撞击动力学参数测量结果的影响

Table 5 The effect of the window variation on the measurement results of the impact dynamics parameters of the particle

Items	Window size			
	11 × 11	21 × 21	31 × 31	41 × 41
$\bar{D}/\mu\text{m}$	56.83 ± 0.90	59.35 ± 1.72	60.18 ± 3.07	60.62 ± 3.28
$V_i/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5.90	5.88	5.88	5.87
$\alpha/(^{\circ})$	0.07	0.16	0.18	0.18
$V_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.00	1.01	1.02	1.00
$\beta/(^{\circ})$	32.38	32.09	34.31	32.88
e_n	0.17	0.17	0.17	0.17

的测量结果的影响较为明显,但对颗粒的撞击动力学参数的测量影响并不显著.相比于小窗口,稍微大一点的窗口其测量值的稳定性更好一些,但是太大的捕捉窗口,会增加干扰因素,给测量带来不必要不稳定因素.所以,捕捉窗口的类型及其大小的选择需要根据颗粒的大小以及所处的环境等因素综合评定.本实验条件下,对于占 3 个像素左右的颗粒,推荐采用 21 × 21 的捕捉窗口为宜.

3.2 主要的测量结果

3.2.1 颗粒的直径

为了验证本试验条件下颗粒直径测量的可靠性,本文利用 ImageJ 软件,并采用 IsoData 阈值分割算法对扫描电子显微镜 (SEM) 所拍摄的 100 个标准颗粒的直径进行了测量.两种测量条件下获得的颗粒直径的分布情况如图 15 所示.从图中可以观察到,在 SEM 条件下,测量的颗粒直径分布在 50 ~ 75 μm 之间,而且颗粒直径主要集中在 55 ~ 65 μm 的范围内,占比高达 79.38%.具体来说,55 ~ 60 μm 和 60 ~ 65 μm 的颗粒分别占据了 31.96% 和 47.42% 的份额,平均粒径为 60.59 ± 3.96 μm.其他的颗粒直径所占的份额均低于 10%.SEM 的测量结果揭示了一个事实:即使是标准颗粒,在尺寸上也存在一定的差异性.相比之下,在高速摄影条件下,测量的颗粒直径分布在 45 ~ 75 μm 之间,颗粒直径的也主要集中在 55 ~ 65 μm 之间,占比高达 66.27%.其中,55 ~ 60 μm 和 60 ~ 65 μm 的颗粒分别占据了 31.33% 和 34.94% 的份额.其他的颗粒直径所占的份额均低于 20%.平均粒径为 61.13 ± 5.86 μm.

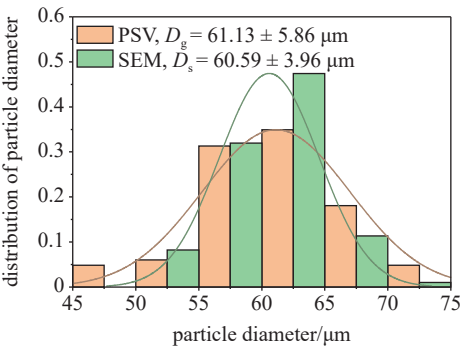


图 15 高速摄影和 SEM 条件下标准颗粒直径的分布图

Fig. 15 Diameter distribution of the standard particles under the high-speed photography and SEM

两种测量条件下的颗粒直径略有差异性,主要表现在 60 ~ 65 μm 直径范围内,通过高速摄影技术测量得到的颗粒直径所占的比例,明显低于使用 SEM 测量的结果.这种差异可能源于测量环境的不同.在高速摄影条件下,颗粒所处的环境相对更为复杂,且动态测量的难度也高于 SEM 的静态测量.此外,颗粒在测量过程中可能会粘附在管壁上,造成样品的损失.尽管如此,SEM 和高速摄影条件下的颗粒直径测量结果在颗粒直径的分布上仍然非常接近.如果能够进一步提升实验条件并扩大测量样本,我们有理由期待获得更为精确的测量结果.

3.2.2 颗粒的运动速度

图 16 列举了 3 种粒径的颗粒在接近相同的撞击速度 (约 5.4 m/s) 下的运动轨迹图.从图中可以看出,在接近相同的撞击速度下,颗粒 A (直径为 55.16 ± 2.09 μm) 和颗粒 C (直径为 66.78 ± 1.56 μm 颗粒) 与壁面发生碰撞后,其反弹特性较为相似,而颗粒 B 的反弹特性与另外两种颗粒的反弹特性差别较大,撞击后其几乎沿着撞击面发生移动.3 种颗粒的反弹

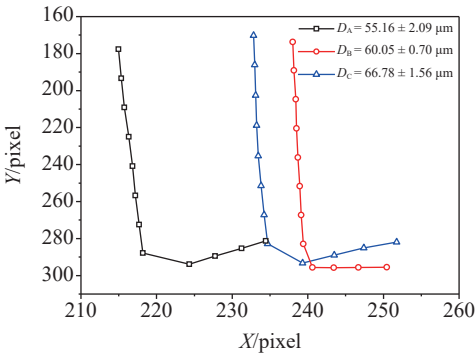


图 16 3 种颗粒在不同撞击速度下的运动轨迹图

Fig. 16 The trajectories of the three types of particles under the different impact velocities

特性的差异性在一定程度上反映出了颗粒反弹的随机性. 这种随机性可能源于颗粒组分、直径、撞击点位置以及运动状态的多样性和差异性.

为了进一步了解颗粒撞击壁面过程中的运动情况, 本文根据颗粒的轨迹图, 计算了 3 种颗粒在入射和反弹阶段的平均法向速度情况, 如图 17 所示. 从图中可以观察到, 对于 3 种尺度的颗粒, 在入射阶段的初始阶段, 颗粒从喷嘴出来, 其法向速度有所增加, 但越接近撞击壁面时, 其法向速度会有较大的衰减, 当颗粒发生反弹后, 颗粒的法向速度会明显下降, 尤其对颗粒 A 和颗粒 C.

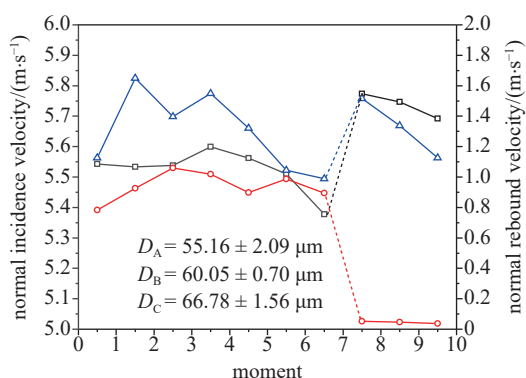


图 17 3 种颗粒在入射和反弹阶段的平均法向速度变化

Fig. 17 The average normal velocities of three kinds of the particles in the incident and rebound stages

由此可见, 颗粒的撞击速度和反弹速度均会受到气流的影响, 呈现出减速趋势. 而且, 在实际测量过程中, 由于颗粒撞击壁面时的位置难以捕捉, 所以我们通常选择在壁面上方最靠近撞击点的测量点进行平均速度的测量. 这种方法虽然方便操作, 但不可避免地会在测量值与颗粒实际撞击和反弹速度之间引入一定的误差. 为了提高测量的准确性, 未来的工作需要考虑如何更准确捕捉颗粒在撞击和反弹过程中的速度变化.

3.2.3 颗粒的反弹角度

在本实验中, 颗粒以接近垂直的角度撞击壁面, 即撞击角度接近 0° , 但颗粒的反弹角度变化较大. 本研究重点关注了颗粒的反弹角度与法向恢复系数之间的相互关系, 如图 18 所示. 从图中可以观察到, 在一定的法向恢复系数条件下, 颗粒的反弹角度呈现出明显的分散性. 这种分散性可能源自颗粒直径的不同、撞击速度的差异、撞击位置的不固定性, 以及撞击表面局部粗糙度的不一致性. 对数据进行线

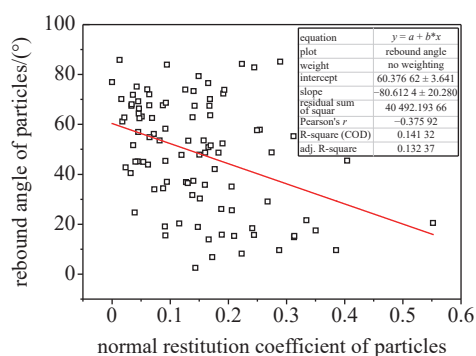


图 18 颗粒的法向恢复系数与反弹角度之间的关系

Fig. 18 The relationship between the restitution coefficients and the rebound angle of the particles

性拟合, 结果表明, 随颗粒的法向恢复系数的增加, 颗粒的反弹角度总体上呈现出逐渐减小的趋势. 这是因为颗粒的反弹角度取决于颗粒的切向反弹速度和颗粒的法向反弹速度的比值. 而颗粒的切向反弹速度依赖于气体沿壁面的剪切速度的大小. 在颗粒的切向速度变化不显著的情况下, 颗粒的法向反弹速度越大, 即恢复系数越大, 则颗粒的反弹角度越小.

3.2.4 颗粒的法向恢复系数

在本研究中, 我们深入探讨了颗粒直径位于主要区间 ($50 \sim 65\ \mu\text{m}$) 的颗粒在法向撞击速度与法向恢复系数之间的相互关系. 实验数据如图 19 所示, 颗粒的撞击速度分布在 $4 \sim 20\ \text{m/s}$ 的范围内, 而法向恢复系数则分布在 $0 \sim 0.35$ 的区间内, 大部分颗粒的法向恢复系数低于 0.2. 我们观察到颗粒的法向恢复系数也表现出较高的分散性. 这种特征并非本研究独有, 而是在相关文献中也表现如此^[4,11,14]. 颗粒反弹特性受到多种因素的影响. 尽管本实验采用了标准颗粒以确保物理和化学性质的基本一致性, 同

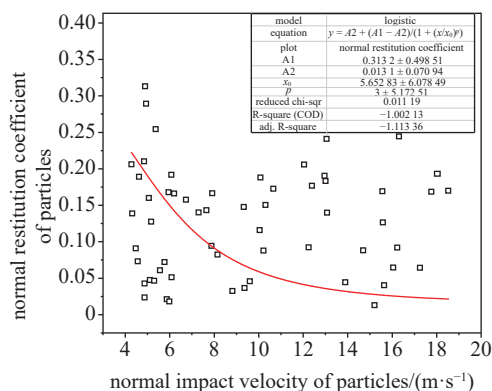


图 19 颗粒的法向撞击速度与其法向恢复系数的关系

Fig. 19 The relationship between the normal impact velocities of the particles and their coefficients of restitution

时在颗粒直径的测量上作出了努力,但是受实验条件的限制,一些重要的影响因素难以控制,比如,标准颗粒的直径并非均一的直径,气流的影响,撞击面局部粗糙的差异性等,这些因素仍可能对测量结果产生影响.因此,未来的研究将继续着重于加强实验条件的控制和提高测量技术的精确度.另外,采用了 Logistic 模型对样本数据进行了拟合分析.分析结果表明,随着撞击速度的增加,颗粒的法向恢复系数呈现出逐渐下降的趋势.这一发现与基于颗粒的弹塑性碰撞理论模型^[30]得出的结论基本上一致.

3.3 测量参数的误差分析

通过对 100 组颗粒直径的测量结果进行分析,得到了颗粒直径标准差的百分数的分布情况,结果如图 20 所示.从图中我们可以发现约 58% 的颗粒直径测量的标准差百分数低于 6%,而测量误差较大的例子,主要是因为颗粒速度较高,而拍摄频率相对低,导致所拍摄到的部分颗粒阴影出现“拖尾”现象造成的.总体上,如果颗粒的速度与拍摄频率匹配合适的话,颗粒直径的测量结果具有较高的稳定性.以平均粒径 $57.61\ \mu\text{m}$ 为例,计算得出的标准差为 $2.88\ \mu\text{m}$,相当于 0.16 像素单位.

这表明,采用本研究提出的测量方法,可以将颗粒平均直径的测量误差控制在 ± 0.16 像素的范围内,相比传统方法到达至少 ± 0.5 像素的误差,这是一个显著的改进.

此外,颗粒的运动速度和法向恢复系数的测量精度同样依赖于颗粒质心位置的准确识别.本研究由于采用了亚像素插值技术,所以颗粒的质心的测量具有亚像素精度.因此颗粒运动速度的测量精度也较传统方式有显著的提高.同时颗粒的直径及其撞击动力学参数的测量也受到硬件配置的影响.在硬件方面,光源的均匀性、拍摄频率以及 CCD 相机

的性能都是关键因素.比如:不均匀的光源可能导致图像处理过程中产生较大的噪声,增加处理难度;在高速拍摄条件下,过低的拍摄频率可能会导致颗粒阴影出现“拖尾”现象,使测量结果可能偏大等.

4 结论

本研究利用 PSV 技术,开发相应的测试装置和方法分析了标准玻璃微珠颗粒在高温条件下撞击壁面的动力学行为.研究得出以下主要结论.

(1) 通过结合亚像素插值法和最大内切圆法,提出了一种新的颗粒直径测量方法,显著提升了测量精度,并通过验证证明了其可靠性.

(2) 亚像素插值技术在提高颗粒直径测量准确性方面发挥了关键作用.在比较了 Otsu, IsoData 和 Th_intermodes 三种阈值分割算法后,在本实验条件下,发现 Otsu 算法在颗粒直径的测量上更为准确,尽管测量结果仍受亚像素插值方法和参数设置以及窗口效应的影响.

(3) 颗粒的法向恢复系数随撞击速度的增加而降低,而且撞击和反弹过程中颗粒速度的减小趋势表明,流场效应对颗粒动力学特性存在一定的影响.

本研究中提出的方法主要针对球形单颗粒的测量.在未来的研究中,我们将进一步优化和扩展这些测量技术,以适应更多样化和复杂的测量环境.

参 考 文 献

- 1 岑可法. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算. 北京: 科学出版社, 1994: 15-33 (Cen Kefa. Prevention Principle and Calculation on Fouling, Agglomeration, Abrasion and Corrosion of Boil and Heat Exchanger. Beijing: Science Press, 1994: 15-33 (in Chinese))
- 2 Van Beek MC, Rindt CCM, Wijers JG, et al. Rebound characteristics for $50\ \mu\text{m}$ particles impacting a powdery deposit. *Powder Technology*, 2006, 165(2): 53-64
- 3 Dong M, Li SF, Xie J, et al. Experimental studies on the normal impact of fly ash particles with planar surfaces. *Energies*, 2013, 6(7): 3245-3262
- 4 Wang YX, Wang YM, Zhou MM, et al. The influence of self-assembled particle layer on particle collision properties. *Powder Technology*, 2024, 446: 120138
- 5 Li SF, Xie J, Dong M, et al. Rebound characteristics for the impact of SiO_2 particle onto a flat surface at different temperatures. *Powder Technology*, 2015, 284: 418-428
- 6 Cai YT, Tay K, Zheng ZM, et al. Modeling of ash formation and deposition processes in coal and biomass fired boilers: A comprehensive review. *Applied Energy*, 2018, 230: 1447-1544
- 7 Tabakoff W, Malak MF. Laser measurements of fly ash rebound

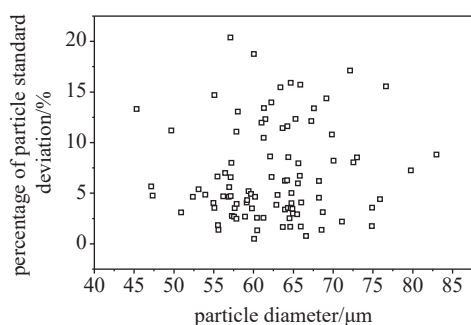


图 20 颗粒直径标准差的百分数

Fig. 20 Percentage of the standard deviation of the particle diameter

- parameters for use in trajectory calculations//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 1985, 79399: 535-540
- 8 Dong M, Xie J, Bai LY, et al. An experimental investigation on the influence of temperature on the normal impact of fine particles with a plane surface. *Energies*, 2014, 7(4): 2079-2094
 - 9 Xie J, Li CX, Yang TH, et al. The motion behavior of micron fly-ash particles impacting on the liquid surface. *ACS Omega*, 2022, 7(34): 29813-29822
 - 10 Wilson J, Qiao R, Kappes M, et al. The importance of shape in particle rebound behaviors. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145(4): 041005
 - 11 Cen ZT, Wu YX, Wang JY, et al. Investigation of the dominant effects of non-spherical particles on particle-wall collisions. *Processes*, 2024, 12(6): 1234
 - 12 Li X, Dong M, Jiang DY, et al. The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision. *Powder Technology*, 2020, 362: 17-25
 - 13 Yu KH, Peng CQ, Shang LW, et al. Elastic-plastic collision mechanism of micron-sized particle impacting rough surfaces. *Powder Technology*, 2024, 442: 119903
 - 14 Reagle CJ, Delimont JM, Ng WF, et al. Measuring the coefficient of restitution of high speed microparticle impacts using a PTV and CFD hybrid technique. *Measurement Science & Technology*, 2013, 24: 105303
 - 15 Kato H, Nishino K, Shinshi A, et al. Flow visualization and image processing of multiphase system//Proceedings of the ASME, United States of America: ASME Press, 1995: 115-122
 - 16 陈启刚, 陈槐, 钟强等. 高频粒子图像测速系统原理与实践. 北京: 清华大学出版社, 2017 (Chen Qigang, Chen Huai, Zhong Qing, et al. Principle and Practice of High Frequency Particle Image Velocity Measurement System. Beijing: Tsinghua University Press, 2017 (in Chinese))
 - 17 Reagle CJ, Delimont JM, Ng WF, et al. Measuring the coefficient of restitution of high speed microparticle impacts using a PTV and CFD hybrid technique. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105303
 - 18 李丹勋, 曲兆松, 禹明忠. 粒子示踪测速技术原理与应用. 北京: 科学出版社, 2012 (Li Danxun, Qu Zhaosong, Yu Mingzhong, Principle and Application of Particle Tracer Velocity Measurement Technology. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese))
 - 19 Whitaker SM, Peterson B, Miller AF, et al. The effect of particle loading, size, and temperature on deposition in a vane leading edge impingement cooling geometry//Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, American Society of Mechanical Engineers. Seoul, South Korea. June 13-17, 2016
 - 20 Bons JP, Blunt R, Whitaker S. A comparison of techniques for particle rebound measurement in gas turbine applications//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015: 56628
 - 21 Cheng S, Li SQ, Yang MN. Sticking/rebound criterion for collisions of small adhesive particles: Effects of impact parameter and particle size. *Powder Technology*, 2015, 274: 431-440
 - 22 梅凡民, 蒋缠文. 风沙颗粒运动的数字高速摄影图像的分割算法. *力学学报*, 2012, 44(1): 82-87 (Mei Fanmin, Jiang Chanwen. An arithmetic method of segmenting moving aeolian sand particles' images from background information of digital high-speed photography images. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(1): 82-87 (in Chinese))
 - 23 相恒升, 程博, 张成飞等. 固体火箭发动机尾焰中颗粒速度的粒子轨迹法测量. *固体火箭技术*, 2023, 46(5): 787-796 (Xiang Hengsheng, Cheng Bo, Zhang Chengfei, et al. Particle trajectory method for particle velocity measurements in solid rocket motor wake flames. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(5): 787-796 (in Chinese))
 - 24 周文. 基于 CCD 摄像的颗粒粒径测量图像法研究. [硕士学位论文]. 江苏: 东南大学, 2003 (Zhou Wen. Research on the image method of particle size measurement based on CCD camera. [Master Thesis]. Jiangsu: Southeast University, 2003 (in Chinese))
 - 25 许潇, 张文阁, 池顺鑫. 基于圆形拟合识别算法的颗粒粒度粒形自动测量方法研究. *计量科学与技术*, 2021, 65(3): 15-18 (Xu Xiao, Zhang Wenge, Chi Shunxin. Automatic particle measurement method based on circle fitting aided recognition algorithm. *Metrology Science and Technology*, 2021, 65(3): 15-18 (in Chinese))
 - 26 任世龙, 王浩亮, 刘桢等. 多相流图像法测量中目标颗粒识别方法. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2020, 42(6): 710-720 (Ren Shilong, Wang Hailiang, Liu Zhen, et al. Identification of target particles in multi-phase flow image method measurements. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(6): 710-720 (in Chinese))
 - 27 张琮昌, 吴学成, 吴迎春等. 煤粉颗粒速度和粒径在线测量的轨迹成像法. *中国电机工程学报*, 2011, 31(S1): 108-113 (Zhang Zongchang, Wu Xuecheng, Wu Yingchun, et al. Trajectory imaging method for on-line measurement of pulverised coal particle velocity and particle size. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(S1): 108-113 (in Chinese))
 - 28 张翔云, 周骛, 姜友新等. 基于卷积神经网络的离焦颗粒粒径与位置测量. *光学学报*, 2022, 42(19): 100-106 (Zhang Xiangyun, Zhou Wu, Jiang Youxin, et al. Particle size and position measurement of defocused particle based on convolutional neural network. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 100-106 (in Chinese))
 - 29 魏建旭. 高温条件下煤灰颗粒与平面的惯性碰撞特性研究. [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020 (Wei Jianxu. Characteristics of inertial collision between coal ash particles and flat surfaces under high temperature conditions. [Master Thesis]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2020 (in Chinese))
 - 30 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1975, 11(285-296): 23-27
 - 31 Ridler TW, Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1978, 8(8): 630-632
 - 32 Prewitt JMS, Mendelsohn ML. The analysis of cell images. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1966, 128(3): 1035-1053