

# 气固两相撞击流内颗粒运动规律的实验研究

杜 敏<sup>1</sup>, 周 宾<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 东南大学 空间科学与技术研究院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:**为研究气固两相撞击流内的颗粒运动规律,在自行设计的撞击流实验装置上以玻璃珠为颗粒物料,通过改变加料方式、喷嘴间距、气流速度、颗粒加料速率和颗粒粒径等条件,对撞击流内的颗粒撞击特性进行研究,得出了不同条件下的颗粒运动规律。研究表明,气固两相撞击流内两股颗粒在颗粒碰撞区发生剧烈撞击后向四周散开,没有明显的颗粒渗入反向流的现象,且颗粒碰撞区内的剧烈颗粒碰撞使得颗粒浓度升高;在其它条件一定的情况下,喷嘴间距的减小和颗粒加料速率的增大均使得颗粒碰撞区内的颗粒碰撞更加剧烈,颗粒碰撞区的范围变小变窄;颗粒粒径较大时,颗粒数密度的减小使得颗粒之间的碰撞相对减少。

**关 键 词:** 撞击流; 气固两相流; 颗粒运动; 碰撞

中图分类号: O359 文献标识码: A

## 引 言

撞击流概念是针对强化气固相间传递问题提出的<sup>[1]</sup>,其独特的流场结构为强化相间热质传递过程提供了很好的条件。因此,在煤气化、燃烧、干燥等涉及相间传递的工业过程中有着广阔应用前景。

由于流体力学理论的完善性,目前对于单相撞击流的研究是最全面和深入的<sup>[2~3]</sup>,而对于气固两相撞击流的研究则相对较少。在理论模型研究方面,目前针对气固两相撞击流所建立的模型多为单颗粒模型<sup>[4~5]</sup>,忽略了颗粒间相互作用,因而没有反映颗粒碰撞效应。文献[6~8]逐步建立了考虑颗粒碰撞的多颗粒气固两相撞击流理论模型,并通过分析得到了更为合理的计算结果。在实验研究方面,Elperin 等人采用放射性标记颗粒示踪的方法确定撞击流中颗粒浓度在轴向及径向上的分布<sup>[9]</sup>。许建良等人采用化学示踪法对撞击流气化炉内颗粒的停留时间分布进行了实验研究<sup>[10]</sup>。孙志刚等人采用高速相机对同轴对称撞击流中单颗粒运动行为进行了实验研究<sup>[11]</sup>,揭示了单颗粒在对置撞击流中

的运动特性。但撞击流中颗粒群的运动和碰撞非常复杂,随机性极强,目前对于这方面的实验研究还未见报道。

本研究在实验室规模的气固两相撞击流实验装置上,采用玻璃珠为固体颗粒进行冷态实验,对撞击流内的颗粒运动及撞击特性进行定性研究,直观展示不同条件下的颗粒运动规律,为气固两相撞击流的实际应用及后续理论模型的建立奠定了坚实的理论基础。

表 1 实验工况参数

Tab. 1 Operating parameters under the test conditions

工况	喷嘴间距 $l/\text{mm}$	气流速度 $u_g/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	加料速率 $W_p/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	颗粒直径 $D_p/\text{mm}$	加料方式
1	200	8	326.93	0.2~0.45	双喷嘴
2	400	12	191.66	0.2~0.45	单喷嘴
3	400	12	409.03	0.2~0.45	双喷嘴
4	200	12	392.31	0.2~0.45	双喷嘴
5	200	12	326.7	0.2~0.45	双喷嘴
6	200	12	366.52	0.2~0.45	双喷嘴
7	200	12	470.58	0.2~0.45	双喷嘴
8	400	8	489.36	0.2~0.45	双喷嘴
9	400	4	412.39	0.2~0.45	双喷嘴
10	200	12	327.73	0.8~1.0	双喷嘴

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示<sup>[12]</sup>,包括气路系统、加料系统、实验段、控制与数据采集系统 4 个部分。空气由风机给入气路系统,然后经过两条对称安装的进气管路相向地输送到实验段;固体颗粒(玻璃珠)由左右两侧螺旋加料器在加速管的前端加入到空气

收稿日期: 2013 - 06 - 05; 修订日期: 2013 - 07 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976024),江苏省自然科学基金项目(BK20130520),江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJB470002),江苏大学高级人才专项资助项目(11JDG152)

作者简介: 杜 敏(1981 -),男,山东泰安人,江苏大学讲师,博士。

中,在加速管中由高速气流携带加速,最后被送至实验段完成撞击过程,颗粒及空气由实验段的上下出口排出。为了便于观察实验段内固体颗粒的运动情况,在实验段筒体上装有由直径为 12 cm 的透明圆玻璃制作而成的观察窗,采用高速摄像机(CCD)或照相机进行拍摄观察。

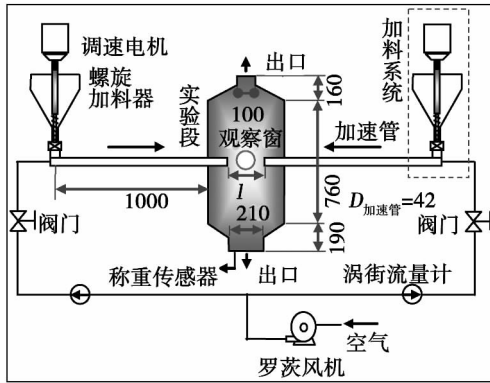


图 1 撞击流实验装置示意图 (mm)  
Fig. 1 Schematic drawing of the impingement flow test rig (mm)

### 1.2 实验方法

在实验过程中,空气的流量由阀门控制,并由涡街流量计测量;固体颗粒的加料量由调速电机控制,并由实验段出口处的称重传感器实时称量,从而得到每一工况的实时加料量;实验段中,两喷嘴之间的距离由加速管的延长段控制。

本研究对所列的 10 种工况进行了实验,表 1 分别列出了各工况的喷嘴间距  $l$ 、加速管中气流速度  $u_g$ 、加料速率  $W_p$ 、颗粒粒径  $D_p$  和加料方式。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 颗粒浓度分布规律

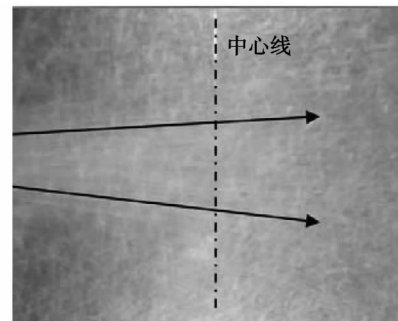
撞击流内两股颗粒流在两喷嘴中间区域发生剧烈撞击,形成一个颗粒碰撞区<sup>[6]</sup>,使得撞击后的颗粒向四周散开,同时,颗粒碰撞区的剧烈撞击还会使得该区域内颗粒富集,颗粒浓度升高。图 2 为工况 1 条件下,适当调节实验段内的光强及 CCD 镜头的光圈位置所摄视频的截图。可以看出,在颗粒碰撞区明显偏亮,这是由于在该区域颗粒浓度较高,颗粒反射或折射的光强比较强造成的。颗粒在颗粒碰撞区的富集这一现象与 Elperin 等人采用放射性标记颗粒示踪方法得到的结果一致<sup>[9]</sup>。



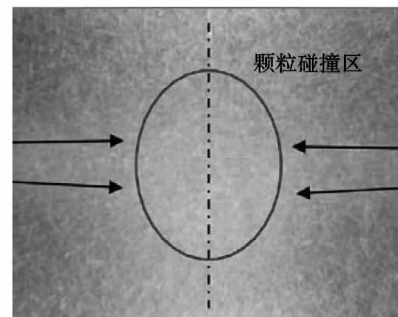
图 2 在适当光强条件下高速摄像视频截图  
Fig. 2 Photo taken from a video shot by a high-speed camera under a proper light intensity

### 2.2 单喷嘴加料与双喷嘴加料工况的比较

为了研究颗粒流的撞击对颗粒运动规律的影响,对单喷嘴加料(工况 2)与双喷嘴加料(工况 3)时的颗粒运动情况进行了对比,如图 3 所示。当单喷嘴加料时,由于没有来流颗粒的影响,颗粒会在惯性的作用下渗入反向气流,或在反向气流中减速然后返回,或碰到对面壁面反弹,最后大部分颗粒在重力的作用下向下运动由下出口排出。当双喷嘴加料时,两股颗粒流在颗粒碰撞区发生剧烈撞击,然后向四周散开,并没有明显的颗粒渗入反向气流的现象。



(a) 工况 2



(b) 工况 3

图 3 单喷嘴加料与双喷嘴加料的比较  
Fig. 3 Comparison of the single and dual nozzle material feeding

### 2.3 不同喷嘴间距时的颗粒运动规律

在其它条件不变的情况下,对具有不同喷嘴间距的颗粒运动规律进行了对比分析,图 3(b)和图 4 分别为喷嘴间距  $l = 400 \text{ mm}$ (工况 3)和  $l = 200 \text{ mm}$ (工况 4)时的颗粒运动规律。可以看出,当  $l = 400 \text{ mm}$  时,受气相射流的影响,颗粒在向颗粒碰撞区运动过程中逐渐向周围散开,使得颗粒流到达颗粒碰撞区时浓度相对较小,减小了颗粒之间的碰撞几率,增加了颗粒渗入反向流的可能性,所以颗粒碰撞区域相对较大。而当喷嘴间距相对较小时( $l = 200 \text{ mm}$ ),两股颗粒流到达颗粒碰撞区时颗粒浓度比大喷嘴间距时相对较大,颗粒碰撞剧烈,颗粒渗入反向流的可能性较小,所以颗粒碰撞区相对较小。总的来说,喷嘴间距较小时颗粒碰撞区内的颗粒碰撞更为剧烈,颗粒碰撞区的范围也较小。

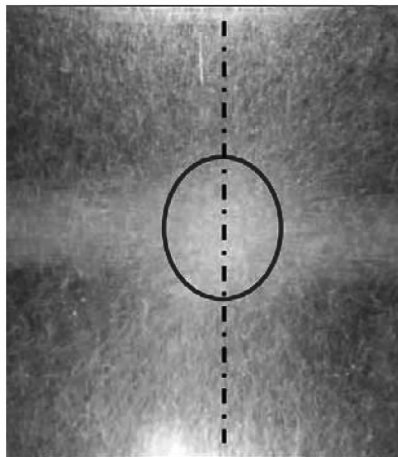
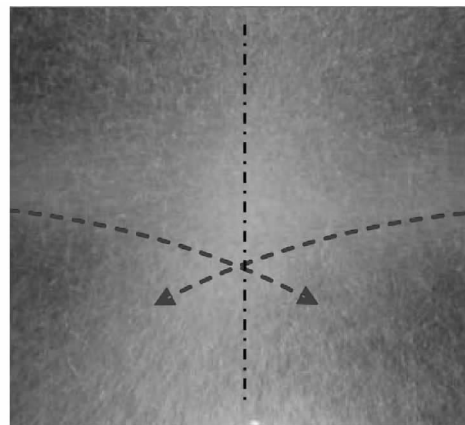


图 4  $l = 200 \text{ mm}$  时的颗粒运动规律(工况 4)  
Fig. 4 Particle movement regularity when  $l = 200 \text{ mm}$   
(operating condition No. 4)

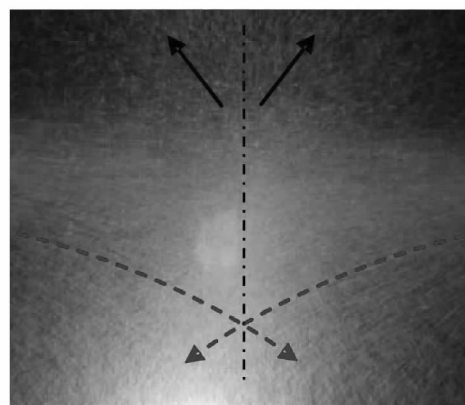
### 2.4 不同气流速度时的颗粒运动规律

加速管中气流速度  $u_g$  的不同直接导致喷嘴出口颗粒速度的不同,从而影响颗粒的运动规律。图 3(b)和图 5 分别给出了颗粒加料速率相近时,不同气流速度下的颗粒运动规律。当气流速度较大时(工况 3),喷嘴出口的颗粒速度也相对较大,两股颗粒流可顺利地到达颗粒碰撞区发生撞击并向四周散开。随着气流速度的减小(工况 8),喷嘴出口的颗粒速度较小,到达颗粒碰撞区的时间延长,颗粒会在运动过程受重力的作用向下运动,使得部分颗粒从颗粒碰撞区下方经过,从而错过颗粒碰撞区的碰撞过程。随着气流速度的进一步减小(工况 9),大部

分颗粒从颗粒碰撞区下方交叉而过,只有少数颗粒在颗粒碰撞区发生撞击并向上运动,这就失去了撞击流的意义。所以,为了保证撞击流内的撞击效果,气流速度存在一个最小值,在本实验工况下为  $8 \text{ m/s}$ 。



(a) 工况 8



(b) 工况 9

图 5 不同气流速度时的颗粒运动规律  
Fig. 5 Particle movement regularity at  
various gas flow speeds

### 2.5 不同颗粒加料速率时的颗粒运动规律

不同的颗粒加料速率影响撞击流内的颗粒浓度分布,从而影响颗粒运动规律。图 6 为不同加料速率时的颗粒运动规律。当颗粒加料速率较小时(工况 5),喷嘴出口颗粒浓度较小,两股颗粒流到达颗粒碰撞区时的颗粒浓度也较小,减小了颗粒间的碰撞几率,有利于颗粒更深入的渗入反向流,进而与来流颗粒发生撞击,所以颗粒碰撞区的范围相对较大。随着颗粒加料速率的增大,两股颗粒流到达颗粒碰撞区时的颗粒浓度较大,颗粒间的碰撞加剧,使得颗粒渗入反向流的几率逐渐减小,所以颗粒碰撞区的范围逐渐变窄。当颗粒加料速率达到  $470.58 \text{ kg/h}$

时(工况7) ,颗粒碰撞区的颗粒碰撞非常剧烈 ,颗粒碰撞区已变为一个薄层 ,且由于颗粒碰撞区内的剧烈碰撞 ,及两边喷嘴在高度上的细微差别 ,使得薄层

稍有偏转 ,如图 6( d) 所示。所以 ,在颗粒加料速率较大时 ,对气固两相撞击流装置内两侧喷嘴的对心要求更为严格。

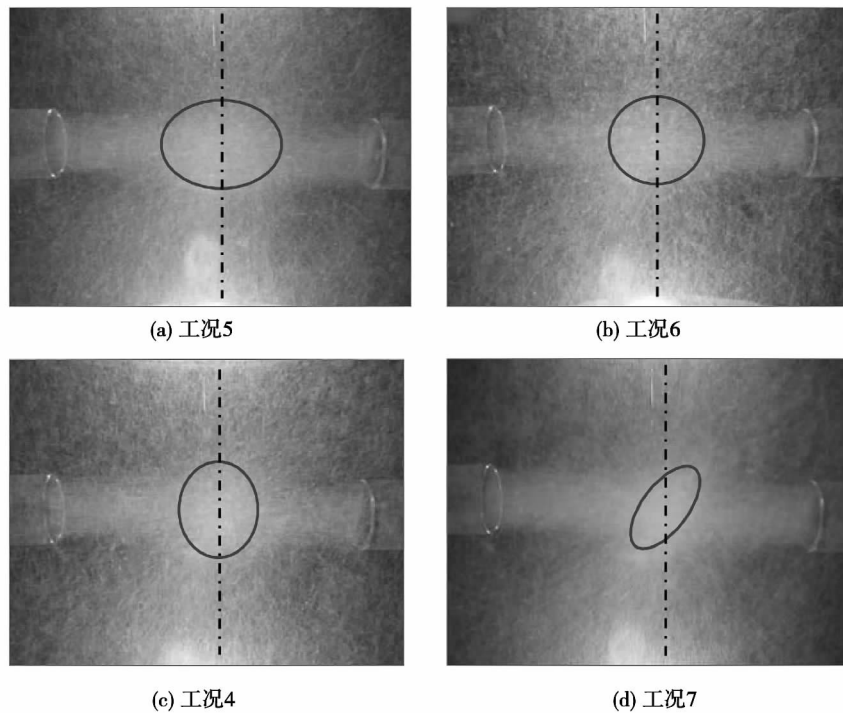


图 6 不同加料速率时的颗粒运动规律

Fig. 6 Particle movement regularity at various material feeding rates

### 2.6 不同颗粒粒径时的颗粒运动规律

不同的颗粒粒径主要影响颗粒碰撞区内的颗粒数密度分布 ,从而影响颗粒运动规律。图 6( a) 和图 7 给出了颗粒粒径分别为 0.2 ~ 0.45 mm( 工况 5) 和 0.8 ~ 1.0 mm( 工况 10) 时的颗粒运动规律。在相同颗粒加料速率工况下 ,当颗粒粒径较大时( 工况 10) ,颗粒数的密度相对减小 ,两股颗粒流相遇时颗粒间碰撞几率较小 ,并不能观察到明显的颗粒碰撞区范围。另外 ,颗粒粒径的增大 ,使得单个颗粒的重力和惯性都增大 ,在经过碰撞后部分颗粒仍保持向前的运动趋势 ,且在重力的作用下使得运动方向偏向向下 ,如图 7 箭头方向所示。总的来说 ,在其它条件不变的情况下 ,颗粒粒径较小时两股颗粒的碰撞更加剧烈。

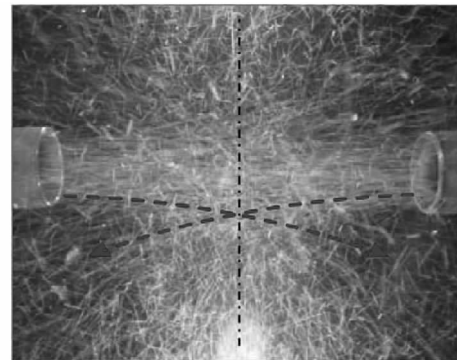


图 7  $D_p = 0.8 \sim 1.0$  mm 时的颗粒运动规律( 工况 10)

Fig. 7 Particle movement regularity when  $D_p = 0.8 - 1.0$  mm( operating condition No. 10)

### 3 结 论

对气固两相撞击流内的颗粒运动规律进行了实验研究 ,并通过分析得到如下主要结论:

- (1) 在气固两相撞击流内 ,两股颗粒流在颗粒碰撞区发生剧烈撞击 ,然后向四周散开 ,并没有明显的颗粒渗入反向流的现象; 颗粒碰撞区内的剧烈颗粒碰撞使得该区域内颗粒富集 ,颗粒浓度升高。
- (2) 在其它条件一定的情况下 ,喷嘴间距较小

时颗粒碰撞区内的颗粒碰撞更为剧烈,颗粒碰撞区的范围也较小。

(3) 在颗粒加料速率一定的情况下,为保证撞击流内的撞击效果,喷嘴出口气流速度存在一个最小值。在本实验工况下,最小风速的值为 8 m/s。

(4) 在其它条件一定的情况下,颗粒加料速率的增大会使得颗粒碰撞区的范围变窄,颗粒碰撞区内的颗粒碰撞更加剧烈。

(5) 在其它条件一定的情况下,颗粒粒径较大时,颗粒数密度相对较小,颗粒之间的碰撞相对减弱。

#### 参考文献:

- [1] Elperin I T. Heat and Mass Transfer in Opposing Currents [J]. Journal of Engineering Physics, 1961, 6: 62 - 68.
- [2] 孙志刚,李伟锋,刘海峰.小喷嘴间距撞击流的径向射流速度分布[J].燃烧科学与技术,2010,16(2):165-169.  
SUN Zhi-gang, LI Wei-feng, LIU Hai-feng. Radial jet flow speed distribution of an impingement flow at a small nozzle interval [J]. Combustion Science and Technology, 2010, 16(2): 165 - 169.
- [3] Marchisio D L. Large Eddy Simulation of mixing and reaction in a Confined Impinging Jets Reactor [J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(2): 408 - 420.
- [4] Carrier G F, Fendell F E, Fink S F, et al. Particle transport in a counter-flow [J]. Combustion and Flame, 2001, 126(3): 1630 - 1639.
- [5] 刘红娟,邹春,田智威等.撞击流中单颗粒运动行为的数值模拟[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(5):106-109.  
LIU Hong-juan, ZOU Chun, TIAN Zhi-wei, et al. Numerical simulation of a single particle movement behavior in an impingement flow [J]. Journal of Central China University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2008, 36(5): 106 - 109.
- [6] 杜敏,郝英立,刘向东. DSMC 方法在大规模气固两相撞击流中的应用[J].化工学报,2009,60(8):1950-1958.  
DU Min, HAO Ying-li, LIU Xiang-dong. Application of the DSMC method in large-scale gas-solid two-phase impingement flows [J]. Journal of Chemical Industry, 2009, 60(8): 1950 - 1958.
- [7] 杜敏,郝英立.撞击流内相间传热传质理论模型研究[J].工程热物理学报,2010,31(6):1037-1040.  
DU Min, HAO Ying-li. Study of a theoretical model for heat and mass transfer between phases in an impingement flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(6): 1037 - 1040.
- [8] Du M, Zhao C S, Zhou B, et al. A modified DSMC method for simulating gas-particle two-phase impinging streams [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(20): 4922 - 4931.
- [9] Elperin I T, Meltser V L, Levental L E, et al. Influence of solid particles concentration on their motion in impinging jets [J]. Series of Physical-Energy Science, 1971, 4: 66 - 74.
- [10] 许建良,代正华,李巧红,等.气流床气化炉内颗粒停留时间分布[J].化工学报,2008,59(1):53-57.  
XU Jian-liang, DAI Zheng-hua, LI Qiao-hong, et al. Particle residence time distribution inside a gasifier of a gas fluidized bed [J]. Journal of Chemical Industry, 2008, 59(1): 53 - 57.
- [11] 孙志刚,李伟锋,刘海峰,等.同轴对称撞击流中颗粒运动行为的研究.化学工程与工艺,2009,25(2):97-103.  
SUN Zhi-gang, LI Wei-feng, LIU Hai-feng, et al. Particle movement behavior in a coaxial symmetrical impingement flow [J]. Chemical Engineering and Technology, 2009, 25(2): 97 - 103.
- [12] 张涛,杜敏,周宾,等.气固同轴撞击流干燥试验研究[J].工程热物理学报,2011,32(11):1910-1912.  
ZHANG Tao, DU Min, ZHOU Bin, et al. Experimental Study of the drying of a gas-solid coaxial impingement flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(11): 1910 - 1912.

(陈滨 编辑)

#### • 书 讯 •

### 大型风力发电机组状态 监测与智能故障诊断

本书介绍了风电机组相关部件的监测与故障诊断技术,内容包括大型叶片、齿轮箱、主轴、制动系统、发电机、开关设备、互感器、升压变压器、变流器等故障在线监测系统的基本组成、故障树、故障诊断的新理论及新方法。提出了基于专家系统、模糊神经网络和小波分析三种推理模式集成的风力发电组合智能诊断策略;基于故障树和神经网络模型,建立了由框架和规则混合知识表示的智能故障诊断系统,利用模糊神经网络来建立风力发电机常见运行故障的专家诊断知识库;在诊断策略的决策层,利用小波分析、模糊神经网络和证据理论的融合,提高风力发电机故障的预测精度;利用基于神经网络的模糊综合评判,对风力发电机衬垫摩擦系数质量进行准确的综合评价;并利用小波神经网络对风力发电机的常见运行故障进行了趋势预测;提出了采用集成智能传感器容错控制方法来实现风电机组的容错控制;提出了风力发电机的一种综合安全控制策略。

本书可作为普通高等院校相关专业本科生和研究生的教材,也适合风力发电技术领域的工程技术人员参考。

作者:王致杰

ISBN: 978 - 7 - 313 - 09602 - 9

出版社:上海交通大学出版社

出版时间:2013 - 09 - 27

定价:¥38.00

ence can be regressed to a linear relationship with the flue gas temperature at the outlet. The heat balance iterative algorithm was adopted to obtain the relationship between the maximum flue gas flow rate of the synthesizer and the flue gas temperature at the outlet of the waste heat recovery boiler when the requirements for the process were met. The calculation results show that the algorithm in question can be used to predict the thermal performance of the waste heat recovery boiler, thus contributing to a stable production yield and efficiency enhancement of the copper synthesizer. **Key words:** copper synthesizer, waste heat recovery boiler, heat balance, calculation method

气固两相撞击流内颗粒运动规律的实验研究 = **Experimental Study of the Law Governing the Movement of Particles Inside a Gas-solid Two-phase Impingement Flow** [刊, 汉] DU Min ( College of Energy Source and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code: 212013), ZHOU Bin ( College of Space Science and Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(6). - 611 ~ 615

To study the movement law of particles inside a gas-solid two-phase impingement flow, investigated was the impingement characteristics of particles inside an impingement flow with glass balls serving as the particle materials on a self-designed impingement flow test rig by changing the material feeding mode, clearance between nozzles, gas flow speed, particle feeding speed and diameter etc. and the movement law of particles under different conditions were obtained. It has been found that inside a gas-solid two-phase flow, after a drastic impingement of two strands of particle flow has occurred in the particle impingement zone, the particles will disperse to everywhere and there will be no phenomena that any particle obviously joins in a reverse flow. Furthermore, the drastic impingement in the impingement zone will lead to a rise of the particle concentration. In the case that other conditions are kept constant, to decrease the clearance between the nozzles and increase the particle feeding speed will force the impingement inside the impingement zone more drastic, thus the particle impingement zone will become smaller and narrower. When the particle diameter is relatively big, to decrease the particle density will result in a decrease of the impingement correspondingly between particles. **Key words:** impingement flow, gas-solid two-phase flow, particle movement, collision

基于内模控制的火电机组功率控制系统 = **Power Control System for Thermal Power Generator Units Based on the Inner Model Control** [刊, 汉] SHENG Kai ( Academy of Sciences, Hunan Provincial Electric Power Co.,