

# 飞灰颗粒撞击顺列光管管束的数值模拟研究

周 翼 吴 新 韩继广

(东南大学 能源与环境学院 江苏 南京 210096)

**[摘要]** 对水泥窑窑头余热锅炉(AQC)内颗粒撞击顺列光管进行了数值模拟,研究了不同横纵向间距、管束直径及颗粒入口速度等因素对飞灰颗粒撞击管束行为的影响,得出了飞灰颗粒横掠顺列光管管束的运动规律。采用飞灰颗粒通过率及碰撞率的无因次关联式来表征其与各个影响因素的关系。研究结果表明:管径及管间横向间距增大使得颗粒通过率增大,碰撞率降低;颗粒入口速度及纵向间距增大,使得颗粒通过率降低,碰撞率增大。

**[关键词]** 飞灰颗粒 顺列光管管束 颗粒通过率 颗粒撞击率

**[中图分类号]** TK11.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)04-0034-06

## Simulation Study on Flue Gas Particle Impacting the Aligned Bare Tube Bundles

Zhou Yi ,Wu Xin ,Han Jiguang

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Simulation study was conducted on flue gas particle impacting the aligned bare tube bundles in AQC (Air Quenching Chamber) heat recovery steam generator. The effects of transverse and longitudinal spaces of tubes, diameters of tubes and particle velocities on the particles impacting the tubes were investigated. The movement law of the flue gas particles crossing bundles of bare tubes in aligned arrangement was obtained by numerical calculation. The dimensionless relation between passing rate and impacting rate was used to represent the relationship with the above factors. The results show that with the increase of the tube diameter and transverse space, the passing rate rises and the impacting rate decreases, and that the passing rate and the impacting rate represent the opposite consequences when the particle velocity and the longitudinal space rises.

**Key words:** flue gas particle, aligned bare tube bundle, passing rate, impacting rate

水泥是国民经济的基础原料,水泥工业与经济建设密切相关。水泥窑窑头排放的大量中低温烟气中的飞灰颗粒硬度较大,对受热面磨损较为严重,生产过程排放大量的余热废气,不仅造成严重的环境污染,而且影响企业经济效益的提高。如何有效地回收和利用余热废气,对节约能源、保护环境起着重要的作用<sup>[1]</sup>。因此对于水泥窑窑头余热锅炉飞灰磨损需要作进一步研究。

众多学者对管束磨损的研究主要是针对烟气流速、粉尘颗粒形状、颗粒碰撞角度等参数进行探讨。马颖<sup>[2]</sup>等从冲蚀磨损的实质及其磨损理论着手,分析得出了环境因素、粒子性能和材料性能等是冲蚀磨损的主要影响因素。王涌等<sup>[3]</sup>通过对神东公司热电厂循环流化床锅炉运行资料分析发现:顺列和错列管束第一排的局部磨损量基本相同,最大局部磨损量位于 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间,而对于错列管束的第二排,最大局部磨损量位于 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ,角度随颗粒直径增大而减小,并提出了防磨片角度 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间即可起到保护作用。闫洁、樊建人等<sup>[4]</sup>研究圆柱近壁区颗粒与柱体间碰撞磨损,发现随着颗粒粒径的增大,颗粒与壁面的碰撞频率变高,局部碰撞频率的曲线较为特殊,粒径较大颗粒的碰撞多发生在与来流方向平行的中心轴线处,而小粒径颗粒的碰撞则要外移一定的位置,壁面磨损率随粒径增大而增大,对塑性材料冲击角为 $20^{\circ}$

收稿日期: 2011-09-08.

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金(BA2009021)。

通讯联系人: 吴 新,副教授,研究方向: 高效清洁燃烧与污染物排放控制、流化床燃烧与气化、多相流传热、流动、测试技术。

E-mail: wuxin@seu.edu.cn

~30°时,壁面磨损率最大.

介于众多学者<sup>[5-7]</sup>都是针对颗粒本身的物性参数,如飞灰粒径、飞灰速度、飞灰冲击角等进行探讨,并没有系统地将飞灰颗粒的物性参数和管束本身的布置有机结合起来进行探讨. 本文将采用数值模拟方法研究飞灰粒径、飞灰速度、管束直径及管束横纵向间距等影响因素对管束冲刷的影响规律,并引进通过率 $\eta_p$ 和碰撞率 $\eta_c$ 来表征颗粒碰撞与上述因素间的关系.

1 物理问题及模型建立

1.1 物理问题

以外径  $\Phi 38\text{ mm}$ 、 $\Phi 51\text{ mm}$  和  $\Phi 57\text{ mm}$  的光管为研究对象,研究烟气在通过顺列光管管束时颗粒对管束的碰撞规律. 为减轻磨损烟气流速低于  $5\text{ m/s}$ ,故本文中进口烟气速度分别选取  $3\text{ m/s}$  和  $5\text{ m/s}$ ,烟气中飞灰颗粒直径  $20\sim 120\text{ }\mu\text{m}$ ,采用 rosin-rammler 分布. 选取 10 排管束作为研究对象(如图 1 所示),探讨颗粒撞击管束之间的关系. 顺列光管管束采用卧式布置(如图 2 所示),烟气自上而下横掠管束,重力加速度  $g=9.812\text{ m/s}^2$ . 对于锅炉换热面,为了提高换热效果并且减少颗粒的磨损,通常选取的横向间距要大于纵向间距,因此本文中按该原则布置管束. 实验工况如表 1 所示.

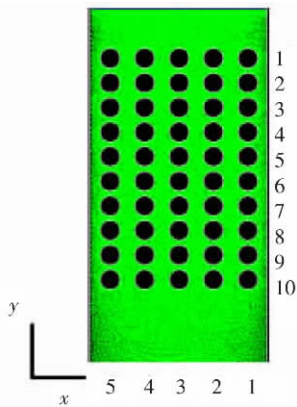


图 1 管束排布图  
Fig.1 Bundle arrangement

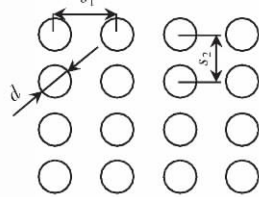


图 2 顺列布置  
Fig.2 Aligned arrangement

表 1 实验工况

Table 1 Simulation conditions

工况	进口风速 $\text{m/s}$	管径 $d_0/\text{mm}$	$s_1/d_0$	$s_2/d_0$
1	3.5	38,51,57	1.5	1.25
2	3.5	38,51,57	1.75	1.25
3	3.5	38,51,57	1.75	1.5
4	3.5	38,51,57	2	1.25
5	3.5	38,51,57	2	1.5
6	3.5	38,51,57	2	1.75
7	3.5	38,51,57	2.5	1.25
8	3.5	38,51,57	2.5	1.5
9	3.5	38,51,57	2.5	1.75
10	3.5	38,51,57	2.5	2
11	3.5	38,51,57	3	2

1.2 问题简化

(1) 忽略炉内的支撑和固定结构、联箱以及蛇形管的弯头部分,认为其是由数排平行的无限长直管组成.

(2) 假定烟气在管束间为定常流动.

(3) 飞灰颗粒由烟气携带进入,两者入口速度基本相同  $v_p=v$ .

(4) 流场中的所有飞灰颗粒均为球形,并具有相同的密度.

(5) 颗粒在烟气中所占的体积分数小于 10%,故不考虑颗粒对气相的影响,不考虑颗粒间的碰撞,只考虑颗粒与管束之间的碰撞.

(6) 本研究将在冷态下进行,颗粒由常温空气携带进入换热段.

基于以上几点假设,保留了影响研究结果的主要因素,省略了次要因素,使研究的问题既得到简化,又不失一般性. 气相、固相参数分别如表 2 所示.

表 2 气相(常温 25℃)、固相(碳酸钙)参数

Table 2 Parameters

参数	值
气相	
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.225
粘度/( $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ )	$1.7894\text{e}-05$
气相速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3.5
固相	
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	3 320
$C_p/(J\cdot(\text{kgK})^{-1})$	783
导热系数/( $\text{W}\cdot(\text{mK})^{-1}$ )	2.25
固相速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3.5

本文采用 Fluent 商业软件,以顺列光管为研究对象建立数学模型,对表 1 中各个工况进行计算. 分析入口速度、飞灰颗粒直径、管束的横纵向间距等影响因素对飞灰颗粒运行的影响规律,并得出诸因素与通过率 $\eta_p$ 和碰撞率 $\eta_c$ 之间的关系.

1.3 控制方程的建立

1.3.1 气相控制方程

气相的控制方程组采用标准  $k-\varepsilon$  模型,方程组包括连续性方程、动量方程、 $k$  方程、 $\varepsilon$  方程.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{V} = 0, \tag{1}$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \mathbf{F} - \nabla P + \mu \Delta \mathbf{V} , \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon , \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} , \quad (4)$$

式中  $\sigma_k$   $\sigma_\varepsilon$  分别是湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数.

由平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项如下式:

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} , \quad (5)$$

其中  $C_{1\varepsilon} = 1.44$   $C_{2\varepsilon} = 1.92$   $C_\mu = 0.99$   $\sigma_k = 1.0$   $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

### 1.3.2 固相控制方程

颗粒相运动在考虑颗粒所受曳力和重力的情况下,根据牛顿第二运动定律建立方程描述如下:

$$m_p \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d_p^2}{8} C_D \rho |u - v| |u - v| + m_p g \phi , \quad (6)$$

式中  $u$  代表颗粒所在位置的气体速度;  $v$  代表颗粒速度;  $\rho$  为流体密度;  $C_D$  为颗粒的阻力系数;  $m_p g$  为颗粒的重力. 颗粒的运动轨迹方程如下:

$$\frac{dx_p}{dt} = v. \quad (7)$$

为了较精确计算颗粒所受曳力,选择由 Clift<sup>[8]</sup> 提出的曳力模型,它描述了在 10 个不同的  $Re$  数范围内阻力系数  $C_D$  的表达式.

### 1.3.3 颗粒与管束碰撞模型

当飞灰颗粒与管束或槽道壁面碰撞时,飞灰颗粒会在碰撞力作用下改变运动轨迹. 颗粒与不锈钢金属壁面碰撞前后的速度关系为<sup>[9]</sup>:

$$\frac{v_{n2}}{v_{n1}} = 1.0 - 0.4159\beta - 0.4994\beta^2 + 0.292\beta^3 , \quad (8)$$

$$\frac{v_{t2}}{v_{t1}} = 1.0 - 2.12\beta + 3.0775\beta^2 - 1.1\beta^3 , \quad (9)$$

其中  $v_n$  和  $v_t$  分别为颗粒碰撞速度的法向和切向分量; 下标 1 和 2 分别代表碰撞前、后的状况;  $\beta$  为颗粒与金属壁面碰撞时颗粒速度的入射角. 如图 3 所示.

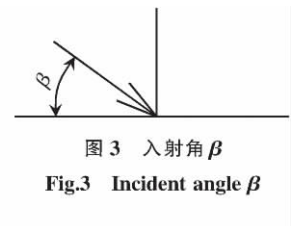


图 3 入射角  $\beta$   
Fig.3 Incident angle  $\beta$

## 2 结果与讨论

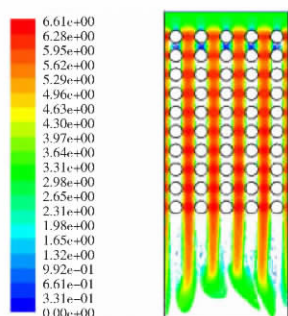
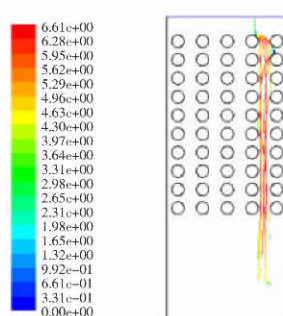
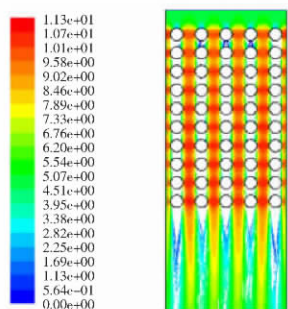
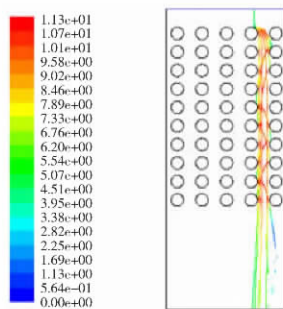
对于顺布置的管束,烟气自上而下横掠管束,如图 1 所示,首排管束不可避免地会受到磨损. 本文将引入通过率  $\eta_p$  和碰撞率  $\eta_c$  来研究管束第 2 排以后的颗粒碰撞状况.  $\eta_p$  定义为通过第 1 排管子后直接从管间隙自由通过的颗粒与总颗粒数之比,如公式(10)所示. 对于第 2 排以后的管束通过率  $\eta_p$  与碰撞率  $\eta_c$  关系如公式(11)所示:

$$\eta_p = \frac{\sum_{i=2}^{10} n_{p\_free}}{N} , \quad (10)$$

$\sum_{i=2}^{10} n_{p\_free}$  为自由通过 2 至 10 排的颗粒数,  $N$  为总颗粒数.

$$\eta_p + \eta_c = 1 , \quad (11)$$

选取其中一个工况:  $\Phi 51 \text{ mm}$   $s_1/d_0 = 2$   $s_2/d_0 = 1.5$ , 看一下  $u = 3 \text{ m/s}$  和  $u = 5 \text{ m/s}$  时颗粒轨迹图. 如图 4 ~ 图 8 所示,反应了颗粒不同的速度,颗粒在管束最小截面处得到加速,速度最大,甚至有些颗粒在撞击到管束后,反弹到前排管束的背面,如图 8 所示. 对于单束颗粒  $u = 5 \text{ m/s}$  时颗粒对管束的撞击次数要明显多于  $u = 3 \text{ m/s}$  时,如图 5 和图 7 所示.

图 4  $u=3$  m/s 颗粒轨迹图Fig.4 Particle trajectories ( $u=3$  m/s)图 5  $u=3$  m/s 单束颗粒轨迹图Fig.5 Single-beam particle trajectories ( $u=3$  m/s)图 6  $u=5$  m/s 颗粒轨迹图Fig.6 Particle trajectories ( $u=5$  m/s)图 7  $u=5$  m/s 单束颗粒轨迹图Fig.7 Single-beam particle trajectories ( $u=5$  m/s)

## 2.1 管径的影响

图9、图10 分别是  $s_1/d_0$ 、 $s_2/d_0$  不变的情况下, 烟速分别为 3 m/s 和 5 m/s 时管径对颗粒通过率的影响结果。两幅图的变化规律基本一致, 随着管径  $d_0$  的增大, 通过率  $\eta_p$  值增大, 碰撞率  $\eta_c$  值减小。这是因为对于体积一定的换热段而言, 管径  $d_0$  的增大,  $s_1$  的实际距离是增大的, 因此相邻两列管束之间的自由流通区域变大。对于同样的进口速度的颗粒而言, 其入口处动能不变, 烟气携带飞灰颗粒到达首排管束并与之碰撞, 反弹瞬间颗粒受到法向应力和切向应力作用, 在部分法向和切向应力的作用下颗粒向邻排的管束飞去导致颗粒再次与管束相碰撞, 部分法向和切向应力促使颗粒向流场下游运

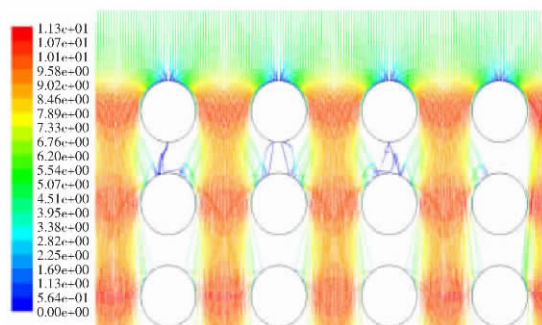
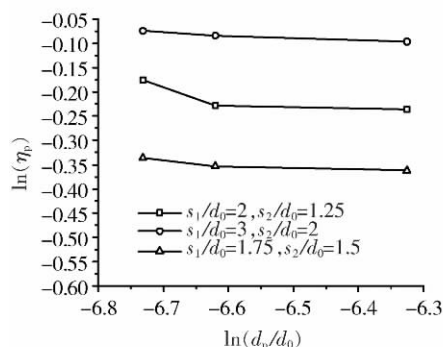
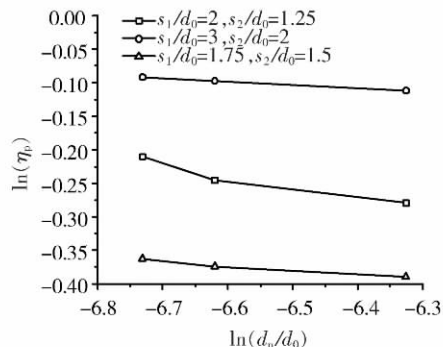


图 8 局部放大的颗粒碰撞管束图

Fig.8 Enlarged particle collision

图 9 管径对通过率的影响( $u=3$  m/s)Fig.9 Passing rate of particles with different diameters ( $u=3$  m/s)图 10 管径对通过率的影响( $u=5$  m/s)Fig.10 Passing rate of particles with different diameters ( $u=5$  m/s)



动,最后离开换热段.气体流经管束截面最小处,气体因压缩,流速急剧增大,颗粒在此加速.由于自由流通区域变大,将会有更多颗粒加速后迅速离开换热段,因此  $d_0$  增大,使得  $\eta_p$  值增大,  $\eta_c$  值减小.

## 2.2 横向间距的影响

图 11、图 12 呈现的是  $d_0$  和  $s_2$  不变的情况下,烟速分别为 3 m/s 和 5 m/s 时横向间距对通过率的影响结果.由图可见在其他条件相同的情况下,随着横向管距  $s_1/d_0$  的增大,  $\eta_p$  增大,碰撞率  $\eta_c$  减小.这是因为一方面,随着  $s_1/d_0$  的增大,管间隙占颗粒入口通道的比例增大,有更多的颗粒从管束第 1 排通过,流向后面管列,使得自由通过颗粒的总基数增大,最终使得  $\eta_p$  值增大;另一方面,  $s_1/d_0$  的增大使得颗粒再次撞击距离变长,部分颗粒在未达到相邻管列就被自上而下的烟气带走,因而  $\eta_p$  同样增大,  $\eta_c$  减小.

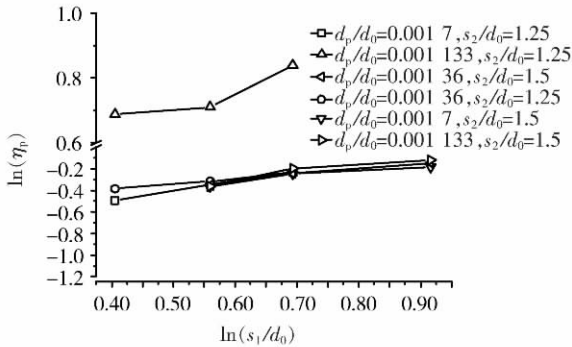


图 11 横向间距对通过率的影响( $u=3$  m/s)

Fig.11 Passing rate of particles with different transverse spaces ( $u=3$  m/s)

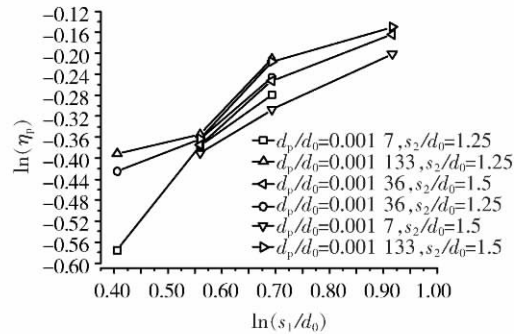


图 12 横向间距对通过率的影响( $u=5$  m/s)

Fig.12 Passing rate of particles with different transverse spaces ( $u=5$  m/s)

## 2.3 纵向间距的影响

图 13、图 14 给出了  $d_0$  和  $s_1$  不变时,烟速分别为 3 m/s 和 5 m/s 时纵向间距对通过率的影响.由图可见,在其他条件相同的情况下,随着纵向间距  $s_2/d_0$  的增大,  $\eta_p$  值减小,碰撞率  $\eta_c$  值增大.这是因为其他条件不变时,纵向管距的增大,并没有过多得影响颗粒与首排管束碰撞后的速度.撞击到首排管束表面后反弹的颗粒,横向间距不变,纵向间距变大,颗粒有更充分的时间可以到达相邻管列,使得  $\eta_p$  值减小.

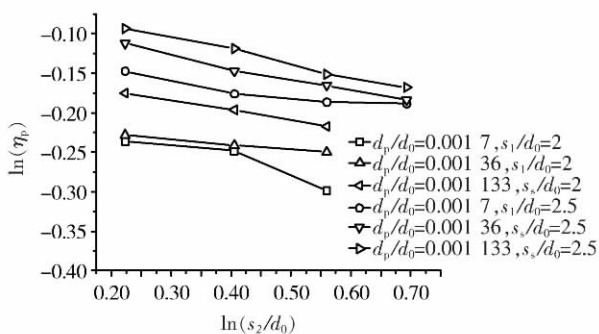


图 13 纵向间距对通过率的影响( $u=3$  m/s)

Fig.13 Passing rate of particles with different longitudinal spaces ( $u=3$  m/s)

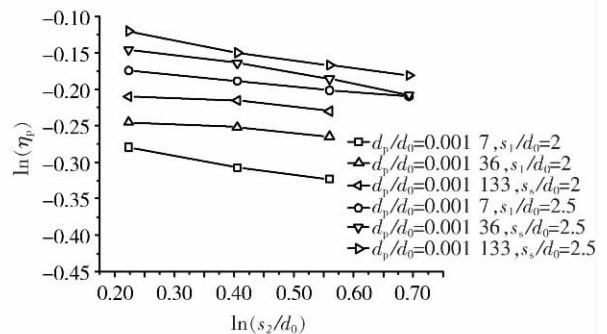


图 14 纵向间距对通过率的影响( $u=5$  m/s)

Fig.14 Passing rate of particles with different longitudinal spaces ( $u=5$  m/s)

## 2.4 颗粒入口速度的影响

图 15 展示了  $u$  对通过率的影响规律,介于颗粒入口速度与空气入口速度相同,在其他条件相同的条件下,随着颗粒入口速度的增大,撞击到首排管束表面反弹后的颗粒与入口速度较低的颗粒相比,反弹后的动能要更大,因此将会有更多颗粒撞击到相邻管列上,使得  $\eta_p$  值增大,碰撞率  $\eta_c$  值增大.

## 2.5 通过率 $\eta_p$ 关联式

将 66 个模拟结果进行分析和统计,并对  $\eta_p$ 、 $d_p/d_0$ 、 $s_1/d_0$ 、 $s_2/d_0$ 、 $Re$  进行线性回归分析,得出如下式:

$$\eta_p = 0.256581 \times \left(\frac{d_p}{d_0}\right)^{-0.1745} \times \left(\frac{s_1}{d_0}\right)^{0.61683} \times \left(\frac{s_2}{d_0}\right)^{-0.11149} \times Re^{-0.04399}. \quad (12)$$

该式使用范围:颗粒直径  $d_p = 20 \sim 120 \mu\text{m}$ ;管径  $d_0 = 38 \text{ mm}, 51 \text{ mm}, 57 \text{ mm}$ ;横向间距  $s_1/d_0 = 1.5 \sim$

3; 纵向间距  $s_2/d_0 = 1.25 \sim 2$ .

线性回归拟合的公式与模拟的结果误差为  $\pm 7\%$ .

由于  $\eta_p + \eta_c = 1$  结合线性拟合的通过率公式, 可以得到碰撞率  $\eta_c$  的公式:

$$\eta_c = 1 - \eta_p = 1 - 0.256581 \times \left(\frac{d_p}{d_0}\right)^{-0.1745} \times \left(\frac{s_1}{d_0}\right)^{0.61683} \times \left(\frac{s_2}{d_0}\right)^{-0.11149} \times Re^{-0.04399}. \quad (13)$$

### 3 结论

本文对烟气通过顺列光管管束时颗粒对管束的碰撞规律进行了数值计算研究, 线性拟合出了与管束横纵向管距、

颗粒入口速度、管束直径等影响因素相关的飞灰颗粒通过率和碰撞率的无因次关联式, 得出了如下结论:

(1) 管径、管束横间间距增大, 无形中增大了相邻管列间的自由流通区域和颗粒的横向飞行距离, 部分颗粒在未达到相邻管束就被烟气带走, 造成颗粒通过率增大, 碰撞率降低;

(2) 颗粒入口速度、管束纵向间距增大, 一方面增大颗粒反弹后的动能, 另一方面为颗粒再次碰撞争取了更多的时间, 因此造成颗粒通过率降低, 碰撞率增大.

该研究结果可为锅炉设计者以及设备检修者提供一定的参考依据.

### [参考文献] (References)

- [1] 白文莉, 吴忠诤. 纯低温水泥窑余热锅炉技术的开发[J]. 电站系统工程, 2006, 22(2): 39-40.  
Bai Wenli, Wu Zhongqian. Development of low temperature HRSG technology in cement kiln[J]. Power System Engineering, 2006, 22(2): 39-40. (in Chinese)
- [2] 马颖, 任峻, 李元东, 等. 冲蚀磨损研究的进展[J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 21-25.  
Ma Ying, Ren Jun, Li Yuandong, et al. Development of research on erosion of materials[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005, 31(1): 21-25. (in Chinese)
- [3] 王涌. CIRCOFLUID 型循环流化床锅炉受热面减轻磨损的方法[J]. 热力发电, 2006(2): 52-58.  
Wang Yong. The measures of wearing reduction in the heating surface of CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2006(2): 52-58. (in Chinese)
- [4] 闫洁, 李文春, 樊建人, 等. 绕流中颗粒与柱体碰撞和磨损的直接数值模拟[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(4): 589-593.  
Yan Jie, Li Wenchun, Fan Jianren, et al. Direct numerical simulation of collisions and erosions between particles and cylinder in circular wake[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(4): 589-593. (in Chinese)
- [5] 宋金刚, 陈克, 李坚, 等. 灰粒冲击换热器管壁碰撞与磨损的数值研究[J]. 能源工程, 2006(6): 17-20.  
Song Jingang, Chen Ke, Li Jian, et al. Numerical study on impaction and erosion between coal ash and heat exchanger wall[J]. Energy Engineering, 2006(6): 17-20. (in Chinese)
- [6] 李会雄, 陈听宽, 梁合飞, 等. 含尘气流中换热器管壁磨损特性的实验研究[J]. 动力工程, 2003, 23(4): 2538-2542, 2556.  
Li Huixiong, Chen Tingkuan, Luan Hefei, et al. Experimental research on the wear characteristics of heat transfer tubes in dusty gas flows[J]. Power Engineering, 2003, 23(4): 2538-2542, 2556. (in Chinese)
- [7] 樊建人, 周大冬, 岑可法. 煤灰粒子冲击管束的碰撞和磨损研究[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(4): 452-455.  
Fan Jianren, Zhou Dadong, Cen Kefa. Numerical study on impaction and erosion between coal ash and tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1989, 10(4): 452-455. (in Chinese)
- [8] Clift R. Bubble Drops and Particles[M]. New York: Academic Press, 1987.
- [9] Fan J R, Zhou D D, Jin J, et al. Numerical simulation of the tube erosion by particle impaction[J]. Wear, 1991, 142: 171-184.

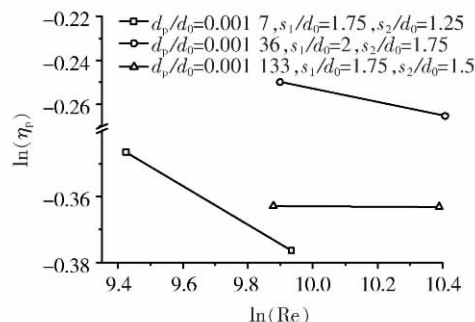


图 15 烟气速度对通过率的影响

Fig.15 Passing rate of particles with different velocities

[责任编辑: 刘 健]