

文章编号 1000-5013(2001)03-0303-06

工业炉旋风预燃器煤粉颗粒运动轨迹

肖美添 刘华信 朱 艳

(华侨大学材料科学与工程学院, 泉州 362011)

摘要 在预燃器冷态模型流场内, 考虑气流曳引力、重力和 Magnus 旋转升力, 建立颗粒的运动微分方程, 并考察颗粒与壁面相互碰撞过程. 采用龙格库塔法进行数值求解, 得到了不同粒径的颗粒在 4 种流场工况中的运动和停留时间. 经计算, 还可得出以下结论: (1) 颗粒的运动轨迹主要受气相流场分布、颗粒粒径和颗粒初始速度等因素的影响. (2) 颗粒粒径较小时, 可以忽略升力和重力的影响. 但大颗粒与壁面碰撞后, 必须连同考虑颗粒旋转及 Magnus 升力的作用. (3) 选择合适的入口一二次风量比(Q_2/Q_1)和颗粒的初始速度, 可延长颗粒在预燃器内的停留时间, 能分离大于 $30\ \mu\text{m}$ 的颗粒. 该结果能为粉煤旋风预燃器的优化设计提供理论依据.

关键词 旋风, 预燃器, 颗粒运动轨迹, 数值计算

中图分类号 TQ 018 : TQ 022.3 : TQ 534

文献标识码 A

燃煤工业炉运行时的能耗、烟尘污染和生产效率等, 与所用的预燃器密切相关. 而预燃器的设计与运行, 又需以器内的气固两相运动状况为依据. 此前有一些研究^[1,2]计算了旋流场中的颗粒运动轨迹, 但只采用轨迹模型计算颗粒与室壁碰撞之前的第 1 条运动轨迹, 而未进一步研究颗粒与器壁相互碰撞过程, 以及碰撞后的第 2, 3, ..., n 条运动轨迹. 显然, 这种情况不但不符合常温工作的旋流装置(如旋风分离器), 也不符合粉煤旋风预燃器中的实际情况. 本文以 HD-2 型工业炉煤粉旋风预燃器为对象, 在前期工作的基础上^[3,4], 计算预燃器内的存在颗粒与壁面碰撞时, 颗粒完整的三维运动轨迹. 它既可直接为优化预燃器设计与操作服务, 也可作为旋风炉、旋风分离器等其它旋流设备的理论探索 and 实际应用提供参考依据.

1 数学模型及求解

1.1 颗粒运动微分方程的建立及求解

粉煤颗粒在预燃器中运动时, 颗粒为稀相, 可不考虑颗粒间的相互作用. 颗粒受力种类很多, 通过对诸多力的分析、数量级的比较和文献[5]的推荐, 本文在计算中考虑了气流曳引力、重力和旋转升力. 在拉格朗日坐标系中考察颗粒运动状况, 其微分方程为

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \Sigma \mathbf{F} =$$

$$\frac{1}{2} C_D A_p \rho_g |v_g - v_p| (v_g - v_p) + m_p g + \frac{1}{8} \pi \rho_g d_p^3 (v_g - v_p) \times \omega, \quad (1)$$

式中 m, v, t, ρ 和 A 分别代表质量、速度、时间、密度和颗粒的球形迎风面积, 下标 p 和 g 分别代表颗粒和气流, C_D 为气体曳引阻力系数. 据估算, 在燃烧工况下, 燃料颗粒在室内的雷诺数 $Re = 4 \sim 65$, 而在冷模中, Re 可达到 10^3 的数量级. 查文献 [5] 阻力系数表, 本文采用下式计算阻力系数, 即

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^3}, \quad (2)$$

$$Re = \frac{|v_g - v_p| d_p}{\mu}, \quad (3)$$

式中 μ, r_p 和 d_p 分别表示气流的运动粘度、颗粒半径和直径. 在预燃器轴向、径向和切向对式 (1) 进行分解、降阶、无因次化, 使式 (1) 成为一阶微分方程组的初值问题. 在给定初始条件后, 对方程进行离散化. 采用四阶龙格——库塔法进行数值求解, 可得到该方程组的解, 即颗粒在不同时刻所处的位置.

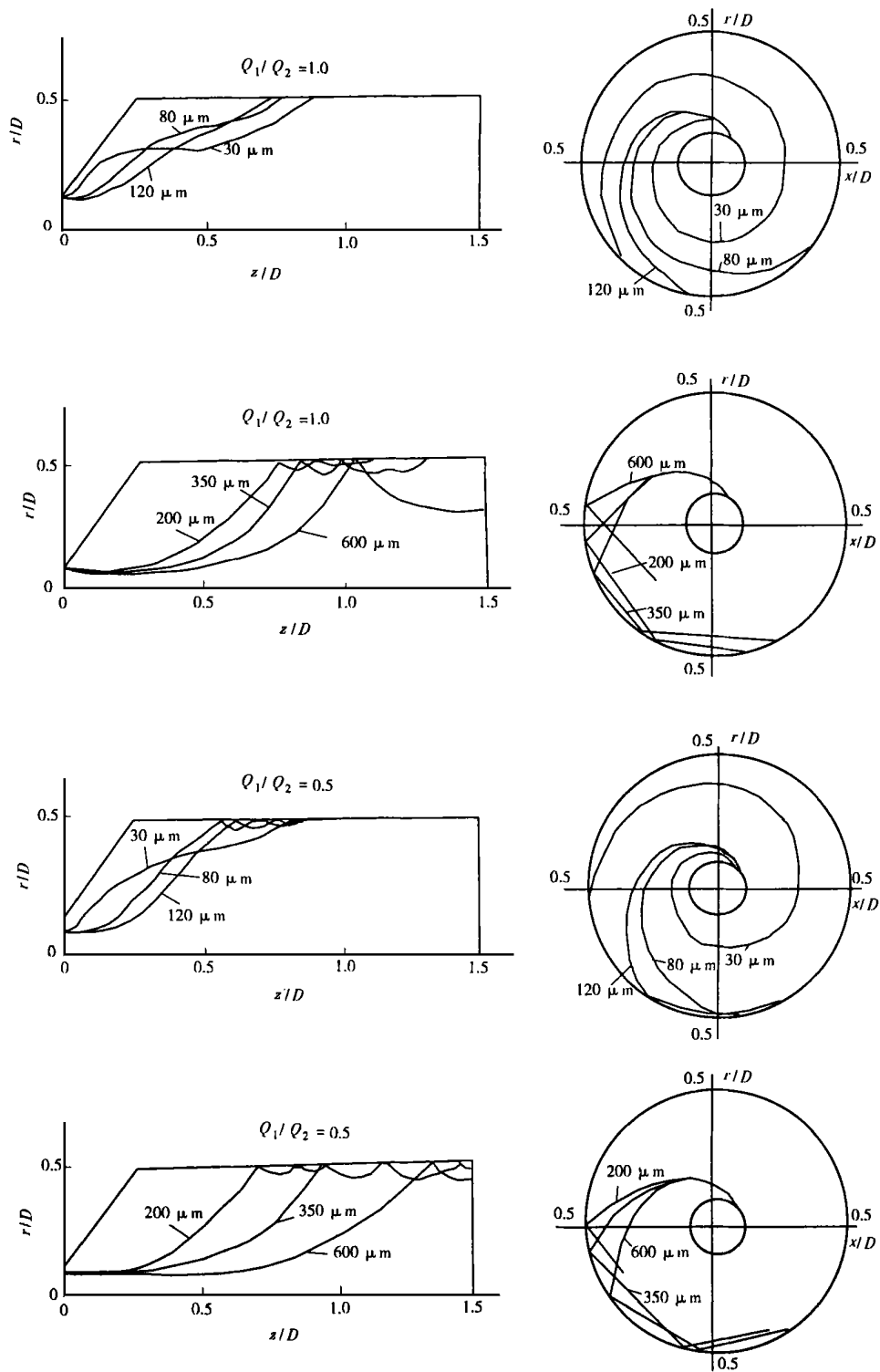
1.2 颗粒与壁面相互碰撞过程

预燃器内温度大约为 $600 \sim 700$ 左右, 固体燃料颗粒在器内只作预燃烧, 壁上不能形成熔渣膜. 当燃料颗粒打击到壁面时, 将被反弹重新进入预燃器空间运动. 所以, 为了描述颗粒在预燃器内的完整运动轨迹, 必须考虑颗粒与壁面碰撞过程和反弹后的运动情况. 粒子与壁面相互作用过程, 可采用三维非弹性碰撞模型来进行模拟. 对于非弹性碰撞, 可分为压缩和恢复两个阶段. 在碰撞前后, 颗粒的线速度和角速度变化可以通过列经典力学的冲量方程来求解^[6]. 颗粒从预燃器轴向入口进入的初始条件: x, y, z 的初始位置, 分别为 $0.042, 0, 0$; 其线速度 v ($m \cdot s^{-1}$), 分别为 $0, 0$ 和 8 ; 其角速度 ω ($r \cdot min^{-1}$), 则分别为 $1\ 000, 0, 1\ 000$.

2 计算结果及讨论分析

2.1 颗粒的运动轨迹

计算文献 [6] 所列的 4 种流场工况 (Q_2/Q_1) 下, 不同粒径颗粒在预燃器内的运动轨迹. 限于篇幅, 本文只列出部分计算结果, 如图 1 所示. 从计算结果可以看出 4 种现象. (1) 小于 $30\ \mu m$ 的颗粒较难着壁, 它们长时间在预燃器空间随气流作旋转运动, 有时也会有漂移现象. 在其它随机力或者湍流扩散等因素的影响下, 它们极可能随气流流出器外. $30 \sim 600\ \mu m$ 的颗粒能着壁, 其中 $30 \sim 120\ \mu m$ 颗粒的轴向着壁距离随粒径的增大而减小; $120 \sim 600\ \mu m$ 颗粒的着壁距离随着粒径的增大而增大; 更大粒径颗粒在来不及分离到壁面时, 就直接飞出室外. 这主要是由于该预燃器内中心存在有明显的回流区, 边缘因没有设回流挡板而呈正压区. 同时, 由于气流与大粒间的速度滑移较大, 故具有一定轴向初速的不同粒径颗粒在流场作用下, 表现出上述的运动结果. (2) 当初速相同的颗粒进入预燃器后, 小颗粒加速得快, 获得的切向速度大. 大颗粒虽然迎风面积 A_p 较大, 但由于其惯性大, 加速慢, 所获得的切向速度小. 周向运动距离主要随切向速度的增大而增大, 故颗粒沿圆周运动距离随着颗粒粒径的增大而减小. (3) 无论是轴向还是周向, 当颗粒与壁面碰撞后, 颗粒都能继续向前作弹跳运动, 其反弹“高度”随粒径的增大而增高. 小颗粒 ($d_p < 80\ \mu m$) 碰撞后, 径向速度衰减很快, 最后只沿着壁面滑动. (4) 对



于同一粒径的颗粒,在不同的流场中,颗粒运动规律基本相同.但是入口风量比 Q_2/Q_1 大(Q_1 不变, Q_2 增大),颗粒越容易着壁,着壁轴向位置 z/D 越小.工况 1 的风量比 Q_2/Q_1 为 1.0,气流切向速度较大,使得颗粒沿圆周方向走过的距离也较远.

2.2 颗粒初始速度对颗粒运动的影响

2.2.1 改变初始切向速度 图 2 为同一颗粒($d_p = 150 \mu\text{m}$)在不同初始切向速度($v_{\theta 0}$)时,与首次着壁位置 z/D 的关系图.可以看出,颗粒着壁位置 z/D 随着其初始切向速度增大而减小.这是由于初始切向速度大的颗粒所受的离心力大,颗粒容易分离,着壁位置 z/D 也就小.

2.2.2 改变初始径向速度 图 3 为同一颗粒($d_p = 150 \mu\text{m}$)在不同初始径向速度(v_{r0})时,与首次着壁位置 z/D 的关系图.由图可知,颗粒着壁位置 z/D 随径向初速度的增大而减小,增大颗粒径向速度,有利于提高颗粒的分离能力.

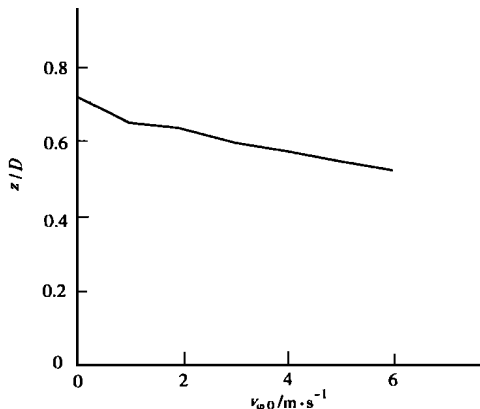


图 2 颗粒切向初速与着壁位置的关系

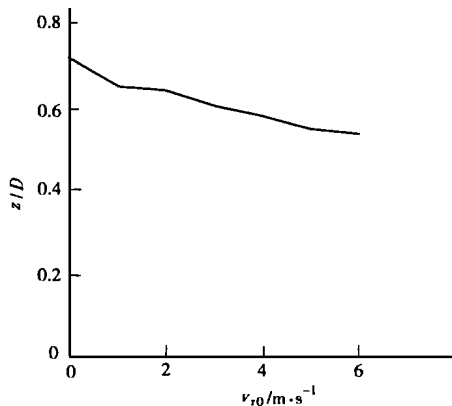


图 3 颗粒径向初速与着壁位置的关系

2.2.3 改变初始轴向速度 图 4 为同一颗粒($d_p = 150 \mu\text{m}$)在不同初始轴向速度(v_{z0})时,与首次着壁位置 z/D 的关系图.颗粒初始轴向速度对颗粒的着壁位置 z/D 有着直接的关系,颗粒初始轴向速度越大,着壁位置 z/D 也就越大.对于 HD 型预燃器($L/D = 1.0 \sim 1.2$),如果初始轴向速度大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有可能使得颗粒不着壁就飞出预燃器外;反之,当轴向初速很小时,颗粒可能很快就被分离到进口附近.此结果符合实际情况.当颗粒在全速度不变的情况下,切向速度和颗粒离心力随着轴向速度的增大而减小和下降,直至颗粒只向预燃器出口轴向方向运动.合适的颗粒初始速度和气流场分布,会延长颗粒在室内的停留时间.

2.3 停留时间

2.3.1 流场工况对颗粒停留时间的影响 颗粒的第 1 条运动轨迹的着壁时间(指第 1 次碰撞前)随粒径变化的关系,如图 5 所示.由图可知,当粒径小于 $30 \mu\text{m}$ 时,颗粒几乎不着壁;当粒径为 $40 \sim 120 \mu\text{m}$ 时,颗粒的着壁时间随着颗粒的粒径的增加而减小;当粒径大于 $120 \mu\text{m}$ 时,随粒径的增加,颗粒着壁时间有增大趋势.同一颗粒在不同流场工况(Q_2/Q_1)下,着壁时间不同,所以必须根据粒径范围来控制进风量 Q_2/Q_1 值.

2.3.2 轴向初速对颗粒停留时间的影响 颗粒的轴向初速对其首次着壁位置 z/D 的影响比较显著,同样影响颗粒在预燃器内的停留时间.在同一流场工况下,选择了 4 种初速 v_{z0} ,停留时间(t)与颗粒粒径的关系,如图 6 所示.由图可见,小于 $200 \mu\text{m}$ 的颗粒应选择轴向速度大

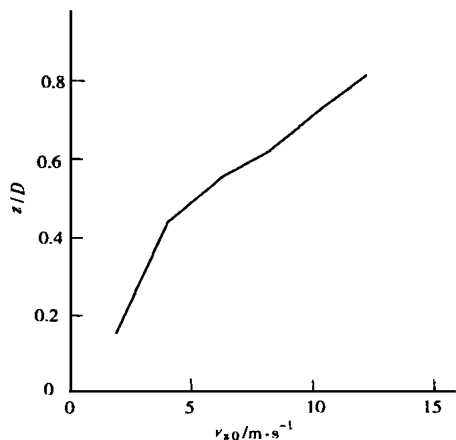


图4 轴向初始速度与着壁位置的关系

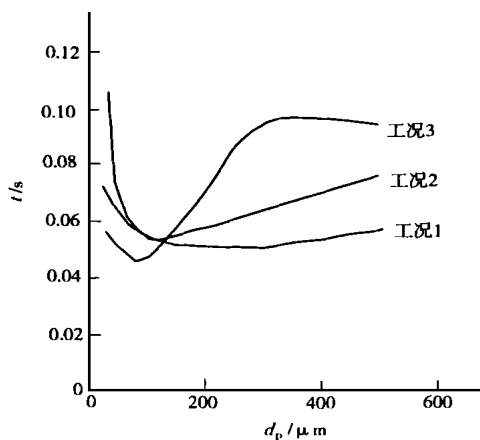


图5 着壁时间与粒径的关系

些, 避免进入预燃器后不久便着壁并沉积在入口附近, 停留时间短。大于 $200\ \mu\text{m}$ 的颗粒应选择轴向入口速度小一些, 方可延长在室内的停留时间, 使大颗粒粉煤也能得到较好的预燃烧。

2.4 颗粒在不同受力情况下的运动轨迹

图7为不同受力情况下, 颗粒的运动轨迹图。这里考虑颗粒的3种受力情况。(1) 颗粒只受气体曳引阻力。(2) 颗粒同时受气体曳引阻力和重力。(3) 颗粒同时受气体曳引阻力、重力

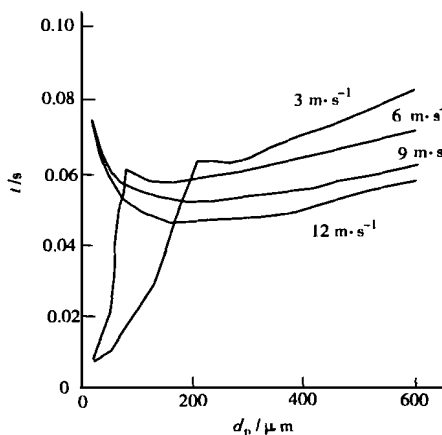


图6 着壁时间与粒径的关系

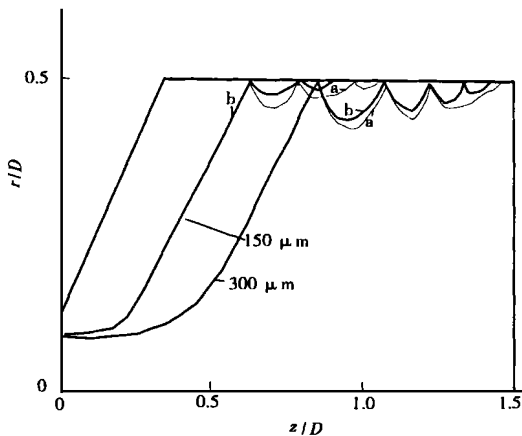


图7 不同受力情况下的颗粒运动轨迹图

和 Magnus 升力。颗粒在 (1), (2) 两种受力情况下的运动轨迹基本一致, 见图中曲线 a。曲线 b 是颗粒在 3 种受力情况下, 即在阻力、重力和升力共同作用下的运动轨迹。从图中可知, 颗粒运动轨迹主要受气体曳引阻力的影响。重力对粉煤颗粒的运动轨迹几乎没有影响。Magnus 升力在第 1 次碰撞前对颗粒运动轨迹影响不大, 或没有影响。但碰撞后, 由于颗粒旋转角速度急增, 其数量级可达 $10^4 \sim 10^5\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 使旋转升力明显增大。特别是大颗粒 (如大于 $300\ \mu\text{m}$), 颗粒的反弹“高度”明显降低, 径向速度衰减较快。当径向速度趋于零时, 如果这时切向速度、轴向速度不为零, 颗粒只能沿壁而滑动。所以, 要计算颗粒在预燃器内的完整运动轨迹, 必须连同考虑颗粒旋转和 Magnus 升力的作用。

3 结论

(1) 在相同流场条件下, 不同粒径的颗粒轴向着壁位置(z/D)不同. 较适合于 HD 型预燃器作预燃烧的粉煤粒径范围是 $30 \sim 600 \mu\text{m}$. (2) 颗粒着壁位置与颗粒初速关系密切, 尤其是轴向初速. 选择一二次风量比(Q_2/Q_1)时, 应视颗粒粒径大小而定, 方可延长颗粒在室内的停留时间. (3) 颗粒粒径较小时, 计算颗粒运动轨迹可以忽略升力和重力的影响. 但大颗粒与壁面碰撞后, 升力不能被忽略. 该研究结果在理论上有助于加深对有旋流和回流的气固两相流动原理的认识, 在工程应用上可为优化工业炉煤粉旋风燃烧器的设计与操作提供依据. 同时, 也可作为旋风炉、旋风分离器和其它旋流式设备的设计与操作, 提供参考数据与资料.

参 考 文 献

- 1 张永安, 李春生. 煤粉旋风燃烧器颗粒运动轨迹数学模拟实验研究[J]. 冶金能源, 1993, 12(1): 47 ~ 52
- 2 何 屏, 蔡乔生. 旋风燃烧器冷态模型颗粒运动轨迹计算[J]. 昆明理工大学学报, 1996, 21(1): 40 ~ 43
- 3 刘华信, 肖美添, 朱 艳等. 工业炉煤粉旋风预燃器的气相流场特性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 21(3): 313 ~ 318
- 4 肖美添. 旋风气固两相流动特性研究[D]. [学位论文]. 泉州: 华侨大学化工学院, 1999. 11 ~ 36
- 5 岑可法, 樊建人. 工程气固两相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 303 ~ 401
- 6 Sommerfeld M. Qiu H H. Characterization of particle-laden, confined swirling flows by phase-doppler anemometry and numerical calculation[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1993, 19(6): 1 093 ~ 1 127

Kinematic Trajectory of Pulverized Coal Particles in the Cyclone Precombustor of Industrial Furnace

Xiao Meitian Liu Huaxin Zhu Yan

(College of Mater. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract For reflecting kinematics of pulverized coal particles in the flow field of the cold state model of cyclone precombustor, a differential equation is formulated and solved numerically by adopting Runge Kutta method. In the equation, draw force of gas flow and gravity and Magnus lift force are taken into account. By investigating the effect from collision of particles with wall surface, kinematic trajectory and retention time of particles of different sizes in four operating modes are obtained. The following conclusions can also be obtained through computation: (a) Kinematic trajectory of particles is mainly influenced by such factors as distribution of gas-phase flow field, particle size and initial speed of particles. (b) For the smaller particles, the effect of lift force and gravity can be ignored; but for the larger particles and those collided with wall surface in particular, particle rotation and action of Magnus lift force must be considered altogether. (c) The retention time of particle in cyclone precombustor can be prolonged and particles larger than $30 \mu\text{m}$ can be separated by choosing appropriate ratio of primary air quantity and secondary ones at the inlet (Q_2/Q_1) and appropriate initial speed of particles. These results will provide the optimized design of cyclone precombustor for pulverized coal with theoretical basis.

Keywords cyclone precombustor; kinematic trajectory of particle; numerical solution