

针盘式粉碎机内气固两相流场数值研究

吴浩,张裕中

(江南大学 食品装备技术研究中心,江苏 无锡 214122)

摘要: 为了准确了解针盘式粉碎机的粉碎过程,气相采用重整化群(Renormalization Group, RNG) $k-\varepsilon$ 双方程模型,颗粒相采用随机颗粒轨道模型. 对针盘式粉碎机进行气固两相流的数值研究,并综合考虑颗粒受力、湍流扩散以及颗粒粒径分布三方面影响因素来对颗粒轨道模型进行精确的定义. 模拟结果表明,在转子销棒的高速撞击下,定子区附近会形成回流,有利于颗粒的再粉碎;小的定、转子周向间隙和径向间隙也有利于颗粒的多次粉碎;转子叶片与径向夹角减小,有利于出料. 本研究有助于针盘式粉碎机性能的分析及结构与工艺参数的优化.

关键词: 针盘式粉碎机;颗粒轨道模型;气固两相流;数值模拟

中图分类号: TS 203; TQ 051.9 **文献标识码:** A

0 引言

针盘式粉碎机能用于目前难以粉碎的物料,例如脂肪质、油质及黏性物料的粉碎^[1-2],其原理主要是粉碎机内定转子的多级销棒对物料颗粒进行碰撞粉碎. K. Husemann 等人曾采用输运模型对针盘式粉碎机的粉碎过程进行过研究^[3],但对粉碎腔内细小的微观扩散现象并不十分清楚,而采用流体动力学模型对该机型颗粒粉碎过程的模拟研究鲜见报道.

采用针盘式粉碎机对物料进行粉碎,粉碎机内部流场是典型的气固两相流. 研究两相流有 Euler-Lagrange 和 Euler-Euler 方法. 颗粒轨道模型是 Euler-Lagrange 方法体系下的两相流模型之一,与其他两相流模型相比,该模型的优点是无需构造颗粒的湍流模型,易于模拟有复杂经历(如颗粒的破碎、凝并)的颗粒相,且没有数值扩散,但该模型的计算过程却相对复杂^[4]. 随着计算流体力学的发展,颗粒轨道模型已经能够广泛地用于工程模拟. 笔者选用商业软件 Fluent 作为计算工具,模拟了粉碎腔内物料流场区域的流动状况. 对气相采用重整化群(RNG $k-\varepsilon$)双方程湍流模型,对颗粒相采用随机轨道模型,考虑颗粒间碰撞,颗粒与粉碎腔体内壁面的碰撞,研究了不同

转速、不同间隙、不同形状的粉碎部件对粉碎腔内气术的速度场、压力场变化以及颗粒相轨道变化的影响.

1 物理模型及网格划分

1.1 物理模型

模拟所用的主要设计参数取自台湾凌广工业股份有限公司的针盘式粉碎机. 其主要部件为定、转子模拟参数如表 1 所示.

表 1 模拟参数

Tab. 1 Parameters used in simulation

项目	数值
物料处理量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	30
进口气流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.5
定、转子销棒长度/mm	25
进口直径/mm	80
出口直径/mm	300
出口压力(表压)/Pa	0

因为销棒的长度是定、转盘径向尺寸的 1/10 以上,中心断面可以简化成二维问题进行模拟,经简化的计算模型如图 1 所示.

1.2 划分网格

为研究不同运行及结构参数(如转子转速、定转子销棒间隙、转子叶片与叶轮径向夹角)对粉碎腔内物料流场的影响,将前述几何结构进行

收稿日期:2008-01-20;修订日期:2008-03-19

作者简介:吴浩(1986-),男,江西新余人,江南大学硕士研究生,从事食品装备技术研究, E-mail: wuhao0510@126.com.

一定的变化,其参数如表 2 所示. 网格类型采用适应性较好的三角形网格,并采用分块结构化、局部加密的方法和网格自适应技术划分粉碎腔内网络,使计算精度得以提高. 不同结构的粉碎腔,网格数在 520 000 到 600 000 之间不等.

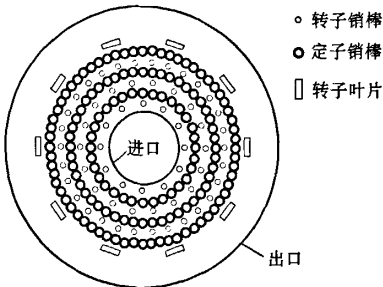


图 1 粉碎腔计算模型

Fig. 1 Numerical geometry model of comminution cavity

表 2 运行和结构参数

Tab. 2 Operation and structure parameters

参数	数值
转子转速/(r · min ⁻¹)	1 000, 3 500, 6 000, 12 000
转子销棒周向间隙/mm	18.3, 42.7
定子销棒径向间隙/mm	11, 22
转子叶片与径向夹角 α/(°)	0.45, 90

2 两相流模型

2.1 湍流模型

在定转子销棒的多重撞击作用下,粉碎腔内的湍流流动是强旋和带回流的,按工程近似计算,内部的旋流强度 $\Omega > 1.0$,属强旋流动($\Omega > 0.6$)^[5]. 重整化群 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型在 $k-\varepsilon$ 模型基础上,修正了湍流黏度及 ε 方程,反映了主流的时均变化率,能更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动^[6]. k 方程与 ε 方程见式(1)和(2).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} + G_b) + G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³; k 为流体的湍动能, kJ; u_i 为流体速度, m/s; μ_{eff} 为有效动力黏度, kg/(m · s); G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能, kJ; G_b 为浮力产生的湍流动能, kJ; Y_M 为可压缩湍流中过度扩散所产生的波动源项; S_k 、 S_ε 为自定义

源项,这里为 0; ε 为湍流耗散率, %; α_k 、 α_ε 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 均为常量, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_{3\varepsilon} = 1.92$; α_k 和 α_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数; R_ε 为强旋流的修正项; 其余参数物理意义见文献[5, 6].

2.2 固体颗粒的控制方程^[7]

在模拟中,将粉碎腔内的空气作为连续相处理,将物料颗粒作为离散相处理. 颗粒的作用力平衡方程在直角坐标系下的形式为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(\bar{u} - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{other} \quad (3)$$

$$F_D = \frac{18m}{r_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (4)$$

式中: \bar{u} 为气相的时均速度, m/s; u_p 为颗粒速度, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; ρ_p 为颗粒的密度, kg/m³; μ 为流体动力黏度, Pa · s; d_p 为颗粒直径, m; C_D 为阻力系数(无量纲),与颗粒雷诺数及颗粒形状有关; Re 为相对雷诺数(颗粒雷诺数),无量纲; F_{other} 为其它相间作用力, N.

等式(3)右端第一项为单位质量颗粒所受阻力,第二项为颗粒的重力与浮力之差,最后一项代表颗粒所受其它作用力,主要包括视质量力、布朗力、Saffman 升力等,视质量力主要作用于流体密度大于颗粒密度的情况,该力在计算中不予考虑,而布朗力和 Saffman 升力均对亚观粒子(直径 1 ~ 10 μm)而言,粉碎腔内物料颗粒的平均直径一般大于 10 μm,故不需要考虑这两种力.

2.3 射流源定义

Rosin 与 Rammler 等人通过对煤粉、水泥等物料粉碎实验的概率和统计理论的研究,归纳出用指数函数表达粒度分布的关系式^[8]. 在 Fluent 中,颗粒尺寸分布就使用 Rosin-Rammler 分布来描述象粉碎产物、粉尘等粒度分布范围广的颗粒群,该分布假定颗粒直径 d 与大于此直径的颗粒的质量分数 Y_d 之间存在指数关系:

$$Y_d = \exp[-(d/\bar{d})^n] \quad (5)$$

式中: n 是非均匀性指数; \bar{d} 为特征尺寸; 均可由粉碎实验数据得到.

由粉碎机供应商提供的物料(花生粉)实验数据中包括物料颗粒的累积粒径分布数据,从中选取有代表性的 10 个点进行拟合,可得到物料颗粒的 Rosin-Rammler 分布曲线,如图 2 所示. 由(5)式可知, \bar{d} 为 $Y_d = e^{-1} \approx 0.368$ 时的颗粒直径. 由图 2 得到的拟合曲线,可计算出 $\bar{d} = 144 \mu\text{m}$. n 值由式(6)给出.

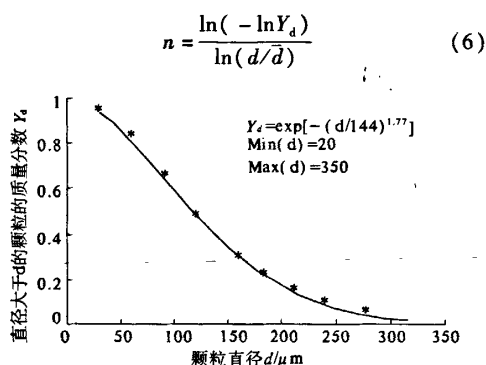


图2 入射颗粒粒径 Rosin-Rammler 分布

Fig. 2 Particle size Rosin-Rammler distribution

把 Y_d 与 d/\bar{d} 的数值代入(7)式可得到 n 值及其平均值 n_{aver} , 本算例中 $n_{aver} = 1.77$, 将算得的 \bar{d} 与 n_{aver} 输入 Fluent 中, 可得到颗粒的粒径分布。将射流源定义为面射流源, 材料为花生粉末, 实验测得其密度为 $1\,100.2\text{ kg/m}^3$, 质量流率为 0.5 kg/s , 进口速度为 0.5 m/s , 方向与重力方向一致。

2.4 颗粒-壁面撞击模型

国外采用高速摄像的方法及相关研究, 分析出颗粒粉碎的作用主要来自颗粒与壁面的撞击^[9], 其次是研磨、挤压及剪切。为研究方便, 可将颗粒外形简化为球状, 不考虑壁面粗糙度对颗粒运动行为的影响。而用壁面恢复系数来对颗粒碰撞前后的动量变化加以修正。根据 Tabakoff 和 Malak 等人的研究^[10], 颗粒与壁面撞击的壁面恢复系数的表达式如下

$$e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}} = 0.993 - 1.76\beta + 1.56\beta^2 - 0.49\beta^3 \quad (7)$$

$$e_t = \frac{v_{2,t}}{v_{1,t}} = 0.998 - 1.66\beta + 2.11\beta^2 - 0.67\beta^3 \quad (8)$$

式中: e_n 为法向恢复系数; e_t 为切向恢复系数; v_n 为垂直壁面的法向速度分量; v_t 为垂直壁面的切向速度分量, 下标 1、2 分别表示碰撞前后的量; β 为入射角。上述 2 个表达式的系数在 Fluent 壁面条件中给予设定, 以确定颗粒与壁面撞击前后的动量变化。而对颗粒撞击壁面破碎现象做了如下假定: 当颗粒与壁面发生碰撞时, 颗粒的粒径未发生变化; 不考虑相间的曳力及动量的传输对颗粒轨道的影响。

3 数值计算方法与边界条件

数值计算是利用基于有限体积法和非结构网格划分原理的 Fluent 商业 CFD 软件进行求解。选

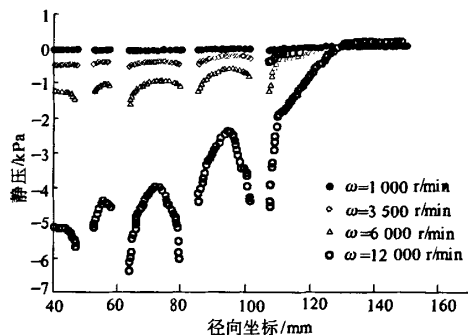
用 2D、分离式、隐式求解模型。压力采用 Standard 离散格式。动量方程, 湍动能方程和湍动能耗散率方程均采用精度较高的二阶离散格式, 压力和速度场的求解使用基于交错网格的 Simplec 算法, 迭代收敛标准设置在 10^{-4} 。经过 2 000 ~ 6 000 次迭代, 计算结果收敛。

入口边界选用速度进口, 入口气流速度为 0.5 m/s ; 出口边界为压力出口, 为标准大气压。定子及粉碎腔壁面设定为固壁边界, 转子及叶片壁面设定为旋转壁面边界; 假设壁面是绝热的, 在流体与壁面之间没有热交换。流体在定子间区域定义为静止区域, 转子区域定义为旋转区域, 定转子交界区域定义为内部边界。

4 计算结果分析与讨论

4.1 不同转子转速下压力和速度分布

当转子的转速发生变化时, 粉碎腔内的压力及速度分布会产生明显不同。图 3 为叶片与径向的夹角 $\alpha = 90^\circ$, 转子转速分别为 1 000、3 500、6 000、12 000 r/min 时粉碎腔内的压力分布。当转子转速由 1 000 r/min 升高至 12 000 r/min 时, 粉碎腔内产生的负压逐渐变大, 使得物料能够从进口吸入。而进口附近的负压平均值的大小决定了物料吸入粉碎腔的难易程度。负压值越大, 物料吸入越容易。图上曲线间断处的数值反映的是转子销棒壁面附近的负压。转子转速提高使得此处负压增大。负压的增大能够使物料更容易吸入到转子销棒粉碎区。图 4 给出了 $\alpha = 90^\circ$, 转子转速分别为 1 000、3 500、6 000、12 000 r/min 时粉碎腔内的速度分布。随着转速提高, 流体的线速度可以达到 120 m/s 。高速的气流迫使物料颗粒与定转子销棒发生剧烈的碰撞, 因而使物料受到强烈的撞击、剪切以及挤压等作用而得以粉碎。

图3 $\alpha = 90^\circ$, 不同转速下压力分布特征Fig. 3 $\alpha = 90^\circ$, Distribution characteristic of the pressure at different rotor speed

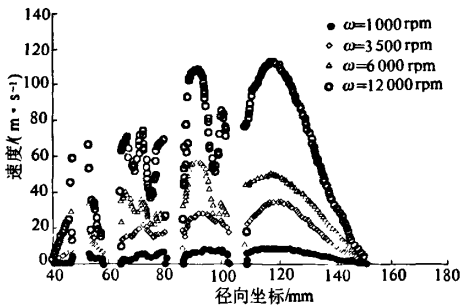


图 4 $\alpha = 90^\circ$,不同转速下速度分布特征

Fig.4 $\alpha = 90^\circ$, Distribution characteristic of the gas phase velocity at different rotor speed

4.2 不同定子周向间隙下压力和速度分布

图 5 和图 6 给出了 6 000 r/min 时, $\alpha = 90^\circ$, 定转子的周向间隙分别为 18.3、42.7 mm 下压力及速度的分布情况。在相同转子盘径下,周向间隙减小,是通过增加转子同圈下销棒的个数,使得进口及粉碎区内负压增加,因而在进口处产生的“吸料”作用更加明显。同时,由于周向间隙的减小,使得物料撞击定转子销棒壁面的几率得以提高,增加了同转速下定转子的粉碎效率。

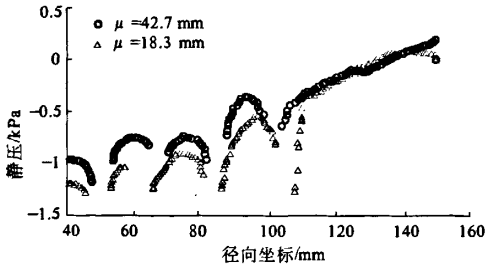


图 5 $\alpha = 90^\circ$,不同周向间隙下压力分布特征

Fig.5 $\alpha = 90^\circ$, Distribution characteristic of the

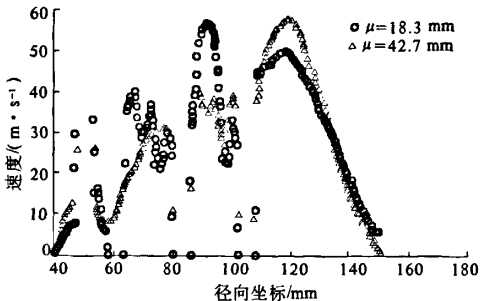


图 6 $\alpha = 90^\circ$,不同周向间隙下速度分布特征

Fig.6 $\alpha = 90^\circ$, Distribution characteristic of the gas phase velocity in different circular gap

4.3 不同径向间隙下压力和速度分布

图 7 和图 8 反映了 6 000 rpm 时, $\alpha = 90^\circ$, 定

转子的径向间隙分别为 11、22 mm 下压力及速度的分布情况。在转子盘径一定的情况下,通过增加销棒的圈数(定转子各增加一圈销棒),实现径向间隙减小,能够增大物料受到的剪切及挤压作用力,使物料能够获得更好的微观粉碎效果;同时能够增大进口处及粉碎区内的负压,提高了同转速下物料的粉碎效率。图 9 显示了定转子区域的速度矢量图。物料在经过右边定子区域时,形成回流。回流的产生,一方面使得没有充分粉碎的物料能够重复进行粉碎,获得粉碎能;另一方面,对于符合粒度要求的物料也会在定子区域重复进行粉碎,一定程度上增加了粉碎机的功耗。

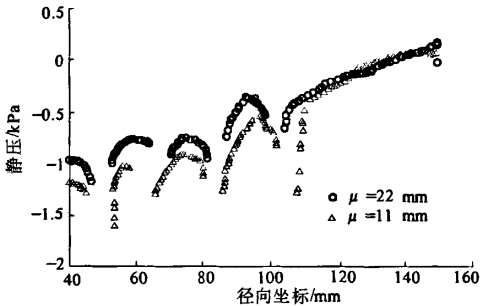


图 7 $\alpha = 90^\circ$,不同径向间隙下压力分布特征

Fig.7 $\alpha = 90^\circ$, Distribution characteristic of the pressure in different radial gap

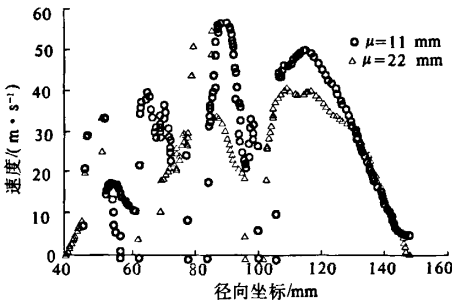


图 8 $\alpha = 90^\circ$,不同径向间隙下速度分布特征

Fig.8 $\alpha = 90^\circ$, Distribution characteristic of the gas phase velocity in different radial gap

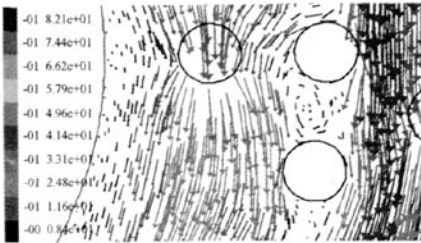


图 9 定转子区域速度矢量图

Fig.9 Velocity arrows in the stator and rotor region

4.4 不同转子叶片角度下压力和速度分布

图 10 比较了同转速(6 000 r/min)下,转子叶片与径向的夹角分别 90°、45°及 0°下叶片附近压力的大小. 随着夹角的减小,叶片前角的压力增大. 前角压力增大,有利于物料高速甩出,同时也会由于空气阻力的增加而加大功耗. 但是对于此类粉碎机有筛网的粉碎情况,小的径向夹角($0^\circ < \alpha < 45^\circ$)更有利于出料. 图 11、12 给出了同转速(6 000 r/min)下,转子叶片与径向的夹角分别 0°、45°及 90°下压力及速度的分布情况. 当叶片与径向的夹角 α 减小时,进口附近负压增大,增强了进口“吸料”效果. 在 α 由 45°减小至 0°时,这种现象更为明显. 而气流速度却产生了一定下降,则可能是由于空气阻力增加的缘故,会使得粉碎效率有所下降.

4.5 颗粒相轨迹的追踪

图 13 为单颗粒轨道随弛豫时间的变化情况. 由于颗粒的轨道是随机跟踪的,因此考虑了湍流对颗粒的影响^[7]. 可以看出,颗粒在定子区域附近发生了回流. 一般来说,颗粒在定转子销棒间发生的回流有利于颗粒的多次粉碎. 但在粉碎区的外缘,即叶片附近区域,回流应当减小,采取的办法就是如前面所分析的,减小叶片与径向的夹角($0^\circ < \alpha < 45^\circ$),增大叶片前角正压,有利于出料.

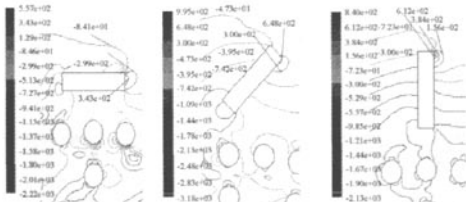


图 10 6 000 r/min, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ 及 $\alpha = 0^\circ$ 叶片附近压力

Fig. 10 6 000 r/min, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ and $\alpha = 0^\circ$, pressure(Pa) around blade

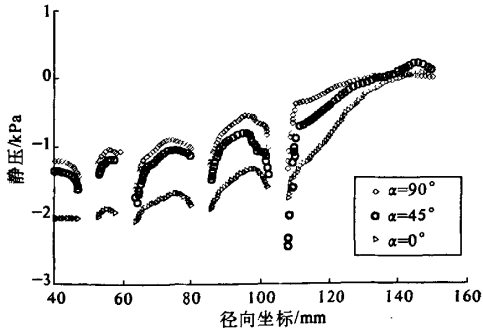


图 11 不同角度的叶片下压力分布特征

Fig. 11 Distribution characteristic of the pressure with different angle blade

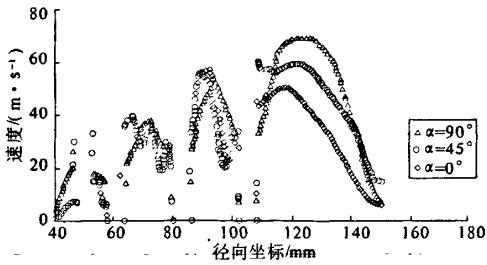


图 12 不同角度的叶片下速度分布特征

Fig. 12 Distribution characteristic of the gas phase velocity with different angle blade

图 14 为颗粒群平均弛豫时间随转速的变化. 转速提高,颗粒群的平均弛豫时间减小,单位时间内处理量提高. 可以看出,这种趋势却随着转速的提高不断下降,因此一味追求高速旋转使生产效率提高也是不可取的. 并且,对于不同物料,转速也有不同的使用范围. 对于硬脆性物料,例如矿石、金属颗粒,高速旋转碰撞有利于粉碎;但对于花生、药材等塑性、热敏性颗粒,高速碰撞会使得颗粒获得的能量大于其破碎需要的能量,多余的能量转化为热能,使物料产生粘结,粒度难以粉碎,因此对于不同物料,转速需要控制在不同的范围内,且具体范围需要通过实验确定.

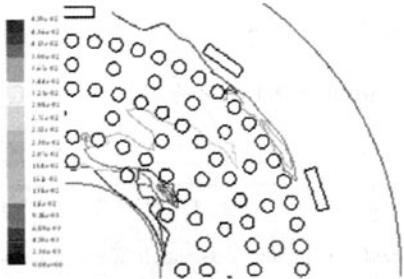


图 13 单个颗粒轨道弛豫时间

Fig. 13 Single particle trajectory residence time

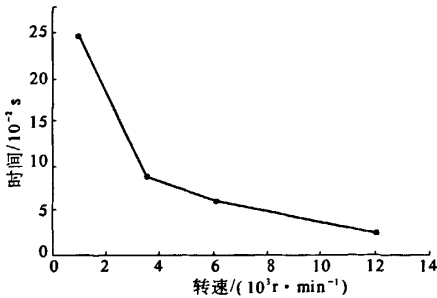


图 14 颗粒群平均弛豫时间随转速的变化

Fig. 14 The change of particles average residence time with rotor speed

5 总结

根据针盘式粉碎机粉碎部件的实际结构和工作参数,对粉碎腔内的气固两相流场进行了数值研究。气相采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程模型,颗粒相采用随机轨道模型。得出了不同转速、定转子及叶片结构下粉碎腔内的流场分布和颗粒运动轨迹,为分析粉碎腔内的物料粉碎特性提供了可视化描述,也为该类粉碎机的结构及参数优化提供了理论依据,主要结论为:

(1)对于数量多且属性复杂的颗粒,Fluent 能够从颗粒受力、湍流扩散作用以及颗粒粒径分布等方面进行精确定义。

(2)在转子销棒的高速撞击下,物料颗粒在定子区会形成回流,有利于颗粒的再粉碎;小的定、转子周向间隙和径向间隙也有利于颗粒的多次粉碎,提高粉碎效率;转子叶片与径向夹角应减小,有利于出料。

(3)对于不同物料,粉碎机的转速应控制在与其结构尺寸相匹配的范围内,可以达到更好的粉碎效果。

参考文献:

[1] 神保元二,王少儒. 粉碎[M]. 孙成林,译. 北京:中

国建筑工业出版社,1985: 64-65.

- [2] 盖国胜. 超细粉碎分级技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2000: 140-141.
- [3] 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000: 39-43.
- [4] 王 维,李佑楚. 颗粒流体两相流模型研究进展[J]. 化学进展,2000,12(2): 208-217.
- [5] LAUNDER B E, SPALDING D B. Mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press,1972.
- [6] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics; the finite volume method [M]. New York: Academic Press, 1995:41-65.
- [7] Fluent 6.0 User's Guide[CP]. December 2001:19-6~19-14.
- [8] 陆厚根. 粉体工程导论[M]. 上海:同济大学出版社,1993:17-21.
- [9] IOANNIS G C, MICHAEL J, MARK W Y. Numerical investigation of a developmental pneumatically fed impact pulveriser[J]. Applied Mathematical Modelling, 2006,30: 1180-1195.
- [10] TABAKOFF W, MALAK M F, HAMED A. Laser measurements of solid-particles rebound parameters impacting on 2024 aluminium and 6Al-4V titanium alloys[J]. AIAA,1987,25(5):721-726.

Numerical Investigation of the Gas-solid Two-phase Flow in a Pin Pulverizer

WU Hao, ZHANG Yu-Zhong

(Research Center of Food Equipment, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A numerical research of the gas-solid two-phase flow in a pin pulverizer is presented. The gas phase is expressed with the renormalization group $k-\varepsilon$ two-equation model, and the particle phase is expressed with the particle stochastic trajectory model. The model's precise definition, including force analysis of solid particle, gas turbulent dispersion, and particle size distribution, is presented. The results indicate that the recirculation area can be formed around the stator region under impact of the rotor at high speed, which benefits particles' grinding. Small circular and radial gap is also in favor of repeated comminution among the particles. Decreasing the angle between rotor blade and radial direction helps to discharge. It can thus be seen that useful information has been provided in this paper for analyzing the performance of the pin pulverizer and optimizing the geometry structure and process parameter of the pulverizer.

Key words: pin pulverizer; particle trajectory model; gas-solid two-phase flow; numerical simulation