

针盘式粉碎机圆柱齿钉二维绕流数值模拟

黄 鹏, 李双跃*, 刁 雄

(西南科技大学制造科学与工程学院, 绵阳 621010)

摘 要: 为了分析针盘式粉碎机静圆柱齿钉的气动力学特性, 利用计算流体力学(diesel engine emission experiments, CFD)方法, 对粉碎机中二维单圆柱齿钉的绕流问题进行研究。在进行计算之前, 采用均匀来流中的圆柱绕流问题对计算模型进行验证, 并且对数值计算中的网格和时间步长独立性均进行了算例考核。结果表明: 在雷诺数小于 200 的范围内, 流动出现 3 种不同的流态; 在稳定分离区中圆柱齿钉上的附着涡最大长度约等于齿钉直径, 且附着涡随雷诺数增加出现了消亡的现象; 在不稳定泄涡区流动只在较小的雷诺下呈现出周期性, 圆柱齿钉上受到流体周期性的升力和阻力均很小, 在较大雷诺数下, 流动的无量纲频率增加, 且不再由单个频率主导, 出现了一个频带; 在不稳定泄涡区的无量纲频率比均匀来流中的圆柱绕流情况小一个数量级。该文为研究粉碎机圆柱齿钉在高雷诺数下的受力情况提供了参考。

关键词: 流场, 数据模拟, 计算机流体力学, 针盘式粉碎机, 圆柱绕流

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.005

中图分类号: X712

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0027-08

黄 鹏, 李双跃, 刁 雄. 针盘式粉碎机圆柱齿钉二维绕流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 27-34.
Huang Peng, Li Shuangyue, Diao Xiong. Numerical simulation of flow around circular cylinder in pin pulverizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 27-34. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国具有丰富的农作物秸秆资源^[1]。如何将这些废弃的秸秆资源变废为宝, 将资源充分利用已成为各国研究的一个重要课题^[2-5]。其中一个十分有前景的处理办法是把这些秸秆、木屑等粉碎到一定的细度作为原料来生产人造板^[6-9]。

针盘式粉碎机(又叫销棒式粉碎机)由于其结构简单, 占地面积小, 操作方便, 生产能力大, 能耗低, 超细程度好, 生产成本低, 易拆卸保养, 价格低廉等优点被广泛应用于各个行业。对于秸秆、木屑等韧性较强的生物质材料, 可以将圆柱形齿钉改为三角形、柱形或刀片来对物料进行切割; 同时还可以减小齿钉之间的径向间隙, 增强齿钉之间的气流的剪切作用, 使物料被撕裂, 从而达到粉碎效果。

针盘式粉碎机由于其广泛的应用, 得到了许多学者的关注^[10-12], 但用流体力学模型来研究粉碎机内部流体流动规律研究却少见报道。在已报道的研究中, 刘东升等^[13]建立了粉碎腔的流体力学模型, 研究了流场介质分别为液体和流体 2 种情况下流场的运动机理。但他

只计算了销棒之间所围成的流体区域, 没有考虑销棒在整个流场中所造成的影响。吴浩^[14]对针盘式粉碎机进行了气固两相的数值研究, 根据粉碎机的结构和工艺参数的变化, 研究的粉碎区速度场和压力场的变化情况。但是他只是对二维稳态情况进行数值模拟, 而根据均匀来流中圆柱绕流的研究来看, 当雷诺数达到一定的临界值($Re=49$)之后, 流态将是瞬态的, 并且在雷诺数达到一定值($Re=150$)之后, 流动进入转捩区, 并且呈现出明显的三维性^[15]。

圆柱绕流作为流体力学中的经典问题, 国内外许多学者都对这个问题进行了大量的研究^[16-25], 得到了许多有价值的数值计算和试验数据。这些成果也成为后来的研究者继续研究圆柱绕流的机理、验证计算模型的借鉴。但是, 在针盘式粉碎机中的齿钉绕流问题的研究还未见相关报道。

为了更好地理解粉碎机内部的流动情况, 本文按照文献^[14]将物理模型进行简化, 且只考虑较简单的单个静止圆柱齿钉的绕流情况, 对不同雷诺数下流场的流动状态和圆柱齿钉在流场中的受力情况进行研究。考虑到流动可能出现的三维性和计算能力, 本文只关注雷诺数 $Re \leq 200$ 的齿钉绕流情况, 揭示流场运动规律。

1 数值计算方法

1.1 控制方程及其求解

对于不考虑热传导的二维非定常层流不可压缩黏性流动, 其控制方程为连续性方程和动量方程, 在直角坐标系下分别为

收稿日期: 2011-12-02 修订日期: 2012-02-20

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAA04B04); 国家科技计划(09C2621502330)

作者简介: 黄 鹏(1987-), 男, 四川泸州人, 主要从事粉体装备的研究。绵阳 西南科技大学制造科学与工程学院, 621010。

Email: huangtiefei@126.com

※通信作者: 李双跃(1958-), 女, 四川隆昌人, 教授, 主要从事粉体制备技术及装备、制造业信息化方面的研究。绵阳 西南科技大学制造科学与工程学院, 621010。Email: shuangyue-58@263.net

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

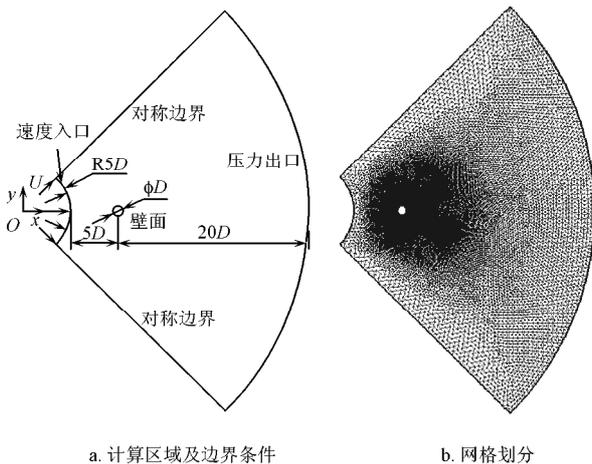
式中, u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度分量, m/s ; t 为流动时间, s ; ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; p 为压强, Pa ; ν 为流体的运动黏度, m^2/s 。对控制方程采用基于有限体积法的非定常流场压力和速度耦合求解的 SIMPLE 算法。时间项采用二阶精度的隐式格式; 压力项和动量项的离散分别采用二阶格式和二阶迎风格式。

1.2 计算模型及边界条件

将粉碎机的粉碎腔简化为二维情况, 且仅取 1/4 圆周, 在所取的区域中安排一个固定的圆柱齿钉, 如图 1a。来流垂直于进口的 1/4 圆周; 圆柱齿钉的直径 $D=0.01 \text{ m}$; 进口与圆柱中心的距离为 $5D$; 出口与圆柱齿钉中心的距离为 $20D$ 。流动入口设为速度入口; 出口为压力出口, 出口相对压力为 0; 上、下均为对称边界; 圆柱面为壁面。

1.3 网格的划分

在进行数值计算之前, 要先对图 1a 所示的计算区域进行网格划分。考虑到计算区域边界的不规则性和以后研究柱体群的气动力学特性时内部壁面的复杂性, 此处采用非结构网格进行划分。进行网格划分时, 对圆柱周围流场变化剧烈的区域用较密的网格, 其他区域则用较稀疏的网格, 如图 1b。



注: U 为进口速度, m/s ; D 为圆柱齿钉的直径, m 。

图 1 计算区域及网格划分

Fig.1 Computational domain and mesh

为了验证网格对计算的无关性, 设计了三套网格。其主要区别在于圆柱上所安排的节点数, 保证网格能较好地捕捉流动特征。三套网格的具体参数见表 1。

表 1 三套网格圆柱上节点数和总网格数

Table 1 Node number on circular cylinder and total cell number in three cases

算例	圆柱上节点数	总网格数
1	100	64 625
2	150	88 869
3	180	118 423

2 计算结果

2.1 算例验证

为了验证所采用的模型和网格的正确性, 参考文献 [16] 中雷诺数 $Re=200$ 的情况, 采用 Fluent 求解器, 对均匀来流中单圆柱绕流的算例对模型和网格划分方式进行考核。在此算例中, 网格的划分仍采用非结构网格, 圆柱上布置 180 个节点, 采用 SIMPLE 算法, 方程中各项的离散仍按照前文所述进行离散。计算流体介质为空气, 密度为 1.225 kg/m^3 ; 黏度为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$; 来流速度为 0.146 m/s 。计算时的时间步长按文献 [18] 取大约为涡周期周期的 0.01 倍, 此处取 0.005 s 。残差控制为 1×10^{-5} 。

将圆柱齿钉所受的升、阻力和泄涡频率无量纲化, 得到无量纲的升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 和斯特努哈数 St 定义如下

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2 D} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 D} \quad (5)$$

$$St = \frac{fD}{U} \quad (6)$$

式中, F_L 、 F_D 为单位长度上圆柱所受的升力和阻力, N ; ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; U 为来流速度, m/s ; D 为圆柱的直径, m ; f 为圆柱上漩涡的脱落频率, Hz 。此处主要考察以上 3 个宏观无量纲量计算的精确性来验证计算模型。验证算例所得到的 C_L 、 C_D 和 St 同试验值或计算值的对比情况见表 2。

表 2 $Re=200$ 时的阻力系数、升力系数和斯特努哈数

Table 2 Drag and lift coefficients and strouhal number for a cylinder at $Re=200$

算例	C_D		C_L		St
	max	min	max	min	
本文算例	1.501	1.399	0.746	-0.747	0.205
G.X. Wu and Z.Z Hu ^[16]	1.384	1.322	0.586	-0.546	0.190
Farrane et al. ^[18]	1.360(average)		1.420(peak-peak)		0.196
Braza et al. ^[19]	1.320(average)		1.550(peak-peak)		0.200
Roshko(experiment) ^[20]					0.190
Williamson(experiment) ^[21]					0.198
Lecoince and Piquet ^[22]	1.500	1.420	0.700	-0.700	0.230
Chen et.al. ^[23]	1.370	1.290	0.720	-0.720	0.200
B.N Rajani et al. ^[24]	1.380	1.294	0.610	-0.610	0.196

注: C_D 为阻力系数; C_L 为升力系数; St 为斯托努哈数; max 和 min 分别表示最大值和最小值。

从表 2 中的对比可知, 虽然计算结果相对已报道的结果偏大, 但是这个精度可以满足工程应用。同时本文

所用的网格是非结构网格，而已报道的数值计算结果基本都是采用结构网格计算；从结构网格和非结构网格所用的网格数来看，非结构网格所需要的网格数量要大得多。因此可以知道，非结构网格对复杂流动区域的适应性是以牺牲部分计算精度和增加计算量为代价的。从对比情况来看，本文所采用的计算模型对粉碎机内部流场的预测具有足够的精度。

2.2 粉碎机固定单圆柱流场计算结果

首先对表 1 中所示的 3 套网格进行网格计算无关性的验证。计算在 $Re=100$ 时进行，流体的物性参数和圆柱的结构参数均与验证算例相同。由计算结果知，圆柱的阻力系数虽然呈现出周期性变化，但变化很小，因此采用阻力系数的时程平均值来考察网格。3 套网格的计算结果见表 3。

表 3 三套网格的计算结果
Table 3 Computational results of three cases

算例	C_D		C_L		St $\times 10^{-2}$
	time-average	max	min	min	
1	0.223	0.003	-0.002	-0.002	1.083
2	0.222	0.002	-0.002	-0.002	1.067
3	0.222	0.002	-0.002	-0.002	1.054

注： C_D 为阻力系数； C_L 为升力系数； St 为斯托努哈数；time-average 表示时程平均值；max 和 min 分别表示最大值和最小值。

由表 3 可知，第二套网格和第三套网格计算的 C_D 的时均值和 C_L 的最大最小值均不再变化，而 St 的变化也只有 1%，故认为网格达到第二套网格的密度即可对流场进行较准确的预测，再增加网格的数量也对计算没有影响。之后的计算也在第二套网格上进行。

考虑时间步长对计算的影响，取 0.2、0.1、0.05 s 3 个时间步长对第二套网格进行计算，考察 St 的变化见表 4。由表 4 可知，在时间步长取 0.1 和 0.05 s 时，2 种情况的计算结果基本一样，可以认为更小的时间步长也不再对结果有影响。考虑到计算的经济性，之后的算例均取时间步长为 0.1 s 进行计算。

表 4 时间步长对计算的影响
Table 4 Influence of time step on calculation

Δt	C_D		C_L		St $\times 10^{-2}$
	time-average	max	min	min	
0.2	0.222	0.002	-0.003	-0.003	1.053
0.1	0.222	0.002	-0.002	-0.002	1.067
0.05	0.221	0.002	-0.002	-0.002	1.067

注： C_D 为阻力系数； C_L 为升力系数； St 为斯托努哈数； Δt 表示时间步长，s；time-average 表示时程平均值；max 和 min 分别表示最大值和最小值。

对 Re 在 200 以下的情况进行计算，与文献[24]中的情况类似，出现了流态不同的 3 个区：蠕流区，稳定分离区，不稳定泄流区。

2.2.1 蠕流区

表 5 中列出了 Re 在 0.1~4 内，圆柱齿钉前驻点的压力系数 C_{p0} ，后驻点的压力系数 C_{pb} ，阻力系数 C_D 随雷诺数的变化情况。按照文献[25]对分离角的定义，寻求在此

种情况下，流动开始发生分离的临界雷诺数。计算表明，大约在 $Re=4.1$ 时流动开始发生分离。

表 5 圆柱齿钉前、后驻点压力系数和阻力系数
Table 5 Pressure coefficients of front stagnation and back stagnation and drag coefficients

Re	C_{p0}	C_{pb}	C_D
0.1	27.29	-15.95	68.42
0.5	5.44	-3.27	13.70
1	2.72	-1.65	6.82
2	1.41	-0.80	3.38
3	1.00	-0.55	2.31
4	0.80	-0.44	1.81

注： Re 为雷诺数； C_{p0} 为圆柱齿钉前驻点的压力系数； C_{pb} 为后驻点的压力系数； C_D 为阻力系数。

2.2.2 稳定分离区

以上已指出，流动大约在 $Re=4.1$ 时流动开始分离。之后在大约 $Re=88$ 时，流动开始呈现出周期性。 Re 在这 2 种流态之间的流动都是稳态的分离流。而根据计算结果，在稳定分离区的流动又出现 2 种不同的情况，即圆柱齿钉后有闭合涡和圆柱齿钉后无闭合涡。

计算结果表明当 $4.1 < Re < 9$ 时，圆柱齿钉后有一对对称的漩涡。其流线如图 2 所示，当 $Re=5$ 时，由于气体来流速度垂直于进口，因此气体在计算区域中向四周扩散。当气体流过圆柱齿钉时，齿钉后面形成负压区，两边的气体由于压力梯度的作用向中间流动，从而形成了一个闭合的区域，流动分离形成的一对漩涡也在闭合区域中形成。 $Re=6$ 时，圆柱齿钉后面的一对漩涡长度增加，同时在下流也形成 2 个较大的对称的涡，对称涡前方出现 1 个驻点。这是因为随着 Re 的增大，气体的惯性力增加，气体在压力梯度的作用下，运动了较长的距离才形成了闭合涡。随着 Re 越来越大，惯性力也越来越大，由于粉碎机结构的限制，计算区域内压力梯度已不能将气体推到水平的对称轴上，而由计算域外的气体进入补充，在出口边界形成回流，驻点与进口的距离逐渐减小，图 2c、d。当 Re 达到一定程度时，回流气体的速度增大，进而破坏圆柱齿钉后的闭合对称涡，直到后面的对称涡消失，图 2e、f。闭合涡的长度 L 如图 3，可以知道在该雷诺数范围内，闭合涡的长度并不是呈线性增长，而是先缓慢增长然后迅速增加，且其最大长度约为 1 倍齿钉直径。

当 $Re=10$ 时，对称涡完全被破坏，其流线图与图 2f 类似。以图 1 中的坐标原点建立极坐标系，无闭合涡流动的流场中气体的径向速度和切向速度的分布如图 4。随着极径 r 的增加，径向速度分布和切向速度分布均趋于平坦。但是由于粉碎机结构的限制，流体不能在现有的结构中形成如均匀来流圆柱绕流问题中圆柱后形成的附着涡，而在出口边界处形成回流。径向速度和切向速度分布随雷诺数的变化不大，但雷诺数越小，流体的惯性力也小，流场中的切向速度随极角 θ 的分布会在极径 r 较小的地方迅速趋于平坦。

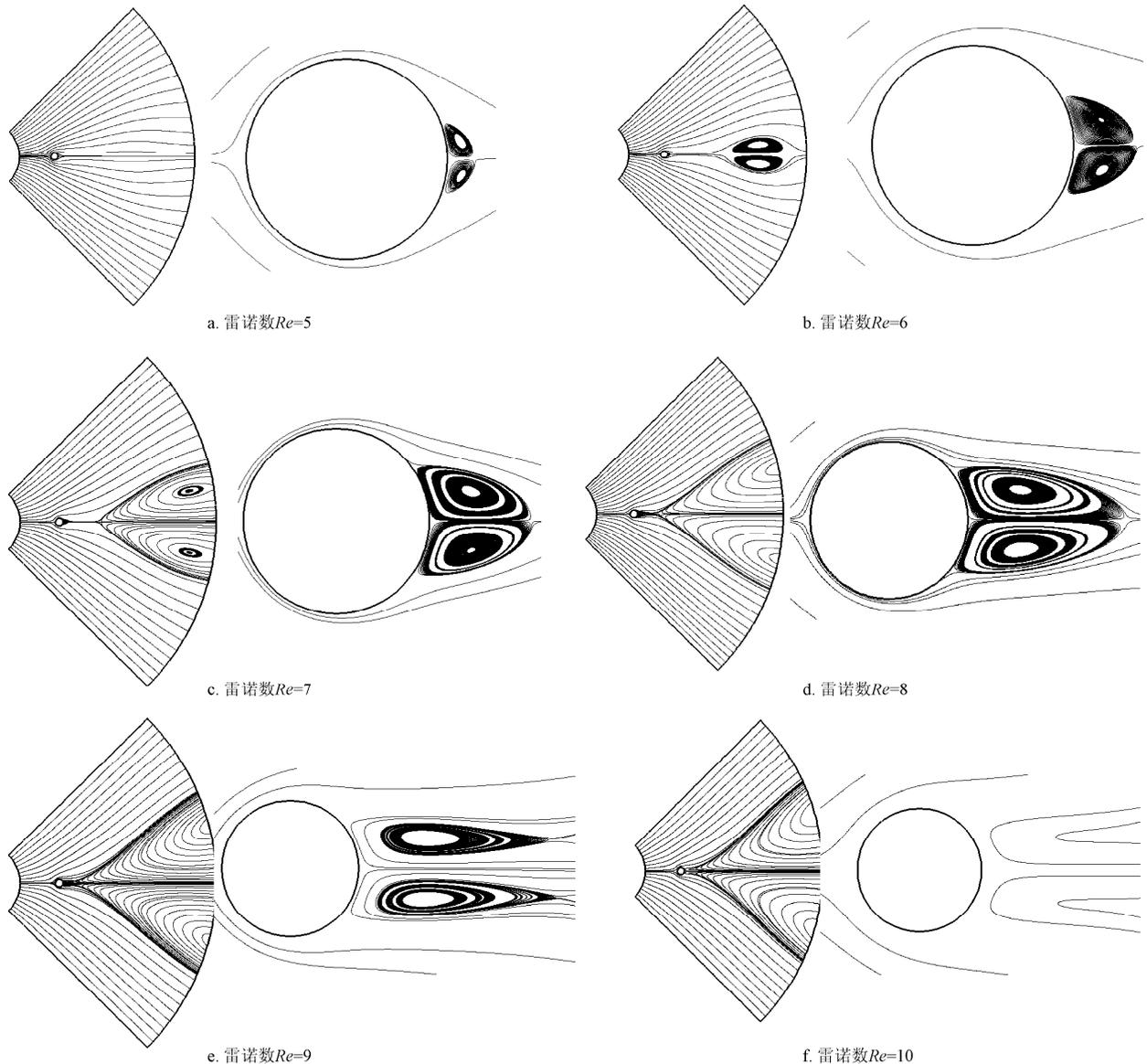
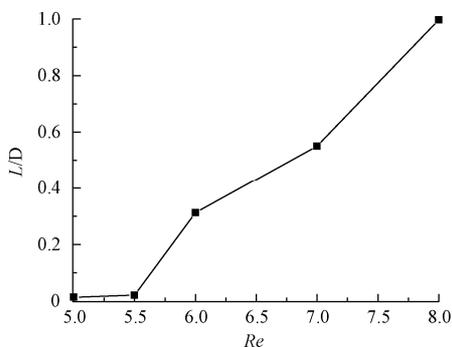


图 2 有闭合涡的稳定分离流线图

Fig.2 Streamlines in steady separating regime with closed wakes



注: L/D 为闭合涡无量纲长度; Re 为雷诺数

图 3 闭合涡长度

Fig.3 Lengths of closed wakes

2.2.3 不稳定泄涡区

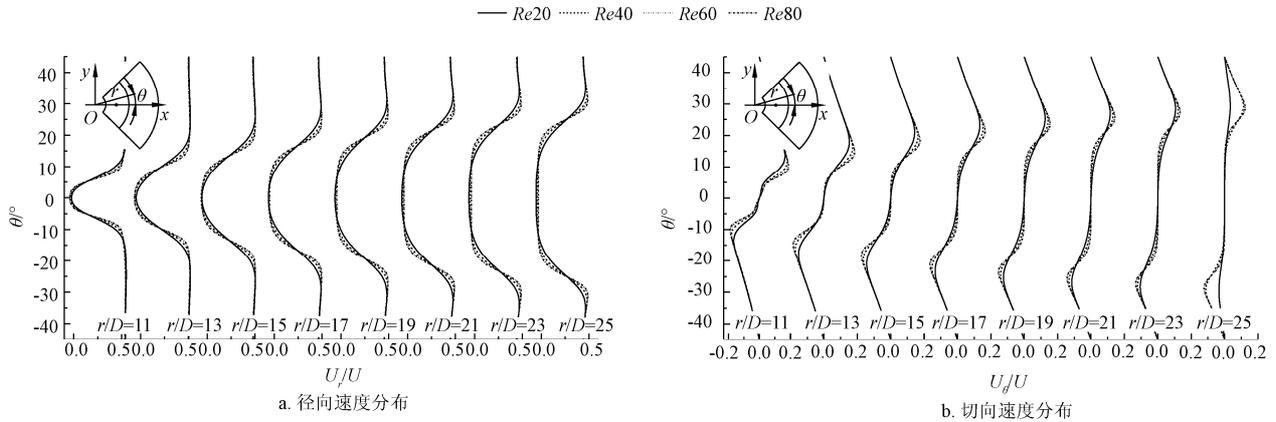
计算表明, 大约 $Re=89$ 时, 流动开始不稳定, 圆柱

上的升力系数开始呈现出周期性。图 5 为 $Re=88,89$ 时, 圆柱齿钉上的升力系数 C_L 随时间的变化情况。由图可知, 当 $Re=88$ 时, C_L 在刚开始计算时有周期性波动, 但是随着计算的进行其值逐渐趋于 0, 此时流动是稳态的。当 $Re=89$ 时, C_L 在经过一段时间的计算之后开始呈现出明显周期性, 此时气体流经圆柱齿钉所形成的漩涡开始脱落。通过对 C_L 的时程曲线做快速傅里叶变换(FFT), 得到其无量纲的脱落周期为 0.01。

图 6 为不同 Re 的情况下, 圆柱齿钉的 C_D 和 C_L 随时间的变化情况。当 $Re=100$ 时, C_D 和 C_L 呈周期性变化。随着 Re 的增加, 它们的变化开始出现了一些非周期性的变化, 且 C_L 的峰值也随着增加。虽然 C_D 的峰值也增加, 但由图 6 可知 C_D 的时程平均值并没有增加, 而在逐渐减小。当 $Re=120$ 时, 流动在计算初期呈现出周期性, 当计算到一定程度时, 周期性的流动被破坏, 流动开始出现一些非周期的特征。随着 Re 的增加, 这种非周期性

出现得很快，且其 C_L 也随着 Re 的增加而继续增加。出现这种现象的原因可能是因为流动转捩失稳造成，具体

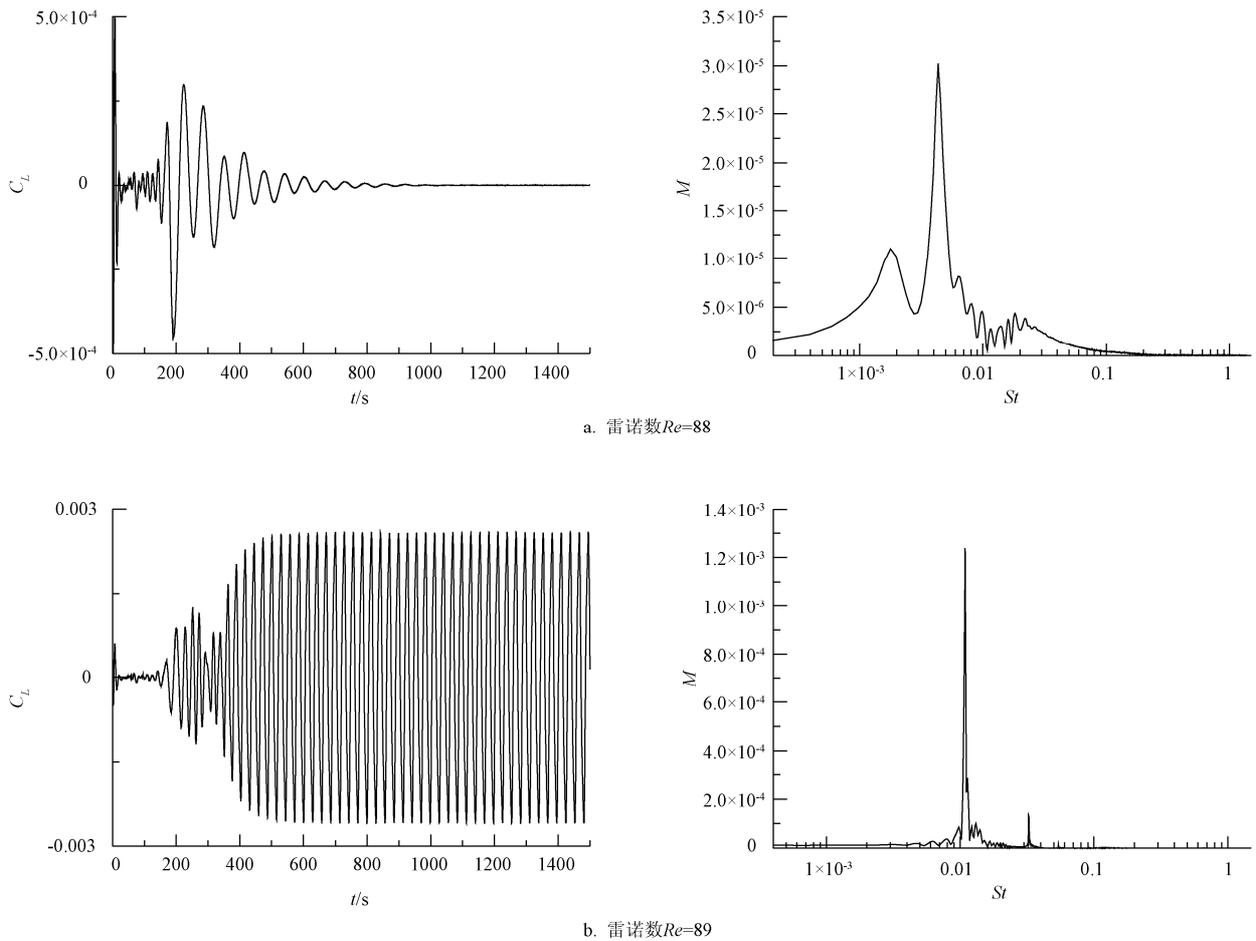
原因还有待进一步研究。



注： r/D 为无量纲极径； U_r/U 为无量纲径向速度； U_θ/U 为无量纲切向速度； θ 为极角， $^\circ$ ； r 为极径，m； U_r 为径向速度，m/s； U_θ 为切向速度，m/s； U 为来流速度，m/s； D 为圆柱齿钉直径，m。

图 4 无闭合涡流动流场的径向速度和切向速度分布

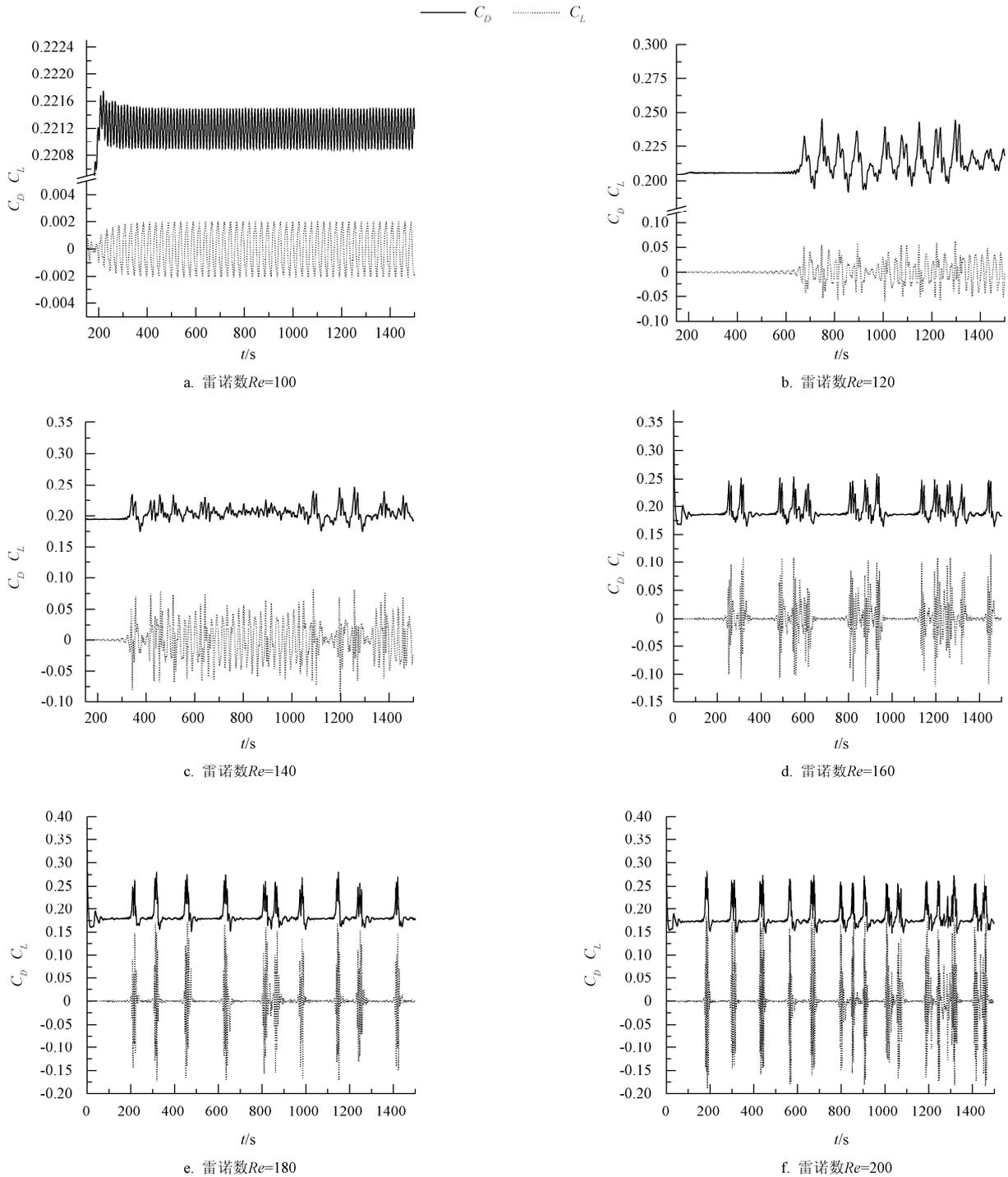
Fig.4 Velocity distributions in radial and tangential direction of flow without closed vortex



注： C_L 为升力系数； t 为计算的物理时间，s； St 为无量纲周期； M 为升力系数作快速傅里叶变换的幅值。

图 5 $Re=88, 89$ 时 C_L 随时间变化情况和无量纲周期 St

Fig.5 Temporal variations of C_L and dimensionless frequency at $Re=88,89$



注: C_D 为阻力系数; C_L 为升力系数; t 为计算的物理时间, s。

图6 不同 Re 下 C_D 和 C_L 的时程曲线

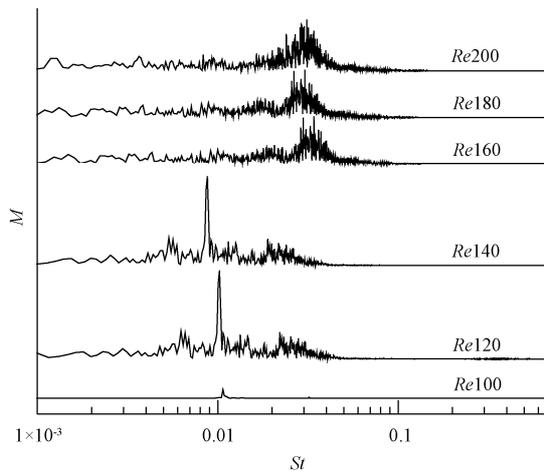
Fig.6 Temporal variations of C_D and C_L on time at different Reynolds numbers

图7是对不同 Re 下的 C_L 时程曲线作 FFT 变换所得到的无量纲频率 St 。由图可知在 $Re=100$ 的时候, 流动为周期性流动, 其 St 大约为 0.011。 $Re=120$ 和 140 时, 虽然流动开始呈现非周期性, 但仍然有一个主频占据了主导地位, 此时 St 的值分别为 0.010 和 0.009。 Re 进一步增大到 160 时, 漩涡不再是周期性脱落, 其频谱出现了一个较宽的频带, 各种频率成分相互叠加, 其无量纲频率相对于 $Re=140$ 时也有了较大的增加。此时, 圆柱齿钉受

到的不再是流体对它的周期性作用力, 而是由多个频率成分叠加的力。

圆柱齿钉在流场所受阻力的时程平均值和时均分离角如图8。在 $Re \leq 200$ 的范围内, 圆柱齿钉上的阻力系数随 Re 的增加而减小。与均匀来流中的圆柱绕流的 C_D 在流动开始出现周期性时出现突然增加的情况^[24]不同, 粉碎机中的圆柱齿钉绕流问题并没有出现这一现象。这是因为气体在计算区域中作一种类似点源的流动, 当气体遇到

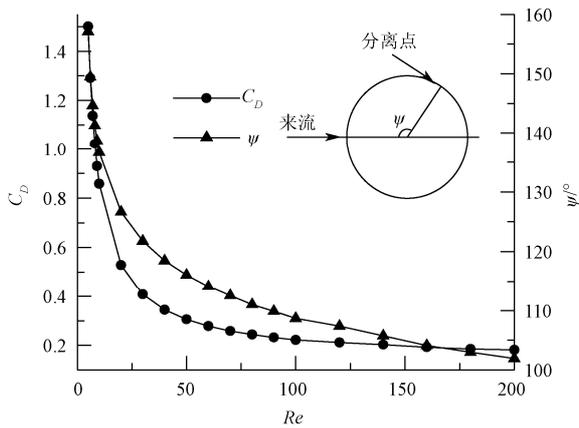
圆柱齿钉时，漩涡将延伸到下游很远的地方才开始脱落，因此，周期性的漩涡脱落对圆柱齿钉的影响很小。



注：St 为无斯托努哈数；M 为升力系数作快速傅里叶变换的幅值。

图 7 不同雷诺数下的 St

Fig.7 Dimensionless frequency at different Reynolds numbers



注：Cd 阻力系数；psi 为分离角，°；Re 为雷诺数。

图 8 Cd、psi 随 Re 的变化

Fig.8 Variation of Cd and psi at different Reynolds numbers

3 结 论

本文通过对针盘式粉碎机中的静圆柱齿钉在雷诺数 $Re \leq 200$ 的情况下的绕流问题的研究，得到以下结论：

1) 对网格无关性的验证表明：非结构网格相对于复杂流动区域的适应性是以牺牲部分计算精度和增加计算量为代价的。

2) 针盘式粉碎机中圆柱齿钉的绕流问题呈现出了许多与均匀来流中圆柱绕流问题不同的现象，如附着涡的消亡，其最大长度约为 1 倍圆柱齿钉直径；流动的非周期性在较小的雷诺数下就出现；漩涡的脱落频率相对于均匀来流的情况小了约一个数量级。这对于研究粉碎机内的粉碎流场提出了挑战。

3) 对针盘式粉碎机中圆柱齿钉的受力情况做了研究，得到了圆柱齿钉在不同的雷诺数下的升、阻力系数

的时程曲线，发现粉碎机中静止圆柱齿钉受到的流体阻力很小，且并没有因为流动的分流而增加。作用在齿钉上流体力的无量纲频率小于 0.05。本文的研究结果对减小齿钉运动阻力，节能降耗，避免齿钉发生疲劳破坏，共振断裂等工程问题有积极的意义。

参 考 文 献

[1] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296.
Cui Ming, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 291-296. (in Chinese with English abstract)

[2] 吴创之, 周肇秋, 阴秀丽, 等. 我国生物质能源发展现状与思考[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 91-99.
Wu Chuangzhi, Zhou Zhaoqiu, Yin Xiuli, et al. Current status of biomass energy development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 91-99. (in Chinese with English abstract)

[3] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91.
Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 87-91. (in Chinese with English abstract)

[4] 王久臣, 戴林, 田宜水, 等. 中国生物质能产业发展现状及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 276-282.
Wang Jiuchen, Dai Lin, Tian Yishui, et al. Analysis of the development status and trends of biomass energy industry in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 276-282. (in Chinese with English abstract)

[5] 姚宗路, 田宜水, 孟海波, 等. 生物质固体成型燃料加工生产线及设备研究[J]. 农业工程学报, 2010, 9(26): 280-285.
Yao Zonglu, Tian Yishui, Meng Haibo, et al. Design and study on production line and equipment of biomass solid fuel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 9(26): 280-285. (in Chinese with English abstract)

[6] 张晓文, 赵改宾, 杨仁全, 等. 农作物秸秆在循环经济中的综合利用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊 1): 107-109.
Zhang Xiaowen, Zhao Gaibin, Yang Renquan, et al. Comprehensive utilization of agricultural straws in recycle economy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(Supp.1): 107-109. (in Chinese with English abstract)

[7] 时君友, 汤芸芸. 改性生物质玉米淀粉压制稻秸秆人造板的研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(2): 127-130.
Shi Junyou, Tang Yunyun. Study on preparation of rice straw particleboard using modified corn starch adhesive[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2011, 35(2): 127-130. (in Chinese with English abstract)

- [8] 张燕. 我国农作物秸秆板产业化发展的动因即模式研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
Zhang Yan. The Researches on Development Motivation and Model of STRAWBOARD INDUSTRIALIZATION in China[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [9] 高翔. 秸秆人造板项目的社会效益评价[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
Gao xiang. The Evaluation of Social Benefit of Straw Particle Panel Project[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kapur P C, Panda D. Analysis of single-particle breakage by impact grindin[J]. *Mineral Processing*, 1997, 49(3/4): 224—235.
- [11] Lutz Vogel, Wolfgang Peukert. From single particle impact behaviour to modeling of impact mills[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(8): 5165—5174.
- [12] Wolfgang Peukert. Material properties in fine grinding[J]. *Minera Processing*, 2004, 74(S1): S4—S16.
- [13] 刘东升, 李凤生, 宋洪昌, 等. GLS 销棒粉碎机湿式与干式粉碎机理研究(II)[J]. *南京理工大学学报: 自然科学版*, 1997, 21(5): 428—431.
Liu Dongsheng, Li Fengsheng, Song Hongchang, et al. Study of grinding mechanism for GLS mill with wet grinding and dry grinding[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science*, 1997, 21(5): 428—431. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴浩. 高油脂物料微细粉碎技术及实验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
Wu Hao. Study on the Micro Comminuting Technology and Experiment on the Oiliness Material[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [15] Williamson C H K. Advances in our understanding of vortex dynamics in bluff body wake[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997(69/71): 3—32.
- [16] Wu G X, Hu Z Z. Numerical simulation of viscous flow around unrestrained cylinders[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22: 371—390.
- [17] 顾罡. 二维单圆柱、双圆柱绕流问题和三维垂荡板运动的数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Gu Gang. Numerical Simulation of Two-Dimensional Flow Around Single and Double Cylinders and Three-Dimensional Oscillation of Heave Plates[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [18] Farrant T, Tan M, Price W G. A cell boundary element method applied to laminar vortex-shedding from arrays of cylinders in various arrangements[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2000, 14(3): 375—402.
- [19] Braza M, Chassaing P, Ha Minh H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 165: 79—130.
- [20] Roshko A. On the development of turbulent wakes from vortex streets[R]. NACA Report, 1191, 1954.
- [21] Williamson C H K. Vortex dynamics in the cylinder wake[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996, 28: 477—539.
- [22] Lecoq Y and Piquet J. On the use of several compact methods for the study of unsteady incompressible viscous flow around a circular cylinder. *Computer and Fluids*, 1984, 12(4): 255—280.
- [23] Chen Y H, Yang S C, Yang J Y. Implicit weighted essentially non-oscillatory schemes for the incompressible Navier-Stokes equations[J]. *International Journal on Numerical Methods in Fluids*, 1999, 31(4): 747—765.
- [24] Rajani B N, Kandasamy A and Sekhar Majumdar. Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2009, 33(3): 1228—1247.
- [25] Wu M H, Wen C Y, Yen R H, Weng et al. Experimental and numerical study of the separation angle for flow around a circular cylinder at low Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 515: 233—260.

Numerical simulation of flow around circular cylinder in pin pulverizer

Huang Peng, Li Shuangyue^{*}, Diao Xiong

(School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to investigate the aerodynamic performance of circular cylinders in a pin pulverizer, the computational fluid dynamics method was applied in the study of flow past a circular cylinder nail in a 2D model. The problem of flow around a circular cylinder in uniform inflow was used to verify the correctness of the computational model. The independence of mesh and time step were also investigated. The results showed that flows could be classified into three flow regimes when Reynolds numbers varied within 200. In the stable separating regime, the max length of closed wakes was approximately equaled to the diameter of the cylinder, and the wakes would vanish as the increasing of Reynolds number. In the unstable vortex shedding regime, periodical vortices shedding occurred at low Reynolds numbers. Lift force and drag force on the cylinder were small. As Reynolds number grew, the dimensionless frequency increased and different frequency components appeared. The dimensionless frequency was one order of magnitude smaller than that of the flow around a cylinder in uniform inflow. It lays the foundation of the research on the problem of flow around cylinders at high Reynolds numbers.

Key words: flow fields, computer simulation, diesel engine emission experiments pin pulverizer, flow around a cylinder