

采用内嵌边界方法模拟错列管束的磨损

金台, 罗坤, 杨建胜, 樊建人

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 310027, 杭州)

摘要: 采用内嵌边界方法, 模拟研究了不同 Stokes 数 St 的煤灰颗粒穿过槽道中 10×11 错列不锈钢管束时的运动情况及其对管束的磨损规律. 其中, 流场与管束之间的耦合采用内嵌边界技术描述, 颗粒的运动采用拉格朗日轨道模型求解. 结果表明, 不同 St 的颗粒有不同的运动特点, 对管束造成的磨损也不同. 第 1 排管束的平均磨损量在 $St=0.01, 0.1$ 时都较小, 此后磨损量随着 St 的增大而增大. $St=0.1$ 时, 第 1 排圆管的磨损量最小. 靠近槽道壁面两列管束的平均磨损量大于中间管束, 需加强防磨措施.

关键词: 直接数值模拟; 内嵌边界法; 错列管束; 磨损; Stokes 数

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0122-06

Numerical Investigation into Erosion of Staggered Tube Bank Based on Immersed Boundary Method

JIN Tai, LUO Kun, YANG Jiansheng, FAN Jianren

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The immersed boundary method was applied to investigate particle-laden flow passing a 10×11 staggered stainless tube bank in a duct at different Stokes numbers. The dispersion of coal ash particles and the tube erosion yielded by the flow were studied in detail. The interactions between tubes and flow were simulated using the immersed boundary technique. The trajectories of the particles were tracked through the Lagrangian approach with two-way coupling. The results show that the particles at different Stokes numbers have quite different dispersion patterns, leading to different tube erosion characteristics. Particles at larger Stokes number cause more erosion on the first row of tubes. However, only slight erosion occurs when $St=0.01$ and 0.1 , and particles cause the smallest erosion on the first row of tubes when $St=0.1$. More attention should be paid to the anti-erosion of the tubes near the side walls where mass erosion is greater than that of the tubes in the middle.

Keywords: direct numerical simulation; immersed boundary method; staggered tube bank; erosion; Stokes number

在化学反应炉、煤粉锅炉、换热器、风机和除尘器等许多工业设备中, 固体颗粒的输运对壁面冲击产生磨损, 严重地影响设备的寿命. 在锅炉对流受热面管束失效问题的研究中, 发现有 $1/3$ 的管束失效是由于冲蚀磨损造成的^[1]. 特别是在埋管流化床运

行过程中出现的问题, 几乎都是由冲蚀磨损引起的. Tabakoff^[2]等的研究表明, 煤灰粒子对各种锅炉钢的冲蚀均表现为塑性材料的特性. 通过管道输运物料时, 弯管部位的冲蚀磨损率可比直管部分高出近 50 倍. 因此, 研究气固两相流中颗粒对壁面的碰撞

和磨损机理,对减轻材料磨损、提高设备的寿命具有重要的意义。

随着计算流体动力学(CFD)的发展,数值模拟成为研究颗粒对材料磨损的有力工具^[3-11]。Lee等^[5]基于欧拉方法,把颗粒相当作连续相来处理,每个颗粒的具体轨迹不需要计算,研究了颗粒对单根圆柱的磨损。Sato等^[7]采用欧拉-拉格朗日模型研究了槽道中颗粒对槽道壁面的磨损率。樊建人等^[8]对颗粒与管束的碰撞和磨损进行了数值模拟,认为颗粒对管壁的冲蚀磨损、碰撞频率因子与磨损冲蚀量、碰撞角度和碰撞速度有关。闫洁等^[9]采用数值模拟的方法研究了不同粒径的颗粒对单个柱体壁面的碰撞和磨损情况。王则力等^[10]采用直接数值模拟方法研究了管道中直径为 80 μm 的颗粒对顺列 10 $\times$ 10 管束的碰撞和磨损,结果表明应对流向第 3 排后的管束采取防磨措施。

采用高精度的数值方法对错列管束群磨损进行研究的报道还不多见,而在实际应用中,很多情况下管束群是以错列形式出现的。基于此,本文把内嵌边界方法^[12-14]与点颗粒假设的拉格朗日方法结合起来,研究槽道中气固两相流及其对错列管束造成的磨损规律,以期对相关工程应用提供参考。

1 问题描述

为了对锅炉含灰气流冲刷换热器管束进行研究,本文构造了一槽道内错列管束作为简单的流动计算模型进行磨损研究。整个槽道的几何结构和流场的计算区域如图 1 所示,其中槽道内错列管束由 105 根直径 $D=30\text{ mm}$ 的圆管组成,并按照 10 $\times$ 11 错列排列。整个槽道的流向计算长度 $L_x=30D$,展向计算长度 $L_y=21D$ 。两个圆管之间流向距离和展向距离均为 $2D$ 。流向第 1 排管束距离入口 $4.5D$,最后一排距离出口 $4.5D$ 。自下而上第 1 列与最后一列管束与槽道壁面的间距均为 $2D$ 。

2 数值计算方法

2.1 内嵌边界方法

内嵌边界方法的特点是在整个流场中将复杂的边界模化成 Navier-Stokes 动量方程中的一种外力,并且使用简单的笛卡尔网格替代贴体网格进行求解计算。本文以黏性不可压缩流体为研究对象,通过直接求解 Navier-Stokes 方程计算速度场,流场与管束之间的耦合采用由王则力等^[13]提出的基于压力速度方程的内嵌边界方法来处理。计算区域进口边界

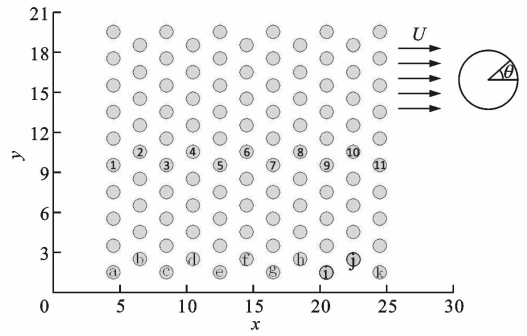


图 1 几何结构和计算区域

采用均匀速度入口边界条件,计算区域上下两侧为槽道,采用壁面无滑移边界条件,计算区域出口采用无反射边界条件。

假定流体的物性参数在时间和空间上均为常数,同时忽略流体重力,则流场的无量纲控制方程为连续性方程

$$\nabla u = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u + f + f_p \quad (2)$$

式中: u 是流体的速度; p 是压力;雷诺数 $Re = \rho_l UL / \mu$, ρ_l 是流体特征密度, U 是流场的特征速度, $L=D$ 是流场的特征长度, μ 是流体特征动力黏度; f_p 是颗粒对流体的反作用力; f 是内嵌边界方法中流体与固体壁面之间的相互作用力。根据直接力算法^[14],有

$$f(x) = \int_{\Omega_p} F_k(x_k) \delta(x - x_k) dx_k = \sum_{k=1}^N F_k(x_k) \delta_h(x - x_k) \Delta V_k \quad (3)$$

式中: Ω_p 为颗粒内嵌边界区域; N 为内嵌边界上拉格朗日节点的数目; x 是欧拉计算网格点的位置; x_k 是在内嵌边界上第 k 个拉格朗日点的位置; ΔV_k 为 x_k 处的离散体积; $\delta(x - x_k)$ 是狄拉克 δ 函数; $F_k(x_k)$ 是第 k 个拉格朗日点处固体壁面施加在流体上的力。

在计算时,采用拉格朗日轨道模型计算煤灰颗粒的运动轨迹,采用计算颗粒的概念^[15]以保证颗粒相的体积分数为 10^{-4} 。由于本文模拟的是低速、低雷诺数流动,且煤灰颗粒流动是稀疏两相流,因此忽略了颗粒之间的相互碰撞以及颗粒自身的旋转。单个颗粒的无量纲控制方程为

$$\frac{dV}{dt} = \frac{f_p}{St} (U - V) + g \quad (4)$$

式中: U 和 V 分别表示气体和颗粒的瞬时速度; f_p

$=1+0.15Re_p^{0.687}$, Re_p 是以颗粒直径为特征长度的雷诺数; 颗粒的 Stokes 数 $St=\rho_p d_p^2(18\mu)^{-1}/(L\cdot U^{-1})$, ρ_p 为颗粒密度, d_p 是颗粒直径; g 为重力加速度.

2.2 颗粒与壁面的碰撞和磨损模型

当煤灰颗粒与管束表面和槽道壁面碰撞时, 煤灰颗粒会改变运动轨迹. 本文把颗粒与壁面碰撞时的法向恢复系数和切向恢复系数当作常数. 根据前人研究^[8], 颗粒与不锈钢金属壁面碰撞前后的速度关系为

$$\frac{V_{n2}}{V_{n1}}=1.0-0.415\ 9\beta-0.499\ 4\beta^2+0.292\beta^3$$

(5)

$$\frac{V_{t2}}{V_{t1}}=1.0-2.12\beta+3.077\ 5\beta^2-1.1\beta^3$$

(6)

式中: V_n 和 V_t 分别为颗粒碰撞速度的法向分量和切向分量; 下标 1 和 2 分别代表碰撞前后的状况; β 为颗粒与金属壁面碰撞时颗粒速度的入射角.

对于颗粒与金属壁面碰撞造成的磨损, 本文选用 Tabakoff 等^[1]通过实验得出的用于计算煤灰颗粒与不锈钢金属碰撞时产生的磨损量的经验关系式来模拟. 局部质量磨损率 E 定义为目标材料金属的质量损失量(mg)与碰撞颗粒的质量之比(g)

$$E=K_1\left\{1+C_k\left[K_2\sin\left(\frac{90^\circ}{\beta_0}\beta_1\right)\right]\right\}^2V_i^2\cdot\cos^2\beta_1(1-R_1^2)+K_3(V_i^2\sin\beta_1)^4$$

(7)

3 计算工况

本文主要研究不同 St 下的煤灰颗粒对槽道内管束和壁面的磨损情况. 计算参数设置如下: 自由来流入口速度 $U=1$ m/s, 空气密度 $\rho=1.205$ kg/m³, 空气黏度 $\mu=1.8\times10^{-5}$ kg/(m $\cdot$ s), 以圆管直径为特征尺度的雷诺数 $Re_D=2\times10^3$, 以槽道横截面宽度为特征尺度的雷诺数 $Re_{Ly}=4.2\times10^4$. 计算中特征尺度取为圆管直径, 即 $\tilde{L}=30$ mm, 特征速度为进口来流速度, 即 $\tilde{U}=1$ m/s, 特征时间 $\tilde{t}=\tilde{L}/\tilde{U}=0.03$ s. 采用无量纲网格尺度 $h=1/64$ 和时间尺度 $\Delta t=10^{-3}$ 进行计算. 1 800 个煤灰颗粒均匀分布在流场入口, 每隔 0.2 个无量纲时间, 以等同于当地流体的速度进入计算区域, 颗粒的直径为 6.2、20、62、200 μm , 对应的 St 分别为 0.01、0.1、1.0、10.0. 碰撞和磨损的统计始于第 2 个对流时间, 止于第 12 个对流时间. 相关的计算参数由表 1 列出.

表 1 计算参数

自由来流压力 p_∞/kPa	101.6
自由来流温度 T_∞/K	293
空气密度 $\rho_t/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.205
自由来流速度 $U/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1
圆管直径 D/mm	30
圆管材料	AISI 304 不锈钢
颗粒密度 $\rho_p/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 450
颗粒直径 $d_p/\mu\text{m}$	6.2、20、62、200

4 结果与讨论

4.1 颗粒运动特征

气固两相流中不同 St 的颗粒运动具有不同的规律. 当 St 为 0 时, 颗粒完全跟随流体, 呈理想状态, 而当 St 非常大时, 颗粒惯性对颗粒运动起主导作用, 颗粒运动受流体的影响较小, 在惯性作用下颗粒将穿透流体涡结构. 图 2 为不同 St 的颗粒在流场中的瞬时分布, 可以发现, 直径为 6.2 μm ($St=0.01$) 的颗粒运动很容易受流体涡运动的影响, 颗粒跟随流体运动, 在圆管后涡脱落的影响下, 这种小颗粒很容易被卷吸进旋转涡中(如图 2a 所示). 随着颗粒直径的增加, 颗粒的惯性作用对颗粒运动的影响逐渐加大. 图 2b、2c 分别表示直径为 20 μm ($St=0.1$) 和 62 μm ($St=1.0$) 的颗粒在流场中的分布. 这些颗粒由于惯性的影响很难被流体涡卷吸进入流向第 1 排圆管尾部, 而是表现出选择性聚集^[16]的特性, 在流场中呈现浓淡不均的分布. 当颗粒直径增加到 200 μm ($St=10.0$) 时, 颗粒的惯性主导了颗粒的运动轨迹, 颗粒可以穿透流体涡团运动, 在流场中分布较均匀, 如图 2d 所示. 颗粒与流体相互作用, 流体在颗粒作用下, 下游湍动增强, 从层流流动变成湍流. 流场的运动特性改变将会影响到颗粒的运动轨迹, 从而影响到颗粒与管束以及槽道壁面之间的碰撞和磨损, 分析不同位置管束的磨损对圆管防磨具有重要意义.

4.2 不同 St 的颗粒对第 1 排圆管的磨损量比较

不同直径的颗粒随流场运动的跟随性以及颗粒与气相场的相互作用不同, 呈现出如图 2 中所示的不同分布, 从而对各排圆管的磨损也不同. 图 3 为各 St 下第 1 排各圆管(从上到下分别为 1~10 列)的质量磨损量 E_{rG} 分布. 第 1 排管束中各圆管的质量

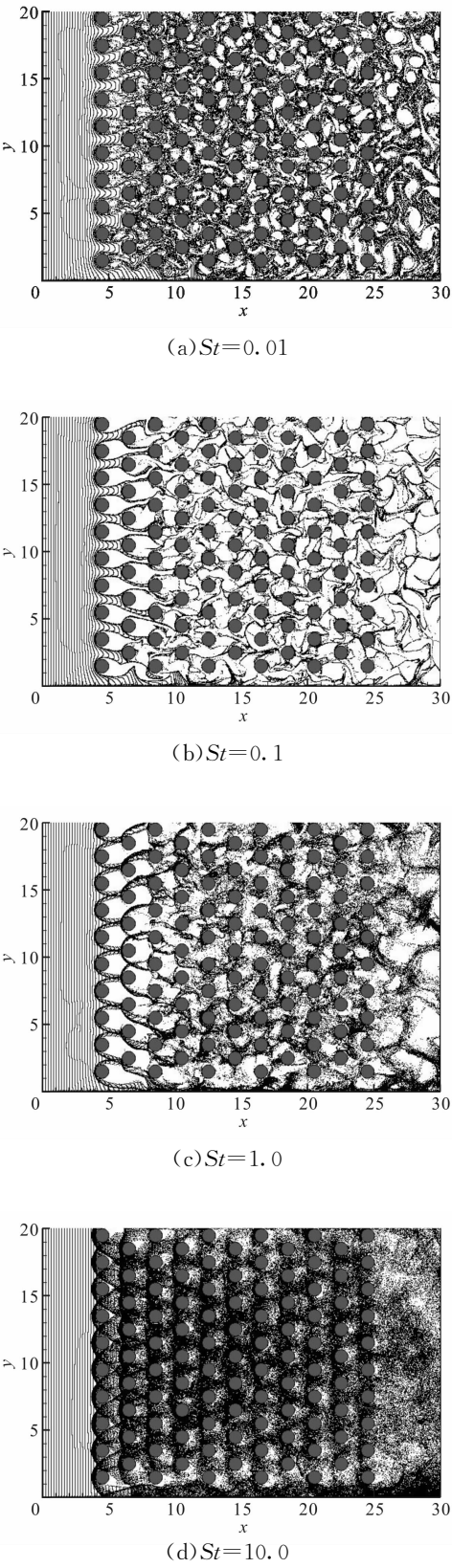


图 2 不同 St 下流场中的颗粒分布

磨损量随着颗粒 St 的增加而增大,但并不与颗粒直径(或 St)成正比关系, $St=0.01,0.1$ 时,磨损量很小,小于 1.0×10^{-13} mg/g. 当 St 升高至 1.0 时,磨

损量在 $4.0\times 10^{-10}\sim 6.0\times 10^{-10}$ mg/g 之间,为前两者的千倍以上. $St=10.0$ 时,磨损量在 $10.0\times 10^{-10}\sim 12.0\times 10^{-10}$ mg/g 之间,比 $St=1.0$ 时大 2 倍左右. 圆管表面的质量磨损由表面局部碰撞频率和局部质量磨损率共同决定,这些不仅与颗粒的大小有关,还和颗粒速度大小、方向等运动特性密切相关.

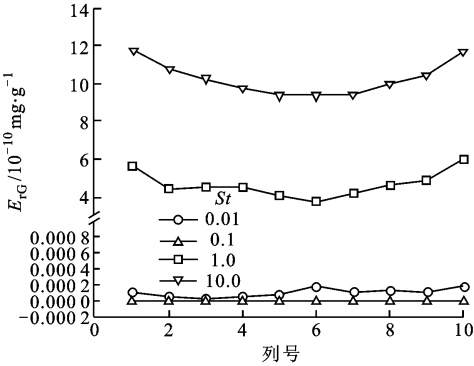


图 3 第 1 排管束的质量磨损量分布

4.3 编号 1 的圆管磨损分布和周围颗粒运动特性

从图 3 中还可以发现, $St=0.1$ 时颗粒对第 1 排各圆管的磨损量最小,接近于 0. 对图 1 中第 1 排管束中编号为 1 的圆管进行分析,得到颗粒与圆管壁面碰撞频率 $\eta(\theta)$ 沿圆管周向的分布,见图 4. 从图中可以看出,当 $St=1.0$ 时,颗粒与壁面的碰撞主要发生在迎风面($\pi/2, 3\pi/2$),在迎风面滞止点 $\theta=\pi$ 时碰撞频率最大,而在圆管 1 的背风面碰撞频率为 0. 此时,颗粒不再被卷吸进圆管背风面漩涡区. 图 5a 为 $St=1.0$ 时颗粒的运动情况,分图 1~3 分别为颗粒进入流场流过第 1 排圆管的瞬时分布,分图 4 为与图 2c 同一瞬时圆管 1 周围局部颗粒运动状态. 当 $St=0.1$ 时,颗粒对圆管 1 周向各个角度的碰撞频率都为 0,如图 4 所示.

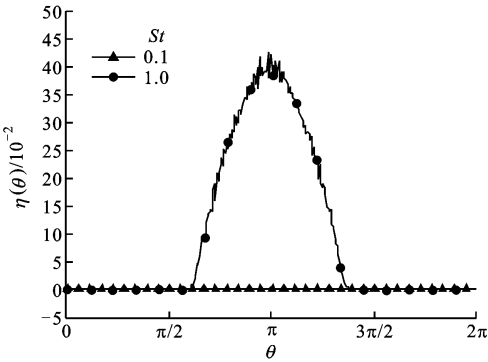


图 4 编号 1 的圆管表面碰撞频率局部分布

图 5b 为 $St=0.1$ 时颗粒的运动情况,分图 1~4 所示的各瞬时与图 5a 中的各瞬时一一对应. 气固

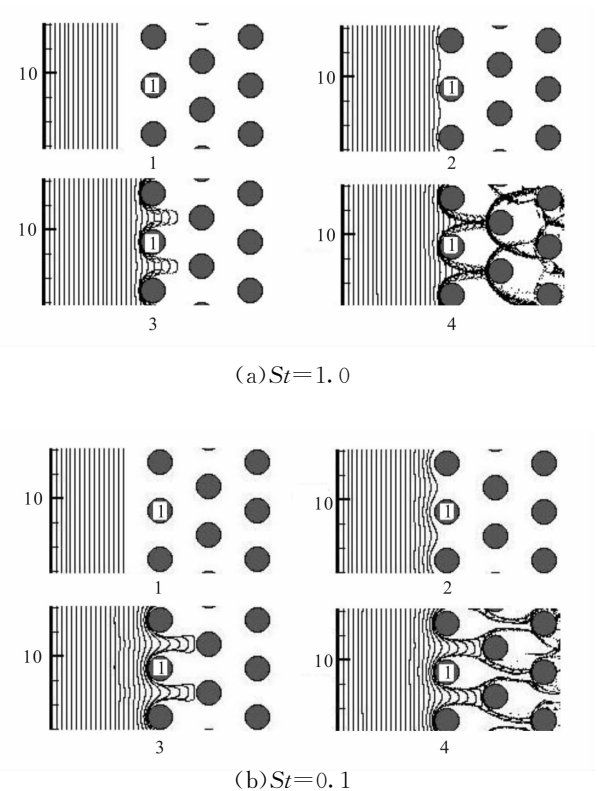


图 5 编号 1 的圆管周围颗粒瞬时分布

流体绕单根圆柱运动时,在圆柱的表面存在着一层气膜^[17],气膜将颗粒与圆柱壁面隔离,颗粒只有穿过气膜才能和壁面发生碰撞.图 5a、5b 中分图 2 为颗粒刚刚流进管束位置时的运动状态, $St=1.0$ 的颗粒运动具有足够的惯性穿透气膜到达圆管壁面并发生碰撞,而 $St=0.1$ 的颗粒直径很小,自身的惯性尚不足以使得颗粒穿透圆管壁面的气膜与壁面发生碰撞,由图中可以看到颗粒与壁面之间存在明显间隙,同时,颗粒的惯性又使得颗粒不再被卷入圆管背风面回流区,与圆管背风面也不发生碰撞,故 $St=0.1$ 的颗粒对第 1 排管束的磨损量最小.

4.4 流向圆管磨损量比较

颗粒在随流体流动的过程中,会与槽道壁面、圆管表面频繁碰撞,速度方向时刻发生变化.从图 2 流场中颗粒的分布可以看出,在流动方向(x 正方向)上颗粒的流动形态有很大的不同,颗粒对各圆管产生的磨损也将不同. $St=1.0$ 的颗粒对第 1、5、11 排圆管(从上到下分别为 1~10 列)的质量磨损如图 6 所示,流向上各排管束圆管的质量磨损量逐渐升高.1 m/s 的来流处于层流状态,颗粒伴随来流与第 1 排管束发生碰撞,但是颗粒速度太低,磨损量处于一个较低的数值.气固两相流体经过第 1 排管束时,圆管之间的通道是一个缩放的结构,流体流过后速度增加,颗粒以更大的速度和圆管相碰撞.此外,在颗

粒与流体的相互作用下,流体从层流状态发展成湍流流动形态,如图 2c 所示,在流向下游各排,更多的颗粒湍动在圆管周围而发生碰撞,使得颗粒与圆管碰撞频率增加.综合上述原因,在下游,颗粒对各排圆管的磨损更大.同时也可以发现,第 11 排圆管中靠近槽道上下壁面的圆管的质量磨损远远大于中间管束,这将在下面进行论述.

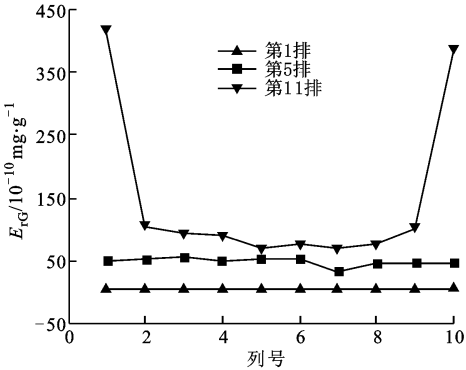


图 6 第 1、5、11 排圆管的质量磨损量分布

4.5 中间管束和靠近壁面管束的磨损比较

从 4.3 节可知,靠近壁面的两列管束的列平均磨损量高于中间列管束,为定量地对其进行说明,下面将对图 1 中靠近壁面的 a~k 圆管和槽道中间对应排的 1~11 圆管的质量磨损进行比较分析. St 分别为 1.0 和 10.0 时,各圆管的整体质量磨损量如图 7 所示,同样可以发现, $St=1.0$ 时颗粒对各圆管的质量磨损更大,流向下游圆管的磨损量更大.

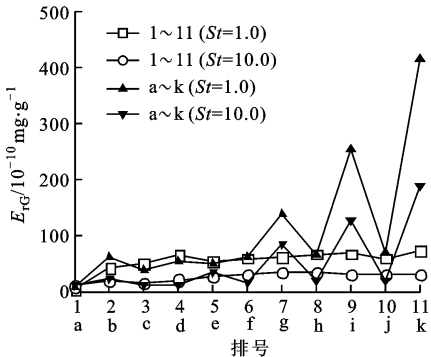


图 7 中间管束的整体磨损和靠近壁面管束的磨损比较

从图中可以看出,对于中间管束(编号为 1~11 的圆管),各圆管的质量磨损量在一个很小的范围内变化,对于靠近壁面的管束(编号为 a~k 的圆管),各圆管的磨损量呈锯齿状振荡,下游靠近壁面的圆管(g、i、k)的质量磨损明显大于其余圆管,其余圆管则与对应位置的中间圆管的磨损量相差不大.因此,对于靠近壁面的管束(特别是从第 7 排圆管开始)应

加强防磨。

5 结 论

本文采用基于内嵌边界技术的数值模拟方法,研究了不同粒径的煤灰颗粒在错列槽道中的运动及对管束的磨损情况,发现 St 较小的颗粒,在流场中的分布均匀,对管束的磨损量也小, St 越大的颗粒对第1排管束的磨损越突出,但 $St=0.1$ 时,该列圆管磨损量最小。圆管表面的质量磨损由表面局部碰撞频率和局部质量磨损率共同决定。 $St=0.1$ 时,颗粒不能穿过第1排圆管表面的气膜,从而不能与圆管迎风面发生碰撞,但又不能被卷吸入圆管背风面,因此编号为1的圆管磨损量最小。由于槽道壁面反弹颗粒的再次碰撞,靠近壁面的两列管束的平均磨损均大于中间各列管束,从第7排管束开始,靠近槽道壁面圆管的质量磨损大于中间圆管,应该采取更多的防磨措施。

参考文献:

- [1] TABAKOFF W, KOTWAL R, HAMED A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles [J]. *Wear*, 1979, 52(1):161-173.
- [2] TILLY G P. Erosion caused by impact of solid particles [J]. *Treatise on Materials Science and Technology*, 1979, 13:287-298.
- [3] 柳成文,毛靖儒,俞茂铮. 90°弯管内稀疏气固两相流及固粒对壁面磨损量的数值研究[J]. *西安交通大学学报*, 1999, 33(9):53-57.
LIU Chengwen, MAO Jingru, YU Maozheng. Analysis of gas-solid two-phase flow and erosion in a 90° curved duct [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1999, 33(9):53-57.
- [4] 姚军,陈丽华,樊建人,等. 一种气固两相流中弯管抗磨方法的数值试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(5):134-138.
YAO Jun, CHEN Lihua, FAN Jianren, et al. Numerical simulation of a new method for protecting bends from erosion in a gas-particle flows [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2002, 22(5):134-138.
- [5] LEE B, FLETCHER C A J, BEHNIA M. Computational study of solid particle erosion for a single tube in cross flow [J]. *Wear*, 2000, 240(1/2): 95-99.
- [6] LEE B E, TU J Y, FLETCHER C A J. On numerical modeling of particle-wall impaction in relation to erosion prediction: Eulerian versus Lagrangian method

- [J]. *Wear*, 2002, 252(3/4):179-188.
- [7] SATO S, SHIMIZU A, YOKOMINE T. Numerical prediction of erosion for suspension flow duct [J]. *Wear*, 1995, 186/187(1): 203-209.
- [8] FAN Jianren, ZHOU Dadong, JIN Jun. Numerical simulation of tube erosion by particle impaction [J]. *Wear*, 1991, 142(1):171-184.
- [9] 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 cylinder wake [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2007, 41(4):589-593.
- [10] 王则力,罗坤,樊建人. 颗粒与顺列管束磨损的数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2008, 29(9): 1518-1520.
WANG Zeli, LUO Kun, FAN Jianren. Numerical study of the particulate erosion on aligned tube bank [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(9): 1518-1520.
- [11] FAN J R, LUO K, ZHANG X Y, et al. Large eddy simulation of the anti-erosion characteristics of the ribbed-bend in gas-solid flows [J]. *J of Eng for Gas Turbines and Power*, 2004, 126(3): 672-679.
- [12] PESKIN C S. The immersed boundary method [J]. *Acta Numer*, 2002, 11:479-517.
- [13] WANG Z L, FAN J R, LUO K. Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(3):283-302.
- [14] WANG Z L, FAN J R, LUO K. Numerical study of solid particle erosion on the tubes near the side walls in a duct with flow past an aligned tube bank [J]. *AIChE Journal*, 2010, 56(1):66-78.
- [15] ELGHOBASHI S. On predicting particle-laden turbulent flows [J]. *Applied Scientific Research*, 1994, 52: 309-329.
- [16] EATON J K, FESSLER J R. Preferential concentration of particles by turbulence [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1994, 20:169-209.
- [17] LUO K, FAN J R, LI W C, et al. Transient, three-dimensional simulation of particle dispersion in flows around a circular cylinder ($Re=140-260$) [J]. *Fuel*, 2009, 88(7):1294-1301.

(编辑 荆树蓉)