

弯管内二次流对固粒磨损壁面的影响

毛靖儒¹, 柳成文², 相晓伟¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 山西大学工程学院, 030013, 太原)

摘要: 应用双流体模型在贴体坐标系下数值计算了 90° 方形截面弯管内稀疏气固两相的二次流动. 应用气固两相动量方程在次流截面上分别采用速度是、否耦合 2 种求解方法, 计算了固粒对壁面的磨损. 计算与实验结果吻合较好. 结果显示气相二次流动阻碍了固相在次流截面上冲向弯管外壁的速度, 固相二次流使弯管外壁面中心区域的磨损量加大, 在 90° 截面处达到最大值, 其磨损量是同截面侧壁处的 4 倍, 固相二次流加剧了局部磨损, 从而缩短了设备的寿命. 因此, 该方法为抑制固相二次流提供了技术依据.

关键词: 弯管; 二次流; 磨损

中图分类号: O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)07 - 0746 - 04

Effect of Secondary Flow on Erosion from Solid Particles in 90° Curved Duct of Quadrate Section

Mao Jingru¹, Liu Chengwen², Xiang Xiaowei¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Engineering College of Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: The secondary flows for dilute gas-solid two-phase flow in a 90° curved duct of quadrate section are investigated numerically with two-fluid model with body-fitted coordinates. The erosions of particle on outer wall are respectively calculated by the two kinds of methods dependent upon coupled or uncoupled velocities in the cross section of the curved duct via gas and solid phase momentum equations. The numerical results coincide with the corresponding experimental data very well. The velocities of particle rushing to the outer wall in the cross section are baffled by the secondary flow of gas phase. However the secondary flow of solid phase increases observably the erosion quantity in the center region of outer wall and the maximum erosion is 4 times as much as minimum erosion in two side regions of the outer wall in 90° section. The secondary flow of solid phase can aggravate the local erosion to result in a markedly shortened life period of facility. Thus such numerical simulation provides a technical basis for controlling secondary flow.

Key words: curved duct; secondary flow; erosion

除常规的气固两相流设备如气力输送、风机外, 在目前正发展的超超临界机组和运行着的超临界机组中, 由于过热器和再热器内壁面氧化皮脱落形成的粒子进入到透平的通流部分, 对第一级喷嘴和静叶造成显著磨损. 为此, 我们正进行专题研究其抑制方法. 以叶轮机为例, 由于透平调节级较小的展弦比, 二次流损失占总损失份额可高达 50%. 二次流

产生的根源是流体粘性, 因此广泛存在于各种流体机械中. 单相二次流所涉及的主要是流动效率、传热效率. 在流体流动方面, 人们竭力抑制它, 但在传热方面, 又想办法利用它. 本文将流动和固粒磨损壁面问题结合在一起, 重点揭示气固两相二次流对壁面磨损的机理和危害程度, 从而为抑制二次流提供必要的技术途径.

收稿日期: 2003 - 12 - 02. 作者简介: 毛靖儒 (1954 ~), 女, 研究员. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59976031).

弯管是模拟不同曲率流道内流的典型模型.已有的研究表明,气相二次流对弯管的时均及脉动流有较大影响^[1].文献[2]利用轨迹法分别对一个叶栅通道和弯管内二次流对固粒磨损壁面的影响进行了研究,比较了有、无气相二次流情况下的磨损.本文利用双流体模型在贴体坐标系下对弯管内气固两相的二次流进行了数值计算,并应用气固两相动量方程在次流截面上分别采用速度是、否耦合两种求解方法,计算了固粒对壁面的磨损,结果与文献[3]吻合较好.

1 计算模型和控制方程

1.1 计算条件及网格划分

文献[4]利用 LDV 技术测量了由垂直到水平方向 100 mm ×100 mm 的 90° 形截面弯管内的气固两相湍流流动.弯管外半径为 226 mm、曲率为 1176(r/D).弯管垂直向下的一段长为 110 m,水平段长为 112 m.流体介质为空气,进口平均速度为 52119 m/s,雷诺数为 347 000,颗粒相为玻璃球,其密度为 2 990 kg/m³,平均直径为 50 μm,颗粒的体积分数为 6 ×10⁻⁸.本文计算采用上述实验参数.

计算区域如图 1 所示.计算在贴体坐标系下进行,流动方向为 Z 向,沿内外壁方向为 X 向,即径向,垂直于 X 方向为 Y 向.计算网格设置为 18 ×18 ×67. XOY 截面在壁面处网格加密.沿 Z 向(网格数为 12 + 40 + 15)在靠近弯管的 0°、90° 处网格加密,中间弧段均匀分布.

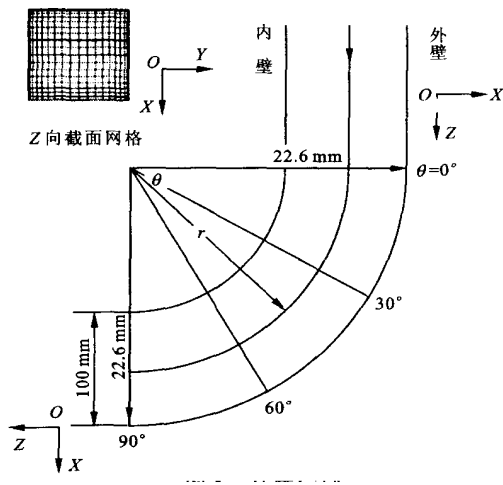


图 1 计算区域

1.2 模型及控制方程

本文采用双流体模型计算弯管内的稀疏气固两相湍流流动.采用体积平均法建立的定常且相间无

质量交换的两相流基本方程组为:

$$\text{总守恒方程} \quad \rho_p + \rho_f = 1 \quad (1)$$

$$\text{连续方程} \quad \alpha_k \cdot (\rho_k U_k) = 0 \quad (2)$$

$$\text{动量方程} \quad \alpha_k \cdot (\rho_k U_k U_k) = - \alpha_k (\rho_k P_k) + \alpha_k (\rho_k f_k) + F_{\text{inter}} \quad (3)$$

式中: f_k 代表作用在混合物单位质量 k 相上的体积力;下标 f 为流体相, p 为颗粒相; F_{inter} 为两相间的作用力,其表达式为

$$F_{\text{inter}} = - \nabla_k \cdot V^{-1} (P_k I - \tau_k) \cdot n_k dA \quad (4)$$

对方程(4)施与单相流体相似的雷诺平均,略去三阶关联项,可得两相湍流基本方程组:

$$\text{连续方程} \quad \alpha_k \cdot (\rho_k U_k) = S_k \quad (5)$$

$$\text{动量方程} \quad \alpha_k \cdot (\rho_k U_k U_k) = - \alpha_k (\rho_k P_k) + \alpha_k (\rho_k k_k + \rho_k \tau_k) + \rho_k f_k + (F_{\text{inter}})_i + S_{U_k} \quad (6)$$

式中: S_{U_k} 为动量方程中浓度与速度的脉动量关联引起的源项; S_k 为连续方程中由浓度引起的各种关联项.这些关联项的模化、初始条件、边界条件及源项的处理见文献[5].

2 二次流计算结果及分析

图 2 为应用双流体模型计算的沿弯管主流方向 0°、30°、60°、90° 截面上气相的二次流动.在 0° 的进口截面,气流径向速度都指向内壁,这是由于此处有较大的径向压力梯度所致.在 30° 的截面可清晰看到一对二次流旋涡,这种二次流的驱动力是弯

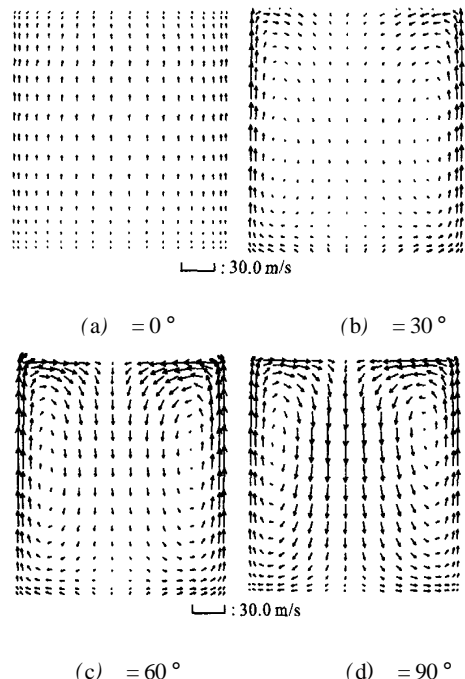


图 2 弯管内气相在各 Z 向截面的二次流矢量图

管壁附面层内低能流体受到离心力与压力梯度的不平衡力所致,根据流体流动的连续性,远离边壁的流体就会从内壁流向外壁,从而形成一对涡.这种二次流旋涡卷吸附面层内的低能流体并随主流向下游不断发展,在 θ 为 $60^\circ, 90^\circ$ 的截面,由于一对涡在中心线附近重叠,使得该处速度矢量沿 z 向投影速度越来越大.

固相在弯管内的二次流动相关因素较多,压力梯度、固相的大密度引起的惯性力,气固两相耦合的作用力等.图 3 显示了固相在各截面的二次流矢量量.在 θ 为 0° 的截面,固相与气相一样由于径向压力梯度的作用而流向内壁,但这一作用远不及气相明显,固相的最大径向速度 U_r 为 1121 m/s .随着 θ 的增大,固相由内壁流向外壁,而且越向下游发展,其径向速度越大,这是由于固相所受的离心力大于径向的压力梯度以及固相所受重力的径向分量所致.这种作用的积累使固相径向的速度在弯管出口截面 (θ 为 90°) 时达到最大, $U_{r, \max} = 29123 \text{ m/s}$.二次流动使固相流向外壁,使外壁处固相的浓度和其径向速度增大,从而使固粒对外壁面的磨损加剧.

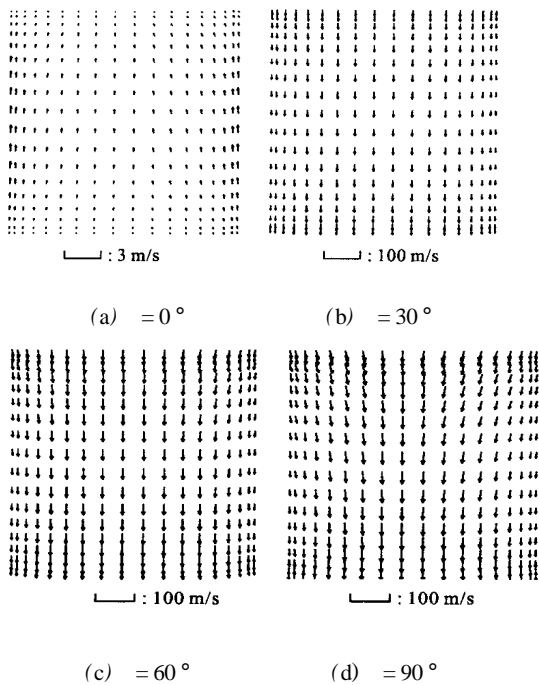


图 3 弯管内固相在 z 向截面的二次流速度矢量

图 4 是作者的计算值与文献[3]实验值的对比曲线.由于本算例属稀疏气固两相流,固相对气相的作用不很显著.在 $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ 的截面,固相的径向速度在靠近外壁处的实验值有一个突降,这是由于用 LDV 技术测量靠近壁面处的值是粒子碰撞前与反弹后径向速度的统计平均值,因反弹速度的反向会减

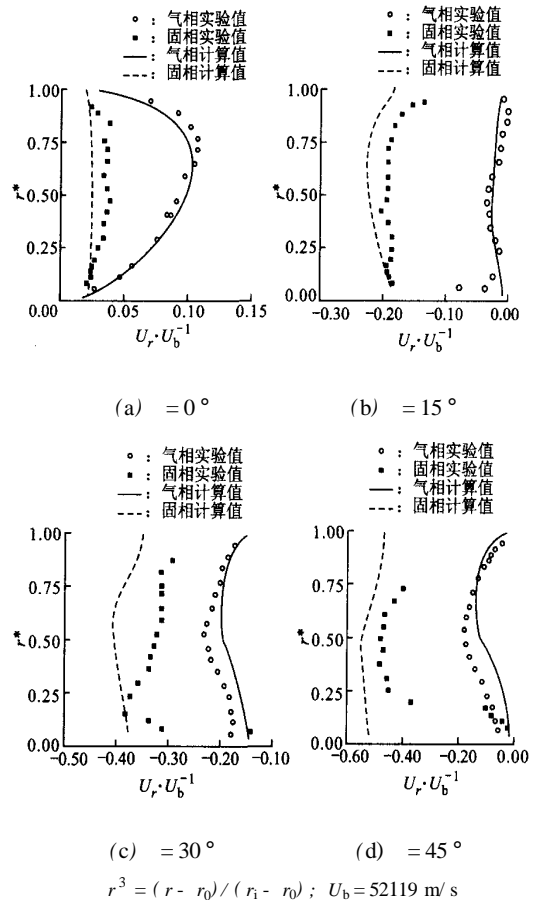


图 4 弯管内气固两相的径向速度(沿中心线)在 z 向截面的分布

小一次撞击速度,用这种测量结果做磨损其计算是偏小的.本文在计算固粒对壁面的磨损时,主要考虑固粒撞击壁面前的速度、撞击角度及固相在壁面处的浓度,这样直接用颗粒碰撞壁面前的径向速度分量计算磨损更为真实可靠.事实上,我们在实验中发现,部分反弹粒子会撞击壁面,有些甚至一直在附面层内脉动并多次接触壁面,反弹行为十分复杂,但其撞击强度与初次撞击相比要小得多.

3 二次流动对磨损的影响

在固粒及壁面物性条件一定的情况下,固粒对壁面的磨损取决于壁面处固粒的速度、撞击角度及浓度.二次流动对磨损的影响可以认为是通过改变固相在壁面处的速度分布、撞击角度及体积浓度而产生的.为了显示气相二次流对固相磨损壁面的影响,需计算固相不受气相二次流影响时在壁面处的撞击速度、撞击角度、浓度分布.为此,本文在求解固相动量方程时不考虑气固两相由于速度滑移在次流截面上气相对固相的拖曳力,也就是不考虑气相二次流动对固相的影响,利用双流体模型在贴体坐标系下重新对气固两相流场进行计算.方法是只要在

固相动量方程中忽略次流截面上气相对固相的拖曳力,在进口给定均匀的浓度和速度,并以浓度代替颗粒数目即可。

3.1.1 冲蚀模型

本文主要研究电厂用风机通流部分的磨损特性,因此固粒对壁面磨损的计算公式采用文献[4]提出的冲蚀模型,该模型主要针对煤炭粒子冲击 16Mn 钢表面的特征,在实验的基础上提出了以下半经验的磨损量计算公式

$$E = K_1 f_1 V_p^2 \cos^2 \alpha (1 - f_2^2) + K_3 V_p^4 \sin^4 \alpha \quad (7)$$

式中: $f_1 = [110 + K_1 K_{12} \sin(90^\circ - \alpha)]^2$; $f_2 = 110 - 0.1001 7 V_p \sin \alpha$; α 表示产生最大磨损量时的粒子撞击角,本文 α 为 25° ; V_p 表示粒子的撞击速度;当煤炭粒子撞击 16Mn 钢表面时,常数 $K_1 = 11505 101 \times 10^{-6}$, $K_{12} = 0.1296 077$, $K_3 = 510 \times 10^{-12}$ 。在壁面处每个网格单元上的总磨损量 E_m 的计算公式为

$$E_m = c_2 E$$

式中: c_2 是壁面处颗粒相的浓度,视为单位时间内固体颗粒撞击该点的次数,即撞击频率。有关细节请参见文献[5]。

3.1.2 计算结果及分析

图 5 为次流耦合时弯管外壁的磨损量分布。 $Y = n$ 表示 Y 向网格数为 n 的弯管外壁面区域,其中 $Y=9$ 表示外壁面的中心线网格区域, $Y=1$ 表示弯管外壁面上侧壁处的网格区域。从图 5 可以清晰地看到 $Y=9$ 时外壁中心处的磨损量较大,尤其在 90° 的截面达到最大,在靠近外壁上侧处的磨损量最小,最大磨损量是最小磨损量的 4 倍。外壁处磨损量最大的原因是气相二次流的方向与固相二次流的方向一致,而且气相二次流的速度在横截面上为最大,即阻碍固相由弯管内壁向外壁运动的力量最小;在外侧壁区域,磨损量急剧降低,是由于此处附面层内的气相速度与固相速度相反,使气相阻碍固相由弯管内壁向外壁运动的力量达到最大,从而使磨损最小。由此可见,二次流造成弯管外壁面的磨损量沿横向(Y 向)分布不均匀,中心处大,侧壁处小。由不耦合求解次流截面内气固两相动量方程时的气固两相二次流动矢量图可知(图略),耦合求解前后二次流的强度都随主流向下游发展,但不耦和求解时的气相二次流明显比耦合求解时的弱,同时不耦合求解时的固相二次流在其发生的最大截面处(90° 截面)要比耦合求解时的强。由此可以说明固相由于惯性较大在次流截面上对气相有很大的影响,而且弯管内

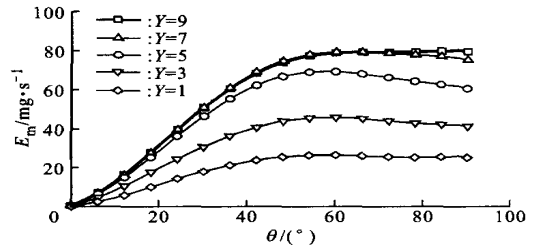


图 5 次流耦合时的弯管外壁磨损量分布

气固两相径向速度分布的实验数据也可以说明这一点。由图 4 可看到,固相速度在次流截面上明显大于气相,固相在次流截面上对气相有一个带动作用。从两相速度分布的轮廓线可以清晰地看出,特别是在中心区对气相的带动有助于气相二次流的发展。相反,气相在次流截面上的流动又阻碍了固相由于惯性在次流截面上向外壁的碰撞,有减轻磨损的作用,表现出较强的双向耦合现象。

4 结 论

(1) 固相由于惯性较大在次流截面上对气相有很大的影响,尤其在中心区对气相的带动有助于气相二次流的发展。

(2) 气相的二次流动阻碍了固相在次流截面上冲向弯管外壁的速度,一定程度上减缓了磨损。气相的计算结果与实验数据吻合较好。

(3) 固相二次流使外壁面上的磨损量分布变得不均匀,中心处大,侧壁处小,即使弯管外壁面中心区域的磨损量加大,在 90° 截面处达最大,是同截面侧壁处磨损量的 4 倍。固相二次流加剧了局部磨损,会显著缩短设备的寿命。

参考文献:

- [1] 史 峰. 大曲率弯道内气-固两相流的 LDV 测量及数值分析[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 1988.
- [2] Elsayed A F. Effects of secondary flow on particle motion and erosion in a stationary cascade [J]. Int J Heat & Fluid Flow, 1986, 7(2): 146 - 153.
- [3] Kliafas Y Holt M. LDV measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90° bend [J]. Experiments in Fluids, 1987, 5(2): 73 - 85.
- [4] Menguturk M, Sverdrup E F. Computer calculation of fan erosion in coal-fired power plants [J]. Inter J of Turbo and Jet Engines, 1985, 2(2): 169 - 176.
- [5] 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. (编辑 王焕雪)