文章编号:1673-5005(2008)06-0109-04

旋风分离器排气管内气相流场的数值模拟

金有海, 姬广勤, 曹晴云, 王建军

(中国石油大学 机电工程学院,山东 东营 257061)

摘要:采用雷诺应力模型对直切式旋风分离器内气相流动的三维流场进行数值模拟,分析了排气管内的气相流场特 点及排气管直径对气相流场的影响。结果表明:排气管内气流旋转强度较高,轴向速度呈强剪切流特征,并且存在 回流区,这些都是造成能量损失的重要原因;减小排气管直径可以抑制短路流量,使旋风分离器整个空间内的切向 速度增大,有利于颗粒分离,但同时压降增大。

关键词:旋风分离器; 排气管; 气相流动; 数值模拟 中图分类号: TQ 051.8 文献标识码: A

Numerical simulation of gas-phase flow field in vortex finder of cyclone separators

JIN You-hai, JI Guang-qin, CAO Qing-yun, WANG Jian-jun

(College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Based on Reynolds stress model, the three-dimensional gas-phase flow filed in cyclone separator with tangential inlet was simulated, and the characteristics of gas flow field in the vortex finder and the influence of the diameter of vortex finder on gas-phase flow field were especially analyzed. The results show that high gas swirling intensity, shear flow characteristics of the axial velocity and reverse flow are contributed to the energy loss in the vortex finder. When the diameter of vortex finder decreases, the downward flow decreases and the tangential velocities of the whole cyclone separator increase, but the pressure drop increases at the same time.

Key words: cyclone separators; vortex finder; gas flow; numerical simulation

旋风分离器内是复杂的三维湍流流场,实验测 量困难,并且获得的实验数据有限。五孔球探针与 热线风速仪为接触式测量方法,对流场有干扰;激光 多普勒测速仪(LDV)与颗粒图像测速仪(PIV)的测 量精度高,但在旋风分离器内离心力场中受示踪粒 子的限制,测量的难度大,成本高。目前随着计算流 体力学(CFD)的发展和商用软件的应用普及,对强 旋流动的模拟已经达到一定的精度。已有学者采用 多种湍流模型,如 k - e 模型^[1-2]、雷诺应力模型 (RSM)^[3-5]和大涡模型^[6-7]研究旋风分离器内的流 场,从模拟结果和目前的计算机水平看,以用 RSM 模型为宜。笔者针对直切式旋风分离器,采用 FLU-ENT6.2 流体计算软件提供的 RSM 模型对三维气相 流场进行数值模拟,分析排气管内流场特点,研究不 同排气管直径对气相流场的影响规律,为优化旋风 分离器结构参数提供参考。

1 几何和数学模型

1.1 几何模型与网格划分

直切式旋风分离器的结构尺寸如图1 所示。筒体直径为170 mm,进气口尺寸为43 mm×85 mm,坐标原点取在旋风分离器顶盖的中心轴线上,向下为正。考虑到进气管与筒体连接处的尖锐程度,采取分区生成网格的办法。不同区域内分别采用了结构化和非结构化网格,网格节点数为33 万个。

1.2 数学模型和边界条件

采用雷诺应力模型(RSM)模拟旋风分离器内 非稳态不可压缩湍流流动,使用有限体积法建立离

基金项目:国家"863"计划项目(2006AA06Z224)

作者简介:金有海(1956-),男(汉族),安徽无为人,教授,博士生导师,从事气固分离技术研究。

收稿日期:2008-01-26

散方程,采用 QUICK 差分格式和 SIMPLE 算法求解 控制方程。



图 1 直切式旋风分离器结构

Fig.1 Structure of tangential cyclone separator (1) 人口边界条件: 人口气流为常温状态的空

气,入口速度按实验值给定,即 v_i = 11.47 m/s。

(2)出口边界条件:按充分发展管流条件处理, 所有变量在出口截面法向上梯度为零,即^{∂ф}_{∂z}=0。 为此在计算中将旋风分离器的出口管路加长,以保 证充分发展条件的成立。

(3)壁面边界条件:采用无滑移条件,对近壁网 格点用壁面函数近似处理。

2 计算结果及其分析

2.1 计算值与实验值的对比

为了检验计算模型的可靠性,将流场模拟结果 与王建军^[89]利用激光 Doppler 测速仪(LDV)对同 尺寸旋风分离器测量的结果进行对比,见图 2。从 图中可以看出,不同流动区域内气流的切向速度轴 向速度计算值与实测值均吻合较好。由此表明,所 采用的计算模型和数值模拟方法能较好地预测旋风 分离器内的气相流场,有较高的可靠性。



Fig. 2 Comparison of numerical and experimental data

2.2 排气管内流场分布

排气管内切向速度和轴向速度分布如图 3 所 示。图 4 为排气管内切向速度沿轴向的变化曲线(r =25 mm,220°)。由图可知,切向速度沿径向呈"驼 峰"形分布,与分离器内分布规律基本相同;切向速 度沿轴向衰减,但衰减幅度较小;排气管出口处(排 气管轴向长度为其半径的 10 倍)最大切向速度仍 保持 14.3 m/s,是排气管入口处最大切向速度的 0.7 倍,这表明排气管中存在较强的旋转。由于排 气管内的旋转气流对于分离已毫无益处,气流的高



速旋转只能带来能量的消耗,而且旋转速度越高,旋转动能越大,能量消耗也越大。因此可以考虑在排 气管中设置导流叶片,以抑制气流旋转,从而实现流动减阻。

轴向速度从边壁向中心逐渐降低,而且速度梯 度很大,呈强剪切流的特征。在轴心附近轴向速度 甚至出现正值,产生了回流区。沿轴向距排气管入 口越远,回流区越小,直至完全消失。排气管中心附 近回流区的存在必然导致排气管内流动阻力增加, 从而造成能量损失。



图 3 排气管内切向和轴向速度分布





图 4 排气管内切向速度沿轴向的分布 Fig. 4 Axial distribution of tangential velocity in the vortex finder

2.3 排气管直径对流场的影响

图 5 为入口风速为 11.47 m/s 时不同排气管直 径旋风分离器内切向速度和轴向速度分布。由图可 见,随着排气管直径的减小,旋风分离器整个空间内 的切向速度增大,带动颗粒作高速旋转运动,有利于 颗粒的分离;同时轴心处气流的下行速度逐渐减小, 排气管入口处的回流区消失。

图 6 为环形空间 40°~220°方向纵剖面的二维 合成速度矢量图。由图可以看出,排气管入口附近 有较大的径向速度,一部分气流未通过下部分离空 间就直接进入排气管,形成所谓的"短路流"。根据 流量守恒关系可知,"短路流"量的大小与下行流量 沿轴向的变化量有关。旋风分离器每一断面处的下 行流量可以通过下行流中的轴向速度对过流面积的 积分求得^[10],即

$$Q = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r v_z dr.$$
 (1)

式中,Q为体积流量,m³/s;v₂为轴向速度,m/s;r为 径向距离,m;r₁和r₂为下行流区域的内外半径,m。

将轴向速度用多项式拟合为半径 r 的函数,并 根据式(1)积分,就可以得到下行流量。图7为计算 得到的排气管人口附近40°~220°下行流量沿轴向 的变化曲线。由图可知,分离空间内的下行流量沿轴向 向向下逐渐减小,尤其是排气管人口附近(z < 105 mm 区域内),下行流量沿轴向的减小量即成为进入 排气管的:"短路流"量。通过不同排气管直径对比可 知,排气管直径越小,下行流量变化曲线越平缓,沿 轴向的减小率越小,则"短路流"量也越小,分离空 间断面的下行流量增加,可使含尘空气在旋风分离 器内的停留时间增长,为颗粒创造更多的分离机会。

排气管直径分别为 75,86,96 mm 时,旋风分离 器的总压降分别为 620.8,529.3,441.0 Pa。随着排 气管直径的减小,分离器总压降增大。这是因为:人 口面积一定时,排气管直径减小,旋转速度增加,造 成流体内摩擦阻力以及流体与器壁间摩擦阻力增 大;同时,在排气管入口处径缩效应程度增大,致使 湍流程度增加,这些流动参数的变化都会引起旋风 分离器压降的增大。







3 结 论

(1)用雷诺应力模型对旋风分离器内气相流场进行了数值模拟,流动参数的模拟结果与实验结果吻合较好,有较高的预报精度。

(2)排气管内切向速度沿轴向衰减幅度很小,呈强旋流状态;轴向速度从边壁向中心的速度梯度很大,呈强剪切流特征;排气管入口附近存在回流区。



图 7 排气管入口附近下行流量沿轴向的变化 Fig. 7 Distribution of downflow rate in the

separation space near the inlet of the vortex finder 这些都是造成排气管内产生流动阻力的重要原因。

(3) 排气管直径减小可以增加分离空间的气流 旋转强度,降低排气管入口附近的"短路流"量,有 利于颗粒分离,但同时旋风分离器的总压降增大。

参考文献:

 ZHOU L X, SOO S L. Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator [J]. Powder Technology, 1990,63:45-53.

(下转第124页)

[3] SUNKL Kokal. Crude oil emulsions; a state-of-art review[R]. SPE 77497,2002.

[4] JAWORSKI Artur J, DYAKOWSKI Tomasz. Measurements of oil-water separation dynamics in primary separation systems using distributed capacitance sensors [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005,16:113-127.

- [5] WILKINSON D, WALDIE B. CFD and experimental studies of fluid and particle flow in horizontal primary separators[J]. Trans I Chem E, 1994,72(Part A):189-196.
- [6] BHARDWAJ A, HARTLAND S. Dynamics of emulsification and demulsification of water in crude oil emulsions
 [J]. Fuel and Energy, 1995,36(1):11-19.
- [7] 张鸿仁.油田原油脱水[M].北京:石油工业出版社, 1990.

(上接第112页)

- [2] HOEKSTRA A J, DERKSEN J J, VAN DEN AKKER H E A. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54:2055-2065.
- [3] GONG A L, WANG Lian-ze. Numerical study of gas phase flow in cyclones with the Repds[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, 38:506-512.
- [4] 胡砾元,时铭显,周力行,等.旋风分离器三维强旋湍 流流动的数值模拟[J].清华大学学报:自然科学版, 2004,44(11):1501-1504.

HU Li-yuan, SHI Ming-xian, ZHOU Li-xing, et al. Numerical simulation of 3-D strongly swirling turbulent flow in a cyclone separator[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 2004,44(11):1501-1504.

[5] 张雅,刘淑艳,王保国.雷诺应力模型在三维湍流流场 计算中的应用[J].航空动力学报,2005,20(4):572-576.

> ZHANG Ya, LIU Shu-yan, WANG Bao-guo. Application of the Reynolds stress model to the calculation of three-dimensional turbulent flow-field [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4):572-576.

[6] DERKSEN J J, VAN DEN AKKER H E A. Simulation of vortex core precession in a reverse-flow cyclone [J].

(上接第117页)

[9] 岳吉祥,綦耀光,肖文生,等. 深水半潜式平台钻井材
 料输送系统配置与布局研究[J]. 船海工程,2008,37
 (4):31-36.

YUE Ji-xiang, QI Yao-guang, XIAO Wen-sheng, et al. Study on configuration and layout about drilling material transportation system of semi-submersible drilling platforms [J]. Ship & Ocean Engineering, 2008,37(4);31-36.

- [8] BAKER G, CLARK W W, AZZOPARDI B J, et al. Transient effects in gas-liquid phase separation at a pair of T-junctions [J]. Chemical Engineering Science, 2007,63:968-976.
- [9] GALVIN K P, CALLEN A, ZHOU J, et al. Performance of the reflux classifier for gravity separation at full scale [J]. Minerals Engineering, 2005, 18:19-24.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M].2 版. 西安: 西安交通大 学出版社, 2001.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学 出版社, 2004.

(编辑 沈玉英)

AICHE Journal, 2000, 46(7): 1117-1331.

- [7] 刘成文. 旋风分离器的能耗与减阻杆减阻机理研究
 [D].北京:清华大学航天航空学院,2006.
- [8] 王建军,王连泽,刘成文.旋风分离器排气管内流动分析及减阻机理[J].过程工程学报,2005,15(3):251-254.

WANG Jian-jun, WANG Lian-ze, LIU Cheng-wen. Research on the flow field in the exit tube and the mechanism of pressure drop reduction in a cyclone separator [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 15(3):251-254.

- [9] 王建军,王连泽,刘成文.带有减阻杆的旋风分离器内 气体流动分析[J].化工学报,2005,56(6);989-994. WANG Jian-jun, WANG Lian-ze, LIU Cheng-wen. Gas flow analysis in cyclone separator with a stick[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China),2005,56 (6):989-994.
- [10] 钱付平,章名耀.不同排尘结构旋风分离器的分离特性[J]. 燃烧科学与技术,2006,12(2):169-174. QIAN Fu-ping, ZHANG Ming-yao. Separation characteristics of cyclone separators with different dust outlet geometries[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2006,12(2):169-174.

(编辑 沈玉英)

[10] 岳吉祥,秦耀光,任旭虎.基于人机工程学的海洋平台总体布局设计研究[J].中国海洋平台,2008,23
 (2):7-12.

YUE Ji-xiang, QI Yao-guang, REN Xu-hu. Study on the driller cabin of semi-submersible offshore drilling platforms based on human factors engineering [J]. China Offshore Platform, 2008,23(2):7-12.

(编辑 沈玉英)