文章编号:1673-5005(2009)06-0087-04

排气芯管结构对导叶式旋风管内 流场影响的数值模拟

金有海,马艳杰,许伟伟,王建军

(中国石油大学 机电工程学院,山东 东营 257061)

摘要:利用数值模拟方法,对比分析分流型芯管(SVF)及锥形芯管(CVF)对导叶式旋风管内流场的影响规律。结果表明:分流型芯管具有分流作用,芯管侧缝面积与芯管下口面积之比为2.42时,54%的含尘气流在侧缝处经惯性分离后进入排气芯管;与未开缝的锥形芯管相比,分流型芯管能有效降低芯管下口的短路流量,降低芯管内气流旋转强度,便旋风管总压降降低32%。

关键词:旋风管; 气相流场; 分流型芯管; 数值模拟 中图分类号: TQ 051.8 文献标识码: A

Numerical simulation of effects of vortex finder on gas phase flow in cyclone with guide finder

JIN You-hai, MA Yan-jie, XU Wei-wei, WANG Jian-jun

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

Abstract: The effects of the cone vortex finder (CVF) and slotted vortex finder (SVF) on the gas flow within the cyclones with different vortex finders were studied using numerical simulation method. The results indicate that, when the ratio of slot area to inlet area of SVF is 2.42, about 54% of gas flow entrances the slotted vortex finder through the slot. Compared with CVF, SVF can reduce the short circuit flow rate effectively. The SVF can also reduce the flow swirling intensity in the vortex finder. The total pressure drop decreases by 32%.

Key words: cyclone separator; gas flow field; slotted vortex finder; numerical simulation

旋风管的能量消耗中,有相当部分并没有用于 分离,属于消耗性能量,这部分能量包括设备本体结 构所造成的气流分配不均而产生局部涡流以及湍动 能损失等^[1]。旋风管内是一个复杂的三维强旋流 湍流场,旋转流场分为对颗粒分离起积极作用的外 旋流和以消耗能量为主的内旋流,环形空间既有切 向的主旋流,又有排气芯管下口的二次流及短路 流^[2],这些流动对旋风管的分离性能有直接的影 响,因此研究改善其结构对提高旋风管的分离性能 以及工程设计有重要意义。毛羽^[3],金有海^{(4-5]}等 在试验的基础上设计出导流锥结构,提高了旋风管 的分离性能,降低了能量消耗。笔者对分流型芯管 (SVF)与锥形芯管(CVF)的导叶式旋风管内的气相 流场进行数值模拟,探讨排气芯管结构对导叶式旋 风管内流场的影响规律。

1 导叶式旋风管的结构特点

排气芯管对旋风管内流场影响很大^[69],为了优 化芯管结构,设计出带有开缝结构的导流锥,又称分 流型排气芯管。图1为分流型排气芯管(SVF)和未 开缝锥形排气芯管(CVF)结构图。SVF 旋风管是在 锥形芯管的外壁上开有 22 条缝,每条缝高 220 mm, 宽 3.5 mm,且开缝方向与环形空间的气流旋转方向 保持一定夹角。芯管侧缝面积与芯管下口面积之比 为 2.42。

收稿日期:2009-02-17

基金项目:国家"863"计划项目(2006AA06Z224);教育部重点项目(109159);中国石油大学研究生创新基金 作者简介:金有海(1956-),男(汉族),安徽无为人,教授,博士生导师,研究方向为多相流分离。



Fig. 1 Structure of cyclone separators

2 数值计算结果及其分析

2.1 模型与计算条件

采用 fluent 软件中的雷诺应力模型对装有不同 排气芯管的导叶式旋风管内气相流场进行数值模 拟。为满足计算精度要求,SVF 旋风管内结构化网 格 397 632 个,CVF 旋风管内结构化网格 358 272 个,如图2 所示。坐标原点设置在导向叶片出口平



12 藏风管內打鼻运域的网格图及方流 芯管网格图

Fig. 2 Mesh of cyclone separator and vortex finder with slots

面中心,z 轴沿轴向向下为正。离散方程采用求解 压力-速度耦合方程的半隐算法(SIMPLE),控制方 程中对流项的离散相采用 QUICK 格式。

人口边界条件为常温状态的空气,人口流量为 1500 m³/h。人口为导流叶片的出口,采用速度入口 边界条件,通过 profile 用点轮廓文件定义入口边界 层。出口边界设为 outflow。壁面边界采用无滑移条件, 对近壁面网格点用壁面函数近似处理。

- 2.2 结果分析
- 2.2.1 准确性验证

图 3 为 SVF 旋风管内纵向不同位置处试验值 与模拟的无量纲切向速度对比。从图中可以看出, 数值模拟的结果具有较高的精度。





numerical predictions of tangential velocity

2.2.2 排气芯管结构对环形空间内流场的影响

图 4 为进入侧缝气体惯性分离示意图。由图 4 可知,由于开缝方向与气流旋转方向有一定的夹角, 气流沿侧缝外壁运动进入侧缝内时,有大角度的转 弯,由于瞬间气速基本不变,且转弯半径 r 较小,根 据离心加速度 a = v²/r 可知,颗粒受到较大的离心 力被甩向旋风管气壁方向。含尘气流在环形空间受 离心力惯性力作用,被提前分离。



图 4 进入侧缝气体惯性分离示意图

Fig. 4 Cartogram of inertial separation around slots

图 5 为旋风管内下行流量的分布。由图 5 可 知,在环形空间及排气芯管下口附近(120 mm < z < 470 mm),旋风管内下行流量的变化分 3 个阶段。A 段(120 mm < z ≤ 186 mm),该阶段 SVF 和 CVF 旋风 管内下行流量都保持稳定。B 阶段(186 mm < z ≤ 400 mm):SVF 旋风管内 z = 186 mm 截面下行流量 为0.253 m³/s, z = 400 mm 截面为0.162 m³/s, 根据 不可压缩气体流量守恒可知, 54%的流量经分流型 芯管的侧缝流走; CVF 旋风管在该阶段的下行流量 仍保持稳定。C 阶段(400 mm < $z \le 470$ mm); SVF 旋风管在该阶段的下行流量几乎不变, 即短路流量 为零; CVF 旋风管在该阶段的下行流量变化剧烈, 计算 z = 400 与z = 470 截面下行流量差可知, 38% 的进口流量经芯管下口流出旋风管, 称之为"短路 流"。由以上分析可知分流型芯管(SVF)能有效控 制短路流量。



Fig. 5 Axial profile of downward flow rate in annular region of vortex finder

2.2.3 排气芯管结构对芯管内部流场分布的影响

排气芯管内的强旋流对分离效率作用较小,只 会造成能量的浪费。模拟数据表明,分流型芯管能 有效降低排气芯管内的气流旋转强度。

图 6 为 z = 220 mm 截面速度矢量图。由图可 知:分流型芯管特殊的开缝角度形成排气芯管内旋 转方向相反的两股气流,从而减弱了排气芯管内气 流旋转强度,有利于减低能耗。另外,分流型芯管内 气流旋转中心与旋风管的几何中心重合,而未开缝 导流锥内气流旋转中心偏离旋风管几何中心,对排 气管内壁造成严重的磨损。





图 7 为 SVF 旋风管与 CVF 旋风管排气芯管内的 切向速度对比。SVF 旋风管排气芯管内切向速度最 大值为 14 m/s,且在 r <45 mm 的中心区域切向速度 小于2 m/s,说明 SVF 旋风管排气芯管内气流旋转强 度弱,消耗能量小。CVF 旋风管排气芯管内切向速度 最大值为 30 m/s,旋转强度大,消耗能量高。





SVF and CVF separator

轴向速度对比。SVF 旋风管排气芯管内轴向速度沿 径向基本不变;CVF 旋风管排气芯管内轴向速度沿 径向变化较大,z = -100 mm 截面上的最大轴向速 度与最小轴向速度相差近 10 m/s,说明 CVF 旋风管 排气芯管内存在涡流,能量以涡耗散的形式散失。 2.2.4 排气芯管结构对分离空间流场的影响

图 9 为 SVF 和 CVF 旋风管分离空间内的切向 速度对比。SVF 旋风管内切向速度较 CVF 旋风管 内小。主要是因为 SVF 旋风管内 53.8% 的气流经 侧缝进入排气管,46.2% 的气流和绝大部分颗粒将 在分离空间进行二次分离,缓解了分离空间的压力, 造成旋风管内切向速度变缓,有助于减少内部涡旋 耗散动能损失(特别是中心处准强制涡),显著降低 旋风管的能耗。



Fig. 9 Comparison of tangential velocity in separation region of SVF and CVF cyclone

图 10 为 SVF 和 CVF 旋风管分离空间内的轴 向速度对比。从图中可以看出,排气芯管下端开缝 后,分离空间的轴向速度峰值减小,即上行流速度减 小,下行流基本保持不变。下行流基本不变说明分 离出的颗粒运送未受到排气芯管开缝的影响。上行 流速度减小,一方面节约了能耗,另一方面延长了颗 粒在分离空间的停留时间,增加了颗粒被分离的机 会,有助于提高分离效率。



region of SVF and CVF cyclone

2.2.5 排气芯管结构对能耗的影响

人口流量同为1500 m³/h时,SVF和CVF旋风 管内产生的总压降分别为2.656和3.430 kPa。排气 芯管下端开缝后(开缝面积与排气芯管下口面积比为 2.42),总压降降低近32%。由此得出,安装开缝排气 芯管后,旋风管内消耗的压降明显降低。主要原因有 两方面:一是排气芯管下端开缝后,侧缝起到分流的 作用,减缓了分离空间准强制涡区域的切向速度,特 别是旋转强度,降低了准强制涡的无用功损耗;二是 排气芯管下端开缝后,经侧缝进人排气管内气流的旋 转方向与经排气管下口进人排气管的气流方向相反, 抑制了排气管内气流的强旋转,有效降低能耗。

3 结 论

(1)分流型芯管侧缝具有惯性分离的作用。 SVF 旋风管内 54% 的含尘气流经侧缝高效分离后 进入排气管。

(2)分流型芯管使得导流锥内涡流现象得到缓 解,气流旋转轴对称性好,且边壁的气流旋转方向与 中心处气流旋转方向相反。

(3)分流型芯管与未开缝芯管相比,排气芯管 内气流的切向速度、轴向速度减小,且轴向速度沿径 向分布梯度基本为零,二次流减缓,分离空间的旋转 强度略有下降。

(4)分流型芯管能有效降低旋风管能耗,理论 模拟总压降降低 32%。

参考文献:

- [1] 王连泽. 旋风分离器减阻杆减阻机理的研究及阻力损 失的理论计算[D]. 北京:清华大学热能工程系,1995.
- [2] 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 (Science and Technology), 2004,44(11):1501-1504.

- [3] 时铭显.用于旋风分离器中的分流型芯管[P]. 86100974.6,1986-10-09.
- [4] 金有海,王建军,王宏伟. PSC 型旋风管内气相流动的 实验与数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学 版, 2006,30(6):71-82.
 JIN You-hai, WANG Jian-jun, WANG Hong-wei. Experimental and numerical study of gas flow in PSC type cyclone tube[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(6):71-82.
- [5] 金有海,王建军,时铭显. PDC 型高效旋风管的流场 分析及结构改进[J].石油炼制与化工,1999,30(5): 39-43.

JIN You-hai, WANG Jian-jun, SHI Ming-xian. Flow field analysis and configuration development on the PDC type high efficiency cyclone tube Petroleum[J]. Processing and Prtrochemicals, 1999,30(5):39-43.

(下转第99页)

training algorithm [J]. Neural Processing Letters, 1999 (9):77-89.

- [7] DANILO P Mandic, JONATHON A Chambers. Towards the optimal learning rate for backpropagation [J]. Neural Processing Letters, 2000(11):1-5.
- [8] JOSE L Sanz-gonzalez, DIEGO A, JUAN S. Importance sampling and mean-square error in neural detector training[J]. Neural Processing Letters, 2002(16):259-276.
- [9] BILING S A, et al. A comparison of the back-propogation and recursive prediction error algorithm for training neural networks[J]. Mechanical System and Signal Processing,

(上接第90页)

[6] 王宏伟,王建军,金有海.导叶式旋风管人口环形空间 内气相流场数值模拟[J].石油化工设备,2006,35 (2):33-36.

WANG Hong-wei, WANG Jian-jun, JIN You-hai. Numerical simulation of the gas phase flow field in inlet annular space of a guide vane cyclone tube [J]. Petro-Chemical Equipment, 2006,35(2):33-36.

[7] 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,2005,5(3):251-254.

WANG Jian-jun, WANG Lian-ze, LIU Cheng-wen. Research on the flow field in the exit tube and the Mecha-

(上接第94页)

(2)管道横截面上的速度分布是不均匀的,越 接近管壁速度越小,越接近管道中心速度越大。管 道横截面上的温度分布也是不均匀的,接近管壁处 由于受到管壁的加热作用,温度具有较高值,接近管 道中心处温度具有较低值。

参考文献:

- 李治龙,钱武鼎. 我国油田用泡沫流体综述[J]. 石油 钻采工艺,1994,11(1):1-5.
 LI Zhi-long, QIAN Wu-ding. Survey on the application of foam fluid in China oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1994,11(1):1-5.
- [2] 李兆敏,蔡国琰. 非牛顿流体力学[M].东营:石油大 学出版社,1998.

1991:233-255.

- [10] 王永骥,涂健.神经元网络控制[M].北京:机械工 业出版社,1999:56.
- POGGIO T, GIROSI F. Networks for approximation and learning[J]. Proceedings of the IEEE, 1990 (78): 1481-1497.
- [12] 刘铁男,陈广义,任伟建.时变结构系统的辨识预报 和控制[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 1998:7.

(编辑 沈玉英)

nism of pressure drop reduction in a cyclone separator [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(3):251-254.

- [8] Arman Raoufi, Mehrzad Shams, Meisam Farzaneh. Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder [J]. Chemical Engineering Processing, 2008, 47:128-137.
- [9] LUCÍA FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, ANTONIO GUTÍERREZ LAVÍN. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008,47: 192-199.

(编辑 沈玉英)

- [3] 廖广志,李立众.常规泡沫驱油技术[M].北京:石油 工业出版社,1999:65-92.
- [4] 李兆敏,孙茂盛,林日亿,等. 泡沫封堵及选择性分流 实验研究[J]. 石油学报,2007,28(4):115-118.
 LI Zhao-min, SUN Mao-sheng, LIN Ri-yi, et al. Laboratory study on foam plugging and selective divided-flow [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):115-118.
- [5] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版 社,2001.
- [6] 李克向.保护油气层钻井完井技术[M].北京:石油 工业出版社,1993.
- [7] BLAUER R E, MITCHELL B J. Determination of laminar, turbulent and transitional foam flow friction losses in pipes [R]. SPE 4885, 1974.

(编辑 沈玉英)