

高温高压旋风分离器流场模拟及性能试验

董瑞倩, 孙国刚, 高翠芝, 郭广军, 刘 佳

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:提出一种圆形径向进口、筒体段扩径的拱顶旋风分离器新结构;并与 PV 型分离器进行了流场和分离性能对比。结果表明:在相同处理气量下,新型分离器外旋流区切向速度显著大于 PV 型,中心涡核区轴向速度小于 PV 型;用中位粒径为 $9\ \mu\text{m}$ 的滑石粉进行冷模试验,新型旋风分离器分离效率比 PV 型高约 1%;新型旋风分离器结构强度和分离性能优良,适合高温、高压的工况下应用。

关键词:旋风分离器;结构强度;分离性能;流场

中图分类号:TQ051.8⁴

文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2011)04-0001-04

Numerical and Experimental Study on New Type Cyclone Separator for High Temperature and Pressure Environments

Dong Ruiqian, Sun Guogang, Gao Cuizhi,
Guo Guangjun, Liu Jia

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: A new type cyclone with round gas entrance connected directly to the cylinder of expanded diameter and vault top was designed and constructed. The flow field simulation and contrast cold performance tests were conducted to compare the two type cyclones. The simulation results indicated that the tangential velocity in the outer vortex region of the new type cyclone was obviously higher than that inside PV cyclone and axial velocity inside the inner upward vortex region was lower. The separation efficiency measured by talc powders in median size of $9\ \mu\text{m}$ was approximately 1% higher than that of PV cyclone. These comparisons suggested that the new type cyclone was suitable for using in the high temperature and pressure environments.

Key words: cyclone separator; structural strength; separation performance; flow field

高温、带压气体除尘是石油、化工、清洁煤利用等

收稿日期:2010-11-02,修回日期:2011-01-05。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目,编号:2005CB221201。

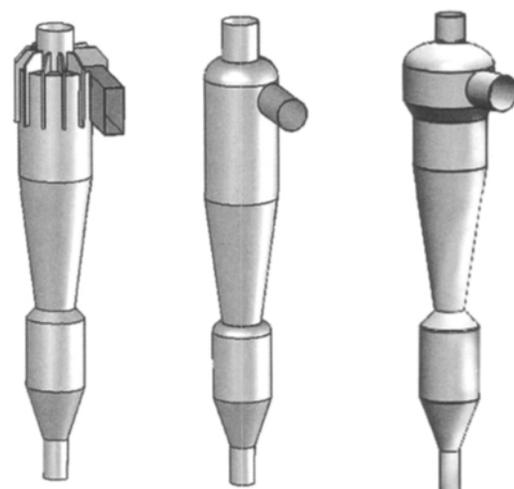
第一作者简介:董瑞倩(1983-),女,硕士研究生,主要从事石油化工过程设备研究。E-mail:dongruiqian910@126.com。

通信作者:孙国刚(1961-),教授,博士生导师,主要从事气-固分离技术及流态化工程方面的研究。E-mail:ggsunbj@163.com。

工艺中的一个重要问题。旋风分离器结构简单紧凑、操作维护方便、分离效率较高,常为高温、带压气体除尘净化的首选。传统的旋风分离器一般为切向矩形进口的异形结构,不便承受较高的压力与温度,应用的气体操作压力一般小于 0.5 MPa,实际应用中往往为保证设备的机械强度而牺牲一些分离效率。针对这一不足,研究人员提出了一些新的旋风分离器结构并进行了相关的研究^[1-6]。但在结构强度与分离性能综合优化方面还有待加强。本文中采用 FLUENT6.3 软件分析一种新型旋风分离器内流场,并通过试验评价其分离效率和压降,为高温高压旋风分离器的设计与应用提供支持。

1 新型旋风分离器的结构特征

图 1(a)为石油催化裂化装置中广泛应用的 PV 型高效旋风分离器基本结构。分离器顶部为简单的平顶板,含尘气体入口为矩形蜗壳入口,角焊缝用筋板加强。为适应高温、高压工况对设备强度的要求,孙国刚等^[2]将图 1(a)的分离器修改为压力容器封头式拱顶型,直切式圆型入口(图 1(b))。修改后的分离器具有压力容器式的外形结构,比图 1(a)的分离器具有更高的承压强度。但图 1(b)拱顶分离器的效率有所下降,且直切入口与筒体连接处的应力集中仍然较大。本文



(a) PV 型 (b) 拱顶 (c) 新型

图 1 旋风分离器的模型

Fig.1 Schematic diagram of cyclone structures

中进一步将图 1(b)分离器进口改为径向圆形,同时将分离器筒体进口段直径扩大,使含尘气流径向进入筒体扩径段,在环形通道中转向,沿切向进入分离器筒体形成旋转流动。新型旋风分离器结构如图 1(c)。

2 流场数值模拟

2.1 计算模型与方法

旋风分离器内流场是复杂的三维强旋转湍流流场。文献[7-8]对各种湍流模型进行了对比,结果表明:雷诺应力模型(RSM)能较好地模拟旋风分离器内流场。因此本文中模拟选用 RSM,压力梯度项采用交错压力格式(pressure staggering option, PRESTO)方法进行处理,而各对流项均采用 QUICK 差分格式。

新型旋风分离器与 PV 型旋风分离器的数值模拟对比在常温、常压状态下进行,气体选空气,入口边界条件采用速度入口。新型旋风分离器的入口截面比 K_A 与相对比的 PV 型旋风分离器同为 5.5,分离器的处理气量相同。分离器进口速度设定为 22 m/s,取湍流强度 $I=0.05$,出口边界条件为充分发展边界出口。为保证充分发展条件的成立,在计算中将旋风分离器出口段加长。壁面处采用无滑移边界条件,对近壁网格点用壁面函数近似处理。旋风分离器筒体直径均取 300 mm,采用六面体结构化网格,网格数为 18 万。以排气管下端截面为基准面($z=0$), z 轴向向下为正。网格结构如图 2 所示。文献[9]证明用此种方法模拟的旋风分离器流场与用激光多普勒测速系统(LDV)测定的流场相吻合。

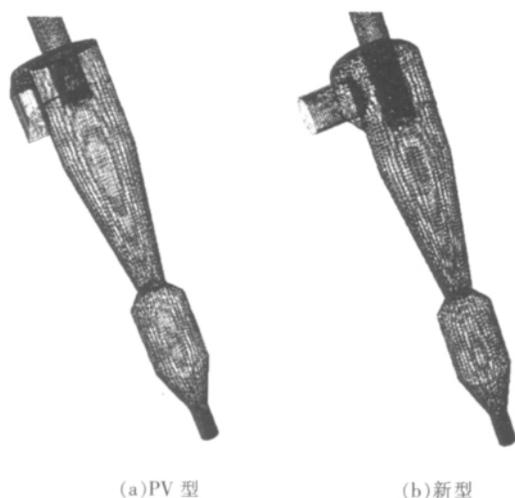


图 2 旋风分离器模拟网格

Fig.2 Computational fluid dynamics mesh for the cyclone

2.2 计算结果与分析

2.2.1 切向速度

相同处理量下,两种分离器分离空间 0~180°及 90~270°纵剖面切向速度分布如图 3 所示。图中, r 为从

分离器轴心计量的任意径向距离, R 为从轴心到分离壁面的径向距离。 $z=80$ mm 位于排气管下端 80 mm 处,处于筒体部分; $z=520$ mm 位于筒锥交接下端 100 mm 处,处于锥体部分。

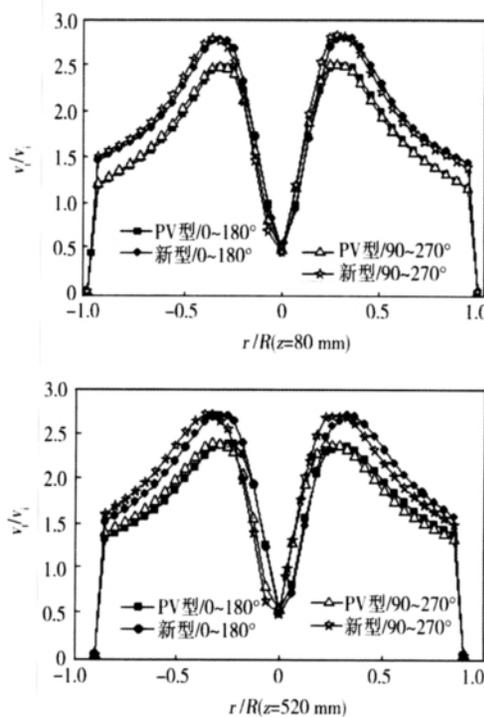


图 3 分离器分离空间 0~180°及 90~270°剖面切向速度径向分布比较
Fig.3 Comparison of tangential velocity profiles in separate space of two cyclones

由图可见:两种分离器分离空间的切向速度分布的轴对称性较好,外部为准自由涡,内部为准强制涡;在筒体及锥体段,两种分离器内外旋流的分界位置基本相同,内旋流区的切向速度也几乎一致,而在外旋流区,新型旋风分离器的切向速度明显高于 PV 型旋风分离器。由于切向速度在旋风分离器中占主导地位,是颗粒分离所受离心力的主要提供者,故较高的切向速度意味着颗粒受较大的离心力,有利于颗粒的分离和获得较高的分离效率。

2.2.2 轴向速度

新型旋风分离器与 PV 型旋风分离器分离空间内气体轴向速度分布的比较如图 4。由图可见:轴向速度沿径向存在一个速度值为 0 的转变点;分离空间的轴向速度总体上都可分为外部下行流区和中心上行流区。在下行流区,新型旋风分离器器壁附近向下的轴向速度比 PV 型的稍高,有利于将颗粒传输到排料口;在中心上行流区,新型分离器涡核部位的轴向速度比 PV 型约低 2~3 m/s,这有助于减少颗粒夹带,对分离效率有利。

由流场数值模拟可以推断新型分离器在保证结构强度的同时也会有较好的分离效率。

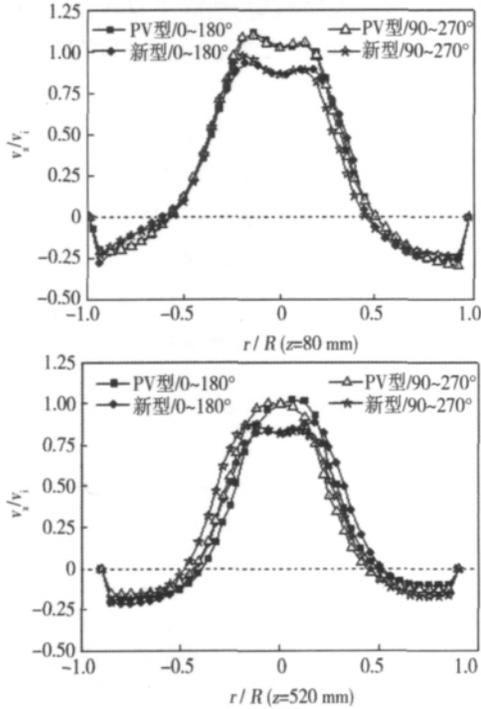


图 4 分离器分离空间 0~180°及 90~270°剖面轴向速度径向分布比较
Fig. 4 Comparison of axial velocity profiles in separate space of two cyclones

3 试验研究

3.1 试验方法和内容

为评价新型拱顶型旋风分离器的分离性能,在实验室内进行了新型分离器和 PV 型分离器的冷模性能对比试验。所对比的两类旋风分离器主体尺寸完全相同,模型分离器筒体直径为 300 mm。本试验中采用负压吸风式操作。试验入口气速为 14、18、22、26 m/s,粉料质量浓度为 10 g/m³;粉料为中位粒径为 9 μm 的滑石粉,颗粒真密度为 2 700 kg/m³。分离效率采用称重法测量,压降用 U 型管测量。

3.2 试验结果

旋风分离器压降实测值与模拟计算值对比如表 1 所示。两者的变化趋势一致,模拟计算结果与实测值吻合较好,从而也部分验证模拟的正确性。

不同气速下两种旋风分离器实测的压降如图 5。可见,在不同气速下,新型旋风分离器的压降要比 PV 型的高 20%左右,即阻力增加。

旋风分离器的阻力损失可以分为入口损失、边壁摩擦损失、旋转动能损失以及出口损失 4 部分。表 2 给出了入口速度为 22 m/s 的气速下两种分离器的压

表 1 两种旋风分离器压降对比

Tab.1 Comparison of pressure drop

型号	试验测量 $\Delta p_{me}/Pa$	数值模拟 $\Delta p_{sim}/Pa$
PV 型	3 825.90	4 093.44
新型	5 248.35	5 638.13

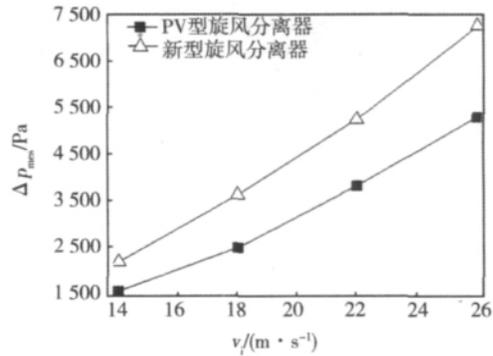


图 5 两种分离器不同气速下压降比较

Fig. 5 Pressure drop at various flow velocity of two type cyclones

降构成。可以看出:新型分离器的入口阻力损失所占比例相对增加。由入口横截面的速度矢量图(图 6)可以看出:新型分离器由于进气首先撞击导流板,造成了较大的入口损失,同时也在入口部位形成了低流速滞留区,使气流进入旋风筒体的有效流通面积减少,气体进入筒体的速度增加,从而导致分离器压降增加。但新型分离器入口的滞留区还可能对减缓颗粒对进口壁面的磨损有一定作用。

表 2 各部分阻力损失的比较

Tab.2 Comparison pressure drop between two cyclones

型号	所占比例/%		
	入口损失	边壁摩擦损失与旋转动能损失	出口损失
PV 型	6.562	28.311	65.127
新型	13.251	25.414	61.336

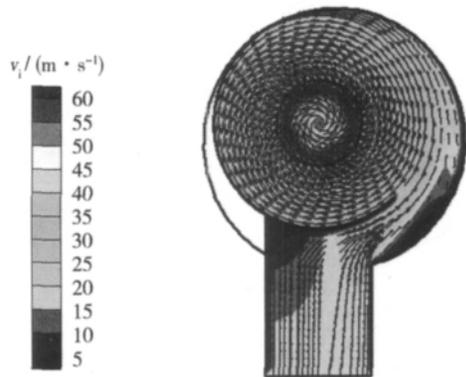


图 6 新型分离器入口截面的速度矢量图

Fig. 6 Flow velocity of inlet section of new type cyclone

图 7 是不同气速下两种分离器试验测量的效率对比。可以看出:新型旋风分离器压降虽然高于 PV 型旋风分离器,但效率也比 PV 型分离器高 1%~2%;相同压降的条件下,新型旋风分离器在气速 14 m/s 时就能达到 PV 型在 22 m/s 时的效率。图 8 为两种分离器的效率-压降曲线对比。上述对比表明:新型分离器在提高承压能力的情况下,在高气速下仍有较好的分离效率,比 PV 型旋风分离器更适合用于高压工况。

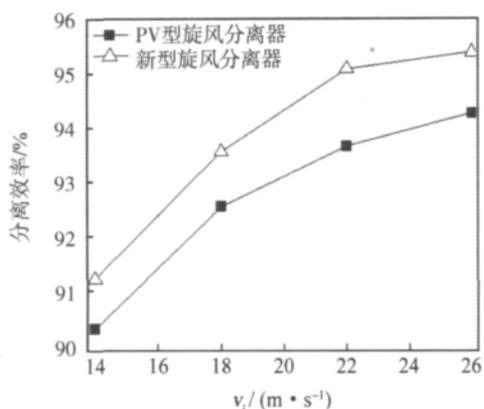


图 7 两种分离器试验测量的效率对比

Fig.7 Experimental results for efficiency of two type cyclones

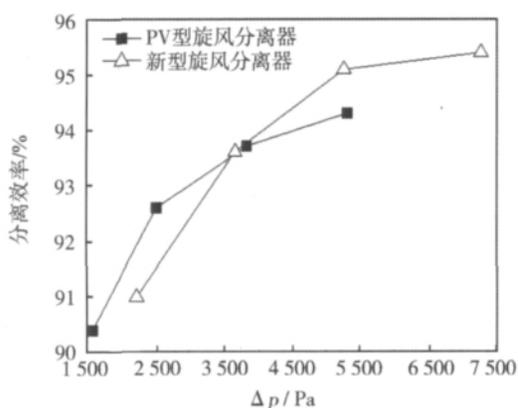


图 8 两种分离器的效率-压降曲线

Fig.8 Relations between pressure drop and efficiency of two type cyclones

4 结论

以工业应用广泛的 PV 型旋风分离器为基础,本文中提出了一种压力容器封头式拱顶、扩径、圆管径向

进气的新型旋风分离器结构,消除了直角接头,增加了分离器的承压能力。模拟结果表明:新型旋风分离器外旋流区切向速度明显高于 PV 型,而上行流区的轴向速度低于 PV 型,有利于颗粒分离和减少颗粒夹带。冷模试验对比证明:在相同入口风速下,虽然新型分离器的压降高于 PV 型,但效率也比 PV 型高 1%~2%;在相同压降下,新型分离器效率也较高,且高入口风速时效率更高。故对高温、高压的工况,新型旋风分离器更具优势,但其入口结构还有待进一步研究优化。

参考文献 (References):

- [1] SHIN Mi-Soo, KIM Hey-Suk, JANG Dong-Soon, et al. A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 25: 1 821-1 835
- [2] 孙国刚, 李双权, 杨淑霞, 等. 高温高压旋风分离器的性能及其应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 98-101
- [3] 许世森, 许晋源, 许传凯. 温度和压力对旋风分离器高温除尘性能影响的研究[J]. 动力工程, 1997, 17(2): 52 - 58
- [4] 田坪, 李双跃, 张亚南, 等. 高效、低阻分离器入口结构改进及测试分析[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(3): 7-11
- [5] 王洪英. 煤气化高温加压旋风分离器的设计研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京)化工学院, 2007: 29-42
- [6] 李双权, 孙国刚, 时铭显. 排气管偏置对 PV 型旋风分离器效率及压降的影响[J]. 中国粉体技术, 2004, 10(s): 100-103
- [7] 王海刚, 刘石. 不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 337-342
- [8] CORTÉ S Cristó bal, GIL Antonia. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separator [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33: 409-452
- [9] 胡瓌元, 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): 1 501-1 508