

旋风式油气分离器数值模拟与实验研究

冯健美, 杨鑫, 高翔, 畅云峰

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对旋风式油气分离器内高速旋转流场引起油滴与壁面碰撞而破碎, 从而使分离效率降低的问题, 设计了多种不同参数组合的旋风式分离器, 对分离器内部气液两相流动及分离效率进行了数值模拟和实验研究, 其中气相流场采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 油滴运动轨迹采用分散相模型. 同时, 搭建了油气分离器性能试验台, 对不同结构参数的旋风式油气分离器在不同工况下的分离效率进行了测试, 并利用 Malvern 激光粒度分析仪对分离器进出口油滴粒径分布进行了测量与分析. 研究表明, 最佳的入口速度与参数组合使得分离器效率最高, 对于直径大于 $25\ \mu\text{m}$ 的油滴, 旋风式分离器完全可以分离. 旋风式分离器内部油滴分离的数值模拟与实验对比表明, 采用考虑油滴破碎的分散相两相流模型的模拟结果与实验数据吻合良好.

关键词: 旋风式油气分离器; 油滴粒径分布; 数值模拟; 分散相模型; 分离效率

中图分类号: TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0055-05

Numerical Simulation and Experiment on Oil-Gas Cyclone Separator

FENG Jianmei, YANG Xin, GAO Xiang, CHANG Yunfeng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The high-speed swirling flow field in a cyclone separator will cause the breakup of oil droplets because they collide with the wall, thus reducing the separation efficiency. Numerical simulation and experiment were done on separation efficiency and two-phase flow in oil-gas cyclone separators with different geometrical features. The gas flow field was simulated using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model and the trajectory of the oil-droplets was calculated by the discrete particle model (DPM). The test rig was established to measure the efficiency of oil-gas cyclone separators with different geometrical features and inlet velocities. In the experiment, a Malvern particle size analyzer was applied to obtain the droplets diameter distribution at the inlet and outlet of the cyclone separator. The results show that the highest separation efficiency could be achieved with the optimum inlet velocity and structure parameters, and the droplets with diameters of larger than $25\ \mu\text{m}$ could be easily separated. It appears that the predictions are in reasonable agreement with the experimental data when the DPM model considering the oil droplets breakup is used to simulate the separation efficiency of oil-gas cyclone separators.

Keywords: oil-gas cyclone separator; droplets diameter distribution; numerical simulation; discrete phase model; separation efficiency

油气分离器的分离效率是影响喷油压缩机系统性能的关键指标之一. 目前, 喷油压缩机系统中常用

两级分离, 先经过油气分离器的一级分离, 去除粗大的油团, 再通过滤芯来分离微小油滴或油雾. 相比于

需要严格限制气流速度的重力沉降分离和机械碰撞分离,作为一级油气分离器结构的旋风式油气分离可采用较高的入口流速,并且大幅减小了分离器尺寸.在旋风式油气分离器中,油气混合物由进气管切向进入分离器,油滴受离心力的作用,一部分与壁面发生碰撞而破碎或反弹,并随气流经出口逃离分离器.

周华等人^[1]通过对卧式油气分离器内部流场进行数值模拟,提出了加大出口段体积、延长流动路径的改型方案,改型后分离效率有所提高.刘小宙^[2]采用修正 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟了压缩机系统中旋风式油气分离器的内部气相流场,指出加长出气芯管可以使旋流得以充分发展,从而提高分离效率.庞东晓^[3]利用 CFD 软件对旋风式油气分离器内部流场进行了数值模拟,并得出了一些定性的结论.文献[4-5]对卧式油气分离器出口油滴分布及分离特性进行了模拟和实验研究,讨论了入口流速和喷油量对分离效率的影响. Eastwick^[6]和 Willenborg^[7]等人对不同结构的航空发动机中卧式油气分离器进行了理论和实验研究,指出轴的转速和入口油气流速对分离效率的影响较大,而油气分离器本身是高速旋转的,分离过程不同于静止的油气分离器.

上述研究主要集中于通过数值模拟对某种类型的油气分离器提出改进与优化,而未能从不同结构油气分离器内部油滴分离机理上来分析模拟模型的有效性和准确性,因而很难将模拟模型推而广之,用以不同结构类型的油气分离器.

本文对不同结构尺寸和不同入口速度的立式旋风分离器内部两相流动进行了数值模拟,同时实验测量了分离器分离效率及分离器进、出口油滴粒径分布特征.通过对模拟结果与实验数据的对比分析,讨论了旋风式分离器主要参数对分离效率的影响,其为数值模拟模型的改进奠定了基础.

1 数值模拟

1.1 两相流模型

利用 CFD 商用软件的两相流分散相模型(DPM)对旋风式分离器内部两相流动进行了模拟计算,其中气相为连续相,用欧拉方法描述,油滴为离散相,用拉格朗日方法描述.在压缩机排出的油气混合物中,油滴的浓度(体积分数)常小于 10%,所以可作为稀相处理.

在气相场流计算中,假设气体各向同性,不可压缩,气相流场可采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,通过压力-速度耦合^[8]进行求解.

油滴的运动轨迹可以通过分析油滴在气相流场所受作用力,根据油滴运动方程求得,气相及油滴相的具体求解方程详见文献[5].因考虑油滴破碎的影响,需按照非定常流动来计算油滴在分离器内部状况.

1.2 边界条件

(1)气相边界条件.入口:速度边界,即入口流速分别为 5、10、15、20 m/s;出口:压力边界,即出口压力为排气压力,分别为 0.6、0.7、0.8、0.9 MPa;壁面:无滑移边界,按壁面函数法处理.

(2)油滴相边界条件.入口:入口处油滴粒径分布规律,由实验测得,按 Rosin-Rammler 分布函数给定,油滴入口速度与气体入口速度相等;出口:逃逸边界,即油滴从此边界离开分离器,则认为其未被分离;壁面:反射(reflect)边界,即如果油滴无法逃逸分离器,则认为其被分离.

2 实验研究

在压缩机排出的油气混合物中,通常会有一些尺寸较大的油团.为了保证 Malvern 激光粒度分析仪在测量旋风式油气分离器进、出口油滴粒径分布上的准确性,实验系统中压缩机排出的油气混合物首先经过一个卧式粗分离器,然后再进入实验用旋风式油气分离器.油气分离器的结构如图 1 所示,其中 H 为外筒体高度, D 为外筒体直径, h 为中心管高度, d 为中心管直径.

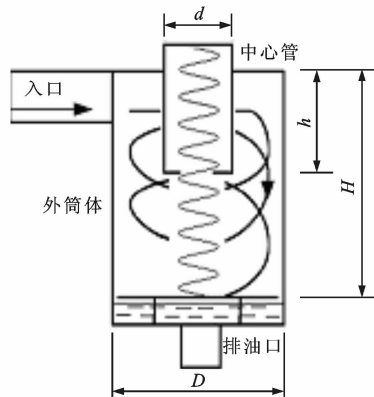


图1 旋风式油气分离器的结构示意图

实验系统流程图及实验装置如图 2 所示.在旋风式分离器进、出口段,分别安装了用于 Malvern 测量的实验段观测管 1、2,观测管两端设有高压氮气进口,氮气纯度(体积分数)为 99%.压缩机的排气经滤芯分离后再分别进入 AO 级和 AA 级超精滤芯,最后经喷嘴测量装置排入大气.压缩机的容积流量

效率要低于模拟结果. 对 CS2 分离器, 模拟分离效率与实验结果在不同的入口速度下均吻合, 误差小于 2%. 对比结果表明, 在旋风式分离器中, 油滴的破碎情况对分离效率有显著的影响.

对 CS3 分离器, 其中心管底部与外筒体底部之间的距离只有 12 mm, 如此狭小的空间会使得气流速度在局部迅速增大, 造成流场紊乱, 将原本已经附着在分离器壁面及外筒体底部的油滴重新带回气流场中, 从而导致分离效率低于 50%. 在数值模拟中, 模型未考虑气流卷起筒体底部油面的影响, 因而此模型对于 CS3 的模拟误差较大.

3.2 分离器进、出口油滴粒径分布特征

对不同结构的旋风式分离器进、出口油滴粒径分布进行了实验测量, 限于篇幅, 下面仅给出了 2 种结构参数下分离器进、出口的油滴分布特征, 如图 4 所示.

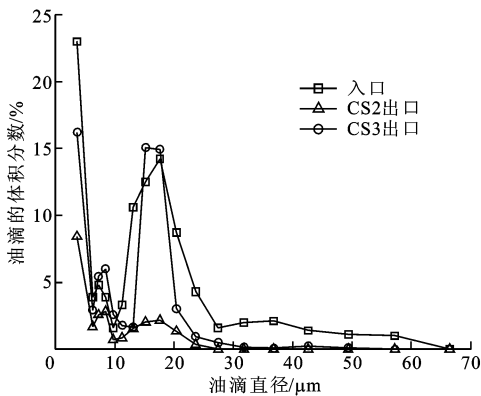


图4 分离器进出口油滴粒径分布
(入口流速为 10.5 m/s)

从图 4 中可以看出, 在进入旋风式分离器之前的油气混合物中, 直径小于 5 μm 的油滴占总进口油量的体积分数为 22.6%, 直径在 10~25 μm 之间的为 51.6%, 直径大于 25 μm 的为 11.4%. 需要说明的是, 为了对比分离器对不同粒径油滴的分离能力, 图中出口处油滴体积分数为出口处不同粒径油滴占进口总油量的体积分数. 经过分离器分离后, 直径大于 25 μm 的油滴的体积分数为 0, 说明油滴被完全分离, 而直径小于 5 μm 的油滴的分离难度较大. CS2、CS3 下分离器的出口油滴的体积分数分别为 8.2% 和 16.8%, 这 2 种结构之间的主要差别在于, CS2 下直径为 10~25 μm 的油滴的分离效果比较好, 实测分离总效率可达 75.6%, 而 CS3 下直径为 10~25 μm 的油滴几乎未被分离, 实测分离总效率仅为 28.3%. 所以, 对于直径为 10~25 μm 的油

滴的分离能力是影响旋风式油气分离器分离效率的关键因素. 在 CS3 分离器的出口处, 直径为 7~10 μm 和 15~17 μm 的油滴数量多于进口处, 这表明, 在旋风式分离器中油滴碰到壁面后不一定被全部捕捉, 如果速度较大, 油滴将破碎, 而这些破碎的小油滴难以分离, 从而降低了分离器的分离效率. 因此, 数值模拟模型应考虑油滴的碰撞和破碎情况.

在文献[4-5]前期的研究中, 利用忽略油滴破碎的分散相模型(DPM)对卧式油气分离器分离效率的模拟结果与实验值吻合良好. 但是, 卧式分离器的内部气体流速低于旋风式分离器, 卧式分离器内部油滴受离心力的作用甩向壁面时的瞬时碰撞能量也就小于旋风式分离器. 旋风式油气分离器, 主要是依赖油滴在流场中受到较大的离心力而实现油气分离的, 这样就必须保证分离器内部具有一定速度的旋转气流, 而速度增大会增加油滴与壁面碰撞时的能量, 使得油滴发生破碎, 从而降低了分离效率.

3.3 分离器结构尺寸与入口速度对分离效率的影响

通过实验测量了不同结构、不同入口速度下的旋风式油气分离器的分离效率. 图 5 仅给出了结构参数和入口速度对分离效率综合影响的模拟值和实验结果, 其中定义分离空间比

$$X = \frac{(\pi/4)(D^2 - d^2)h + (\pi/4)D^2(H - h)}{(\pi/4)D^2H} = 1 - \frac{d^2}{D^2} \frac{h}{H} \tag{2}$$

由式(2)可知, 中心管的直径 d 、长度 h 、筒体长度 H 均会影响分离效率. 如图 5 所示, 不同的 X ($X_{CS1} = 0.95$, $X_{CS2} = 0.63$), 分离效率的模拟值与实验结果均吻合良好, 且变化趋势基本一致. 另外, 在不同入口速度下分别存在最优结构参数, 可使得旋风式油气分离器达到最优效率. 当入口速度为 9.3 m/s 时, 分离效率在 $X = 7.6$ 时最大, 而入口速度为 14.1 m/s 时, 分离效率在 $X = 8.8$ 时最大.

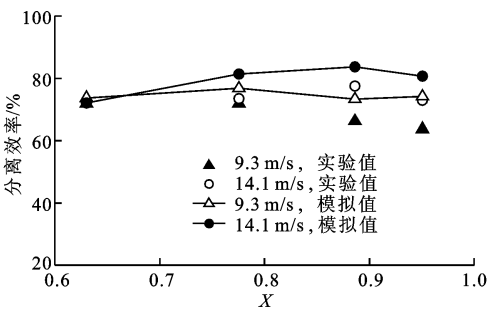


图5 结构参数和入口速度对分离效率的影响

4 结 论

(1)旋风式油气分离器内部高速旋转的流场使得油滴与壁面发生碰撞后,一部分油滴破碎为直径更小的油滴,从而降低了分离效率.实验与模拟结果对比指出,考虑油滴破碎与碰撞的两相流模型可以有效模拟不同结构的旋风式分离器内部油滴的运动轨迹及其分离过程.

(2)通过采用 Malvern 激光粒度分析仪实测获得的旋风式油气分离器进、出口油滴粒径分布特征可知,直径大于 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的油滴可以完全分离,直径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的油滴则难以分离,设法提高直径为 $10\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 油滴的分离效率是提高旋风式油气分离器效率的主要途径.

(3)旋风式油气分离器结构参数(h, d, H)和入口流速对分离效率存在较大影响,因此存在一个最优的结构参数组合和入口流速.入口速度为 14.1 m/s 时,分离效率在 $X=0.88$ 左右时达到最大.

参考文献:

[1] 周华,夏南. 油气分离器内气液两相流的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2006, 23(6): 766-771.
ZHOU Hua, XIA Nan. Numerical simulation on the gas liquid flows inside the oil gas separators [J]. Chinese Journal of computational Mechanics, 2006, 23(6): 766-771.

[2] 刘小宙. 压缩机油气旋风分离器的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005.
[3] 庞东晓. 新型高效油气分离器性能研究及产品设计[D]. 成都: 西南石油学院, 2004.
[4] FENG Jianmei, CHANG Yunfeng, PENG Xueyuan, et al. Investigation of the oil gas separation in a horizontal separator for oil-injected compressor unit [J]. IMechE: Part A Journal of Power and Energy, 2008, 222(A4): 403-412.
[5] 冯健美, 畅云峰, 张勇, 等. 油气分离器内油滴运动轨迹的模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 771-775.
FENG Jianmei, CHANG Yunfeng, ZHANG Yong, et al. Numerical simulation of oil droplets traces in oil-gas separator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7): 771-775.
[6] EASTWICK C N, SIMMONS K, WANG Y, et al. Study of aero-engine oil-air separator [J]. IMechE: Part A Journal of Power and Energy, 2006, 220(A3): 707-717.
[7] GORSE P, DULLENKOPF K, WITTING S. Experimental analysis of air/oil separator performance [C]// Proceedings of GT2006, ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air. New York, USA: ASME, 2006: 1495-1560.
[8] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.

(编辑 苗凌)