

喷油压缩机卧式油气分离器特性的数值模拟及实验研究

冯健美^{1,2}, 畅云峰², 张勇², 彭学院^{1,2}, 屈宗长²

(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. 西安交通大学压缩机研究所, 710049, 西安)

摘要: 在对油气分离器内气相流场模拟计算的基础上, 采用随机轨道模型对不同直径油滴在分离器一次油分内的运动轨迹进行了模拟计算, 并使用 Malvern 粒度分析仪对油分离器一次油分出口处的油滴直径分布特征进行了实验测量, 同时对排气压力和喷油量变化对一次油分效率的影响进行了测量. 结果表明: 不同直径的油滴颗粒的运动轨迹差别较大, 其分离时间和分离效率也截然不同, 直径较大的颗粒较容易分离下来; 油滴的入射位置对其运动轨迹及分离时间也有明显的影响. 随喷油量的增加, 油气混合物中大直径油滴增多, 一次油分效率增高; 一次油分效率随排气压力的升高先提高后降低, 排气压力为 0.65 MPa 时, 一次油分效率最高. 模拟计算表明: 此分离器一次油分能够完全分离的最小油滴直径为 16 μm ; 实测油气分离器出口处油滴的最大直径介于 17.7~20.5 μm 之间, 所占体积分数为 0.2%. 实验结果与数值计算结果基本吻合.

关键词: 喷油压缩机; 油气分离器; 数值模拟

中图分类号: TB652 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0561-04

Theoretical and Experimental Research on Oil-Gas Separator in Compressor System

FENG Jianmei^{1,2}, CHANG Yunfeng², ZHANG Yong², PENG Xueyuan^{1,2}, QU Zongchang²

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

2. Compressor Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the numerical simulation of gas flow in an oil-gas separator, traces of different diameter oil droplets in the separator were simulated using the discrete random walk model. The sizes of oil droplets at the outlet of the oil-gas separator were measured by Malvern analyzer. Separation efficiency of the separator was tested with different discharge pressure and mass of oil injection. The results show that the traces of different diameter oil droplets are different, and the corresponding separation efficiency and the separation time are not the same. The larger diameter oil droplets are separated easily. The separation efficiency increases with the increase of the oil injection mass, however, it increases and then decreases with the increasing discharge pressure. When the discharge pressure was 0.65 MPa, the maximum separation efficiency is obtained. The simulation results indicate that under the calculation condition, the minimal diameter of oil droplets separated completely by the separator is 16 μm . And the measured maximal diameter of oil droplets at the separator outlet is from 17.7 μm to 20.5 μm . The simulation results are in agreement with the experimental data.

Keywords: oil injected compressor; oil-gas separator; numerical simulation

在喷油压缩机的诸多性能评价指标中,油气分离器的分离效率是一个重要指标。油气分离器的分离效率常用排出的高压气体中油的质量分数来评价,一般要求质量分数达到 $2 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-6}$ [1]。在工程上油气分离通常采用两级分离,先在一次油分离器内进行机械碰撞及重力沉降等粗分,然后再将剩余的低浓度油气混合物用多孔滤芯过滤分离出来。一次油分的效率越高,进入二次油分滤芯的油量就越少,油分滤芯的负担就越轻,其分离效率也就越高,使用寿命也随之提高。显然,油气分离器一次分离效率的高低对其总的分离效率有重要影响。

要提高油气分离器的一次分离效率,需要深入研究一次油气分离器内的流场分布及油滴运动规律。目前,对喷油压缩机油气分离器内部流场的数值模拟很少 [2-3],实验研究主要使用称重法,且测量的为油气分离器总的分离效率 [4-5],没有针对一次油分效率的实验研究。本文采用 CFD 数值模拟方法对目前常用的卧式油气分离器一次油分内的流动分布进行详细研究,分析油滴运动轨迹及分离机理,并设计专门实验台对一次油分特性进行实验测量,为油气分离器的结构设计和改进提供依据。

1 理论分析

1.1 物理模型

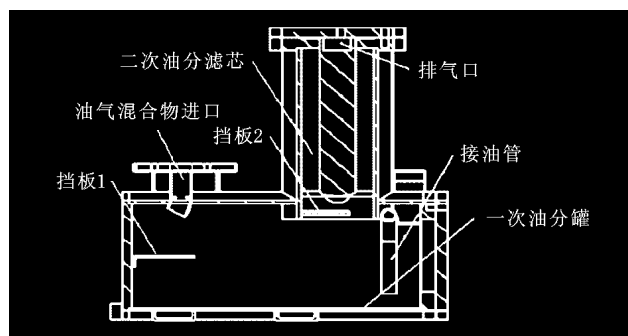
本文对一种喷油螺杆空气压缩机用卧式油气分离器进行模拟计算和实验研究。从压缩机排出的油气混合物进入分离器,经过一次油分和滤芯二次过滤后,洁净的压缩气体从排气口排出使用,分离下来的润滑油经冷却后重新喷入压缩机循环使用。本文重点研究一次油分特性,因此在模拟计算和实验时,油气分离器内都没有安装二次油分滤芯,具体结构及其网格划分如图 1 所示。其网格采用三角形非结构化网格。

1.2 数值计算方法

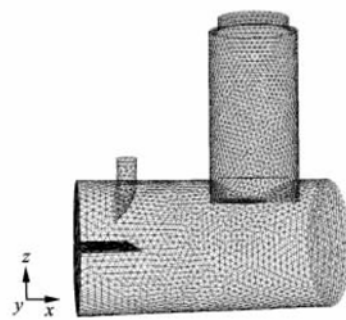
由于油气混合物中油滴相的体积分数一般均小于 10%,因此将油滴相当作稀相处理。对油气分离器内的两相流动模拟采用分相流模型。油气分离器内气相场的湍流流动采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型 [6] 计算。计算方法采用 SIMPLE 算法,近壁区采用改进的壁面函数法处理 [6]。动量、能量、紊动能及紊流耗散率控制方程中对流项的离散格式均采用 QUICK 格式。气相及液滴相的具体求解方程详见文献 [7]。

1.3 边界条件

气相边界条件:进口给定速度边界;出口为压力



(a)分离器结构



(b)网格划分

图1 分离器结构简图及网格划分

边界;壁面采用无滑移边界条件。

油滴相边界条件:油气分离器入口为逃逸边界条件,即油滴如果因回流到达这个面,则认为油滴将脱离这个边界面,不再返回计算域;油气分离器出口设为逃逸边界条件;油气分离器内壁设为捕捉边界,即油滴到达壁面后将被壁面捕捉。

1.4 模拟计算结果

分别对不同直径的油滴颗粒在分离器内的运动轨迹进行了模拟计算。图 2 是直径 d_p 为 1、10、16 μm 的油滴运动轨迹。从图中可以看出,不同直径的油滴在分离器内被分离的时间和运动轨迹明显不同,直径大的颗粒易于分离。另外,油滴的入射位置对其分离过程和运动轨迹也有很大的影响。

相同数量的不同粒径油滴从入口截面喷入,根据计算得出的出口截面未被分离的油滴数目,求得分离器一次油分对不同直径油滴的分离效率,结果如图 3 所示。结果表明,一次油分效率随油滴直径增大而提高,直径大于 10 μm 后,一次油分效率迅速提高,对于直径大于 16 μm 的油滴,可以在一次油分过程中被完全分离。

2 实验验证

2.1 实验装置

为了验证对油分离器特性模拟计算的准确性及

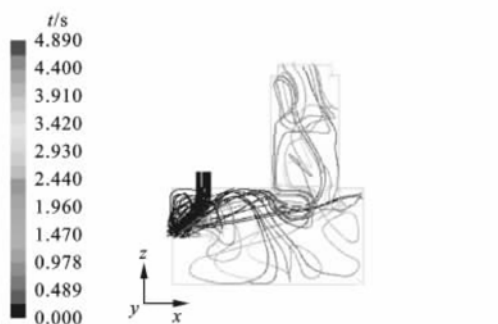
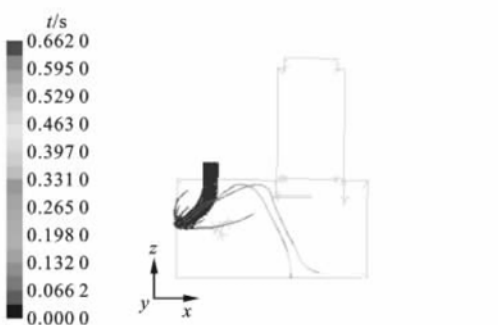
(a) $d_p = 1 \mu\text{m}$ (b) $d_p = 10 \mu\text{m}$ (c) $d_p = 16 \mu\text{m}$

图2 不同直径油滴的运动轨迹

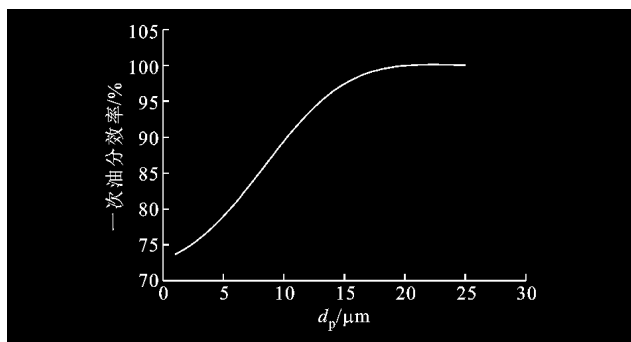


图3 油滴直径与一次油分效率的关系

对油分离器分离效率进行测量,本文搭建了油气分离器性能测试实验台.实验系统流程及实验装置如图4、图5所示.喷油双螺杆压缩机的公称排气压力为1 MPa,公称容积流量为 $3.1 \text{ m}^3/\text{min}$.

2.2 实验内容

本文测量了不同排气压力下,喷油量变化对一

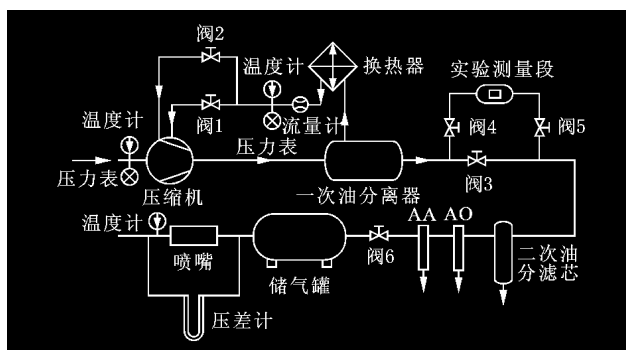


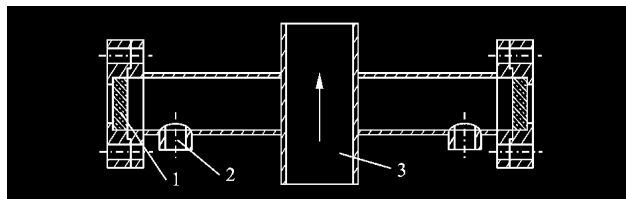
图4 实验系统流程示意图



图5 实验装置图

次油分效率的影响,其中排气压力变化范围为0.55~0.8 MPa,喷油量变化范围为600~1 500 L/h.另外,还测量了排气压力一定时,喷油量对油气分离器一次油分出口处油滴粒径分布的影响.在实验排气压力为0.8 MPa下,喷油量的改变共选择了5个工况点,分别为1 570、1 470、1 360、1 260、1 160 L/h,其油气体积比都在1:100的范围内.

对一次油分出口处的油滴粒径分布采用 Malvern 粒度分析仪进行了实验测量.图6为实验测量段具体结构示意图.两端为保证测量时主管路光学玻璃表面没有油雾存在,设有可通纯度(体积分数)为99.99%的高压氮气进口,以确保测量精度.



1: 光学玻璃部分;2: 充氮气部分;3: 主管路部分

图6 实验测量段结构示意图

2.3 实验结果

图7是在排气压力为0.8 MPa、排气温度为85℃下,不同喷油量时一次油分出口处油滴粒径的分布特征.如图中所示:随着喷油量增加,一次油分出口处直径较大的油滴占的体积分数增大;喷油量越

小,分离器出口处小直径油滴含量越高;在不同喷油量工况下,分离器出口处的最大油滴直径都在 $17 \sim 20 \mu\text{m}$ 的范围,说明分离器能够完全分离出直径大于 $20 \mu\text{m}$ 的油滴.从图 7 还可以看出,不同喷油量时油气分离器出口处小直径油滴含量不同,喷油量大时,分离器出口处小直径油滴含量高.

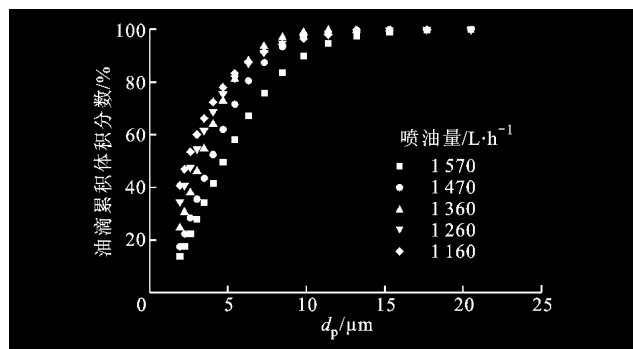


图 7 不同喷油量时一次油分出口处的油滴直径分布

图 8 是在排气压力为 0.8 MPa 、排气温度为 85°C 、喷油量为 1570 L/h 时,一次油分出口处的油滴直径分布特征,与数值计算的工况一致.实验结果表明:该工况下,油气混合物经过油气分离器一次油分后,出口油滴的最大直径介于 $17.7 \sim 20.5 \mu\text{m}$ 之间,体积分数为 0.2% .可以认为在该工况条件下,所研究的卧式油气分离器一次油分能够完全分离的最小油滴的直径为 $17.7 \sim 20.5 \mu\text{m}$,与数值计算结果基本一致.

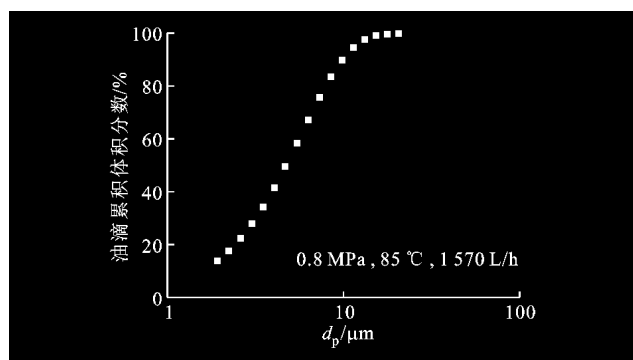


图 8 一次油分出口处的油滴直径分布

图 9 给出了油气分离器效率与压缩机排气压力及喷油量的关系.从图中可以得出,随着喷油量的增加,一次油分效率也随之提高.喷油量增大时,气体单位体积内的含油量增大,油气混合物中油滴以较大直径存在,易于沉降分离.喷油量减小时,气体单位体积内的含油量降低,油气混合比较均匀,大多数油以直径较小的油滴形式存在,不易分离,从而导致一次油分效率降低.

另外,从图中可以得出,随着排气压力升高,一

次油分离器效率先提高后逐渐降低.这主要是排气压力低时,入口流速高,油滴在分离器内主要靠机械碰撞分离,而重力沉降的时间短;排气压力升高,入口流速降低,机械碰撞减弱,油滴在分离器内主要靠重力分离.因此,存在一个最佳排气压力使一次油分效率最高.实验结果表明,对本文研究的卧式油气分离器,排气压力为 0.65 MPa 时,油气分离器的一次油分效率最高.

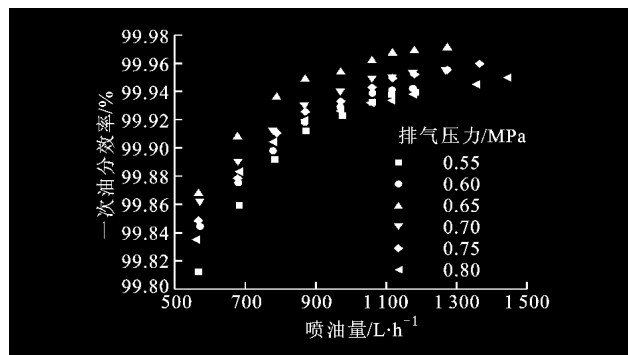


图 9 一次油分效率与排气压力及喷油量的关系

3 结 论

采用实验研究与数值计算相结合的方法对油气分离器一次油分特性进行了研究,得出以下结论:

(1)不同直径的油滴运动轨迹差别较大,其分离时间和分离效率也截然不同,大直径的油滴较容易分离;

(2)对所研究的卧式油气分离器,计算表明一次油分能够完全分离的最小油滴直径为 $16 \mu\text{m}$,实测一次油分离器出口处油滴的最大粒径介于 $17.7 \sim 20.5 \mu\text{m}$ 之间,所占体积分数为 0.2% ;

(3)在油气体积比小于 $1:100$ 的范围内,一次油分效率随喷油量的增加而提高,当排气压力为 0.65 MPa 时,一次油分效率最高;

(4)将数值模拟计算方法应用于油气分离器特性的研究是可行的、有效的,对揭示油气分离机理,优化油气分离器结构有着重要的意义.

参考文献:

- [1] 邢子文. 螺杆压缩机理论、设计及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] CHENG Gang, YAN Liyong, ZHOU Hua. The oil structure optimization by the use of CFD in the oil injection twin-screw compressor [C] // International Compressor Engineering Conference. West Lafayette, Indiana, USA: Purdue University, 2004: 1-7.
- [3] EASTWICK C, HIBBERD S, SIMMONS K. Using

- CFD to improve aero engine air/oil separator design [J]. Pressure Vessels and Piping Division PVP, 2002, 448(1):215-220.
- [4] WILLENBORG K, KLINGSPORN M, TEBBY S. Experimental analysis of air/oil separator performance [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo, Part B: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2006: 1495-1506.
- [5] 周华,孙为民,夏南. CFD技术在油气分离器改型设计中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(S1):926-929.
- ZHOU Hua, SUN Weimin, XIA Nan. Application of CFD in the modification of an oil gas separator design [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(S1):926-929.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [7] 冯健美, 畅云峰, 屈宗长, 等. 油分离器内油滴运动轨迹的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 771-775.
- FENG Jianmei, CHANG Yunfeng, QU Zongchang, et al. Numerical simulation of oil droplets traces in oil gas separator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7): 771-775.
- (编辑 荆树蓉)