

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.006

# 往复压缩机变负荷工况阀片运动规律 及气缸内状态仿真研究\*

赵梦芸<sup>1</sup>, 程贵健<sup>2</sup>, 李 强<sup>2</sup>, 于铁男<sup>2</sup>, 王 瑶<sup>1</sup>

(1. 北京化工大学 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室, 北京 100029;  
2. 中国石油大庆石化公司炼油厂, 黑龙江 大庆 163000)

**摘要:**为了更好地了解往复式压缩机在不同工况下阀片的运动规律以及气缸内压力、温度的变化情况,对压缩机气缸及阀片运动规律进行了模拟仿真研究。采用有限元分析手段建立了往复压缩机的三维流场模型,在变负荷工况下,运用 Fluent 软件模拟分析了压缩机气阀与气缸工作状态;在正常工况下,模拟了压缩机气阀的运动情况和气缸内的压力变化情况,并利用往复压缩机实验台进行了实验验证;在气量调节工况和不同的阀片顶开位移的工况下,针对压缩机进行了模拟,得到了不同工况下阀片运动规律、气缸内示功图及气缸内温度变化规律。研究表明:针对机组复杂运行状态可用计算机仿真研究进行深入模拟,获得贴近实际运行状态的数据,对分析压缩机运行状态,改进优化气量调节系统具有重要作用。

**关键词:**往复压缩机;阀片运动规律;P-V 示功图;气缸内温度

中图分类号:TH457

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0480-05

## Movement law of valve plate and simulation of cylinder state of reciprocating compressor under variable load condition

ZHAO Meng-yun<sup>1</sup>, CHENG Gui-jian<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, YU Tie-nan<sup>2</sup>, WANG Yao<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-Recovery for High-end Machinery, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Oil Refinery of Petro, ChinaDaqing Petrochemical Company, Daqing 163000, China)

**Abstract:** In order to better understanding of the movement law of the valve and the change of pressure and temperature in the cylinder under different working conditions, the simulation of the cylinder and valve motion of the compressor was carried out. The three-dimensional flow field model of the reciprocating compressor was established by means of finite element analysis. The Fluent software was used to simulate and analyze the working state of the valve and cylinder under variable load conditions. The movement of the gas valve under normal working conditions and the pressure change in the cylinder were simulated, and the experimental verification research was carried out by using the reciprocating compressor test bench. The working conditions of the compressor in the gas volume regulation condition and the different valve plate top opening displacement were simulated. The law of valve movement, cylinder internal force diagram and cylinder internal temperature variation under different working conditions were obtained. The research results indicate that the computer simulation research can carry out in-depth simulation of the complex operating state of the unit, obtain the data close to the actual operating state, and play an important role in analyzing the operating state of the compressor and improving the optimized gas volume regulation system.

**Key words:** reciprocating compressor; valve motion law; P-V indicated diagram; cylinder temperature

收稿日期:2018-11-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFF0203305);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JD1815)

作者简介:赵梦芸(1994-),女,山东招远人,硕士研究生,主要从事压缩机建模仿真方面的研究。E-mail:wang-963@qq.com

## 0 引言

往复压缩机在我国的工业生产中应用十分普遍,是炼油、煤化工、化肥等行业的关键动力设备。伴随企业生产负荷状态的变化,往复压缩机排气量需要进行调节,典型的调节方法包括回流调节、余隙调节、转速调节、顶开进气阀调节等<sup>[1]</sup>。从降低机组能耗考虑,当前越来越多的机组安装了顶开进气阀的无级气量调节系统,通过控制进气阀开启、关闭进而控制压缩机吸气与排气量。无级气量调节系统作用下,气阀与气缸内的工作状态直接影响往复压缩机的工作效果,不良的工作状态甚至会引发故障,影响机组安全稳定运行。

据相关石油炼化企业统计,往复压缩机气量调节系统的使用降低了气阀寿命,阀片断裂、泄漏等故障发生频率增大。国内外,关于往复压缩机气阀运动规律的研究较多。

在国内,已有研究人员应用 Fluent 对往复压缩机在正常工况下的整个工作过程进行了模拟<sup>[2]</sup>,得到了其工作过程中缸内压力的变化,但缺少对于阀片运动规律的模拟。有学者对进气阀运动规律进行了理论研究<sup>[3-4]</sup>,研究了不同弹簧刚度、曲轴转速下的进气阀运动规律,但缺少对缸内压力的研究;还有学者对压缩机气缸内的温度场进行了模拟<sup>[5-6]</sup>。在国外,也有研究人员对往复压缩机在正常工况的工作过程进行了模拟,并对气缸流场进行了分析研究<sup>[7-8]</sup>,但通常是通过建立数学模型或简化气阀及气缸模型来进行数值模拟;也有国外学者依据气阀有效流通截面理论,对气阀流动的流体进行了建模仿真,对气缸流场中阀口部分压损进行了分析,并根据分析结果对阀口做了优化<sup>[9-11]</sup>。

综合目前研究成果,国内外对气量调节工况下气阀运行状态的研究较少,一方面气量调节系统对气阀的影响及气阀的故障机理不够明确;另一方面,如何优化气阀设计,进而改进气量调节系统工作效果缺少理论依据。由于当前往复压缩机应用气量调节系统的机组越来越多,开展气量调节工况下往复压缩机工作状态变化规律的研究很有必要。

本文以往复压缩机实验装置为研究对象,采用 Fluent 软件建立机组三维仿真模型,模拟出往复压缩机在正常工况下的阀片运动规律、缸内压力变化规律,并通过往复压缩机实验台数据进行实验验证;针对气量调节工况,模拟不同负荷、不同位移条件下的气阀与气缸工作情况,并与正常工况下气阀运动情况进行对比,得到阀片运动规律、气缸内 P-V 图及气缸内温度场变化特征;同时进一步分析上述理论仿真结果。

## 1 研究对象与模型建立

本文研究对象是一台 2D 型往复压缩机,如图 1 所示。

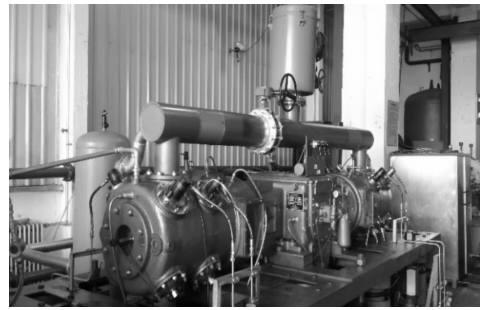
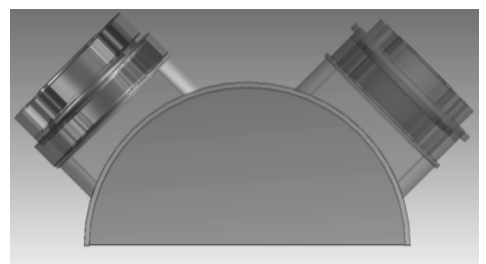


图 1 往复压缩机实验台机组

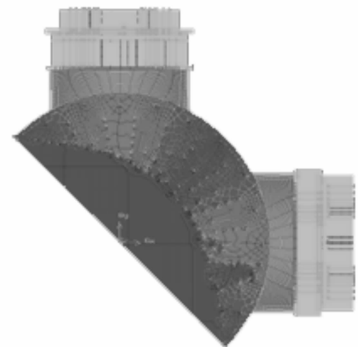
往复式压缩机的气阀可分为环状阀、舌簧阀和网状阀等。实验台机组使用的气阀为网状阀,其零件主要有阀片、缓冲片、弹簧、升程限制器、阀座。工作过程中,压缩机气阀自动完成开启关闭。而在气量调节工况下,往复压缩机工作过程为:膨胀、吸气、压缩、回流、排气,其中回流过程受卸荷器影响,回流时间被改变,进而控制机组排气量与负荷状态。

本研究以往复压缩机气缸的一侧结构为基础,构建仿真模型。在模型建立完成之后,将模型导入 Gambit 进行网格划分,由于模型结构复杂,考虑到计算精度和速度,对模型进行分区域网格的划分,将气阀等精度要求较高的部分细化处理,最终将模型以六面体网格的形式进行划分。

压缩机仿真模型及网格划分如图 2 所示。



(a) 往复压缩机仿真模型



(b) 仿真模型网格划分

图 2 压缩机仿真模型及网格划分

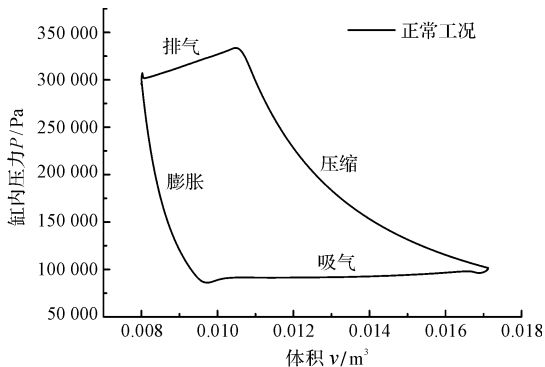
## 2 仿真与结果分析

### 2.1 正常工况下的仿真及实验验证

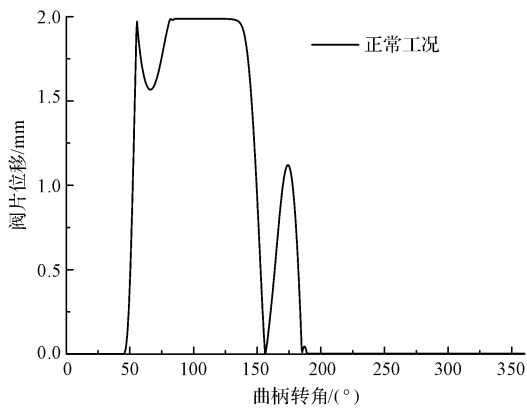
#### 2.1.1 仿真研究

本研究将做好前处理工作的模型导入 Fluent, 并对模型进行检查, 导入自定义程序对模型各个部分的运动进行定义, 对模型中的活塞部分和阀片部分进行动网格定义, 选择非稳态模式、SIMPLE 算法, 对进气、排气压力等参数进行设置, 进行迭代运算。

通过自定义程序输出的数据, 可以得到其缸内示功图及气阀阀片运动规律, 如图 3 所示。



(a) 正常工况下示功图



(b) 正常工况下气阀阀片运动规律

图 3 正常工况下的示功图与阀片运动规律

图 3 中, 示功图中曲线围成的面积代表压缩机做功的大小, 其 4 段分别代表了压缩机的膨胀、吸气、压缩、排气过程。从气阀阀片运动规律图中可以看到, 阀片在 50° 开启, 完全打开和接触面碰撞后反弹, 在气体力的作用下再次完全顶开, 在吸气过程结束后, 阀片和接触面反弹后完全关闭。

#### 2.1.2 实验验证

为了验证理论研究成果正确性, 本研究通过实验台对上述仿真结果进行测试验证。根据实验台条件, 对正常满负荷工况下的缸内压力进行测试。

正常工况下, 气缸实测压力与仿真所得压力随曲轴转角变化的曲线如图 4 所示。

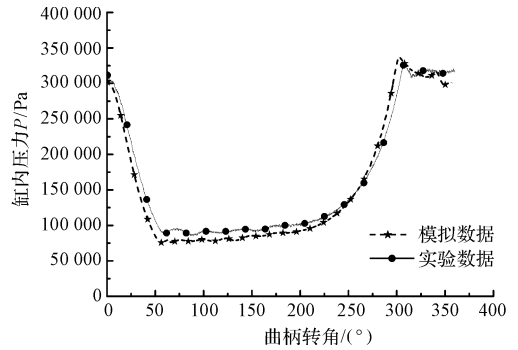


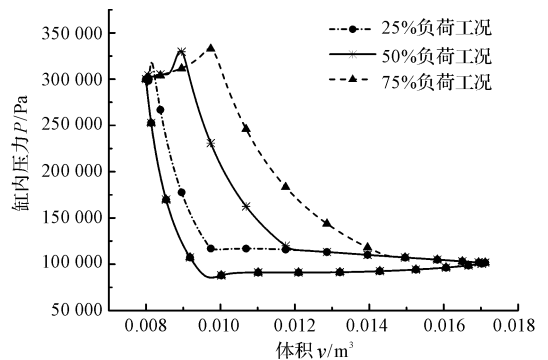
图 4 压缩机气缸内动态压力曲线

图 4 中, 误差较大的部分在吸气和排气阶段, 这是由于在模拟中的进、出口是无限大的。但在实际工作过程中, 进出口均与管道相连接, 管道中的压力还有波动, 故而对实验所测得的压力有了影响。从整体上来看, 该模型可反映实际往复压缩机的工作状态。

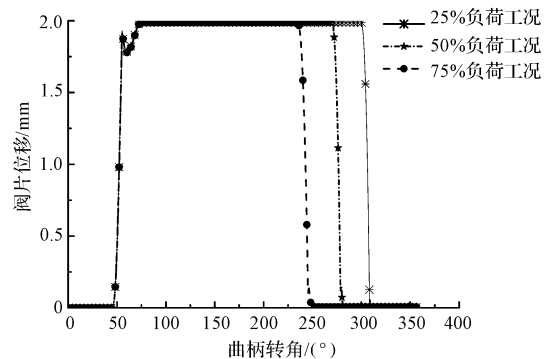
### 2.2 气量调节工况下仿真研究

#### 2.2.1 不同负荷工况状态仿真

在气阀完全顶开状态下, 本文对不同负荷的工况进行了模拟, 得到不同负荷下压缩机示功图和气阀阀片运动规律曲线, 如图 5 所示。



(a) 不同负荷下压缩机示功图



(b) 不同负荷下气阀阀片运动规律

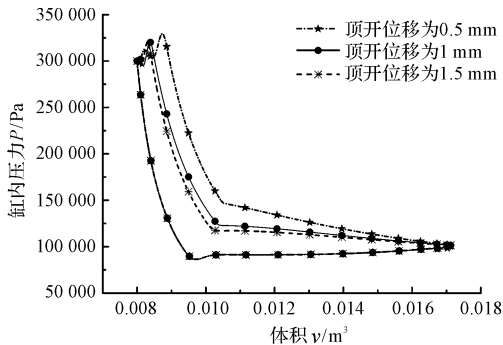
图 5 不同负荷下的示功图与阀片运动规律

从图5可以看出:随着负荷从75%降低到25%,进气阀开启的时间变长,气缸内同一体积所对应的压力有明显的减小,压缩机做功明显减小。

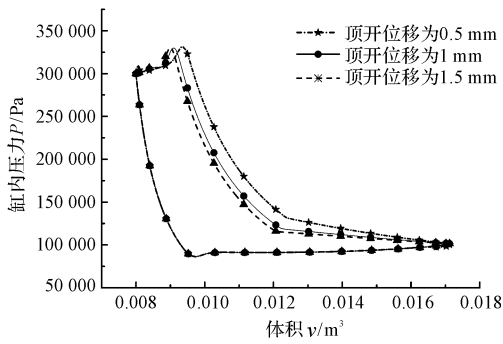
### 2.2.2 阀片不同位移状态仿真

在气量调节系统作用下,气阀阀片在回流过程中被强制顶开,不同的顶开位移影响气阀的通流面积,进而影响回流和气量调节的效果。如何优化气量调节系统的控制效果,获得气阀在不同顶开位移情况下的工作状态是基础。

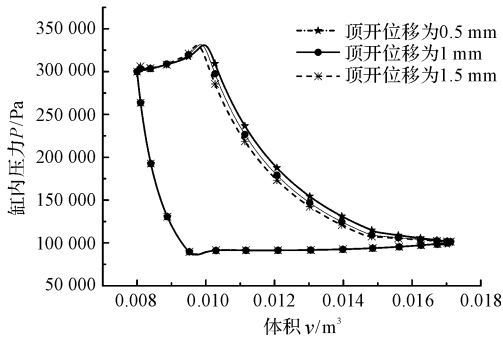
在不同负荷工况下,本文针对压缩机设计了不同的顶开位移,获得了不同位移条件下的气缸缸内压力仿真结果,如图6所示。



(a) 25%工况下不同位移条件下示功图



(b) 50%工况下不同位移条件下示功图



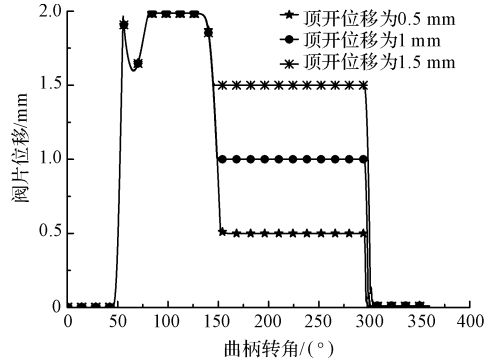
(c) 75%工况下不同位移条件下示功图

图6 不同负荷工况下不同位移条件的示功图

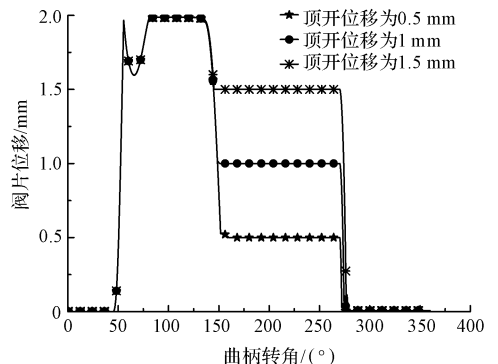
从6图可以看出:在同一工况下,随着阀片顶开位移的增大,压缩机做功明显减少;不同工况下,随着负

荷的减小,压缩机做功明显减小。

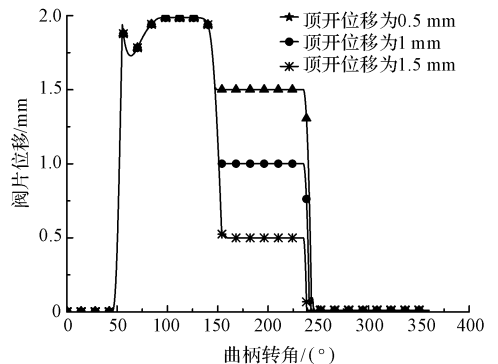
同样,在不同负荷工况下,本文设计了不同的顶开位移,获得了不同位移条件下的阀片运动规律,如图7所示。



(a) 25%工况下不同位移条件下阀片运动规律



(b) 50%工况下不同位移条件下阀片运动规律



(c) 75%工况下不同位移条件下阀片运动规律

图7 不同负荷工况下不同位移条件的阀片运动规律

从图7可以看出:阀片能够准确地停留在设定的位置,阀片运动的控制效果较好。

从上述图谱中可发现:不同位移直接影响气缸回流过程中的压力,进而改变气量调节系统的控制精度和效果;气缸压力的升高并非线性变化,存在明显的非线性特征。

本研究获得了不同气阀位移条件下,回流过程中对应不同负荷的气缸内温度变化曲线,如图8所示。

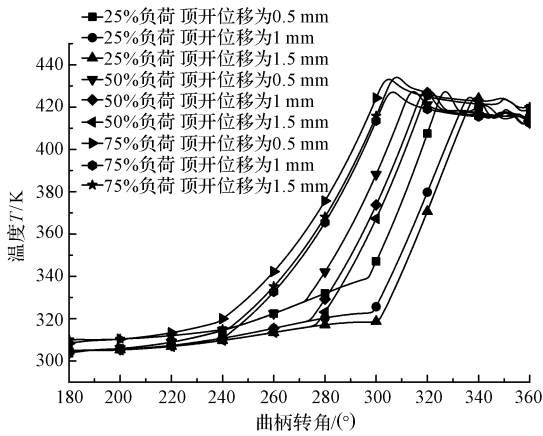


图 8 回流过程中温度变化仿真结果

由图 8 可以看出:温度变化的趋势均为先上升后缓慢下降,在负荷一定的情况下,顶开位移增大,温度上升速度变慢,最高温度减小;在顶开位移确定的情况下,随着负荷的减小,温度上升速度变慢,最高温度减小。

### 2.3 结果分析

在正常工况和气量调节工况下,本研究对气缸、气阀运动状态仿真结果进行了分析,得到如下结论:

(1)不同负荷下,压缩机回流过程中气缸压力升高幅度不同,随着负荷的增大,阀片开启的时间减小,压缩时间变短;

(2)不同顶开位移情况下,压缩机回流过程中气缸压力升高幅度不同,反映了阀片位移对回流损失的影响。同时,缸内压力升高情况与位移变化呈非线性变化关系,可根据关系曲线选择最优顶开位移;

(3)与压力升高情况类似,气缸内温度变化与阀片顶开位移与负荷有直接关系;当顶开位移较小时,气缸内温度升高显著,这对于氢气等易燃易爆气体是非常不利的,所以基于安全性考虑,合适的顶开位移可以降低压缩机气缸内的温度。

## 3 结束语

本文采用计算机仿真技术,对往复压缩机气量调节工况进行了仿真研究,通过构建仿真模型,获得了气量调节工况下往复压缩机运行状态数据,对仿真数据进行分析对比,初步掌握了其中的非线性变化规律。

研究表明:气阀顶开位移对机组气量调节效果具有直接影响,反映在回流过程压缩机气缸压力升高情况与回流压缩过渡过程,对气缸内温度升高情况也具有直接作用。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈 静. ISC 无级气量调节系统在往复式压缩机上的应用[J]. 石油化工自动化, 2014, 50(1): 26-28.
- [2] 谢铁男, 李 辉, 赵贺嘉, 等. 往复压缩机动态压力仿真及瞬态流场分析[J]. 机械设计与制造, 2015(4): 52-58.
- [3] 刘德基, 张慢来, 张 琴, 等. 往复式压缩机进气阀运动规律的理论研究[J]. 石油机械, 2013, 41(3): 80-83.
- [4] 张 琴, 张慢来, 周志宏, 等. 基于数值仿真的往复式压缩机进气阀参数研究[J]. 流体机械, 2013(10): 30-35.
- [5] 李启明, 阎明印, 汤赫男. 大型往复式压缩机气缸内温度场与热应力分析[J]. 机械工程师, 2016(1): 41-43.
- [6] 白 刚, 尚浩田, 王 枫. 压缩机气缸盖联接螺栓的有限元分析[J]. 流体机械, 2017, 45(4): 22-27, 42.
- [7] ELHAJ M, GU F, BALL A D, et al. Numerical simulation and experimental study of a two-stage reciprocating compressor for condition monitoring[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2008, 22(2): 374-389.
- [8] CHEN Y, HALM N P, GROLL E A. Mathematical modeling of scroll compressor: compression process modeling[J]. **International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Froid**, 2002, 25(6): 731-750.
- [9] LONGO G A, GASPARELLA A. Unsteady state analysis of the compression cycle of a hermetic reciprocating compressor[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2003, 26(6): 681-689.
- [10] SRINIVAS M N, PADMANABHAN C. Computationally efficient model for refrigeration compressor gas dynamics[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2002, 25(8): 1083-1092.
- [11] ZHOU W, KIM J, SOEDEL W. New iterative scheme in computer simulation of positive displacement compressors considering the effect of gas pulsations[J]. **Journal of Mechanical Design**, 2001, 123(2): 282-288.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

赵梦芸, 程贵健, 李 强, 等. 往复压缩机变负荷工况阀片运动规律及气缸内状态仿真研究[J]. 机电工程, 2019, 36(5): 480-484.

ZHAO Meng-yun, CHENG Gui-jian, LI Qiang, et al. Movement law of valve plate and simulation of cylinder state of reciprocating compressor under variable load condition[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(5): 480-484.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>