

喷油参数对双螺杆空压机性能的影响

吴光华¹, 吴华根¹, 高宝华², 李庆飞², 黄红叶¹, 侯亮¹, 邢子文¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 上海斯可络压缩机有限公司, 201508, 上海)

摘要: 为研究喷油参数对双螺杆空压机工作性能的影响,并为优化和提高该类型空压机的整体性能提供参考,建立了喷油双螺杆空压机数学模型,研究喷油量、喷油温度等对空压机性能的影响,并通过模拟结果与实验结果的比较,验证了模型的准确性。结果表明:双螺杆空压机存在一个最优的喷油量,可以使空压机达到最佳的绝热效率和比功率,随着转速由 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 升高至 $4\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,最优喷油量呈现下降的趋势,随着背压由 0.7 MPa 提高至 1.0 MPa ,最优喷油量呈现升高的趋势。另外,喷油温度的升高使得双螺杆空压机的绝热效率下降、比功率上升,从而导致空压机性能恶化,因此在保证排气温度的同时,应尽量选择低的喷油温度。同时,喷油参数对泄漏与耗功的影响显著,随着喷油温度由 303.15 K 升高至 323.15 K ,各个泄漏通道泄漏量呈现上升的趋势,摩擦损耗呈现下降的趋势;随着喷油量由 $0.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至 $1.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,各个泄漏通道泄漏量呈现下降的趋势,摩擦损耗呈现上升的趋势。研究工作可为喷油双螺杆空压机的性能优化提供有益的参考。

关键词: 双螺杆空压机;喷油参数;数学建模;性能研究与优化

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202312010 **文章编号:** 0253-987X(2023)12-0102-08

The Effect of Oil Injection Parameters on the Performance of Twin-Screw Air Compressors

WU Guanghua¹, WU Huagen¹, GAO Baohua², LI Qingfei²,

HUANG Hongye¹, HOU Liang¹, XING Ziwen¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Screw Compressor Co., Ltd., Shanghai 201508, China)

Abstract: To study the effect of oil injection parameters on the performance of the twin-screw air compressors and to provide a reference for optimizing and improving the overall performance of such air compressor, a mathematical model of the oil-injected twin-screw air compressor was developed to study the effect of oil injection volume and oil injection temperature on the performance of the air compressor and the accuracy of the model was verified by comparing the simulation results with the experimental results. The results show that, there is an optimal oil injection volume for a twin-screw air compressor to achieve the best adiabatic efficiency and specific power, and such volume decreases as the speed increases (from $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ to $4\,400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) and increases

with the back pressure (from 0.7 MPa to 1.0 MPa). In addition, the increase of oil injection temperature makes the adiabatic efficiency of the compressor decrease and the specific power increase, which leads to the deterioration of the compressor performance. Thus, the oil injection temperature should be as low as possible while ensuring the exhaust temperature. At the same time, there is a significant effect of injection parameters on leakage and power consumption. In particular, with the increase of the injection temperature (from 303.15K to 323.15K), the leakage of each leakage channel shows a increasing trend, and the friction loss shows a decreasing trend, while with the increase of injection volume (from $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ to $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), the leakage shows a decreasing trend, and the friction loss shows a rising trend. This research provides a useful reference for optimizing the performance of the oil-injected twin-screw compressors.

Keywords: twin-screw air compressor; oil injection parameters; mathematical modeling; performance research and optimization

双螺杆空气压缩机拥有庞大的市场并且在总能源消耗中占有相当比重^[1-3]。喷油对于双螺杆空气压缩机的性能提升有显著效果^[4-6],因此关于喷油对双螺杆空压机特性的研究,对于能耗节省以及推进空压机行业的发展有着重要意义^[7]。

研究人员利用数学模型、CFD 模拟以及实验等方法对喷油螺杆压缩机的性能优化进行了广泛的研究。Yang 等^[8]利用 CFX 模型和 SCORG 工具,对喷油双螺杆制冷压缩机内压特性进行了研究。通过模拟与实验结果的对比发现该方法能够很好地表现压缩机的压力脉动,并可以通过优化结构减少排气压力脉动。Eparu 等^[9]通过 CFD 模拟方法对高压比喷油螺杆压缩机的性能进行了分析,并与实验结果进行了对比,研究表明,模拟结果与实验结果相符合,可以有效地指导后续设计工作。Liang 等^[10]利用腔体模型对喷油螺杆压缩机进行建模,并对压缩机处于卸载工况时进行分析优化,结果显示该模型可用于压缩机卸载工况下的性能预测,有益于螺杆压缩机高效节能运行。Lu 等^[11]利用腔体模型对低压比喷油螺杆压缩机的功耗损失进行分析,结果发现机械损失、齿顶拖拽损失对低压比压缩机性能影响很大,合适的油气比对于低压比压缩机更为重要。Yusha 等^[12]通过腔体模型对变频喷油螺杆压缩机进行建模,并对转速、喷油量以及排气温度几个因素进行综合研究,结果显示转速对于效率的影响较小,喷油螺杆压缩机采用独立供油结构更有优势。Kumar 等^[13]利用 SCORG 与 GT-SUITE 对螺杆压缩机进行建模,并对比了 4 种优化算法,结果显示单纯形优化算法计算速度最快,并且该设计方法有益于提升压缩机性能。Basha 等^[14]采用 VOF 模型对一种 4-5 喷油螺杆压缩机进行模拟,结果发现两个

独立的喷油口的设计相比于单个喷油口的设计能使压缩腔的最大气体温度降低了 $30 \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$,比功率降低 1.8%。Basha 等^[15]通过实验对喷油量、压缩机转速、喷油位置和喷油温度对压缩机性能的影响进行了分析,结果显示存在最佳喷油量。Liao 等^[16]对两级螺杆压缩机进行测试,研究了级间注油对整机性能的影响,结果表明,两级空压机存在油量过剩的问题,应当适度减少油量以降低功耗。Dhayanandh 等^[17]通过实验方法研究了喷油孔尺寸、发动机转速和喷油压力对柴油机螺杆空压机性能的影响,并通过响应面分析方法研究了压缩机在钻井和空转工况中最佳性能的注油参数范围。

以上研究聚焦于以特定方法探究各种喷油参数对空压机整机性能的影响,但对于压缩机细节方面的研究相对较少。为了弥补这一不足,本文建立了一种全面的功率计算模型。该模型在保证计算速度的同时,能够提供更为详尽的喷油参数对压缩机性能影响的细节信息,并对喷油参数对压缩机性能的影响进行了更加全面的研究。

1 数学模型

关于双螺杆空压机性能研究的理论模型,本课题组已经建立了吸气、压缩、排气过程的主要方程,以及泄漏模型、气态方程、注油模型、换热模型等子模型^[18-21]。本文进一步建立了喷油双螺杆空压机耗功的数学模型。

1.1 工作流程

双螺杆空气压缩机的工作过程包括吸气、压缩和排气 3 部分^[22]。Hanjalic 等^[23]建立了双螺杆压缩机吸气、压缩和排气过程的数学模型。由于容积式压缩机的工作原理都是依靠容积的变化来完成工

作腔内压力的变化,因此都可以类比于活塞压缩机的工作过程^[24],喷油双螺杆空压机模型如图1所示。将双螺杆空压机的阴阳转子之间的一个工作腔作为研究对象,工作腔内存在空气和油两种物质。工作腔内的工质随着阳转子转角的变化周期性,与吸气孔口、喷油口、排气孔口连通,并在整个压缩过程中伴随着与相邻工作腔的泄漏以及工作腔内空气与油之间的换热。

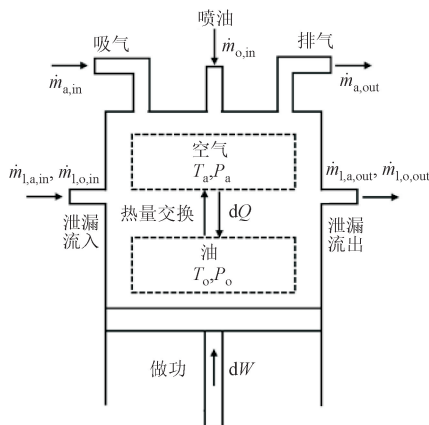


图1 喷油空压机腔体模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the cavity model

1.2 功率模型

为了研究喷油双螺杆空压机的功率分布^[25]特性,本文对喷油空压机各处的耗功建立了数学模型。

通过腔体模型对喷油空压机工作过程进行模拟,可以获得各个转角下工作腔中的压力,结合压缩机容积变化曲线可以获得工作过程 P - V 图,根据轴功率计算公式可得空气的压缩指示功率

$$P_{i,g} = -\frac{z_1 n}{60} \int V_c dP \quad (1)$$

式中: $P_{i,g}$ 为空气指示功率, W ; z_1 为阳转子齿数; n 为阳转子转速, $r \cdot \min^{-1}$; V_c 为工作腔的体积, m^3 。

油的压缩功的计算方程形式类似于式(1),但是油的体积并不是整个工作腔的体积,其具体形式为

$$P_{i,l} = -\frac{z_1 n}{60} \int V_l dP = -\frac{z_1 n}{60} \int \frac{m_l}{\rho_l} dP \quad (2)$$

式中: $P_{i,l}$ 为油压缩耗功, W ; m_l 为工作腔内的油质量, kg ; ρ_l 为工作腔内油的密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

1.2.1 压缩腔内各摩擦功耗计算

双螺杆空压机的转子运动可描述为圆柱形旋转,许多摩擦情况都可以等效于二维圆柱旋转库埃特流动。由于转子的离心力作用,可以认为齿顶间隙被油所充满,同时转子齿顶摩擦功耗可简化二维圆柱库埃

特流动,则阴阳转子齿顶摩擦功耗的计算式为

$$P_t = \frac{\mu L}{4} \left(\frac{z_1 \omega_1^2 D_1^2 b_1}{\delta_1} + \frac{z_2 \omega_2^2 D_2^2 b_2}{\delta_2} \right) \quad (3)$$

式中: P_t 为阴阳转子齿顶摩擦功耗, W ; L 为转子长度, m ; μ 为动力黏度, $Pa \cdot s$; z_i 为阳(阴)转子齿数; ω_i 为阳(阴)转子角速度, $rad \cdot s^{-1}$; D_i 为阳(阴)转子外径, m ; b_i 为阳(阴)转子齿顶宽度, m ; δ_i 为阳(阴)转子齿顶间隙, m 。

对于端面摩擦损失可以看成旋转圆板与静止圆板之间的库埃特流动,端面摩擦功耗为

$$P_{e,i} = \frac{\mu}{\delta_{e,i}} \left(\omega_1^2 \int_1^{\infty} r^2 dA_{e,1} + \omega_2^2 \int_2^{\infty} r^2 dA_{e,2} \right) \quad (4)$$

式中: $P_{e,i}$ 为吸(排)气端面摩擦耗功, W ; $\delta_{e,i}$ 为吸(排)气端面间隙, m ; $A_{e,i}$ 为阳(阴)转子端面面积, m^2 。

阴阳转子之间的啮合摩擦功耗可以类比于齿轮啮合摩擦功耗。本文采用 Benedict 等^[26]提出的弹性流体润滑摩擦系数对螺杆转子啮合摩擦功耗进行计算。啮合摩擦功耗为

$$P_c = 175.2 f W L_c \omega_1 R_{t1} \quad (5)$$

式中: P_c 为转子啮合摩擦功耗, W ; f 为转子啮合摩擦系数; W 为啮合线线载荷, $N \cdot m^{-1}$; L_c 为接触线长度, m ; R_{t1} 为阳转子节圆半径, m ;

1.2.2 滚动轴承与密封摩擦功耗计算

本文所研究压缩机采用的是滚动轴承,因此本文利用 SKF 公司给出的滚动轴承计算公式^[27]对压缩轴承功耗进行计算,即

$$P_b = 1.05 \times 10^{-7} (M_{rr} + M_{sl} + M_s + M_d) n \quad (6)$$

式中: P_b 为所有轴承损失功耗, W ; M_{rr} 为滚动摩擦力矩, $N \cdot m$; M_{sl} 为滑动摩擦力矩, $N \cdot m$; M_s 为密封件的摩擦力矩, $N \cdot m$; M_d 为拖曳损失等导致的摩擦力矩, $N \cdot m$ 。

由于润滑油的黏度随温度变化比较大,轴承摩擦损失功耗产生的热使得润滑油温度升高。为了更精确地计算轴承摩擦功耗,需要对润滑油黏度和温升需要进行迭代计算。

对于阳转子伸出轴的唇封,其摩擦功耗为

$$P_{se,ls} = C_{ls} F_{ls} \omega_1 r_{ls} \quad (7)$$

式中: $P_{se,ls}$ 为唇封位置摩擦损失功耗, W ; C_{ls} 为唇封位置的摩擦系数; F_{ls} 为唇封位置的预紧力, N ; r_{ls} 为唇封位置配合处转子轴半径, m 。

对于轴颈处的环形密封也可类比于圆柱库埃特流动,可获得环形密封处的摩擦功耗

$$P_{se,r} = 2\pi\mu \frac{\omega^2 r_i^3 b_r}{\delta_r} \quad (8)$$

式中: $P_{se,r}$ 为环形密封摩擦损失功耗, W ; ω 为轴角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; r_r 为轴颈半径, m ; b_r 为密封宽度, m ; δ_r 为密封间隙, m 。

综上,可得压缩机轴功率

$$P_s = P_{i,g} + P_{i,l} + P_t + P_{se} + P_e + P_b + P_c \quad (9)$$

式中: P_s 为压缩机轴功率, W 。

1.3 效率计算

对于喷油双螺杆空压机实际气量为从排气孔口排出的气量,利用排气质量随转角的变化率,并认为流入工作腔的质量为正,流出工作腔的质量为负,因此压缩机实际质量流量和容积流量计算式为

$$q_{v,r} = -\frac{z_1 n}{60 \rho_{g,s}} \int_{\varphi_{d,s}}^{\varphi_{d,e}} \frac{dm_d}{d\varphi} d\varphi = -\frac{z_1 n}{60 \rho_{g,s}} \sum_{i=\varphi_{d,s}}^{\varphi_{d,e}} \frac{dm_d}{d\varphi} \Big|_i \Delta\varphi_i \quad (10)$$

式中: $q_{v,r}$ 为压缩机(换算到进气状态下)实际容积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $\rho_{g,s}$ 为空压机进气空气密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\frac{dm_d}{d\varphi}$ 为气体通过排气孔口的质量随转角的变化率,流入为正流出为负, $\text{kg} \cdot (^\circ)^{-1}$; $\varphi_{d,s}$ 为排气开始角, $(^\circ)$; $\varphi_{d,e}$ 为排气结束角, $(^\circ)$; $\Delta\varphi_i$ 为角度步长, $(^\circ)$ 。

根据实际气量与理论气量之间的比值获得容积效率。绝热效率为等熵压缩功率与实际轴功率之比,由于空压机的被压缩气体为空气,可视的理想气体,因此可用理想气体等熵压缩功公式进行计算,以获得压缩机的绝热效率。

2 实验台的搭建与模拟校验

2.1 实验台搭建

为探究喷油对双螺杆空压机的性能的影响,以及对后续腔体模型进行校验,本文搭建了一个喷油螺杆空压机实验台。如图 2 所示。通过在合适的位置布置压力、温度传感器、流量计、和功率仪,测量被测压缩机的喷油参数以及性能参数。

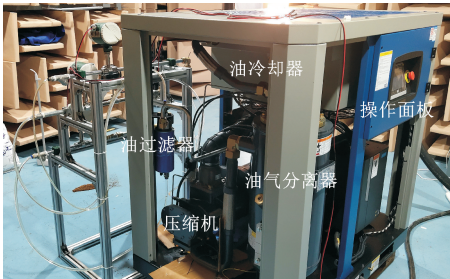


图 2 喷油螺杆空压机性能实验台实物图
Fig. 2 Physical picture of the laboratory table

2.2 模拟结果验证

通过实验得到的数据与相同条件下的模拟计算结果进行对比,验证数学模型的正确性。将 $3\,000 \sim 4\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间 5 个实验点的轴功率以及 $3\,000, 4\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 处的 P - V 图与模拟值进行对比,分别验证功率计算模型、压缩过程模拟的准确性,如图 3 所示。

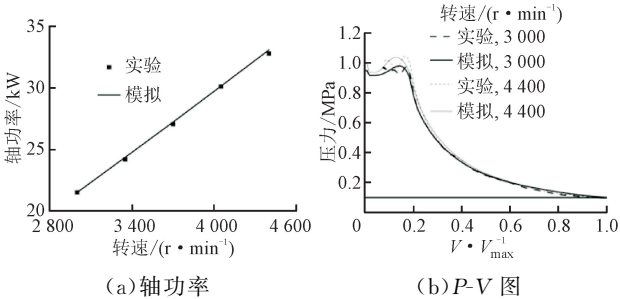


图 3 轴功率、 P - V 图模拟与实验对比图
Fig. 3 Comparison of simulation and experiment

由图 3 可知,在不同转速下,轴功率的模拟值与实验值之间的最大偏差为 0.6% ,且所有偏差均在 5% 以内,符合模拟精度的要求。

转速为 $3\,000, 4\,400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,实验测量与模拟的 P - V 图基本一致,并且在高转速时由于压缩过程中换热减少,会使得压力会更高,在排气阶段因为转速高会有更高的压力峰值,这些在模拟结果中都有体现,但是由于腔体模型中不含有动量方程,因此体现不了排气过程中的压力脉动。

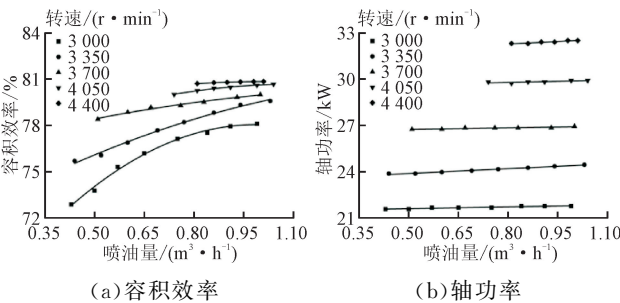
3 结果与讨论

3.1 喷油量对空压机性能影响分析

3.1.1 变转速下喷油量对空压机性能影响分析

保持进气温度为 293.15 K 、压力为 0.098 MPa ,喷油温度为 314.15 K ,背压为 0.9 MPa ,测量不同转速下喷油量对空压机性能影响如图 4 所示。

由图 4 可知,喷油量增加能够有效抑制泄漏,使得容积效率提高,低转速、泄漏量大、喷油量对泄漏的



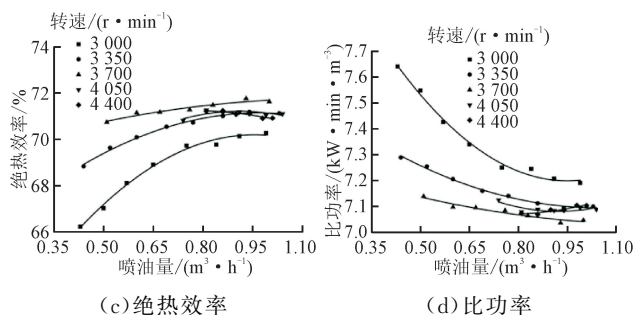


图 4 不同转速下空压机性能参数随喷油量的变化

Fig. 4 Variation of air compressor performance parameters with injection volume at different rotational speeds

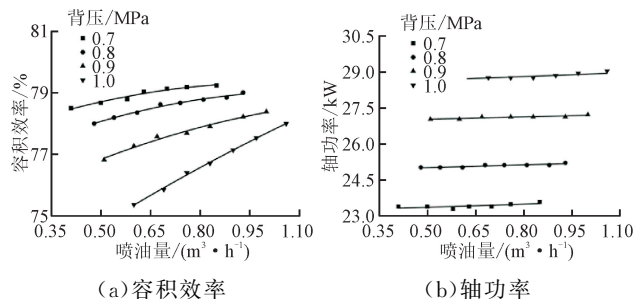
抑制效果更加明显。随着喷油量的增加,容积效率的增长速率减缓,抑制作用趋于饱和。轴功率随着喷油量增加略微增大,因为喷油量的增加,一方面增大换热,另一方面增加油的压缩功和摩擦损耗,耗功比省功大,整体功耗略微增加。

喷油量增加绝热效率整体呈现先增后减的趋势,极大值点的位置会随着转速的增加向左偏移。因为喷油量增加使得容积效率提高、轴功率增大。当喷油量较小时,泄漏严重,喷油量增加对容积效率提高更显著,绝热效率也会提升;随着喷油量继续增大,容积效率增势减缓,轴功率增大更加明显,绝热效率下降。高转速时泄漏较小,随着喷油量增大,轴功率增加速度与容积效率提高速度更快达到平衡,因此其绝热效率的极值点偏向于左边,比功率与绝热效率变化趋势相反,喷油量增加能有效减小排气温度。

3.1.2 变背压下喷油量对空压机性能影响分析

保持进气温度、压力分别为 288.15 K、0.099 MPa,喷油温度为 314.15 K,转速为 3700 r·min⁻¹。测量不同背压下喷油量对空压机性能影响如图 5 所示。

由图 5 可知,容积效率随着喷油量的增加而增加,高背压时,泄漏量较大,喷油抑制效果明显。轴功率随着喷油量的增加缓慢增加,喷油量增加耗功比省功大。



(a)容积效率

(b)轴功率

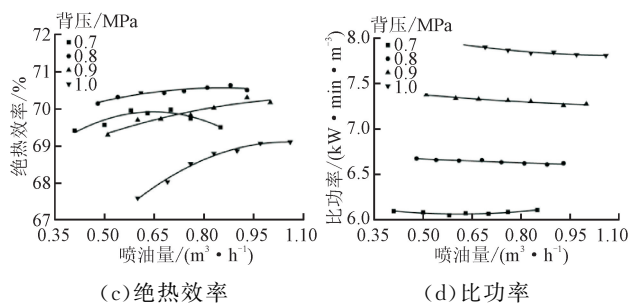


图 5 不同背压下空压机性能参数随喷油量变化图

Fig. 5 Variation of air compressor performance parameters with injection volume at different back pressures

绝热效率随喷油量增加呈现先增后减的趋势,绝热效率的极大值点随着背压的升高向右偏移。这是因为高背压泄漏量较大,喷油量对泄漏的抑制作用也更为明显,其极值点偏右。比功率的极值点位置与绝热效率对应,背压越高,排气温度也越高,对于高背压工况条件应当更加注意喷油量,喷油量不但可以改善泄漏情况,同时也能有效减少排气温度。

3.2 喷油温度对空压机性能影响分析

3.2.1 变转速下喷油温度对空压机性能影响分析

保持进气温度、压力 288.15 K、0.098 MPa,喷油量为 0.95 m³·h⁻¹,背压为 0.9 MPa,测量不同转速下喷油温度对空压机性能影响,如图 6 所示。

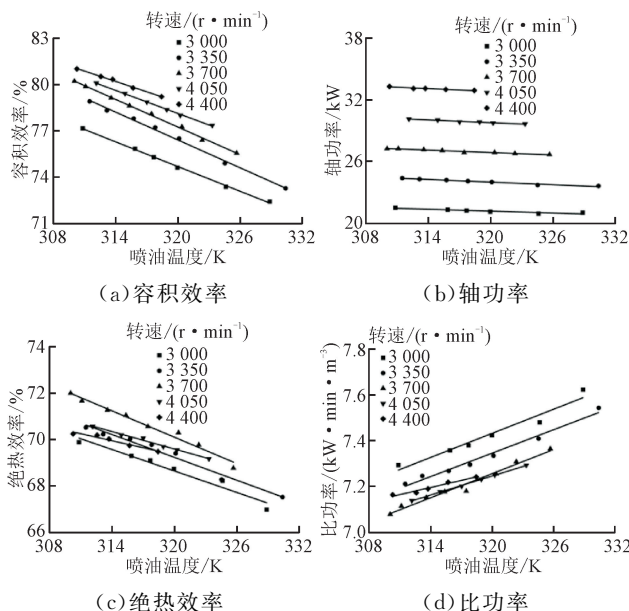


图 6 不同转速下空压机性能参数随喷油温度的变化

Fig. 6 Variation of air compressor performance parameters with injection temperature at different rotational speeds

由图 6 可知,喷油温度升高使得容积效率降低,一方面喷油温度升高会降低油黏度,增加泄漏;另一

方面是喷油温度升高强化进气加热,导致进气量下降。

喷油温度升高使得轴功率下降,喷油温度的升高会增加压缩指示功,但是喷油温度的升高会减少油黏性从而减少摩擦损耗,其中减少摩擦损耗的作用占主导,因此轴功率随喷油温度升高而减小。喷油温度升高使得绝热效率降低,比功率随着喷油温度升高而升高。喷油温度升高对容积流量降低的影响相较于轴功率减低更为明显,排气温度随着喷油温度几乎是线性增加的。

3.2.2 变背压喷油温度对空压机性能影响分析

保持进气温度为 288.15 K、压力为 0.097 kPa,喷油量为 $0.8\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,转速为 $3\,700\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,测量不同背压下喷油温度对空压机性能影响如图 7 所示。

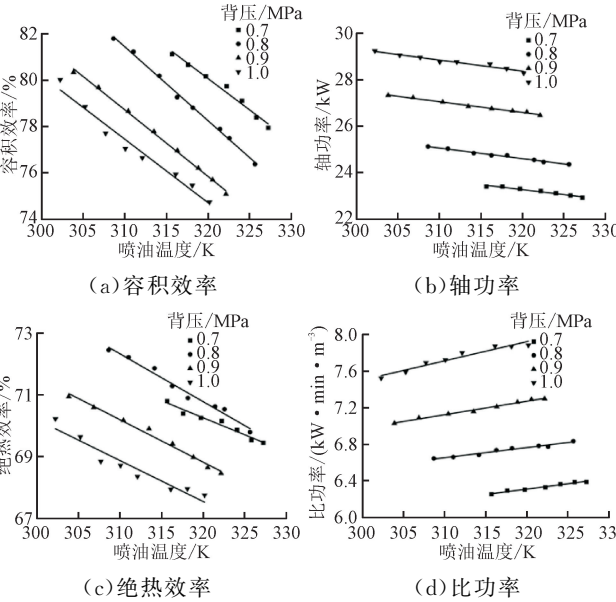


图 7 不同背压下空压机性能参数随喷油温度的变化
Fig. 7 Variation of air compressor performance parameters with injection temperature at different back pressures

由图 7 可知,随着喷油温度的升高容积效率几乎线性减少,背压越小泄漏量越小,容积效率越高。随着喷油温度的升高轴功率下降,背压越高,压缩指示功和轴承载荷也越高,轴功率越高。

随着喷油温度的升高绝热效率在减少,比功率在增加,其主要原因为容积流量的减少更快。排气温度与喷油温度近似线性增长关系,由于背压高,轴功率更大,排气温度更高,因此对于高压力的工况需要注意喷油温度以保证排气温度在适当范围内。

3.3 喷油参数对泄漏的影响分析

利用数学模型研究喷油参数对于各个泄漏通道

泄漏量增长率的影响,泄漏量增长率均是相对于喷油温度 313.15 K、喷油量 $1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 为基准计算所得,如图 8 所示。模拟工况背压为 0.9 MPa、转速为 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、喷油开始位置容积比(即喷油开始位置工作腔容积与吸气容积比值)为 0.73。

由图 8(a)可知,随喷油温度的升高各个泄漏通道泄漏量均呈现增加的趋势,主要原因是喷油温度升高会导致油黏性降低。在所测范围内喷油温度每升高 10 K,总泄漏约增加 6%,可见喷油温度对于泄漏影响比较明显。

由图 8(b)可知,随着喷油量的增加,各个泄漏通道泄漏量均呈现减小的趋势,主要是由于喷油量的增加使得工作腔中的含油量增加,增加密封性能。在所测量范围内喷油量每增加 $0.25\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,泄漏量约减小 3.3%,喷油量对于泄漏量影响比较明显。

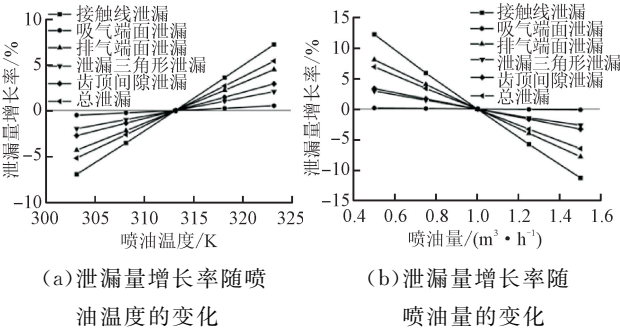


图 8 泄漏量增长率随喷油参数的变化
Fig. 8 Leakage growth rate as a function of injection parameters

3.4 喷油参数对各部分耗功影响分析

利用数学模型研究喷油参数对于各位置耗功的影响,如图 9 所示。模拟工况背压为 0.8 MPa、转速为 $4\,900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、喷油开始位置容积比为 0.73。

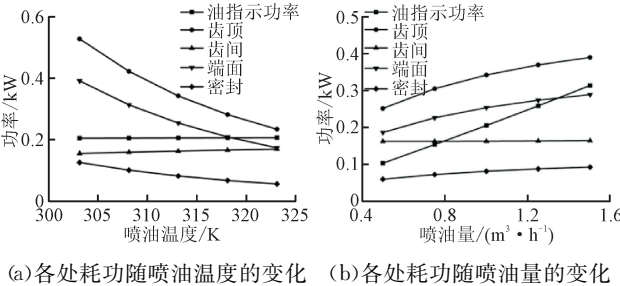


图 9 各处耗功随喷油参数的变化
Fig. 9 Variation of power consumption with injection parameter at each place

由图 9(a)可知,随着喷油温度的升高,齿顶、端面 and 密封的摩擦损耗降低,齿间摩擦损失增大,油指

示功率增加。主要是由于油温升高导致油黏性降低,从而使得齿间油膜厚度变薄与油体积膨胀。由图9(b)可知,随着喷油量增加,各功率都在增加,齿顶、端面和密封摩擦损失随喷油量的增加会明显增加,齿间摩擦损耗增加不明显。油指示功率的增长与喷油量近似线性增长关系。

4 结 论

本文通过建立数学模型并搭建实验台,研究了喷油参数对双螺杆空压机性能的影响,得到了如下结论。

(1)随着喷油量的增加能有效减少泄漏量,降低排气温度,但是喷油量增加会增加空压机功耗,因此双螺杆空压机存在一个最优的喷油量,可以使空压机达到最佳的绝热效率和比功率,随着转速升高最优喷油量呈现下降的趋势,随着背压提高最优喷油量呈现升高的趋势。

(2)喷油温度的升高会降低容积流量与轴功率,同时提升排气温度,容积流量减少速度比轴功率降低速度更快,因此随着喷油温度升高绝热效率下降,比功率升高,空压机性能恶化。所以,对于空压机而言,在保证排气温度的同时尽量选择低喷油温度。

(3)喷油参数对泄漏与耗功有显著的影响,随着喷油温度升高各个泄漏通道泄漏量呈现上升的趋势,摩擦损耗呈下降的趋势。随着喷油量增加各个泄漏通道泄漏量呈下降趋势,摩擦损耗呈上升趋势。

参考文献:

- [1] RADGEN P. Efficiency through compressed air energy audits [C]//Proceedings of Energy Audit Conference. New York, USA: [s. n.], 2006: 11-13.
- [2] SENNIAPPANA P. Baselineing a compressed air system: an expert systems approach [D]. Morgantown, WV, USA: West Virginia University, 2004.
- [3] SAIDUR R, RAHIM N A, HASANUZZAMAN M. A review on compressed-air energy use and energy savings [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(4): 1135-1153.
- [4] WU Xiaokun, XING Ziwen, HE Zhilong, et al. Effects of lubricating oil on the performance of a semi-hermetic twin screw refrigeration compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 340-351.
- [5] YANG Shengmei, OUYANG Hua, WU Yadong, et al. Experimental study of lubricating oil impact on pressure pulsation for twin-screw refrigeration compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 112: 324-332.
- [6] DING Hui, JIANG Yu. CFD simulation of a screw compressor with oil injection [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2017: 012020.
- [7] 杨胜梅, 欧阳华, 吴亚东, 等. 基于供油优化的双螺杆压缩机降噪试验研究 [J]. 流体机械, 2021, 49(4): 7-13.
- [8] YANG Shengmei, OUYANG Hua, WU Yadong, et al. Experimental investigation of sound reduction for twin-screw compressor based on oil supply optimization [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(4): 7-13.
- [9] YANG Shengmei, OUYANG Hua, WU Yadong, et al. CFD simulation for the internal pressure characteristics of an oil-injected twin-screw refrigeration compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 126: 143-154.
- [10] EPARU C N, NEACC A, PRUNDUREL A P, et al. Analysis of a high-pressure screw compressor performances [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2019: 012021.
- [11] LIANG Xiangjing, WU Wanrong. Theoretical and experimental studies on oil injected twin screw air compressor under unload conditions [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol, UK: IOP Publishing, 2019: 032118.
- [12] LU Y, KOVACEVIC A, READ M, et al. Investigation of screw compressors for low pressure ratio applications [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2021: 012006.
- [13] YUSHA L V, CHERNOV G I, FEDOROVA M A. Mathematical modeling of working processes of variable frequency screw compressor with differentiated oil supply into the working chamber [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2018: 012003.
- [14] KUMAR A, KOVACEVIC A, PONNUSAMI S A, et al. On performance optimisation for oil-injected screw compressors using different evolutionary algorithms [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2022: 012021.
- [15] BASHA N, KOVACEVIC A, RANE S. Numerical investigation of oil injection in screw compressors [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 116959.
- [16] BASHA N, KOVACEVIC A, STOSIC N, et al.

- Effect of oil-injection on twin screw compressor performance [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2018: 012009.
- [16] LIAO X, WANG C, YUAN H, et al. Experimental research on influence of interstage oil injection in a dual-motor-driven two-stage screw air compressor [C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, UK: IOP Publishing, 2022: 012023.
- [17] DHAYANANDH K K, RAMESHKUMAR K, SUMESH A, et al. Influence of oil injection parameters on the performance of diesel powered screw air compressor for water well application [J]. *Measurement*, 2020, 152: 107323.
- [18] WU Huagen, XING Ziwen, SHU Pengcheng. Theoretical and experimental study on indicator diagram of twin screw refrigeration compressor [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2004, 27(4): 331-338.
- [19] LI Jianfeng, WU Huagen, WANG Bingming, et al. Research on the performance of water-injection twin screw compressor [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(16): 3401-3408.
- [20] 吴华根, 唐昊, 王养浩, 等. 间隙对双螺杆制冷压缩机性能的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(2): 130-134.
- WU Huagen, TANG Hao, WANG Yanghao, et al. Clearance effects on performance of twin screw refrigeration compressor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(2): 130-134.
- [21] TANG Hao, WU Huagen, WANG Xiaolin, et al. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic Rankine cycle power generator [J]. *Energy*, 2015, 90, Part 1: 631-642.
- [22] 何雪明, 戴进, 潘成龙, 等. 双螺杆压缩机的计算流体力学 3D 动态仿真与试验 [J]. *机械设计*, 2016, 33(7): 59-65.
- HE Xueming, DAI Jin, PAN Chenglong, et al. 3D CFD dynamic simulation and experimental research of twin-screw compressor [J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 33(7): 59-65.
- [23] HANJALIC K, STOŠIC N. Development and optimization of screw machines with a simulation model; thermodynamic performance simulation and design optimization [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119(3): 664-670.
- [24] ISLAM M, NICHOLAS J, BRADSHAW C R. Development and experimental validation of a mechanistic chamber model of a novel peristaltic compressor [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 146: 430-441.
- [25] WANG Chuang, LIU Mingkun, WANG Bingqi, et al. Research on power consumption distribution characteristics of a water-lubricated twin-screw air compressor for fuel cell applications [J]. *Energy*, 2022, 256: 124673.
- [26] BENEDICT G H, KELLEY B W. Instantaneous coefficients of gear tooth friction [J]. *ASLE Transactions*, 1961, 4(1): 59-70.
- [27] 郭惠俊. SKF 轴承综合型录 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1991.

(编辑 赵炜)