

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.05.015

螺杆空压机转子橡胶涂层厚度有限元分析*

孔德逊,王战中*,黄帅可,董文杰,张明亮
(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:转子不同厚度的橡胶涂层对螺杆空压机气密性和转子碰磨问题有很大影响,针对这一问题,对不同厚度橡胶涂层转子在正常工作中产生的等效应力和应变进行了研究。以某型号1立方空压机阴、阳转子为例,首先,在不改变转子几何尺寸的前提下,采用SolidWorks软件分别建立了厚度范围在0.5 mm~2.1 mm、间隔为0.1 mm的17种有橡胶涂层的阴、阳转子模型;然后,利用MATLAB软件编写了程序,并计算了空压机正常工作时转子所受的内力矩;最后,采用ANSYS显示动力学模块,对有不同厚度的橡胶涂层转子分别进行了有限元分析,得到了等效应力和等效弹性应变数据,并对其进行了对比分析。研究结果表明:在综合考虑应力、应变和齿顶间隙等因素后,对螺杆空压机转子橡胶涂层为0.8 mm时符合要求,且此时空压机气密性能优异;该结果可以为螺杆空压机的性能、气密性和效率的提高提供新的方法。

关键词:螺杆式空气压缩机;气密性能;橡胶涂层;转子模型;阴阳转子;内力矩;等效应力和应变

中图分类号:TH45

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)05-0674-07

Finite element analysis of screw air compressor rotors with rubber coating

KONG De-xun, WANG Zhan-zhong, HUANG Shuai-ke, DONG Wen-jie, ZHANG Ming-liang
(College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The rubber coating of rotors with different thickness has great influence on the air tightness of screw air compressor and the friction of rotor, aiming at solving this problem, the equivalent stress and strain of rubber coating rotors with different thickness in normal operation were studied. The male and female rotors of one type of 1 cubic air compressor were taken as an example to research. Firstly, 17 male and female rotor models with thickness ranging from 0.5 mm to 2.1 mm and spacing of 0.1 mm were established with SolidWorks software respectively without changing the geometry of the rotors; then, a program was made with MATLAB software to calculate the internal torque of the rotors when the compressor was working normally; finally, finite element analysis of rubber coating rotors with different thicknesses were carried out with Explicit Dynamics of ANSYS software, and those data of equivalent stress and equivalent elastic strain obtained from above were compared and analyzed. The results indicate that when the rubber coating thickness is 0.8 mm, it meets the requirements and has excellent air tightness performance, after considering factors such as stress, strain and tooth tip clearance. It provides new ideas and methods for improving the performance, air tightness and efficiency of screw compressors.

Key words: screw air compressor; air tightness; rubber coating; rotor model; male/female rotors; internal torque; equivalent stress and strain

0 引言

双螺杆空压机作为一种容积式空压机,其中最为关键的部件是一对相互啮合的阴、阳转子。阴、阳转子通过相互啮合的回转运动来实现螺杆空压机吸气、压

缩和排气过程。阴、阳转子易出现磨损、疲劳、点蚀等问题,容易导致空压机气密性降低、效率下降、运行不稳定,还可能导致严重事故。据统计,70%的螺杆空压机故障是由于转子结构发生破坏引起的^[1]。

因此,国内外学者很早便开始研究如何提高螺杆

收稿日期:2021-10-16

基金项目:河北省高等学校科学技术研究资助项目(BJ2018019)

作者简介:孔德逊(1997-),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事机械设计与制造方面的研究。E-mail:3077157571@qq.com

通信联系人:王战中,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:sjzwzz@163.com

空压机的工作性能、使用寿命以及如何提高螺杆转子的结构性能等问题。

邢子文等人^[2,3]利用转子表面二维网格划分的方法对螺杆转子的受力计算进行了研究,并提出了计算螺杆空压机转子受力的经典理论和方法,但未计算转子所受气体力;俞论等人^[4-6]也利用该方法对螺杆空压机的转子的受力进行了计算,但未进行有限元分析。谢博松^[7]和童学宁^[8]等人针对阴、阳转子的碰磨问题,提出了调整空压机整机组装配间隙的方案和提高能量调节阀的活塞环与阀腔配合间隙的解决方案,但未进行实验或仿真验证;BECERRA J A 等人^[9]针对空压机曲轴进行了有限元分析,但并未进行改进;孔德逊等人^[10]结合橡胶的优点,对阴、阳转子进行了橡胶涂层改进,并进行了有限元分析,发现了在转子上添加橡胶涂层的方法具有提高空压机效率、寿命、气密性等方面的效果,但未针对有不同厚度橡胶涂层的转子进行对比仿真分析;MOORE J J 等人^[11]对转子进行了流固耦合研究,但未进行结构化改进。

笔者从降低转子所受应力、提高转子耐磨性和空压机气密性以提高转子使用寿命出发,分别对有不同厚度橡胶涂层的阴、阳转子进行仿真对比分析。首先,在不改变转子几何尺寸的前提下分别建立含有 0.5 mm ~ 2.1 mm 等 17 种不同厚度的橡胶涂层阴、阳转子三维模型;然后,运用 MATLAB 软件间接计算出该型号螺杆空压机在正常工作时所受到的内力矩;最后,利用 ANSYS 软件对含有不同厚度橡胶涂层的阴、阳转子受力进行有限元分析计算。

1 三维模型的建立

此处笔者以某型号 1 立方螺杆空压机为例,该型号空压机转子端面的型线和参数示意图如图 1 所示。

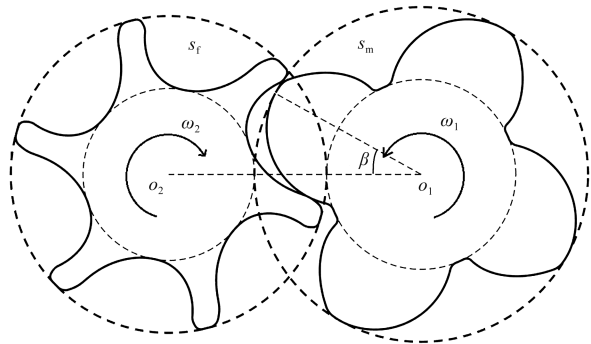


图1 某型号空压机转子端面型线和参数示意图

S_f —阴转子齿间面积; S_m —阳转子齿间面积; β —压缩开始角; O_1 —阳转子中心; O_2 —阴转子中心; ω_1 —阳转子角速度; ω_2 —阴转子角速度

该空压机的具体参数为:阴、阳转子的齿数比为 6 : 4;阳转子外径 $D_1 = 116.284\text{ mm}$;阴转子外径 $D_2 = 110.065\text{ mm}$;中心距 $O_1O_2 = 88\text{ mm}$;旋转速度为 3 000 r/min。

建立正确的空压机三维模型,是保证后续进行有限元分析的前提。首先笔者运用 SolidWorks 软件建立了其三维模型。

某型号空压机转子装配体模型如图 2 所示。

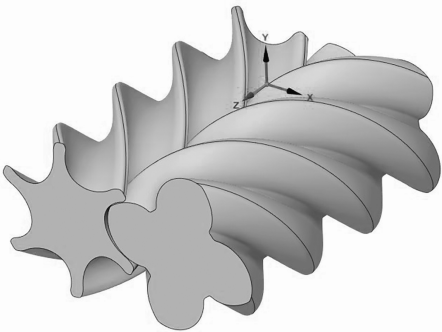


图2 某型号空压机转子装配体模型

在不改变转子几何尺寸的基础上,笔者建立了其几何模型。

有 2 mm 橡胶涂层的转子装配体模型如图 3 所示。

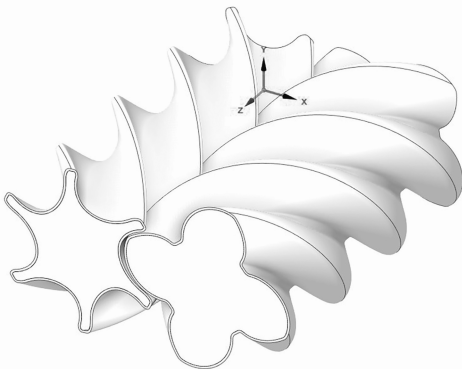


图3 有 2 mm 橡胶涂层的转子装配体模型

由于橡胶涂层的厚度低于 0.5 mm 时,以目前的橡胶硫化工艺很难实现^[12],且当厚度高于 2.1 mm 时,金属部分阴转子型线会发生交叉,无法正确建模。所以,每间隔 0.1 mm,笔者分别建立了含有 0.5 mm ~ 2.1 mm,共 17 种不同厚度的橡胶涂层转子模型。

2 转子内力矩计算

螺杆空压机在工作时,其阴、阳转子可以看作一对同步齿轮,其中,阳转子为主动轮,阴转子为从动轮。作用在转子上的力矩包括电机的驱动力矩、气体被压缩时产生的内力矩以及转子在转动时产生的摩擦阻力矩等 3 部分^[13-15]。

内力矩可通过公式计算解得^[16]。

已知空压机阴、阳转子的齿间面积分别为 826.705 mm^2 、 840.3425 mm^2 , 压缩开始角 $\beta = 28.81^\circ$, 结合螺杆空压机具体参数即可计算各齿槽容积内气体的压力大小。

笔者首先计算齿间容积 V :

$$V = \int_0^L dV = \int_0^L S dz = SL \quad (1)$$

式中: V —转子齿间容积, mm^3 ; S_m, S_f —阳、阴转子齿间面积; L —转子的有效工作长度, mm 。

然后分别计算阳转子扭转角 φ_{1k} 和 τ_{1z} :

$$\varphi_{1k} = \beta + \frac{2\pi}{z_1} \quad (2)$$

$$\tau_{1z} = \frac{L}{T} \cdot 2\pi \quad (3)$$

式中: τ_{1z} —阳转子扭转角, 表示阳转子型线从转子的一个端面左螺旋运动到转子另一个端面所转过的角度; φ_{1k} —从转子齿间容积开始减小, 到阴转子的齿面完全扫过阳转子在吸入端面上的齿间面积时, 阳转子所转过的角度。

进而计算空压机的内容积比为:

$$\theta = \frac{V_0}{V_i} = \frac{V_0}{\tau_{1z} - \varphi_{1c} + \varphi_{1k} - \frac{S_0}{V_0}} \quad (4)$$

最后得到内压力比和内容积比的关系为:

$$\varepsilon_i = \left(\frac{V_0}{V_i} \right)^m = \theta^m \quad (5)$$

式中: θ —空压机的内容积比; ε_i —内压力比; V_0 —吸气过程结束时的容积值; V_i —压缩过程结束时的容积值; φ_{1c} —内压缩转角; m —多方压缩过程指数。

根据式(5)及前面所列转角与内容积比等诸多关系式, 笔者通过使用 MATLAB 软件绘制出了各齿间容积内气体压力的曲线, 如图 4 所示。

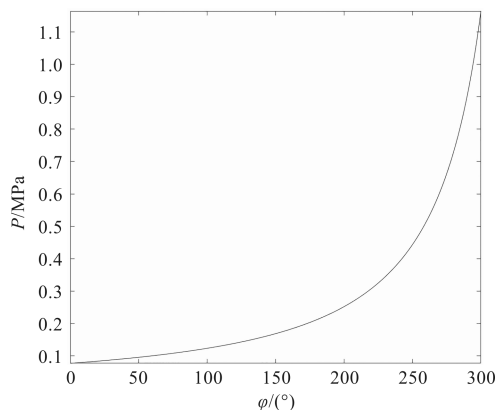


图 4 压力分布图

P —气体压力; φ —阳转子转过的角度

由图 4 可以得到, 当阳转子内压缩转角 $\varphi_{1c} = 247.985^\circ$

时, 各齿槽阳转子转角及压缩气体的压力参数如下:

第 1 对齿槽(已与排气孔口联通) $\varphi_1 = 337.985^\circ$ 时, $P_1 = 1.16 \text{ MPa}$; 第 2 对齿槽(即将与排气孔口联通) $\varphi_2 = 247.985^\circ$, $P_2 = 0.4409 \text{ MPa}$; 第 3 对齿槽 $\varphi_3 = 157.985^\circ$, $P_3 = 0.1823 \text{ MPa}$; 第 4 对齿槽 $\varphi_4 = 67.985^\circ$, $P_4 = 0.1066 \text{ MPa}$ 。

内力矩主要是由被压缩气体的压力作用在转子表面产生的。将沿轴向的载荷按转子长度积分, 便可得到气体压力作用的总力矩。

转子径向力的微分量分别如下式所示:

$$-df_x = p d\sin\alpha = p ds (dy/ds) = p dy \quad (6)$$

$$df_y = p d\cos\alpha = p ds (dy/ds) = p dx \quad (7)$$

积分后得到:

$$f_x = -p \int_{y_1}^{y_2} dy = -p(y_2 - y_1) \quad (8)$$

$$f_y = -p \int_{x_1}^{x_2} dx = -p(x_2 - x_1) \quad (9)$$

式中: p —齿槽内气体压力, MPa ; f_x, f_y —沿 x, y 方向的径向力, N ; x_1, x_2, y_1, y_2 —齿顶螺旋线或接触线坐标。

由式(8,9)可得绕 z 轴的转矩为:

$$dw = df_y x - df_x y = p(y dy - x dx) \quad (10)$$

经积分后可得到:

$$w = p \left[\int_{y_1}^{y_2} y dy + \int_{x_1}^{x_2} x dx \right] = p \left[\frac{y_2^2 - y_1^2}{2} + \frac{x_2^2 - x_1^2}{2} \right] \quad (11)$$

当转子旋转某一角度 ϕ 时, 可以根据式(11)计算出阳转子单位长度上的载荷, 即:

$$W_M(\phi) = p \left[\frac{y_{2F}^2(\phi) - y_{1F}^2(\phi)}{2} + \frac{x_{2F}^2(\phi) - x_{1F}^2(\phi)}{2} \right] \quad (12)$$

同理, 可以得到阴转子在单位长度上的载荷:

$$W_F(\phi) = p \left[\frac{y_{2M}^2(\phi) - y_{1M}^2(\phi)}{2} + \frac{x_{2M}^2(\phi) - x_{1M}^2(\phi)}{2} \right] \quad (13)$$

齿槽内的空气压力 p 产生的转矩 $M_{F,M}$ 为:

$$M_{F,M} = \int_0^z W_{F,M} dz \quad (14)$$

式中: M_F —阳转子的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; M_M —阴转子的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

最后, 分别将所有齿槽的转矩相加, 即可分别得到阴、阳转子的内力矩。其中, 阳转子的内力矩为: $M_1 = 39.9667 \text{ N} \cdot \text{m}$; 阴转子的内力矩为: $M_2 = 8.8810 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

3 仿真计算

笔者将含有不同厚度橡胶涂层的转子模型导入到

ANSYS 软件中,分别进行其有限元分析。

3.1 网格划分

选择合适的网格形状和尺寸对生成网格质量的好坏和仿真结果的准确性有很大的影响。首先,笔者将含有 2 mm 橡胶涂层的转子导入 ANSYS 软件,对 2 mm 橡胶涂层的转子进行网格划分,在综合考虑四面体和六面体网格的优、缺点,并经过多次网格划分求解迭代后,得到符合精度要求的网格,然后分别将其他 16 种含有不同厚度橡胶涂层的转子模型分别导入 ANSYS 软件,并对其进行网格划分操作。

3.2 边界条件设置

笔者通过对空压机阴、阳转子添加旋转副,限制其径向、轴向和切向的位移,只保留了其转子绕 Z 轴转动的自由度。

转子和橡胶涂层的材料属性要分开设置,即转子部分材料属性设置为 45 号钢,涂层部分设置为丁腈橡胶(丁腈橡胶比天然橡胶的空气透过率低 8 倍多,具有更好的气密性和抗老化性能,是转子涂层的理想涂层材料)。

滑动摩擦力的大小计算公式为:

$$f=\mu N \tag{15}$$

式中: μ —动摩擦因数,也叫滑动摩擦系数,它只跟材料、接触面粗糙程度有关,跟接触面积无关; N —正压力。

在螺杆空压机正常工作的过程中,其阴、阳转子之间采用油润滑的方式。由于阳转子主动,且阴、阳转子间通过接触线相互接触,在齿间存在滑动摩擦力。

在 ANSYS 软件中,几何体交互一般不直接添加滑动摩擦力和摩擦阻力矩,直接在阴、阳转子接触表面设置动摩擦系数即可。笔者通过查阅文献[17]得知,丁腈橡胶和丁腈橡胶在油润滑良好的情况下滑动摩擦系数 0.072,所以设置动摩擦系数为 0.072。

为了更加真实模拟空压机的工作状况,笔者添加阳转子的内力矩 $M_1=39.9667\text{ N}\cdot\text{m}$ 和阴转子的内力矩 $M_2=8.8810\text{ N}\cdot\text{m}$,转速设置为空压机正常工作时的转速,即 $n=3\,000\text{ r/min}$;同时,将环境温度温度设置为 $23\text{ }^\circ\text{C}$,仿真时间设置为转子旋转一周的时间,即 0.02 s 。

4 仿真结果与分析

因为材料在各个方向上的应力差值才是实际工程中决定材料是否会被破坏的因素,即等效应力,如下式所示:

$$\sigma=\sqrt{0.5[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]} \tag{16}$$

式中: σ —等效应力; σ_1 —延 x 方向的应力; σ_2 —延 y 方向的应力; σ_3 —延 z 方向的应力。

所以,此处需要通过有限元计算得到等效应力云图后,来对其进行进一步的判断。

应变是形变量与原来长度尺寸的比值,如下式所示:

$$\varepsilon=\Delta L/L \tag{17}$$

式中: ε —应变, mm/mm ; ΔL —形变量, mm ; L —原来的长度, mm 。

4.1 等效应力求解与分析

首先,笔者对含有 2 mm 橡胶涂层的转子进行求解计算,得到的有 2 mm 橡胶涂层转子等效应力云图,如图 5 所示。

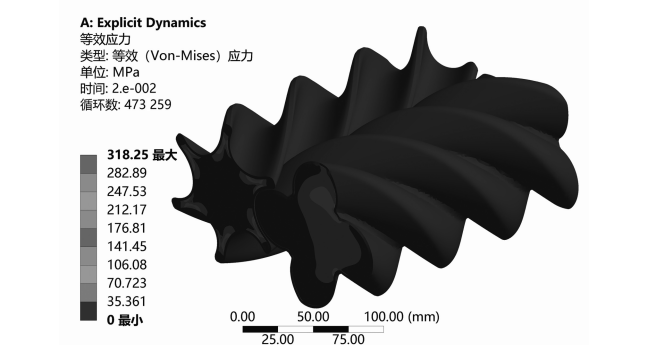


图 5 有 2 mm 橡胶涂层转子等效应力云图

等效应力等效于材料受到单向拉伸时的应力状态,可以清晰地反映出零件所受应力大小是否超过了材料的抗拉强度。

通过图 5 可以清楚地看出橡胶涂层转子表面的应力分布,即转子的表面应力较小。这是因为橡胶具有很好的弹性,吸收了部分应力的同时减少阴、阳转子碰磨,使得等效应力最大的部分集中在了橡胶涂层覆盖下的转子表面,从而对转子起到保护作用。

然后,笔者对其他 16 种含有不同厚度橡胶涂层的转子进行有限元分析。

不同厚度橡胶涂层转子的最大等效应力数据如表 1 所示。

表 1 不同厚度橡胶涂层转子的最大等效应力			
橡胶涂层厚度/mm	最大等效应力/MPa	橡胶涂层厚度/mm	最大等效应力/MPa
0.5	426.95	1.4	386.54
0.6	420.76	1.5	381.21
0.7	416.74	1.6	381.11
0.8	414.27	1.7	372.54
0.9	408.86	1.8	362.57
1.0	402.54	1.9	343.81
1.1	401.21	2.0	318.25
1.2	394.38	2.1	302.43
1.3	390.79		

从表 1 可以看出,随着橡胶涂层厚度的增加,阴、阳转子之间的等效应力在逐渐降低。这是由于不同厚度的橡胶涂层对吸收阴、阳转子应力的能力不同,即橡胶涂层厚度越大,则阴、阳转子间的应力越小。

笔者将上述数据导入 MATLAB 软件中进行曲线拟合。等效应力数据拟合曲线图如图 6 所示。

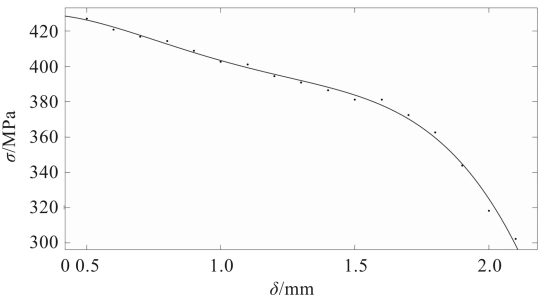


图 6 等效应力数据拟合曲线图

σ —等效应力; δ —橡胶涂层厚度

从图 6 可以看出:涂层厚度在 0.5 mm ~ 1.6 mm 范围内时,等效应力随涂层厚度的增加呈线性下降,而涂层厚度在 1.6 mm ~ 2.1 mm 范围内时,等效应力随涂层厚度的增加呈指数关系下降。

结合空压机的特点,从等效应力角度分析可知:

虽然橡胶涂层厚度的增加对于降低转子应力和减少转子碰磨有很大作用,但过大的橡胶涂层厚度会降低阴、阳转子的刚性;

应力最大点出现在橡胶涂层覆盖下的阴转子齿上,这是因为阴转子相对于阳转子齿面较窄,导致了阴转子齿的刚度要小于阳转子齿的刚度,所以过大的橡胶涂层厚度不仅不能在空压机运行时起到缓冲作用,还将会进一步降低阴转子的刚度;

反之,适当厚度的橡胶涂层会起到缓冲作用,降低阴、阳转子所受应力大小,提高螺杆空压机寿命。

4.2 等效弹性应变求解与分析

等效弹性应变可以反映出螺杆空压机在正常工作状况下阴、阳转子啮合时的弹性变形量。在通常情况下,金属刚性材料的弹性应变很小,而橡胶等弹性材料的弹性应变稍大。

首先,笔者对含有 2 mm 橡胶涂层的转子进行求解计算,得到的有 2 mm 橡胶涂层的转子等效弹性应变云图,如图 7 所示。

由图 7 可以看出:弹性应变最大的地方在阳转子齿尖表面,这是因为阳转子为主动轮,需要在克服阴转子的力矩的情况下输出转矩,所以表面应变大的部分大都集中在阳转子齿尖表面。

由于橡胶具有良好的弹性,且橡胶涂层厚度越大,

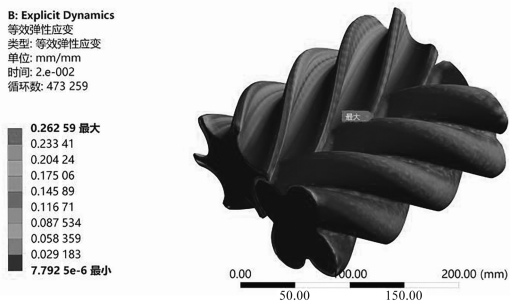


图 7 有 2 mm 橡胶涂层的转子等效弹性应变云图

弹性越好,表面弹性应变越大,在相同尺寸下,较大的弹性形变量可以补充转子齿顶间隙,进而使螺杆空压机运行过程中的气体泄漏量降低,即拥有橡胶涂层转子的螺杆空压机具有更好的气密性。

笔者对其他 16 种含有不同厚度橡胶涂层的转子进行求解,得到不同厚度橡胶涂层转子的最大等效弹性形变,如表 2 所示。

表 2 不同厚度橡胶涂层转子的最大等效弹性形变

橡胶涂层厚度/mm	最大等效弹性应变/($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$)	橡胶涂层厚度/mm	最大等效弹性应变/($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$)
0.5	0.07	1.4	0.185 2
0.6	0.092 5	1.5	0.196
0.7	0.096 192	1.6	0.199 041
0.8	0.112 79	1.7	0.221
0.9	0.139 7	1.8	0.232 57
1.0	0.150 1	1.9	0.246
1.1	0.160 7	2.0	0.263
1.2	0.168 7	2.1	0.273 72
1.3	0.174 9		

从表 2 可以看出,随着橡胶涂层厚度的增加,转子啮合时的最大等效弹性应变也在增加。这是因为,不同厚度的橡胶受力时产生的弹性变形也不一样。

笔者将表 2 中的数据导入 MATLAB 软件中进行曲线拟合,得到了等效弹性应变曲线图,如图 8 所示。

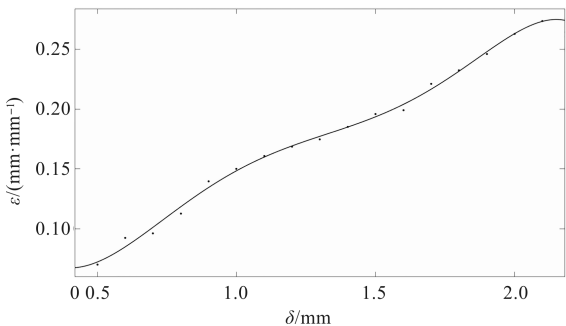


图 8 等效弹性应变数据拟合曲线图

ε —等效弹性应变; δ —橡胶涂层厚度

由图 8 可知,当橡胶涂层的厚度在 0.5 mm ~ 2.1 mm 范围内时,橡胶涂层表面的弹性应变大小与橡

胶涂层厚度呈线性增加趋势。

结合空压机的特点,从等效弹性应变的角度分析可知:弹性变形并不是越大越好。

这是因为螺杆空压机是一种通过阴、阳转子啮合压缩齿间容积达到压缩气体目的的机器,在空压机工作时,会经过吸气、压缩和排气 3 个阶段;而齿间容积的大小决定吸气容量的大小,对于螺杆空压机来说,过大的弹性应变会侵占转子的齿间容积,降低空压机吸气量,从而导致空压机效率降低;过大的弹性应变会导致齿顶间隙过小,甚至导致转子和箱体卡死,从而对空压机运行时的稳定性造成不良影响;反之,适当的弹性应变则可以增加空压机气密性,减少其气体泄漏,进而可延长空压机的寿命。

所以,必须保证橡胶涂层转子在正常运行时发生的弹性应变变量小于齿顶间隙。

4.3 综合分析

在得到不同厚度橡胶涂层转子的应变数据后,笔者通过计算得到转子橡胶涂层的变形量数据,并拟合曲线。最大弹性变形量曲线如图 9 所示。

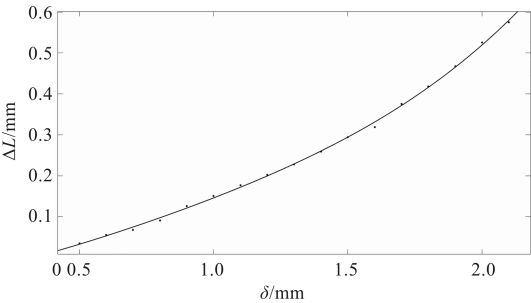


图 9 最大弹性应变变量曲线
ΔL—等效弹性应变变量;δ—胶涂层厚度

由图 9 可以看出,橡胶涂层的最大变形量随着涂层厚度的增加而增加,且厚度在 0.5 mm~1.5 mm 之间的曲线斜率要小于 1.5 mm~2.1 mm 的曲线斜率。

空压机效率的最大影响因素是气密性,主要指来自于压缩过程中的气体泄露。泄露主要发生在转子的齿顶间隙和泄露三角形。泄露三角形属于型线设计问题,在不改变型线的前提下很难调整。所以,通过橡胶涂层转子的方式,在运行过程中降低齿顶间隙是提高空压机效率的优选方式。

但在正常工作时,橡胶涂层转子不仅会降低齿顶间隙、提高气密性,同时还会侵占部分齿间容积,所以需要定量综合考虑这两种情况。

转子长度一定时,齿间容积代表着齿间所能容纳气体的体积,齿间容积越大,相同时间内,被压缩的气体越多,空压机的压缩气体的效率越高。

由式(1)可知,转子齿间容积只与转子齿间面积 S 转子长度 L 有关,而齿间面积与橡胶涂层转子等效弹性应变变量有关。

橡胶涂层转子达到最大等效弹性应变后所能到达的容积利用率如下:

$$C_{n1} = \frac{z_1 (S_m + S_f) L}{V_0} \tag{18}$$

式中: C_{n1} —容积利用效率; z_1 —阳转子齿数; V_0 —无橡胶涂层转子的齿间容积。

笔者运用 MATLAB 软件分别进行计算,得到不同厚度橡胶涂层转子容积利用效率,如表 3 所示。

表 3 不同厚度橡胶涂层转子容积利用效率			
橡胶涂层厚度/mm	容积利用效率/%	橡胶涂层厚度/mm	容积利用效率/%
0.5	99.86	1.4	99.24
0.6	99.83	1.5	99.18
0.7	99.77	1.6	99.03
0.8	99.68	1.7	98.92
0.9	99.61	1.8	98.79
1.0	99.54	1.9	98.55
1.1	99.48	2.0	98.38
1.2	99.41	2.1	98.14
1.3	99.33		

笔者运用 MATLAB 软件将表 3 中的数据拟合曲线,得到了容积利用效率曲线,如图 10 所示。

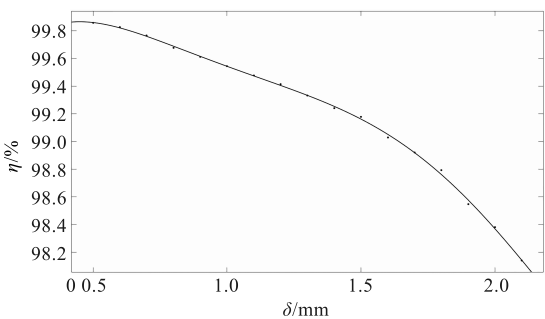


图 10 容积利用效率曲线
η—容积利用效率;δ—橡胶涂层厚度

结合表 3 的数据和图 10 的曲线可以看出:橡胶涂层转子的面积利用率随着橡胶涂层厚度的增加而逐渐减小,但减小的量非常小,即使橡胶涂层厚度达到最大的 2.1 mm,容积利用效率也能达到 98.14%。

因此,在正常运行时,笔者所列厚度的橡胶涂层转子产生的弹性应变变量对齿间容积的影响很小,几乎可以忽略不计。

该案例中的螺杆空压机的设计齿顶间隙为 0.108 mm,所以橡胶涂层转子的最大等效应变不能超过 0.108 mm,超过则会导致转子与箱体卡死。

笔者采用齿顶间隙与橡胶涂层转子最大弹性应变量的比值,来反映空压机气密性的改善程度。

不同厚度橡胶涂层转子气密性改善程度如表 4 所示。

表 4 不同厚度橡胶涂层转子气密性改善程度			
橡胶涂层厚度/mm	弹性应变/mm	齿顶间隙/mm	气密性改善程度/%
0.5	0.035	0.108	32.41
0.6	0.055 5	0.108	51.39
0.7	0.067 334 4	0.108	62.35
0.8	0.090 232	0.108	83.18
0.9	0.125 73	0.105	116.4

从表 4 可以看出:只有橡胶涂层厚度在 0.9 mm 以下的模型才能符合要求。

随着橡胶涂层厚度的增加,空压机气密性的改善程度也在提高,且程度较大。

对比表(3,4)数据可以看出:在空压机正常运行时,橡胶涂层转子对齿间容积的侵占非常小,但可以极大地降低空压机齿顶间隙,改善程度可达 83.18%,可以极大地减小压缩过程中的漏气状况,从而提高空压机的效率。

经综合考虑可发现:0.8 mm 橡胶涂层转子不仅可以降低应力,减少转子碰磨,更能改善空压机气密性,提高空压机效率。

5 结束语

转子不同厚度的橡胶涂层对螺杆空压机气密性和转子碰磨问题有很大影响,为此,笔者对不同厚度橡胶涂层转子在正常工作中产生的等效应力和应变进行了研究,即以某型号 1 立方空压机阴、阳转子为例,对其厚度范围在 0.5 mm~2.1 mm、间隔为 0.1 mm 的橡胶涂层的阴、阳转子进行了有限元分析,并通过仿真数据对其进行了对比分析。

研究结论如下:

- (1)随着转子橡胶涂层厚度的增加,转子所受等效应力逐渐变小;
- (2)随着阴、阳转子橡胶涂层厚度的增加,最大等效弹性应变在提高,且呈线性增加的趋势;
- (3)在一定范围内,橡胶涂层厚度大小对空压机容积效率影响不大,且气密性改善程度随橡胶涂层厚度增加而提高;
- (4)在充分考虑不同厚度橡胶涂层转子应力曲线、应变曲线、气密性改善程度曲线、容积利用率曲线和加工误差以及橡胶涂层均匀度误差后,最终证明 0.8 mm

厚度橡胶涂层转子最优。

在空压机正常运行时,气体由于被压缩而使整个空压机温度升高,可能会对有橡胶涂层的转子造成影响。因此,在今后的研究工作中,笔者将就该问题进行深入研究。

参考文献 (References):

[1] LI T, WANG J, LEI S, et al. Structural characteristics of twin-screw compressor rotor based on thermal-solid coupling method[J]. **Journal of Vibroengineering**, 2020, 22(6): 1534-1546.

[2] 邢子文. 螺杆空压机—理论、设计及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[3] 赵海洋,纪彦东,王金东,等. 基于间隙运动的往复空压机传动机构动力学分析[J]. 流体机械,2013,41(3):15-19,33.

[4] 俞 论,董瑞兵,刘扬娟. 螺杆空压机转子受力计算[J]. 空压机技术,2006(2):18-22.

[5] 王小明,田 岗,田青青,等. 平衡式双螺杆空压机支承结构设计[J]. 机床与液压,2018,46(19):63-66.

[6] 胡 涛,王 莹,张泉明,等. 螺杆转子断裂故障分析及修复方法[J]. 空压机技术,2014(2):49-52.

[7] 谢博松. 螺杆制冷空压机转子碰磨故障分析[J]. 液压气动与密封,2015,35(4):74-76.

[8] 童学宁. 双螺杆空压机的常见故障及对策[J]. 化工管理,2019(26):157-158.

[9] BECERRA JA, JIMENEZ FJ, TORRES M, et al. Failure analysis of reciprocating compressor crankshafts[J]. **Engineering Failure Analysis**,2010,18(2):735-746.

[10] 孔德逊,王战中,黄帅可,等. 螺杆空压机橡胶涂层转子有限元分析[J]. 机床与液压,2022,50(6):163-167.

[11] MOORE J J, RANSOM D L, VIANA F. Rotordynamic force prediction of centrifugal compressor impellers using computational fluid dynamics[J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**,2011,133(4):64-72.

[12] 刘宇鹏. 不同硫化工艺条件对航空胎用天然橡胶性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学化工学院,2015.

[13] 王军利,李托雷,雷 帅,等. 流固耦合下双螺杆空压机转子结构特性研究[J]. 空压机技术,2019(5):5-11.

[14] 董欣红,李 进,何 杉,等. 双螺杆空压机常见故障振动频率分析[J]. 凿岩机械气动工具,2013(3):57-61.

[15] 谭 蔚,陈晓宇,樊显涛. 摩擦阻尼器对塔器风致振动的减振试验研究[J]. 压力容器,2020,37(2):11-16,23.

[16] TAKESHI Y, YU K, KAZUO H. Effect of rubber block height and orientation on the coefficients of friction against smooth steel surface lubricated with glycerol solution[J]. **Tribology International**,2017,110:96-102.

[17] UTRERA-BARRIOS S, ARAUJO-MORERA J, DE L P, et al. An effective and sustainable approach for achieving self-healing in nitrile rubber[J]. **European Polymer Journal**, 2020,139:11-32.

[编辑:李 辉]

本文引用格式: