

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.002

单螺杆泵衬套的收缩变形分析

周培堃, 顾寄南*, 刘元琦
(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对单螺杆泵衬套曲面形状的变形问题, 对影响橡胶收缩率的因素、温度变化与衬套形状之间的关系和衬套模芯曲线形状修正方法等问题进行了研究。采用温度场与结构应变场的耦合分析的方法, 利用有限元分析软件 ANSYS 模拟了衬套出模冷却时的温度场, 分析了螺杆泵衬套形状随温度的变化特点。研究表明, 硫化温度与工作温度差异越大, 衬套的变形越明显, 并呈现出头部变形小、腰部变形较大的特点, 通过适当缩小螺杆泵模芯腰部尺寸可以减小温度变化对其最终形状的影响, 提高衬套的形状精度。

关键词: 单螺杆泵衬套; 温度变化; 变形; 有限元分析

中图分类号: TH327; TH145 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)08-0963-04

Deformation analysis of single-screw pump bush

ZHOU Pei-long, GU Ji-nan, LIU Yuan-qi
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problem of the deformation of the shape of pump bush, the relationship between temperature and bush shape, the way to refine the shape of bush and the factors that influence the shrinkage of bush were investigated. The temperature field of the bush was simulated through Finite Element Analysis by combining the temperature field and the structure field. The results show that the more differences between the vulcanization temperature and working temperature, the greater deformation of the bushing, the deformation of head is small, while the deformation of waist is large. By reducing the size of waist could ease the influence of temperature change, thus the size accuracy of the pump bush is refined.

Key words: single-screw pump bush; temperature change; deformation; finite element analysis (FEA)

0 引 言

单螺杆泵是一种性能优良的转子式容积泵, 其主要工作部件由具有螺旋空腔的衬套和与它啮合的螺旋转子组成。两者的截面型线必须保持共轭关系, 如果这种关系被破坏, 螺杆泵就会出现溢流现象^[1-3]。其共轭关系如图1所示。为了减小溢流现象的出现, 橡胶衬套(定子)与螺杆转子要保持一定的过盈量来保证密封, 过盈量过大会造成启动力矩增大, 可能造成卡死; 过盈量过小会导致衬套与转子密封被破坏, 导致输出压力不足。张劲等人^[4]研究了衬套有限元分析的求解策略和三维模型和平面模型在受力时的变形

差异, 王可等人^[5]利用有限元法研究了衬套在均匀内压下和非均匀内压下的变形, 即工作时受力变形, 暂无关衬套压制成型过程的热力耦合分析。实际生产通常采用丁腈橡胶材料在高温条件下压制衬套,

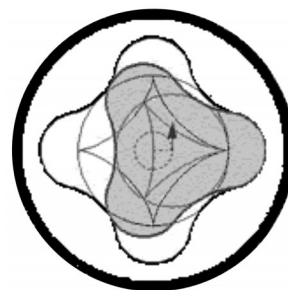


图1 衬套与定子的共轭关系

收稿日期: 2014-02-28

作者简介: 周培堃(1990-), 男, 河南驻马店人, 主要从事CAD/CAM方面的研究。E-mail: zhoupeilong0@163.com

通信联系人: 顾寄南, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: gjnan@ujs.edu.cn

使用时的温度低于压制成型时的温度,而且工作温度会随着时间变化,这些都会导致衬套形状发生变化。

本研究针对上述问题,采用有限元法分析衬套形状随温度的变形规律,为选择合理的过盈量和为衬套模芯形状补偿提供理论参考,保证螺杆泵共轭副在不漏失的前提下选择较小的过盈量。

1 橡胶衬套压制过程及其收缩率

螺杆泵衬套所用橡胶通常为丁腈橡胶(NBR),它是由丁二烯和丙烯腈经乳液聚合法制作而成,其耐油性极好,耐磨性较高,粘结力强,耐热性能和物理性能优异。其加工大致分为4个过程:塑炼、混炼、压出、硫化。经过塑炼和混炼后,橡胶呈现出面团状,在70℃~80℃下压入模具进行硫化。硫化是指橡胶的线型大分子通过化学交联而构成三维网状结构的化学变化过程。橡胶经过硫化后从塑性的混炼胶变为高弹性的或硬质的交联橡胶,从而获得更好的机械物理性能和化学性能,硫化是最后一道工序,硫化温度、硫化压力和硫化时间对橡胶衬套最终性能的影响较大^[6],一般硫化温度为150℃~190℃。

加工装配示意图如图2所示。

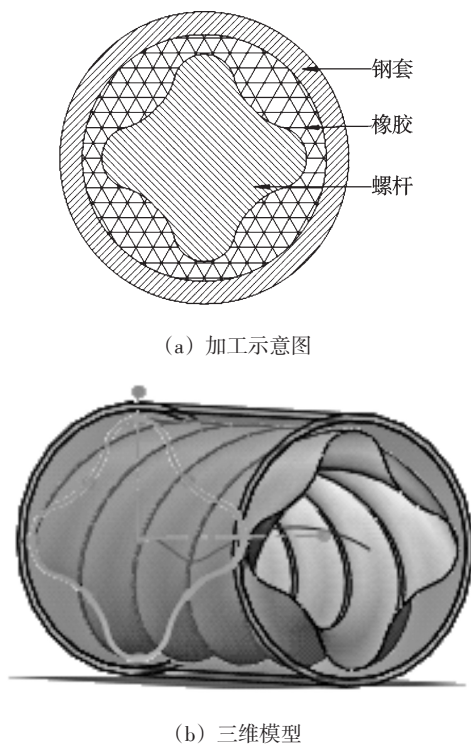


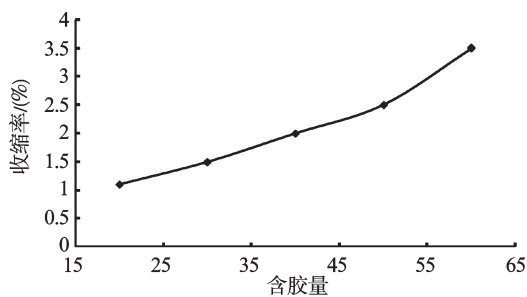
图2 衬套的加工示意图和三维模型

由于丁腈橡胶的线膨胀系数(约为 20×10^{-5})与螺杆的线膨胀系数(约为 1.1×10^{-5})相差18倍之多,当橡胶衬套出模冷却后,其尺寸必然会小于螺杆尺寸^[7]。其收缩率可用下式表示:

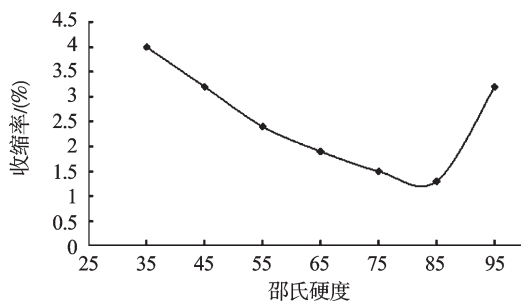
$$Q = \frac{D_{\text{模芯}} - D_{\text{衬套}}}{D_{\text{模芯}}} \quad (1)$$

2 影响橡胶衬套收缩率的因素

橡胶是一种高弹性材料,具有易变形的特点。影响橡胶衬套收缩率的因素很多,如橡胶热膨胀系数、壁厚、有无骨架、含胶量、胶料致密程度及硫化工艺等。橡胶的原材料是由几种不同的生胶和一些添加剂组成的,其中生胶的含量也叫做含胶量,对橡胶的弹塑性有较大的影响,进而影响橡胶的收缩率。同样的原材料配比,如果硫化工艺不同,最后橡胶呈现的综合力学性能也不同,硫化工艺的3个要素为:硫化压力、硫化温度、硫化时间。一般来说,硫化压力越大,橡胶分子组成越致密,分子间的间隙也越小,硫化收缩率相对越小。但是硫化压力不是越大越好,如压力过大则会降低衬套的物理机械性能,释放压力后会出现回弹现象。所以硫化压力应控制在一定的数值内。硫化温度越高,收缩率越大,每提高10℃,收缩率增大0.1%~0.2%,硫化温度越高所需的硫化时间越短。橡胶收缩率随着含胶量和硫化后的邵氏硬度的关系如图3所示。从图3中可以看到,橡胶材料的收缩率随着含胶量的增加而增大,随着邵氏硬度的增大呈现先减小后增大的变化趋势。



(a) 橡胶收缩率与含胶量的关系



(b) 橡胶收缩率与邵氏硬度的关系

图3 橡胶收缩率的变化趋势

当硫化后衬套的邵氏硬度<85时,其收缩率随着硬度的增加而减小,当邵氏硬度>85时,其收缩率随着硬度的增大而增大,当邵氏硬度=85左右时,其收缩率

最小。

3 橡胶衬套收缩变形模拟分析

3.1 滞后热量损失分析

金属转子在橡胶定子型腔中旋转时会受到摩擦阻力,转子与定子之间存在接触应力,由于橡胶的粘弹性,在转子旋转时会产生滞后热量^[8],定子的应力和应变可以表示为:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin (\omega t + \delta) \quad (3)$$

式中: ε_0 —一定子的最大应变,mm; σ_0 —一定子的最大应力,MPa; ω —转子的角速度,rad/s。

根据迟滞效应导致橡胶温升的机理,转子转动一周产生的能力损耗为:

$$Q = 2 \int_0^{\pi} \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt = \pi E' \varepsilon_0^2 \tan \delta \quad (4)$$

式中: E' —弹性模量,MPa; δ —迟滞损耗因子。

节点的生热率为:

$$q = \frac{Q}{T} = \pi n E' \varepsilon_0^2 \tan \delta \quad (5)$$

式中: n —一定子的转速,r/s。

产生的热能使定子的温度升高,为了模拟衬套出模冷却和工作时其端截面形状随温度的变化,根据转子的转速 $n = 3$ r/s,橡胶迟滞损耗因子 $\tan \delta = 0.05$,本研究通过有限元分析法求解衬套冷却时的温度场分布,并利用热力耦合分析得到衬套形状随温度的变化。

3.2 有限元分析

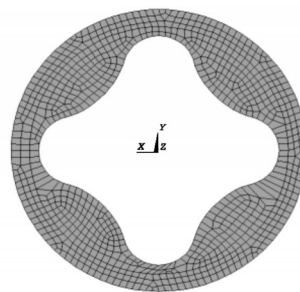
本研究的衬套外径为 142 mm,橡胶最小厚度为 5 mm,端截面轮廓是由短幅内摆线的等距线组成。根据已有的研究结论,通过三维模型和平面应变模型所求出的定子橡胶衬套的变形规律基本一致,这种情况下可以用平面模型来代替三维模型,也可提高求解效率,因此本研究采用平面模型。将变形较小的丁腈橡胶视为不可压缩材料,按线弹性材料处理,这种材料根据自身硬度的不同其弹性模量 E 和泊松比 μ 也不同,一般可取 $E = 4$ MPa, $\mu = 0.499$,材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

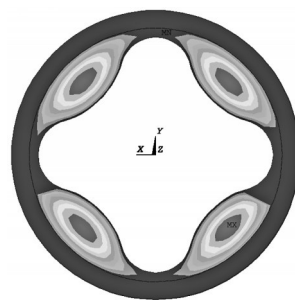
材料	热导率/ (W/(m℃))	弹性模量 /MPa	泊松比	线膨胀系数
45 钢	50.2	2.1E+9	0.3	1.1E-5
丁腈橡胶	0.25	4	0.499	2E-4

热力学分析。本研究采用 PLANE77 作为热分析单元进行网格划分,初始条件硫化温度为 150 ℃,空气温度 25 ℃,模型与周围环境的热对流系数 20 W/m²。

根据式(5)计算出的生热率 $q = 0.8$,加载体热载荷,得到的有限元模型和温度场如图 4 所示^[9-10]。



(a) 有限元模型

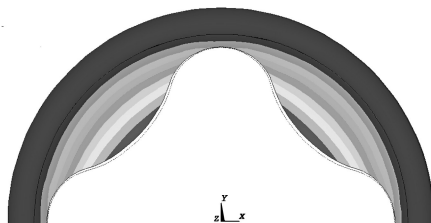


(b) 温度场

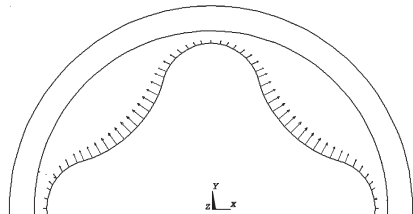
图 4 有限元模型和温度场

衬套的温度场云图如图 4(b)所示,根据图 4(b)可以得出:衬套的温度场是不均匀的,具体表现为钢套和衬套头部冷却较快,温度分布比较均匀,在腰部较厚的地方表现为中间高两边低的特点,大致呈现出椭圆形的分布规律。

热力耦合分析。本研究将热分析单元 PLANE77 转换为结构实体单元 PLANE183,加载上述热分析结果,施加固定约束到钢套外表面,得到耦合后的位移图和位移方向图。橡胶衬套变形前、后的轮廓形状和变形云图如图 5 所示。



(a) 衬套变形云图



(a) 变形方向

图 5 衬套变形云图和变形方向

3.3 结果分析

(1) 计算结果表明:橡胶衬套的最大位移变形出现在衬套的腰部,头部变形较小,变形量随着橡胶厚度的增加而增大。衬套的变形方向近似于沿着轮廓的法线方向。本研究为了得到衬套的收缩量和硫化温度的关系,取硫化温度为150℃~190℃进行有限元分析,得到硫化温度与变形量(最大值)的关系图如图6所示。

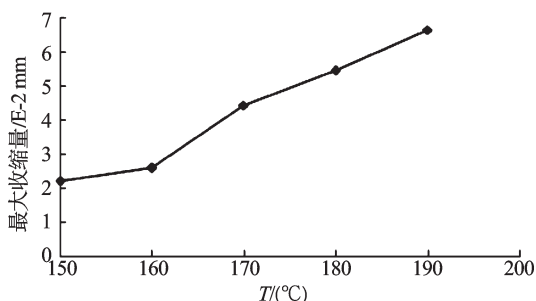


图6 硫化温度与最大收缩量的关系

(2) 本研究分别在温度为150℃、25℃(常温)、100℃(工作温度)时进行热力耦合分析,在后处理中提取轮廓边界节点沿着X轴和Y轴的变形量,通过计算分别得到了衬套冷却到常温和工作时实际的端截面形状,衬套曲线与温度的关系如图7所示。

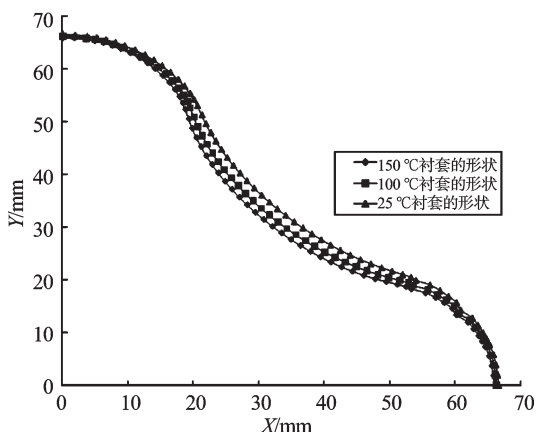


图7 衬套曲线与温度的关系

(3) 温度对过盈量的影响。由橡胶衬套的成型过程可知,衬套是在温度150℃~170℃下定型的,此时其端截面形状与螺杆端截面形状吻合,但当其冷却到室温时,由于热胀冷缩的作用,端截面形状会相应地收缩,此时笔者对衬套与螺杆转子进行装配,假设此时的过盈量为 δ_1 ,正常运转时,橡胶的温度会逐步上升到一个稳定值,由于温度升高,此时过盈量变为 δ_2 。且

$\delta_2 > \delta_1$ 。过盈量过小,衬套与螺杆配合副会被油液压力击穿,泵的输出压力减小;过盈量过大,则螺杆与衬套的摩擦力增大,扭转阻力增大,一旦停机重新启动,会造成卡死现象^[11-13]。

4 结束语

(1) 本研究分析了衬套的压制过程,并分析了影响衬套收缩率的因素。分析表明,温度变化降低了衬套的形状精度。

(2) 本研究建立了衬套的有限元分析模型,通过热力学分析得到了衬套出模冷却时的温度分布,并分析了衬套在不同温度下的变形。结果表明,硫化温度越高,衬套变形量越大,呈现出头部变形小、腰部变形的特点。

(3) 本研究通过对螺杆腰部曲线作合理地补偿,可以减小因温度变化带来的形状误差,提高衬套形状精度。

参考文献(References):

- [1] 李福天. 螺杆泵[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 何希杰,劳学苏. 螺杆泵现状与发展趋势[J]. 水泵技术, 2007(5):1-6.
- [3] 刘少华,郝杰,王建. ESPCP电动潜油螺杆泵设计研究[J]. 机械,2012(2):58-61.
- [4] 张劲,张士诚. 常规螺杆泵衬套有限元求解策略[J]. 机械工程学,2004,40(5):189-193.
- [5] 王可,陈亮亮,孙兴伟. 多头等壁厚橡胶螺杆钻具定子有限元分析[J]. 装备制造技术,2010(1):83-84.
- [6] 聂恒凯. 橡胶通用工艺[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [7] 赵志正. 模压硫化后橡胶制品的收缩率[J]. 世界橡胶工业,2010,37(10):29-32.
- [8] 魏纪德,郑学成. 采油螺杆泵定子温度场数值模拟分析[J]. 石油机械,2006,34(2):11-14.
- [9] 操建平,孟庆昆. 螺杆泵定子热力耦合的计算方法研究[J]. 力学季刊,2012,33(2):331-337.
- [10] 陈艳霞. ANSYS完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [11] 杨秀萍,郭津津. 单螺杆泵定子橡胶的接触磨损分析[J]. 润滑与密封,2007,32(4):33-39.
- [12] 叶卫东,韩道权. 螺杆泵定子与转子的接触分析[J]. 石油矿场机械,2008,37(8):25-28.
- [13] 初同龙,王春生,王晓虎,等. 螺杆泵腔室内流场的数值模拟研究[J]. 流体机械,2014,42(5):21-24.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

周培奎,顾寄南,刘元琦. 单螺杆泵衬套的收缩变形分析[J]. 机电工程,2014,31(8):963-966.

ZHOU Pei-long, GU Ji-nan, LIU Yuan-qi. Deformation analysis of single-screw pump bush[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(8):963-966.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>