

隧道掘进机主轴密封系统性能的研究

汪加科, 王树林*

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:通过对隧道掘进机主轴的油封工作状态进行有限元仿真,研究了油封在不同初始过盈量和工作油压下的密封性能。结果表明:该密封系统油封与轴之间的最大接触应力始终大于工作油压,可以保证油封的密封性能;油封与轴的接触应力呈线性锥形分布,最大接触应力几乎处于接触宽度的中间,影响油封的吸油能力,不利于油封的密封;适当减小油封初始过盈量有利于减少密封处主轴的磨损,提高油封的使用寿命。

关键词:油封;接触应力;有限元分析

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2014)10-0618-04

隧道掘进机也称为盾构机,是集机、液、电、光、信息等技术于一体的高度自动化和机械化的大型工程机械。盾构施工法具有掘进速度快、施工工期短、作业环境好、对生态环境破坏小、综合效益高等优点,已逐步成为隧道的主要施工方法。盾构设备的刀盘主轴的工作状态直接关系到施工效率,而且盾构设备在施工时,刀盘主轴油封的更换比较麻烦,因此有必要对盾构设备的油封密封性能进行研究分析。

由于油封系统几何形状复杂、装配约束关系多且材料具有非线性本构关系,因此难以从理论上求解出密封系统中各零部件的应力和变形,进而预测其密封性能。本工作依据隧道掘进机主轴密封系统中橡胶材料在密封过程中的工作特点,采用 Abaqus 有限元仿真分析软件建立其有限元分析模型,使用非线性接触分析方法,研究了油封与主轴之间的接触应力在不同初始过盈量和工作油压下的变化规律,以期为隧道掘进机主轴油封的设计和提供理论依据。

1 模型建立

1.1 几何模型

轴和密封槽相对于油封属于刚体,主轴的直

径较大,为 860 mm,取其中一部分与油封做接触分析即可。密封元件的结构是轴对称的,所选取的密封元件特别大,在建模时可令油封厚度为 1 mm,通过 UG 三维软件进行建模,得其几何模型,如图 1 所示。

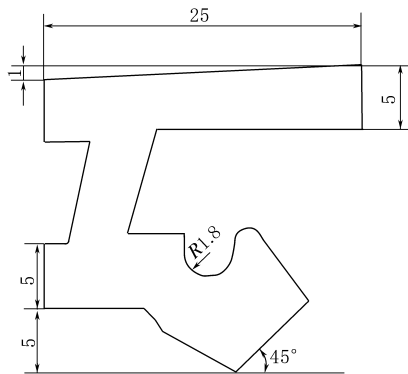


图 1 几何模型

1.2 有限元模型

1.2.1 材料属性

油封部分材料为橡胶,其力学特性表现为超弹性,超弹性体的应力-应变关系是一个复杂的非线性函数,可用应变能函数(W)表示。采用 Mooney-Rivlin 应变能函数来描述其力学特性^[1-2],对于不可压缩的超弹性体,其应变能密度函数为

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中, I_i 为第 i 方向的应变不变量; C_1 和 C_2 为材料的力学性能常数,由所选用的橡胶材料决定。

Mooney-Rivlin 应变能函数对应的应力表达

基金项目:国家自然科学基金资助项目(510751927)

作者简介:汪加科(1987—),男,江苏仪征人,江苏大学硕士,现任职于南京工业大学,主要研究方向为机床主轴密封与润滑。

* 通信联系人

式为

$$\mathbf{S}_{ij} = \partial W / \partial \mathbf{E}_{ij} = 2 \partial W / \partial \mathbf{C}_{ij} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{S}$ 为第二类 Piola-Kirchhoff 应力张量; $\mathbf{E}$ 为 Lagrange 应力张量分量; $\mathbf{C}$ 为 Cauchy-Green 形变张量分量。

Mooney-Rivlin 应变能中的两个常量 C_1 和 C_2 可以参照文献[3]通过单轴压缩试验获取, 本研究分别取 $C_1=7.19 \text{ MPa}$, $C_2=1.72 \text{ MPa}$ 。

轴的材料为碳钢, 相对于油封视为刚体, 其杨氏模量为 210 GPa , 泊松比为 0.3 。

1.2.2 网格划分

在 Abaqus 软件中, C3D8R 六面八节点实体单元可以模拟受力的超弹性体单元, C3D8 六面八节点实体单元可以模拟受力的金属部件, 也是一个六面八节点的实体单元。根据材料的力学特性, 轴和密封槽选择 C3D8 实体单元, 油封选取 C3D8R 实体单元。根据模型的大小, 在模型网格划分中, 通过撒种子的方法设置网格尺寸为 0.01 mm 。其中油封节点为 $5\,586$ 个。有限元模型如图 2 所示。

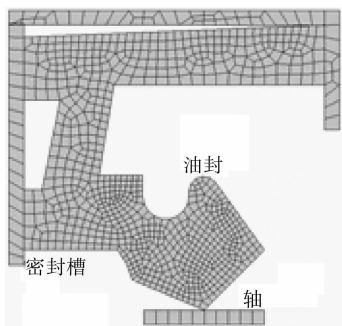


图 2 有限元模型

1.2.3 边界约束和载荷施加

在此模型中, 密封槽的 6 个自由度被完全限定, 油封采用轴对称约束^[4], 轴的自由度被限定在 X - Y 平面, 轴在 X 方向上的位移为零, 把施加在 Y 轴方向上的位移作为油封与轴之间的初始过盈量。

油封与轴建立接触对, 油封与密封槽之间建立 5 个接触对, 它们的接触类型都为面面接触中刚-柔接触, 刚体接触面为主面, 即轴和密封槽为主面, 油封为从面。

根据油封安装的过程, 可以分 2 个分析步进

行求解。第 1 步对油封施加初始过盈量, 即把施加在 Y 轴方向上的位移作为第 1 个分析步; 第 2 步对油封施加工作油压, 即把工作油压加载在油封内部作为第 2 个分析步。

2 结果与讨论

初始过盈量为 0.8 mm , 油封在油压为 0 和 0.4 MPa 时的内部应力及形变状态如图 3 所示。从图 3 可以看出, 油封变形而产生的应力主要集中在油封与轴的接触处, 表明油封处于密封工作状态。有限元分析结果表明, 图 3(a) 和 (b) 中 a 处的接触应力分别为 0.379 和 3.073 MPa , 后者约为前者的 9 倍, 说明增大油压可使油封的密封性能增强。

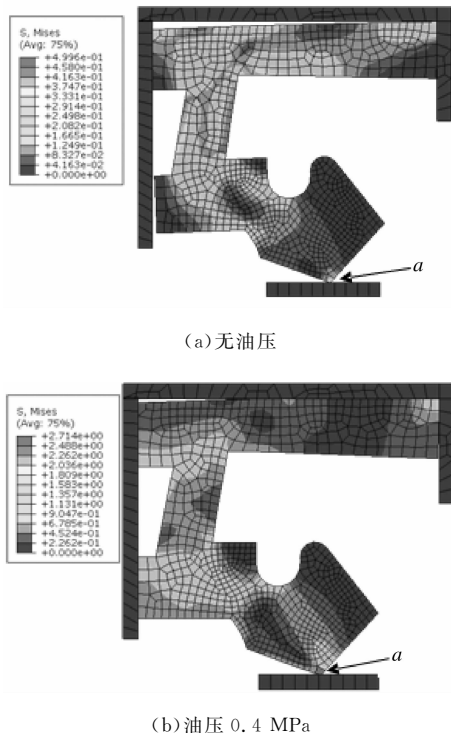


图 3 油封在油压为 0 和 0.4 MPa 时的内部应力及形变状态

从图 3 可以看出油封与密封槽的接触区域发生了变化, 由此可以进一步根据油封有无工作油压作用, 分别讨论油封的密封性能。

油封实际工作时, 当最大接触压应力小于工作油压时, 会造成工作用油外泄, 导致油封失效^[5]。因此油封工作用油不泄漏的条件是油封与轴的最大接触应力大于工作油压, 这就要求最大

接触应力与工作油压之差(Δp)必须大于零。

图4反映出在没有工作油压作用时接触应力与初始过盈量之间的关系。从图4可以看出,油封与轴的初始过盈量对最大接触应力的影响还是比较大的,最大接触应力随初始过盈量的增大而增大,当初始过盈量增大到一定值时,增幅减小,最大接触应力趋于稳定。反映到油封的密封性能就是在无工作油压作用时,油封的密封性能随初始过盈量的增大而增强,但当初始过盈量增大到一定值时油封的密封性能趋于稳定。

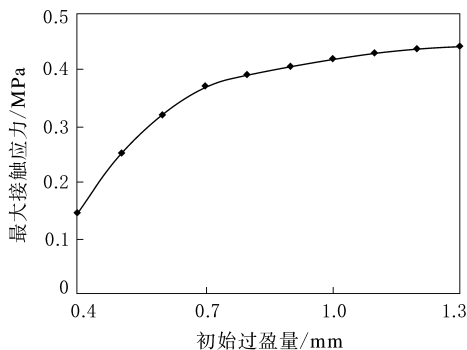


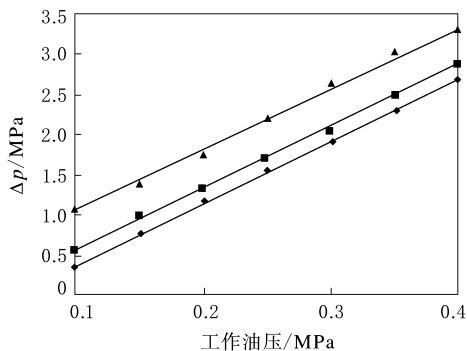
图4 无油压时初始过盈量与接触应力的关系

油封与轴的最大接触应力随着安装时初始过盈量的增大而增大,油封的密封性能也随之增强,符合密封效果随着初始过盈量增大而增强的工程经验。从有限元分析的结果还可以看出,当安装初始过盈量增大到一定值时,最大接触应力随初始过盈量不发生明显变化,这是由于油封与轴的接触面积增大的缘故。因此,工程上通常将安装初始过盈量控制在某个范围内而不是通过尽可能增大安装初始过盈量来提高密封效果。由此可见,有限元分析结果与工程实际应用情况相吻合。

图5反映出油封在不同初始过盈量下 Δp 与工作油压之间的关系。从图5可以看出,对于同一初始过盈量的油封, Δp 始终大于零,即最大接触应力始终大于工作油压,油封始终能够保证密封性能;随着工作油压的增大, Δp 也随之增大,即增大油压可以提高油封的密封性能。

从图5还可以看出,油封在工作油压作用下,增大油封的初始过盈量,油封的密封性能增强,但变化不明显,即影响油封密封性能的主要因素是工作油压。

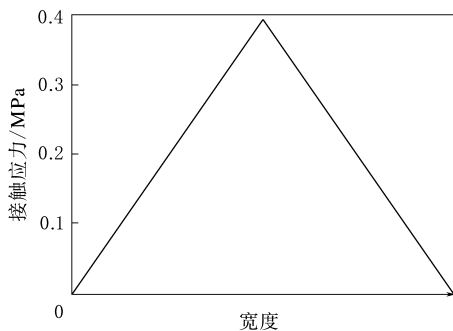
油封的密封性能不仅与 Δp 的大小有关,还



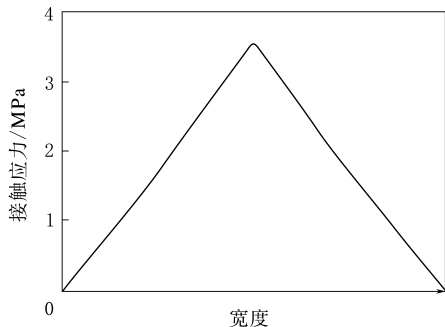
初始过盈量/mm: ◆—0.2; ■—0.4; ▲—0.9。

图5 Δp 与油压的关系

与接触压力的分布相关。试验表明,最大接触应力靠近储油侧能增强储油侧对空气侧的吸油能力,提高密封效果^[6]。初始过盈量为0.8 mm、油压为0和0.4 MPa时,油封与轴接触应力在接触面上的分布如图6所示。



(a) 无油压(接触宽度为0.13 mm)



(b) 油压为0.4 MPa(接触宽度为0.23 mm)

图6 油压为0和0.4 MPa时油封与轴接触应力在接触宽度上的分布

从图6可以看出,接触应力呈线性锥形分布,最大接触应力几乎处在接触宽度的正中间。这会对储油侧对空气侧的吸油能力造成影响,不利于油封的密封性能。

对比图 6(a) 和 (b), 可知在相同初始过盈量下, 增大油压会增大油封与轴的接触宽度。这会增大油封的磨损, 不利于油封的密封性能, 与实际情况相吻合^[7]。

3 结论

基于 Mooney-Rivlin 模型, 利用 Abaqus 有限元仿真分析软件, 对隧道掘进机主轴油封在不同初始过盈量和工作油压下密封性能的变化规律进行有限元仿真, 得到以下结论。

(1) 在不同的油封安装初始过盈量和工作油压下, 油封与轴之间的最大接触应力与工作油压之差始终大于零, 可以保证油封的密封性能。这说明所研究的隧道掘进机主轴密封系统具有一定的“自封”能力。

(2) 油封与轴的接触应力基本呈线性锥形分布, 最大接触应力几乎处于接触宽度的正中间, 影响储油侧对空气侧的吸油能力, 不利于油封的密封性能。

(3) 随着油封安装初始过盈量的增大, 油封与

轴之间的接触应力增大, 密封效果也随之增强, 但过大的初始过盈量会使油封与轴之间的摩擦阻力增大, 磨损功耗增多, 导致油封因摩擦引起的高温老化而缩短使用寿命。这为油封安装时合理选择油封与轴的初始过盈量提供了依据。

参考文献:

- [1] 郭巍, 郑振忠, 吴行, 等. 实心橡胶轮胎非线性有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2011(6): 65-67.
- [2] 陈敏, 姜小敏, 赵祖欣, 等. 唇形橡胶密封圈非线性接触有限元分析[J]. 密封与润滑, 2009, 34(11): 76-80.
- [3] Kurt M. Testing Elastomers for Hyper-elastic Material Models in Finite Element Analysis[J]. Rubber Technology International, 1999, 88: 1-8.
- [4] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 125-163.
- [5] 任全彬, 蔡体敏, 王荣桥, 等. 橡胶 O 型圈参数和失效准则研究[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1): 9-14.
- [6] 李建国, 丁玉梅, 杨卫民, 等. 油封密封性能的有限元分析[J]. 密封与润滑, 2006, 34(11): 116-120.
- [7] Gabelli A, Zwarts J. Means for Measuring a Radial Force[P]. USA: USP 4 703 662, 1987-11-03.

收稿日期: 2014-04-23

Study on Performance of Main Bearing Sealing System for Tunnel Boring Machine

WANG Jia-ke, WANG Shu-lin

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on finite element simulation of the main bearing oil seal for tunnel boring machine under working state, the sealing performance of the oil seal was investigated under different initial interference and working pressure. It was found that, for the sealing system, the maximum contact stress between the oil seal and shaft was always greater than the working oil pressure, which could ensure the sealing performance of oil seal. The contact stress distribution was linear (cone-shape) and the maximum contact stress was almost in the middle part, which affected the oil absorption ability of the oil seal and would reduce the sealing performance. The simulation results indicated that properly reducing the initial interference could decrease shaft wear on the sealing position and improve the service life of the oil seal.

Key words: oil seal; contact stress; finite element analysis