

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.002

文章编号:1672-9331(2022)02-0009-10

引用格式:杨妹,王玉,任勇,等.盾构换刀机器人储存舱闸门密封特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):9-18.

Citation: YANG Mei, WANG Yu, REN Yong, et al. Research on sealing characteristics of storage tank gate of cutter changing robot for shield machine [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 9-18.

盾构换刀机器人储存舱闸门密封特性研究

杨妹¹, 王玉², 任勇³, 张帅坤³, 林赉旻², 夏毅敏²

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083;
3. 中国铁建重工集团股份有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘要:【目的】为保证高压环境下盾构换刀机器人在储存舱内安全密封保存,开展盾构换刀机器人储存舱闸门的密封特性研究。【方法】通过揭示某型号储存舱闸门的结构特点和密封机理,建立闸门密封件在介质压力作用下的仿真分析模型,分析介质压力作用下应力分布以及各接触面最大接触应力值,探究初始压缩量、流体介质压力及材料硬度对闸门密封件密封性能的影响。【结果】在0~2.0 MPa的介质压力范围内,初始压缩量及材料硬度对密封件密封性能的影响较大。以密封件最大接触应力、最小 Von-Mises 应力为优化目标,采用响应曲面法对密封件进行参数优化设计,得到邵尔 A 型硬度 80、初始压缩量 1.0 mm 的密封件可以满足 0~2.0 MPa 介质压力下的密封要求。【结论】通过密封性能测试试验,验证了闸门在低压(0.6 MPa)和高压(1.2 MPa)工况下良好的密封性能。可为泥水盾构换刀机器人储存舱闸门的密封件选型提供指导。

关键词:盾构;换刀机器人;储存舱闸门;密封特性;响应曲面法;优化设计

中图分类号:TU111

文献标志码:A

0 引言

盾构机在施工过程中刀具消耗量巨大、更换频繁,在高水压(压力 ≥ 3 bar)、高湿(相对湿度 $\geq 90\%$)的恶劣工况进行人工换刀作业,存在安全隐患大、作业效率低等问题^[1-3]。为满足隧道施工安全与效率的要求,国内外学者及企业对盾构机换刀机器人进行了研究与应用^[4-6]。闸门是盾构换刀机器人储存舱与开挖仓的连接装置,在盾构机掘过程中,保持关闭状态,隔绝开挖仓的水土压力,为换刀机器人提供常压的储存空间。因其特殊的安装应用工况,在掘进过程中无法更换维修,因此闸门密封效果至关重要,密封失效将导致隧道掌子面压力失衡、储存舱无法保压等问题,进而引发安全事故。开展闸门密封结构的高承压密封

性能研究有助于实现闸门在恶劣环境下可靠密封,为机器人安全、高效地换刀作业提供保障。

目前,国内外学者针对各种类型的耐压闸门的结构设计、密封性能及橡胶密封件材料性能等方面进行了许多研究。在结构与密封性能方面,SAKABA等^[7]设计了一种泄漏率远低于0.1%/d的规定值的核反应堆安全壳耐压闸门,并对所设计的闸门的密封性能进行了分析。MA等^[8-9]设计的具备耐磨损、耐腐蚀的平板闸阀,对地下工程中的复杂工况具有较好的适应性。XU等^[10]对应用于3 000 m水深的水下闸阀进行了密封结构设计,并利用ANSYS进行了密封接触分析,验证了闸阀的密封性能。刘飞香等人^[11-13]设计了适用于盾构机常压换刀的密封闸门,提高了刀具更换效率与安全性。在密封性能方面,吕祥奎等^[14]基于多孔渗流原理提出了一种核电站大型耐压闸门结构泄

收稿日期:2022-10-08;修回日期:2022-11-14;接受日期:2022-11-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1306700)

通信作者:杨妹(1992—)(ORCID:0000-0003-2521-4817),女,博士后,主要从事隧道掘进机刀盘刀具设计与性能分析方面的研究。E-mail:183701027@csu.edu.cn

漏率的理论预测方法,并通过试验研究验证了模型的准确性。黄晓明等^[15]研究了DN20截止阀的静密封结构泄漏机理,提出了界面泄漏率理论预测模型。密封件材料性能方面,渠涛等^[16-17]研究了飞机舱门的橡胶密封件的动摩擦性能,为解决机舱的空气泄漏提供了解决方案。陈祺鑫等^[18]研究了加载振幅、激励频率和孔隙度对金属橡胶密封件疲劳磨损和疲劳寿命的影响,为研究金属橡胶密封件的疲劳寿命提供了一定的基础。LIANG^[19]通过可靠性方法分析橡胶材料参数的随机性对O形环密封性能的影响,为估计橡胶O形密封圈的可靠性提供了便利。

目前很少有学者对盾构换刀机器人储存舱闸门的密封结构展开研究,为了满足储存舱闸门密封性要求,本文运用ABAQUS软件研究了闸门密封结构在不同初始压缩量、流体介质压力及不同材料硬度下的静密封性能。通过密封试验,验证该密封结构的良好密封性能,并为泥水盾构换刀机器人储存舱闸门的密封选型提供工程指导。

1 闸门结构特征与密封机理分析

闸门安装在盾构机盾体的前隔板上,如图1所示。作为机器人储存舱与开挖仓的连接装置,闸门主要起密封作用。盾构机掘进期间,闸门关闭,隔离开挖仓泥水压力,使机器人储存舱保持常压状态。需要换刀时,将储存舱加压至开挖仓压力,并维持压力平衡,闸门打开,机器人进入开挖仓进行换刀作业^[20]。

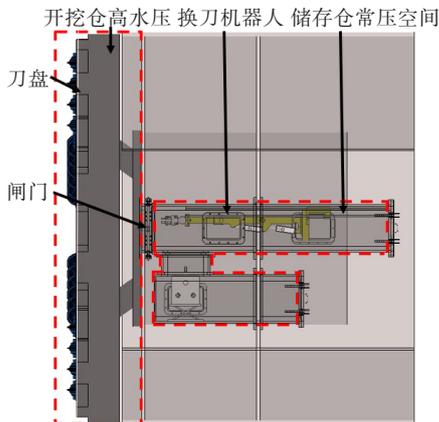


图1 储存舱闸门安装示意图

Fig.1 Schematic diagram of installation of storage tank gate

1.1 闸门结构特征

储存舱闸门属于对开式刀型闸阀,主要结构包括前盖、后盖、闸板、伸缩油缸、闸板拉杆以及内部密封组件,如图2所示。闸板通过闸板拉杆在伸缩油缸的控制下在前盖与后盖之间的腔体内移动,实现闸门的开闭动作。

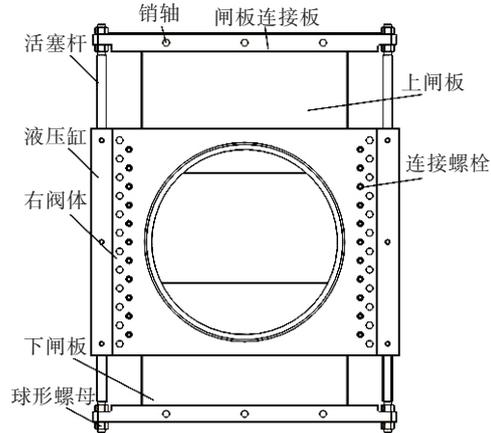


图2 闸门结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of gate structure

闸门作为隔离开挖仓高压与换刀机器人储存舱常压空间的关键装置,应具有较好的耐高压性和密封性。闸门的密封功能主要通过其内部密封结构来实现,闸门密封结构为组合式双重密封结构,按照安装位置不同可分为正向密封件及侧面密封件。正向密封件共有4条,对称安装在前后盖的密封槽当中,对两块闸板的上下表面进行密封;侧面密封件共有2条,对称安装在前后盖两侧的密封槽当中,对两块闸板的左右两个侧面进行密封。密封件结构如图3所示。

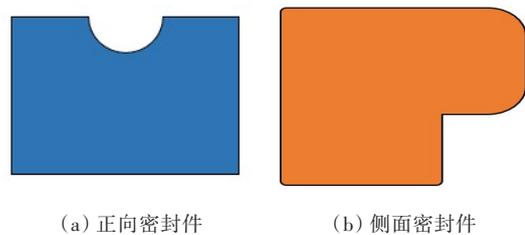


图3 闸门密封件结构

Fig.3 Gate seal structure

1.2 闸门密封机理分析

1.2.1 正向密封

正向密封件是一种矩形截面的密封条,如图4所示。4根密封条对称安装在前、后盖的密封凹槽

当中。正向密封属于挤压式端面密封,以主闸板一侧的前盖正向密封件为例,当闸门前、后盖固定连接后,受到主闸板的预压缩作用,紧密依附在主闸板的下表面上,在接触面产生初始接触应力 $F_1、F_2$;工作状态,在介质压力 p 作用下,密封件继续变形,接触应力变为 $F_1'、F_2'、F_1''$,当接触应力 $F_1'、F_2'$ 的最大值大于介质压力值 p 时,满足密封要求。

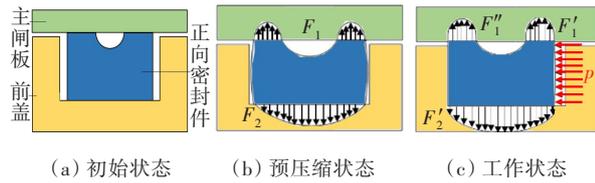


图4 正向密封件密封机理示意图

Fig.4 Schematic diagram of sealing mechanism of forward seal

1.2.2 侧面密封

侧面密封件是截面形式为P形密封件,2根密封条对称安装在前盖的两侧密封槽当中;采用“P”字形的截面设计,可以很好地避免密封条在闸板开闭过程中发生脱落。当闸门整体装配完成后,受到后盖的预压缩作用,侧面密封件发生横向变形,与闸板侧面紧密贴合在一起,其密封机理如图5所示。当密封件受到预压缩,会在接触表面产生初始接触应力 $F_1、F_2$,当受到介质压力 p 作用时,接触应力变为 $F_1'、F_2'$,当接触应力 $F_1'、F_2'$ 的最大值大于介质压力 p 时,密封件发挥密封作用。

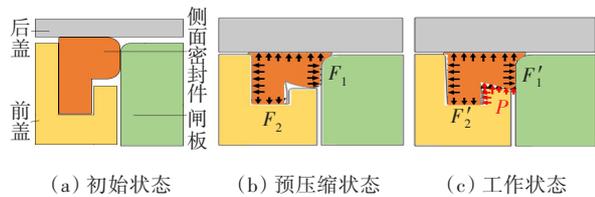


图5 侧面密封件密封机理示意图

Fig.5 Schematic of sealing mechanism of side seal

闸门在密封过程中,侧面密封件承担了两块闸板的外侧密封任务,也是整个闸门的主要密封工作。在闸板移动过程中,侧面密封件不仅分别受到垂直于后盖、闸板方向的挤压力,同时受到两块闸板相反方向的剪力作用。随着闸门开闭次数的逐渐增多,侧面密封件不可避免地发生磨损失效,进而影响闸门整体的密封性能。因此,本文取

侧面密封件为研究对象,研究其力学性能和密封性能的变化规律。

2 侧面密封件有限元建模

2.1 橡胶材料本构模型

侧面密封件一般采用丁腈橡胶(nitrile butadiene rubber, NBR)。橡胶材料的应力-应变关系主要通过应变能密度函数来描述。应变能密度函数本构模型的选取需要根据材料及模型的变形情况综合考虑。橡胶材料的应变能密度函数的表达式如下:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (1)$$

$$I_2 = (\lambda_1\lambda_2)^2 + (\lambda_2\lambda_3)^2 + (\lambda_3\lambda_1)^2 \quad (2)$$

$$I_3 = (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 \quad (3)$$

式中: $I_1、I_2、I_3$ 是第一、第二和第三应变不变量; $\lambda_1、\lambda_2、\lambda_3$ 是材料在三个方向上的主伸长比。由橡胶材料的不可压缩性可得:

$$I_3 = (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2 = 1 \quad (4)$$

Mooney-Rivlin 模型能够较为准确地描述变形量在 150% 以内的橡胶材料的真实特性,且已被大量的试验验证。2 参数的 Mooney-Rivlin 模型目前已成为工程上有限元分析的首选模型^[21-22]。侧面密封件的最大压缩量为 1.0 mm, 压缩率在 10% 以内, 采用 2 参数的 Mooney-Rivlin 模型能够准确描述其力学性能, 其应变能密度函数表达式如下:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

式中: W 为应变能密度; $C_{10}、C_{01}$ 为材料参数。

橡胶材料的弹性模量 E 与邵氏 A 型硬度 H 、材料参数 $C_{10}、C_{01}$ 有以下关系:

$$E = \frac{15.75 + 2.15H}{100 - H} \quad (6)$$

$$\frac{E}{3} = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (7)$$

通常取 $C_{01} = 0.25C_{10}$ 。通过确定橡胶材料的邵氏 A 型硬度 H 可以确定 $C_{10}、C_{01}$ 。本文取橡胶材料的邵氏 A 型硬度为 70、75、80、85 和 90 五种不同的硬度进行研究。按照公式(5)~(7)计算得到几种不同硬度的材料参数,见表1。

表1 橡胶硬度与材料参数对应关系

Table 1 The corresponding relationship among rubber hardness and material parameters

H	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	E/MPa
70	0.739	0.185	5.542
75	0.944	0.236	7.080
80	1.252	0.313	9.387
85	1.764	0.441	13.230
90	2.790	0.698	20.930

2.2 有限元分析模型的建立

由于橡胶密封件具有复杂的材料非线性、几何非线性和接触非线性^[23-24],采用ABAQUS建立侧面密封件模型时,做以下假设:1)密封件材料的弹性模量 E 和泊松比 ν 在工作中保持不变;2)材料性质是各向同性的,即拉伸、蠕变既不引起面积的变化,也不引起体积的变化;3)忽略温度对密封件参数的影响;4)前后盖、闸门板的弹性模量远远大于密封件,视为刚体来分析。

前盖、后盖以及闸门板的材料均为合金钢,弹性模量和泊松比分别为214 GPa和0.290。密封件材料为丁腈橡胶,泊松比为0.499。为了保证有限元分析过程中的计算精度,采用ABAQUS自由网格划分技术,其中网格单元采用四节点双线性平面应变四边形单元(CPE4H),并且网格划分时对密封件进行网格细化以提高仿真精度。侧面密封件的二维平面应变模型如图6所示。

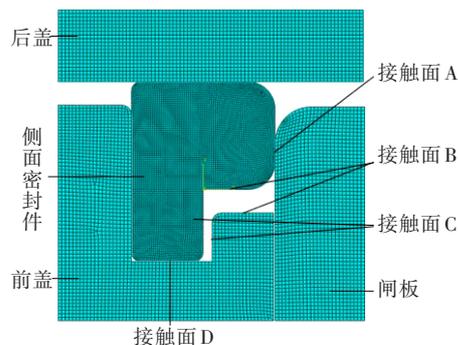


图6 侧面密封件的有限元分析模型

Fig.6 Finite element analysis model of side seal

在分析侧面密封件的工况时,定义了两个分析步:第一个分析步模拟密封件的安装过程,通过对前盖、闸板进行完全约束,然后对后盖施加

竖直向下方向位移实现,建立初始密封装配状态;第二个分析步模拟流体压力加载,采用pressure penetration加载方式。如图7所示,选取点1和点4作为侧面密封件与闸板接触对上压力加载起始点,选取点2和点3作为侧面密封件与前盖的接触对上压力加载起始点,使得流体压力加载的节点可以随着密封件的变形和接触应力的变化不断地自动调整,当渗透到某一节点,该节点上的接触压力大于介质压力时,渗透不再继续,介质停留在该节点处。采用这种加载方式,可自动寻找介质渗透产生接触对分离的临界点,更准确地分析密封件的密封性能。

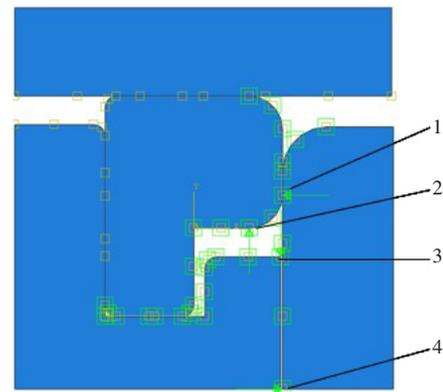


图7 流体压力渗透加载原理

Fig.7 Principle of fluid pressure penetration loading

3 计算结果分析

3.1 初始压缩量对密封性能的影响

选取介质压力 $p=1.0\text{ MPa}$,材料邵氏A型硬度为70,初始压缩量 c 分别为0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0和1.1 mm,进行数值模拟,Von-Mises应力分布如图8所示,各应力变化如图9所示。

由图8可以看出,随着初始压缩量 c 的增加,最大Von-Mises应力由1.178 MPa增加到3.085 MPa;最大Von-Mises应力区域由密封件的上部两个边角部位逐渐向接触面A和接触面B的接触部位过渡。此时密封件受剪切作用,可能会超过密封件的极限屈服应力,极易导致密封件内部产生裂纹而发生破坏。上部两个边角挤进间隙的部位Von-Mises应力始终保持在较高的水平,若继续增大压缩量会导致密封件发生咬伤。

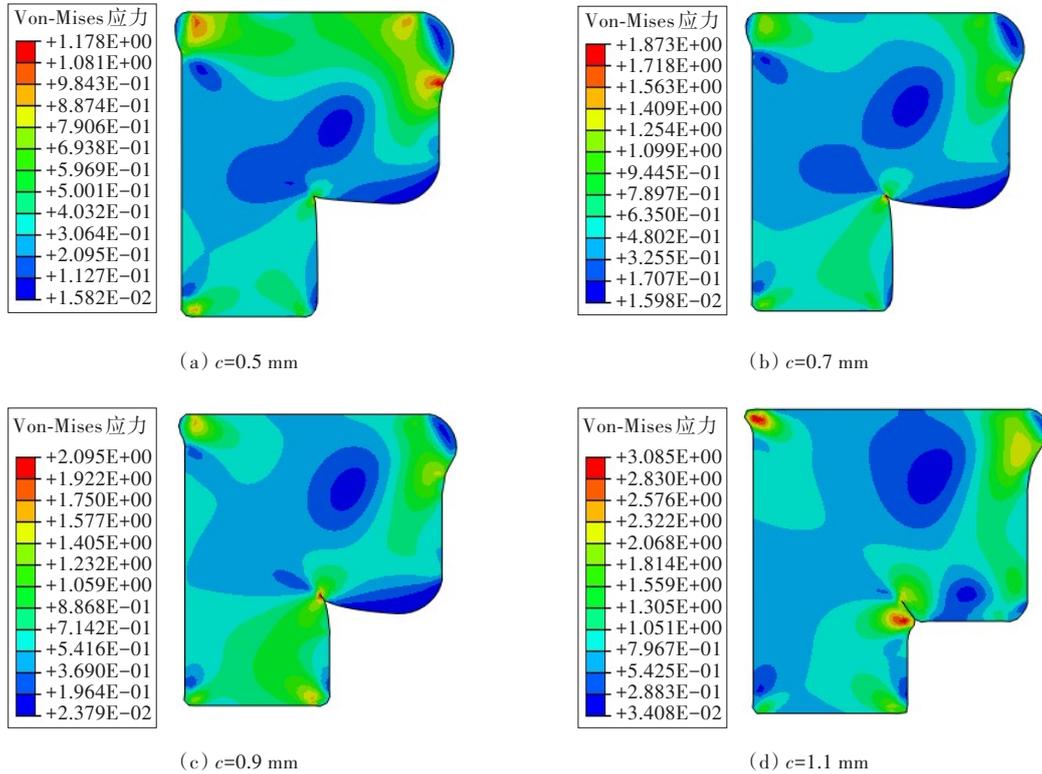


图 8 不同初始压缩量下的 Von-Mises 应力分布图

Fig.8 Schematic of Von-Mises stress distribution under different initial compressions

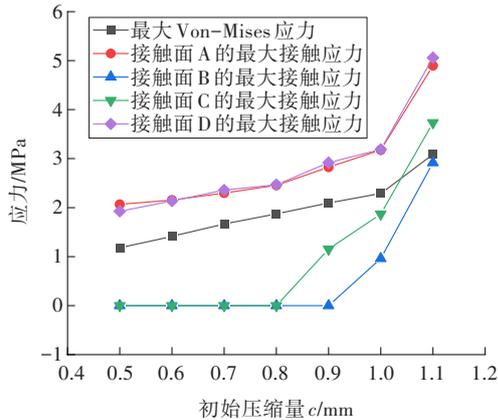


图 9 各应力随初始压缩量 c 的变化

Fig.9 The variation of stress with initial compression

由图 9 可以看出,随着初始压缩量的增加,密封件的最大 Von-Mises 应力与四个接触面的最大接触应力均呈上升趋势,且在 $c=1.1$ mm 时,相比 1.0 mm 时均发生了较大幅度的增大。接触面 A 和接触面 D 的最大接触应力数值和变化趋势非常接近,且均始终大于介质压力,表明侧面密封件具有良好的密封效果;初始压缩量大于 0.9 mm 时,接触对 C 与接触对 D 先后产生。侧面密封件在工作过程中,密封效果受初始压缩量的影响较大,为了保

证密封件的密封性能,要选择小于 1.1 mm 的初始压缩量。

3.2 介质压力对密封性能的影响

密封件的密封能力取决于密封面产生的接触应力,当密封面的最大接触应力小于介质压力时,就会产生泄漏。取 $p=0.3\sim 2.1$ MPa,初始压缩量 $c=1.0$ mm,邵氏 A 型硬度为 70,进行数值模拟。Von-Mises 应力分布如图 10 所示,各应力变化如图 11 所示。

由图 10 可以看出,当 $p<2.0$ MPa 时,随着介质压力 p 的增大,最大 Von-Mises 应力变化幅度较小,在 2.3 MPa 前后波动,其分布区域集中在密封件的中心部位,即面 B 与面 C 接触部位。当 $p>2.0$ MPa 时,最大 Von-Mises 应力发生了大幅度的增大,达到了 2.857 MPa。

由图 11 可以看出,随着介质压力的增大,4 个接触面的最大接触应力呈直线上升趋势,且接触面 D 的最大接触应力始终比其他 3 个面要大一些,接触面 B 的值最小,且始终存在至少 3 个接触面的最大接触应力大于介质压力,具有良好的密封效果。在 2.0 MPa 以内,最大 Von-Mises 应力变化不

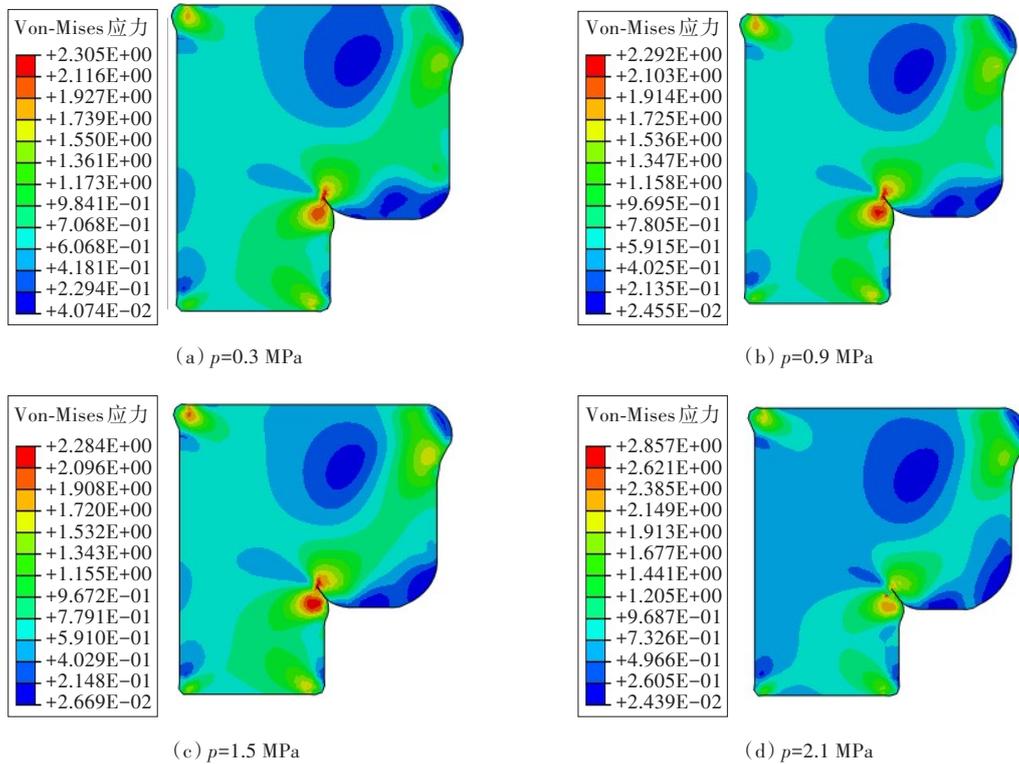


图 10 不同介质压力 p 下 Von-Mises 应力分布

Fig.10 Distribution of Von-Mises stress under different medium pressures

太明显。表明在这个范围内,介质压力对密封件的最大 Von-Mises 应力影响较小。

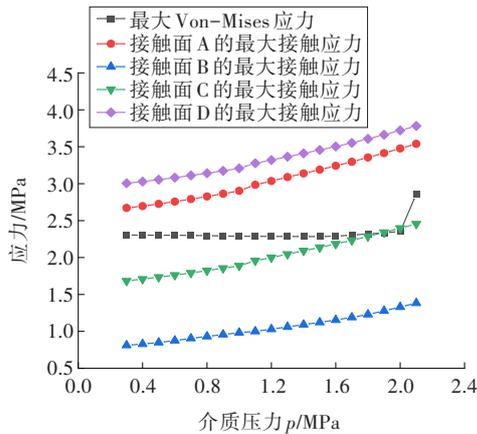


图 11 各应力随流体介质压力 p 的变化

Fig.11 The stress varies with the pressure of the fluid medium

3.3 材料硬度对密封性能的影响

分别选取橡胶材料的邵氏 A 型硬度为 70、75、80、85 和 90,初始压缩量 $c=1.0$ mm,介质压力 $p=1.0$ MPa,对侧面密封件进行数值模拟,侧面密封件的最大 Von-Mises 应力以及各接触面的最大接触应力变化如图 12 所示。

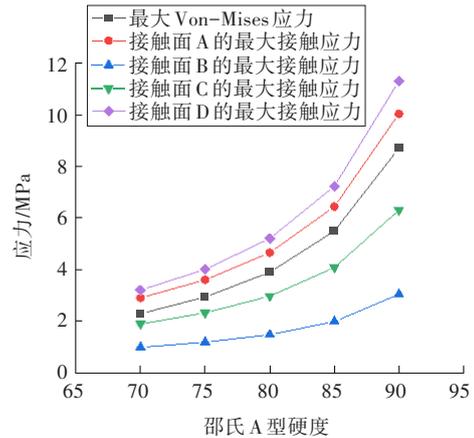


图 12 各应力随材料硬度的变化

Fig.12 The variation of stress with the hardness of the material

由图 12 可以看出,随着密封件材料硬度值的增大,密封件的最大 Von-Mises 应力、各接触面的最大接触应力均呈增大趋势,且增速逐渐在增大。接触面 A、接触面 B、接触面 D 三个面的最大接触应力变化趋势一致,且始终大于介质压力。在 70~80 硬度范围内,各应力的增速较为平缓,当硬度超过 80 后,各应力增速明显变大,较大的 Von-Mises 应力同时会引起密封件的咬伤或疲劳破坏,因此

为延长密封件的使用寿命,材料硬度的选取控制在 80 度以下较为合适。

3.4 基于响应面法的参数优化设计

根据密封件的密封性能分析结果可以得到,初始压缩量 c 、材料硬度值的变化对密封件主密封面即接触面 A 产生较大的影响。响应曲面法是一种通过设计一定数量的试验来获取所需的数据,再利用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系,通过对响应曲面及等值线的分析获取最佳参数组合方案,处理响应变量问题的一种优化方法^[25]。基于响应曲面法,将密封件的主密封面接触面 A 最大接触应力作为响应优化目标,对侧面密封件的介质压力、初始压缩量和材料硬度 3 个参数进行优化组合方案设计。

由图 13~15 所示的三维响应曲面图可以清晰地看出各因子对响应变量的影响程度。

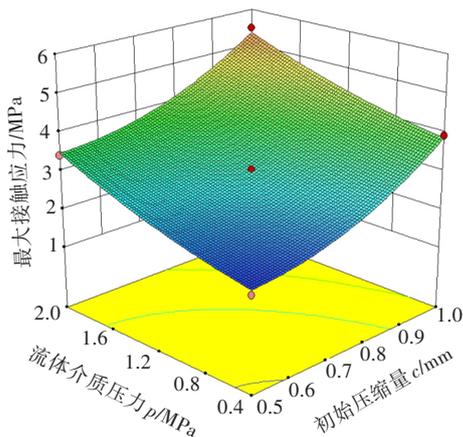


图 13 介质压力、初始压缩量对目标变量的曲面图
Fig.13 Surface diagram of medium pressure and initial compression to target variable

曲面图中等高线的形状弯曲且比较陡时,表明这些因子之间交互作用对响应变量接触应力的影响显著。三个因子中,初始压缩量和材料硬度对响应变量的最大接触应力的反应较强烈。

以最大接触应力作为优化目标,并且把最大接触应力目标值设为最大,初始压缩量 c 的范围设为 0.5~1.0 mm,橡胶材料邵尔 A 型硬度的范围设为 70~80,最终介质压力、初始压缩量、材料硬度这三个因子的优化组合方案如表 2 所示。

根据优化结果可知,侧面密封件保持 1.0 mm 的压缩量,邵尔 A 型硬度选取 80 可以适应 0.4~2.0 MPa 介质压力范围内的所有工况。

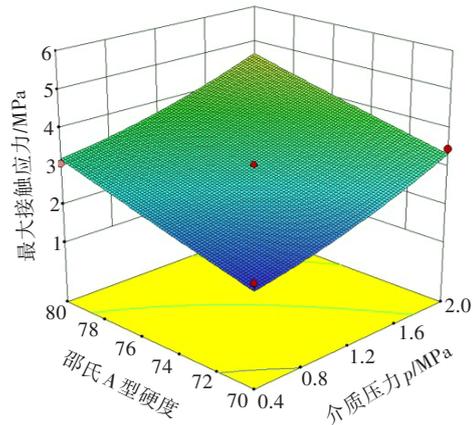


图 14 介质压力、材料硬度对目标变量的曲面图
Fig.14 Surface diagram of medium pressure and hardness to target variables

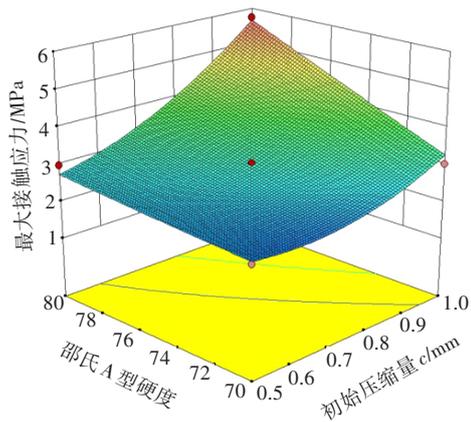


图 15 初始压缩量、硬度对目标变量的曲面图
Fig.15 Surface diagram of initial compression and hardness to target variables

表 2 介质压力、初始压缩量和材料硬度优化组合方案

Table 2 The optimal combination of medium pressure, initial compression and material hardness is proposed

介质压力 p /MPa	初始压缩量 c /mm	邵尔 A 型硬度
0.4	0.978	79
0.8	0.955	77
1.2	0.876	76
1.6	0.824	78
2.0	0.954	79

4 闸门密封试验研究

为了验证闸门密封性能,依托中国铁建重工集团有限公司自主研发的闸门密封试验台开展了闸门密封性能测试试验,试验装置示意图如图 16

所示。试验装置主要由闸门装置、控制柜、水泵、液压泵、支撑台架、液压缸及法兰盲盘等装置组成。基于响应面法的优化结果,选取密封件材料邵氏A型硬度为80,初始压缩量 c 为1.0 mm进行密封性能试验。盾构机在初始掘进阶段,闸门内介质压力较低,随着掘进深入,闸门内介质压力逐渐增大,在整个掘进过程中闸门内介质压力在0.6~1.2 MPa范围内波动。根据盾构换刀机器人闸门介质压力的变化情况,为确保所设计密封件的可靠性,设置闸门密封试验的压力范围为0.4~2.0 MPa。

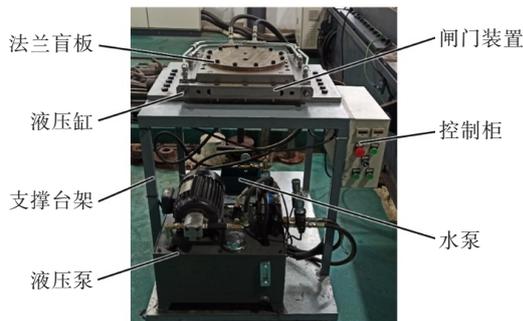


图16 闸门密封试验示意图

Fig.16 Gate seal test device

密封试验共分为4个部分:1)向闸门内腔加水,直至液面升至闸板的下平面,启动液压泵,关闭闸门,启动锁紧装置,对闸门进行机械锁紧;2)将水泵与法兰盲板连接,启动水泵,向法兰盲板加压到0.4 MPa,通过压力表观察20 min后,闸门内腔的压力变化,并记录下压力值;3)重复步骤2,介质压力分别在0.8、1.2、1.6和2.0 MPa的压力下稳压,每个压力工况各稳压20 min;4)试验完成后,卸掉法兰盲板的压力,将法兰盲板、液压泵、水泵与闸门的连接管拆除。

试验结果表明:介质压力在1.6 MPa以下时,稳压20 min,无泄漏,满足密封要求。介质压力在2.0 MPa时,稳压20 min后压力仅降低了0.1 MPa,压降不超过5%,密封性能满足设计要求。

表3 闸门密封性能测试试验结果
Table 3 Test results of gate sealing performance

试验分类	初始压力值/MPa	20 min后压力值/MPa	压降/MPa	泄漏率/%
1	0.4	0.4	0	0
2	0.8	0.8	0	0
3	1.2	1.2	0	0
4	1.6	1.6	0	0
5	2.0	1.9	0.1	5

5 结论

1) 在0~2.0 MPa的流体压力范围内,闸门侧面密封件接触面的最大接触应力始终大于介质压力,可以形成良好的密封效果。

2) 初始压缩量、材料硬度对闸门侧面密封件的最大接触应力和最大Von-Mises应力影响较大;介质压力整体上对最大Von-Mises应力影响较小。

3) 基于响应曲面法对闸门侧面密封件进行了参数优化,得到了侧面密封件在不同介质压力下的最优参数组合方案,结果表明:侧面密封件邵氏A型硬度80,初始压缩量1.0 mm,可以适应介质压力在2.0 MPa以下的所有压力条件,为实际工程应用中闸门侧面密封件的参数选型提供了参考。

4) 通过对闸门进行密封性能测试试验,验证了介质压力在低压(0.6 MPa)、高压(1.2 MPa)的工况下,闸门具有良好的密封性能。

6 致谢

感谢中国铁建重工集团股份有限公司和上海郝丰石油机械有限公司提供的试验设备和支持。

[参考文献]

- [1] FU J, XIA Y, ZHANG L, et al. Failure analysis on the fracture of disc cutter in EPB shield machine[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 104341. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104341.
- [2] 张照煌, 高青凤. 全断面岩石掘进机变厚度刀盘面板理论及应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1360-1369. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.06.019. ZHANG Zhaohuang, GAO Qingfeng. The theory and application of variable thickness cutterhead of TBM[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(6): 1360-1369. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2018.06.019.
- [3] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2020.12.001. CHEN Xiangsheng, XU Zhihao, BAO Xiaohua, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 1-14. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2020.12.001.

- [4] DAVID O, RUSSOTTO F X, MAX D S S, et al. Collision avoidance, virtual guides and advanced supervisory control teleoperation techniques for high-tech construction: framework design[J]. *Automation in Construction*, 2014, 44: 63–72. DOI: 10.1016/j. autcon. 2014.03.020.
- [5] XIA Y M, YANG M, JI Z Y, et al. Design and dimension optimization of cutter disassembly mechanism for shield tunneling machine[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2021, 35(7): 3005–3018. DOI: 10.1007/s12206-021-0624-y.
- [6] MENG Z C, YANG D J, HUO J Z, et al. Development and performance evaluation of an integrated disc cutter system for TBMs[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2): 644. DOI:10.3390/app11020644.
- [7] SAKABA N, LIGAKI K, KONDO M, et al. Leak-tightness characteristics concerning the containment structures of the HTTR[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, 233: 1–3. DOI:10.1016/j.nucengdes.2004.08.023.
- [8] MA X H. The parametric design and finite element analysis of wellhead gate valve based on Solid Works[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 614: 576–579. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.614.576.
- [9] WU H, LI J Y, GAO Z X. Flow characteristics and stress analysis of a parallel gate valve[J]. *Processes*, 2019, 7(11): 803. DOI:10.3390/pr7110803.
- [10] XU X P, LI S, GONG L, et al. Study on seals of subsea production gate valves[J]. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 2018, 58(1): 29–36. DOI:10.1504/IJCAT.2018.10015263.
- [11] 刘飞香,程永亮,彭正阳,等.一种掘进机常压换刀单闸门:CN201920433779.4[P].2020-02-14.
LIU Feixiang, CHENG Yongliang, PENG Zhengyang, et al. The invention relates to a single gate for changing tools under atmospheric pressure of TBM: CN201920433779.4[P].2020-02-14.
- [12] 刘飞香,程永亮,彭正阳,等.一种双刀型掘进机常压换刀闸门:CN210033445U[P].2020-02-07.
LIU Feixiang, CHENG Yongliang, PENG Zhengyang, et al. The invention relates to a double cutter type gate for changing tools under atmospheric pressure of TBM: CN210033445U[P].2020-02-07.
- [13] 李建辉.一种隧道掘进机用单刀式常压换刀闸门:CN207406347U[P].2018-05-25.
LI Jianhui. The invention relates to a single cutter type gate for changing tools under atmospheric pressure of TBM: China, CN207406347U[P].2018-05-25.
- [14] 吕祥奎,黄灏,黄晓明,等.耐压闸门密封圈泄漏率预测的理论及实验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7): 51–55. DOI: 10.13245/j. hust. 170710.
LYU Xiangkui, HUANG Hao, HUANG Xiaoming, et al. Theoretical and experimental study of the leakage prediction of the rubber sealing structure for pressure gate[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2017, 45(7): 51–55. DOI: 10.13245/j. hust. 170710.
- [15] 黄晓明,李骏,许国良,等.反应堆安全壳密封结构泄漏机理与预测模型的研究[J]. *核动力工程*, 2016, 37(3): 116–121. DOI: 10.13832/j. jnpe. 2016.03.0116.
HUANG Xiaoming, LI Jun, XU Guoliang, et al. Study on leak mechanism and leakage rate prediction model of reactor containment sealing structure[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2016, 37(3): 116–121. DOI: 10.13832/j. jnpe. 2016.03.0116.
- [16] 渠涛,柳荣,董弋锋,等.飞机舱门橡胶密封件动摩擦性能实验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 247–256. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2019.08.0445.
QU Tao, LIU Rong, DONG Yifeng, et al. Experimental study on dynamic friction performances of rubber seals for aircraft doors[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 247–256. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2019.08.0445.
- [17] GOULARTE B F, ZATKO V, LION A, et al. Elastomeric door seal analysis under aircraft cabin pressure[J]. *Journal of Rubber Research*, 2021, 24(2): 301–318. DOI: 10.1007/s42464-020-00071-7.
- [18] 陈祺鑫,黄伟,任志英,等.大环径比O形金属橡胶密封件的疲劳力学特性及试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(3): 293–303. DOI: 10.16078/j. tribology. 2020138.
CHEN Qixin, HUANG Wei, REN Zhiying, et al. Fatigue mechanical characteristics and experimental study of O-shaped metal rubber seals with large ring diameter ratio[J]. *Tribology*, 2021, 41(3): 293–303.
- [19] LIANG B, YANG X, WANG Z, et al. Influence of randomness in rubber materials parameters on the reliability of rubber o-ring seal[J]. *Material (Basel)* 2019, 12(9): 1566. DOI: 10.3390/ma12091566
- [20] YANG M, XIA Y M, JIA L H, et al. A modular design method based on TRIZ and AD and its application to cutter changing robot[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(7): 168781402110343. DOI: 10.1177/16878140211034369.
- [21] 王国权,刘萌,姚艳春,等.不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究[J]. *力学与实践*, 2013, 35(4): 40–47. DOI: 10.6052/1000-0879-13-030.
WANG Guoquan, LIU Meng, YAO Yanchun, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber parts[J]. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(4): 40–47. DOI: 10.6052/1000-0879-13-030.
- [22] 祝效华,敬洋.基于三维接触的滑环式旋转组合密封性能主控因素分析[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(13): 1548–1553. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-132X. 2017.13.006.
ZHU Xiaohua, JING Yang. Analysis of main influence

- factors for slip ring combined rotating seals based on 3D contact[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(13): 1548–1553. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2017.13.006.
- [23] 夏毅敏,张欢,罗春雷,等.DAS组合密封圈密封特性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2017,48(1):91–98.DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.01.013.
XIA Yimin, ZHANG Huan, LUO Chunlei, et al. Sealing performance research of DAS composition seal ring[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1): 91–98. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.01.013.
- [24] 蔡智媛,王冰清,彭旭东,等.基于安装过程的O形圈安装结构优化分析[J]. *中国机械工程*,2019,30(22):2691–2697.DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2019.22.007.
CAI Zhiyuan, WANG Bingqing, PENG Xudong, et al. Optimization analysis of O-ring installation structures with installation processes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(22): 2691–2697. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2019.22.007.
- [25] ZHANG Y, ZHANG X D, YANG L, et al. Optimization design for downhole dynamic seal based on response surface method[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(2): 1–10. DOI: 10.1177/168781401982844.

Research on sealing characteristic of storage tank gate of cutter changing robot for shield machine

YANG Mei¹, WANG Yu², REN Yong³, ZHANG Shuaikun³, LIN Laikuang², XIA Yimin²

(1. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 3. China Railway Construction Heavy Industry Co. Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: [Purpose] In order to ensure the safe storage of the cutter changing robot in the storage cabin under high-pressure environment, the sealing characteristics of the gate in the storage cabin were studied. [Methods] By revealing the structural characteristics and sealing mechanism of a certain type of storage cabin gate, a simulation analysis model of gate seals under the action of medium pressure was established. The stress distribution under the action of medium pressure and the maximum contact stress value of each contact surface were analyzed, and the influence of initial compression, fluid medium pressure, and material hardness on the sealing performance of gate seals were explored. [Findings] The results showed that the initial compression and material hardness had a great influence on the sealing performance of the seal in the medium pressure range of 0–2.0 MPa. Taking the maximum contact stress and the minimum Von-Mises stress of the seal as the optimization objective, the response surface method was used to optimize the parameters of the seal. It was obtained that the seal with Shore hardness of 80HA and initial compression of 1.0 mm could meet the sealing requirements under the fluid pressure of 0–2.0 MPa. [Conclusions] Through the sealing performance test, it is verified that the gate has good sealing performance under low pressure (0.6 MPa) and high pressure (1.2 MPa). The research results can provide guidance for the selection of seals for the storage cabin gate of slurry shield machine cutter changing robot.

Key words: shield machine; cutter changing robot; storage tank gate; sealing characteristic; response surface method; optimal design

Manuscript received: 2022-10-08; **revised:** 2022-11-14; **accepted:** 2022-11-17

Foundation item: Project(2018YEB1306700)supported by the National Key Research and Development Program

Corresponding author: YANG Mei(1992—)(ORCID: 0000-0003-2521-4817), female, post doctor, research interest: design and performance analysis of TBM cutter head. E-mail: 183701027@csu.edu.cn

(责任编辑:赵冰;校对:刘平;英文编辑:彭卓寅)