

盾构管片弹性橡胶密封垫防水性能灵敏度分析

雷震宇, 刘 明

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 200092)

摘要: 为研究由生产加工造成的橡胶密封垫材料和几何参数的随机性对盾构管片接头防水性能的影响, 选择密封垫橡胶的材料硬度、孔洞圆心坐标、孔径等参数作为随机输入变量, 以密封垫表面平均接触应力为分析目标, 运用 ANSYS-PDS 随机分析模块计算各随机参数对表面平均接触应力的灵敏度数值, 并在此基础上探究各随机参数的公差对密封垫防水性能的影响程度。对某城市地铁盾构隧道弹性密封垫的分析结果表明: 橡胶材料力学参数是影响抗水能力的主要因素, 尤其是 C_{10} 。几何参数中, 截面上部孔径的变化对下表面接触应力影响较大, 而圆孔位置对临近表面的接触应力影响敏感, 中部圆孔对上、下表面接触应力的影响程度相当。

关键词: 弹性橡胶密封垫; 随机参数; 灵敏度分析; 蒙特卡罗理论; 随机有限元; 防水

中图分类号: TU57+8

文献标志码: A

Sensitivity Analysis of Water-proof Performance of Elastic Rubber Gasket in Shield Tunnel

LEI Zhenyu, LIU Ming

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the influence of random material and geometrical parameters of rubber gasket caused by machining error on waterproof performance of shield tunnels lining joint, material hardness, coordinates of the bore center and diameter are selected as the random input variables, targeting the surface average contact pressures of gasket, to calculate the sensitivity values to contact pressures of all these random parameters by using the ANSYS PDS module. The results from an analysis of elastic gaskets used in a certain city metro shield tunnel show that rubber mechanic parameters are principal factors, especially C_{10} . Among geometric parameters, there is more influence on down surface contact stress because of the variation of upper bores diameter in the

section. However, positions of bore are sensitive to near surface contact stresses, and the variation of middle bores have almost the same influences on both surfaces.

Key words: elastic rubber gasket; random parameters; sensitivity analysis; Monte-Carlo Theory; stochastic finite element method(FEM); waterproof

防水是地下工程的关键, 而盾构隧道的防水尤其重要, 管片接缝是盾构隧道的主要渗漏部位。管片接缝防水主要采用弹性橡胶密封垫。因此, 橡胶密封垫的防水性能对盾构隧道防水至关重要。根据密封垫的静态密封原理, 密封垫在工作状态下具有把压力传递到接触面的特征^[1-2]。在初始拼装阶段, 随着连接螺栓的旋紧, 橡胶密封垫之间将产生接触应力 P_0 ; 在管片推出盾尾之后, 其与外界土层直接接触, 外界水压直接作用在密封垫上, 由于其自封作用, 将在接触面上产生附加应力 P_1 。因此, 在正常使用状态下总接触面的应力为 $P = P_0 + P_1$ 。国内外学者普遍认为接缝处的防水能力与密封垫接触面之间的接触压力大小存在直接关系。显然表面接触应力越大, 密封垫的防水能力越强, 但这样的断面往往对应的闭合压力, 即密封垫被完全压入沟槽所需压力越大, 从而增加施工尤其是隧道管片封顶块施工的难度, 轻则影响施工进度, 严重的会致使封顶块上的密封垫挤出或拉裂, 甚至可能致使混凝土管片出现裂纹, 造成防水失败^[3]。因此表面接触应力和闭合压力被称作弹性密封垫设计的双控指标, 要求密封垫设计在满足水密性条件下应使得闭合压力尽可能较小。

对隧道接头弹性密封垫的优化设计, 以往的研究均采用确定性分析方法, 通过多次调整细部尺寸进行大量试算, 分析密封垫表面接触压力的分布和

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 流体及动力机械教育部重点实验室开放基金(SZJJ2015-034)

第一作者: 雷震宇(1970—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为地下结构工程。E-mail: leizhenyu@126.com

通讯作者: 刘 明(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为隧道及地下结构工程。E-mail: 956853033@qq.com

大小,并综合考虑闭合压力^[4-5],从中选取性能最优的断面作为候选断面进行水密性试验^[6].

此类方法难以考虑某参数连续改变时对密封垫防水性能的影响;而且,当多个参数同时改变时,不能区别各个参数对密封垫防水性能优化效果的贡献量,分析存在一定盲目性.此外,确定性的优化分析过程中未考虑几何尺寸、加工误差、材料参数等的不确定性对密封垫防水性能的影响.由于橡胶具有很大弹性,密封垫在挤出过程中很容易产生形变.笔者曾对不同厂家提供的盾构隧道所用弹性密封垫进行过截面测量,结果发现厂家的产品与设计图纸均有较大出入,根据优化设计的经验可知,这对密封垫的防水性能影响显著.

同时,合成橡胶材料的硬度等力学参数受原材料产地、各组分配比以及温度等因素的影响很大,一般工程要求硬度在 $\pm 5^\circ$ 的范围内^[7],这是基于对其力学特性随机性的考虑.鉴于此,本文通过选择材料硬度、孔洞圆心坐标、孔径等参数作为随机变量,探究了各参数对橡胶密封垫防水性能影响的灵敏度,得出各参数与密封垫防水性能的相关性,为盾构隧道接头弹性橡胶密封垫的优化设计提供参考.

1 基于 Monte-Carlo 模拟的随机有限元法及 ANSYS-PDS 模块

实际工程中,对于同批生产的产品来说,几何尺寸、加工误差、材料、承受的实际工作荷载等都存在随机性,随机有限元法^[8]是一种处理结构随机问题或者系统输入随机问题的数值分析方法.最初的随机有限元法是将以统计抽样理论为基础的 Monte-Carlo 模拟方法与有限元法相结合,对大量的随机样本使用传统确定性有限元程序进行计算,然后再对计算结果进行统计分析^[9].后来,这个方法仍被广泛用于验证其他的随机有限元方法的有效性,如摄动随机有限元法(PSFEM)^[10]等.

基于 Monte-Carlo 法的 ANSYS 的概率设计 PDS 模块^[11]可用于研究不确定因素对密封垫防水性能的影响.分析时需对各随机变量采用参数化建模,运用参数化设计语言 APDL 命令流建立概率设计分析文件,使得随机参数可以在限定范围内按照各自的概率分布随机取值,通过有限元计算得到橡胶密封垫接触应力的响应值.采用 ANSYS-PDS 模块中蒙特卡罗法的拉丁超立方抽样法(简称 LHS 抽样法)进行抽样处理. LHS 抽样法具有抽样“记忆”

功能^[12],同时它强制抽样点必须离散分布于整个抽样空间,可以避免仿真循环重复问题.基于 ANSYS-PDS 的概率设计分析流程如图 1 所示.

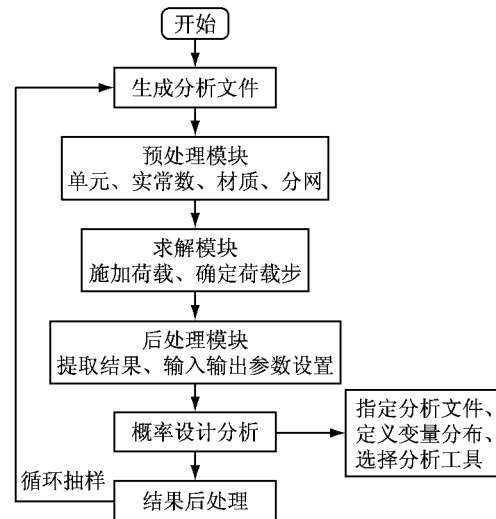


图 1 ANSYS-PDS 分析流程

Fig.1 ANSYS-PDS analysis process

2 隧道接头弹性密封垫的灵敏度分析

2.1 建立参数化模型

密封垫和管片沟槽尺寸如图 2 所示.选定的随机参数有:

(1) 橡胶的材料参数 C_{10} 和 C_{01} . 橡胶本构模型采用 Mooney-Rivlin 二参数模型,该模型能很好地描述橡胶变形在 150% 内的特性^[13].

(2) 断面内所有圆孔的圆心坐标 (x_i, y_i) , $i=1\sim 4$,分析开孔位置对密封垫防水性能的影响.密封垫断面具有对称性,内开 8 孔,编号为 1~4.

(3) 各圆孔半径 R_i , $i=1\sim 4$.

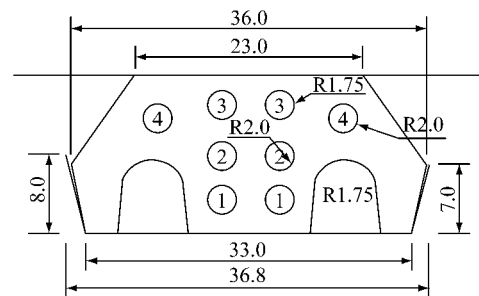


图 2 密封垫及沟槽尺寸(单位:mm)

Fig.2 The size of the gasket and groove(unit: mm)

2.2 各随机参数的统计特征

盾构隧道管片接头密封垫为三元乙丙合成橡胶,工程中一般对橡胶材料的硬度有明确规定,常采

用邵尔 A 型硬度 $H_A=60^\circ$, 公差要求 $\pm 5^\circ$. 橡胶硬度 H_A 与橡胶的力学特性常数 C_{10} 和 C_{01} 以及弹性模量 E 之间有关系如下^[14]:

$$\lg E = 0.019 8H_A - 0.543 2 \quad (1)$$

$$E = 6C_{10} \left(1 + \frac{C_{01}}{C_{10}} \right) \quad (2)$$

根据经验, 选定 $C_{01}/C_{10} = 0.05$, 均值 $C_{10} = 0.700 \text{ MPa}$, $C_{01} = 0.035 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E = 4.41 \text{ MPa}$, 由式(1)和式(2)得 C_{01} 和 C_{10} 的最大与最小极

$$\text{限值为 } C_{10} = \begin{cases} 0.88 \text{ MPa} \\ 0.557 8 \text{ MPa} \end{cases}, C_{01} = \begin{cases} 0.044 \text{ MPa} \\ 0.027 9 \text{ MPa} \end{cases}$$

各孔洞圆心坐标均值为 $x_1 = x_3 = 2.75 \text{ mm}$, $x_2 = 3.5 \text{ mm}$, $x_4 = 9.5 \text{ mm}$, $y_1 = 3.5 \text{ mm}$, $y_2 = 8.3 \text{ mm}$, $y_3 = 13 \text{ mm}$, $y_4 = 11.5 \text{ mm}$. 各孔径均值为 $R_1 = R_3 = 1.75 \text{ mm}$, $R_2 = R_4 = 2 \text{ mm}$.

以 C_{01} 和 C_{10} , 各孔洞的圆心坐标 x_i 和 y_i 、各孔洞的半径 R_i 为随机输入变量, 不考虑各变量之间的相关性, 其随机分布及其特征值见表 1, 各变量统计特征主要根据相关文献^[15]确定.

表 1 随机输入变量的统计特征
Tab.1 Statistical characteristics of random input variables

变量名称	分布类型	均值	标准差	最小极 限值	最大极 限值
C_{01}/MPa	截断正态分布	0.035	$0.05C_{01}$	0.0279	0.044
C_{10}/MPa	截断正态分布	0.700	$0.05C_{10}$	0.5578	0.88
$x_i (i=1, 2, 3, 4)/\text{mm}$	截断正态分布	(2.75, 3.50, 2.75, 9.50)	0.15	$x_i - 0.15$	$x_i + 0.15$
$y_i (i=1, 2, 3, 4)/\text{mm}$	截断正态分布	(3.5, 8.3, 13.0, 11.5)	0.1	$y_i - 0.15$	$y_i + 0.15$
$R_i (i=1, 2, 3, 4)/\text{mm}$	截断正态分布	(1.75, 2.0, 1.75, 2.0)	0.03	$R_i - 0.05$	$R_i + 0.01$

2.3 有限元模型简介

模拟密封垫压缩采用单侧压缩 2-D 平面应变模型, 如图 3 所示. 压缩过程中, 混凝土管片沟槽及上压板可视为刚体, 而橡胶密封垫为柔性体, 沟槽、上

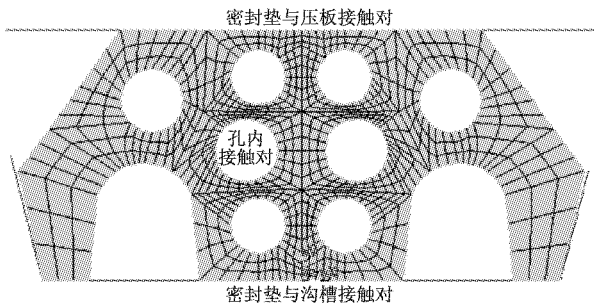


图 3 橡胶密封垫单侧压缩有限元模型

Fig.3 Unilateral compress finite element model of the rubber gasket

压板与橡胶的接触采用刚-柔接触, 橡胶与橡胶之间的接触采用柔-柔接触.

对于超弹性体的橡胶材料, 采用 PLANE182 单元. 接触对单元采用 TARGE169 和 CONTA172 单元, 橡胶的摩擦系数均取 0.25.

根据工程上允许最大张开量计算得出单侧压缩量为 5 mm, 对沟槽的所有节点施加全部约束, 上压板的所有节点沿 Y 方向向下施加 5 mm 位移.

2.4 灵敏度计算与分析

灵敏度分析^[16-17]是评价因设计变量或参数的改变而引起结构响应特性变化率的方法, 可以分析随机诸因素对结构响应量影响程度的大小^[18-19], 在密封垫断面优化设计中确定敏感参数, 减小优化的盲目性.

2.4.1 基于 Spearman 秩相关系数的灵敏度分析^[20]

设密封垫的随机结构参数序列为 $x = \{C_{10}, C_{01}, x_i, y_i, R_i\} (i=1 \sim 4)$, 共 14 个随机变量, 均服从截断正态分布.

假设进行 n 次随机模拟运算后, 得到 n 个结构响应值, y_1, y_2, \dots, y_n . 对于弹性密封垫, 其密封是依靠弹性压密产生的表面接触应力来止水, 因而取密封垫上表面的平均接触应力 $\bar{\sigma}_u$ 和下表面的平均接触应力 $\bar{\sigma}_d$ 作为考察的结构响应值, 记为 $\bar{\sigma}_{i1}, \bar{\sigma}_{i2}, \dots$

$\bar{\sigma}_{in}; \bar{\sigma}_u$ 和 $\bar{\sigma}_d$ 分别代表上下表面. $\bar{\sigma}_u = \left(\sum_{k=1}^m \sigma_{uk} \cdot \Delta s \right) / L$, 其中, σ_{uk} 为上部接触表面第 k 个节点的接触应力值垂向分量; m 为接触节点的总数; Δs_k 指第 k 个单元的宽度; L 指密封垫上表面的宽度, 同理可求得 $\bar{\sigma}_d$.

由随机结构参数序列 x 中的某个参数 $x_j (j=1 \sim 14)$, 经 n 次随机模拟运算得到的样本值 $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}$ 和其对应的结构响应样本值 $\bar{\sigma}_{i1}, \bar{\sigma}_{i2}, \dots, \bar{\sigma}_{in}$, 可构成如下 14 个数据对: $\left[\begin{matrix} x_{j1} \\ \bar{\sigma}_{i1} \end{matrix} \right], \left[\begin{matrix} x_{j2} \\ \bar{\sigma}_{i2} \end{matrix} \right], \dots,$

$$\left[\begin{matrix} x_{jn} \\ \bar{\sigma}_{in} \end{matrix} \right] \quad j=1 \sim 14.$$

对于每一个数据对, 可由式(3)计算 Spearman 秩相关系数 r_s , 即

$$r_{sj} = 1 - \frac{6 \sum_{k=1}^n (P_{kj} - Q_{kj})^2}{n^3 - n} \quad j = 1 \sim 14 \quad (3)$$

$$-1 \leq r_s \leq 1 \quad (4)$$

式中: P_{kj} 为由随机结构参数序列 x 中的某个参数 $x_j (j=1 \sim 14)$ 的秩; Q_{kj} 为与之对应的结构响应量

σ_i 在响应值样本空间内的秩; n 为总样本数。

Spearman 秩相关系数是非参数统计中用来检验变量之间相关程度的重要方法。如果计算所得其系数接近 1 或 -1, 就认为输入变量对输出变量影响显著, 如果计算所得系数趋近于零, 就认为影响微弱。同时, 如果其系数为正值, 表明增加输入变量的值, 输出变量的值也增加; 如果其系数为负值, 表明增加输入变量的值, 输出变量的值反而减小。

2.4.2 灵敏度计算结果

利用 ANSYS-PDS 模块对它们进行灵敏度分析, 选择蒙特卡洛法和拉丁超立方方法作为概率分析方法, 抽样次数取为 500 次, 执行概率设计分析。得到 σ_u 和 σ_d 的均值趋势如图 4 所示, 随着抽样次数的增加, 置信区间的宽度随之减小, 抽样均值趋近水平, 表明 500 次抽样次数足够。

各随机输入变量基于 Spearman 秩相关系数的灵敏度具体数值列于表 2。对于下表面平均接触应力 σ_d 影响最显著的是 C_{10} , 接着依次是 R_3 , x_1 , R_4 和

表 2 平均接触应力灵敏度值

Tab.2 The sensitivity of the average contact stress values

	C_{01}	C_{10}	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	R_1	R_2	R_3	R_4
σ_d	0.049	0.971	0.126	-0.102	0.094	0.011	0.010	-0.019	0.010	0.032	-0.072	-0.040	-0.138	-0.102
σ_u	0.036	0.918	0.080	-0.107	0.074	-0.277	-0.027	0.031	-0.002	0.035	-0.069	0.031	-0.062	-0.065

2.4.3 公差对灵敏度的影响分析

随机输入变量的最大与最小极限值由均值和公差计算得来, 依次改变各随机输入变量的公差, 分析其对灵敏度的影响。

(1) 橡胶硬度公差

橡胶硬度公差依次取为 $\pm 5^\circ$, $\pm 4^\circ$, $\pm 3^\circ$, $\pm 2^\circ$ 和 $\pm 1^\circ$, 由式(1)与式(2)得 C_{01} 与 C_{10} 的最大与最小极限值, 其他输入变量的统计特征同表 1, 选择与上文相同的分析方法与分析次数得到上下表面平均接触应力灵敏度值如图 5 所示(只列出灵敏度较大的前 5 个变量)。由图 5 可知, 当橡胶硬度公差为 $\pm 5^\circ \sim \pm 3^\circ$ 时, 改变橡胶硬度公差对接触应力灵敏度的影响很小; 当采取更严格的生产标准将橡胶硬度公差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内时, 橡胶硬度变化对接触应力的影响程度明显减小, 其他变量如孔洞圆心位置偏移、孔径变化等对接触应力的影响程度显著增加。

(2) 坐标位置偏差

横坐标位置偏差依次取为 ± 0.2 , ± 0.17 , ± 0.15 和 ± 0.13 mm, 与均值相加得各孔洞圆心横坐标的最大与最小极限值, 其他输入变量的统计特征同表 1, 选择与上文相同的分析方法与分析次数得到上下表面平均接触应力灵敏度值如图 6 所示。由图 6

x_2 , 结果显示橡胶的材料参数 C_{10} 的影响显著程度远高于其他四个变量; 对于上表面平均接触应力 σ_u , 最主要影响参数仍是 C_{10} , 接着依次是 x_4 和 x_2 , 但与 C_{10} 比较属小量。另外, 在随机输入变量空间内, 增加橡胶硬度即增大 C_{10} , 上下表面平均接触应力均增大; 增大 x_1 , 下表面平均接触应力增大; 增大 x_2 , 上、下表面平均接触应力均减小; 增大 x_4 , 上表面平均接触应力减小; 增大 3 号孔孔径 R_3 , 下表面平均接触应力减小; 增大 4 号孔孔径 R_4 , 下表面平均接触应力减小。

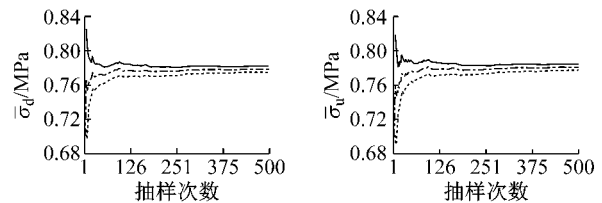


图 4 σ_d 与 σ_u 均值趋势图

Fig.4 Trend chart of average of σ_d and σ_u

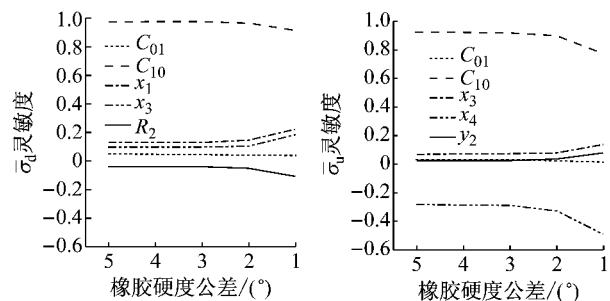


图 5 橡胶硬度公差对灵敏度的影响

Fig.5 The influence of rubber hardness tolerance on sensitivity

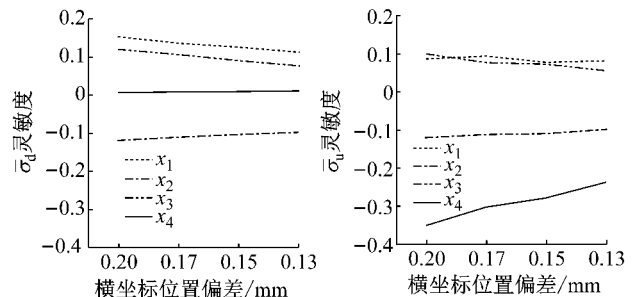


图 6 横坐标位置偏差对灵敏度的影响

Fig.6 The influence of horizontal position deviation of sensitivity

可知, 横坐标位置偏差控制得越严格, 各孔洞圆心横

坐标变化对下表面平均接触应力的影响程度有所减小,但变化值较小,因为该条件下橡胶硬度公差为 $\pm 5^\circ$,橡胶硬度对接触应力影响显著程度远高于其他变量;横坐标位置偏差控制得越严格,4号孔洞圆心横坐标变化对上表面平均接触应力的影响减小,灵敏度变化值为0.113,其他横坐标变化对上表面平均接触应力的影响程度变化微小。

由表2可知,各孔洞圆心纵坐标对接触应力的影响非常小,因此不讨论纵坐标位置偏差变化对接触应力灵敏度的影响。

(3) 孔径偏差

孔径最大极限值保持为 $R_i + 0.01$,孔径最小极限值依次取为 $R_i - 0.1$, $R_i - 0.07$ 和 $R_i - 0.05$ 以及 $R_i - 0.03$,其他输入变量的统计特征同表1,选择与上文相同的分析方法与分析次数得到上下表面平均接触应力灵敏度值如图7所示。由图7可知,孔径偏差控制得越严格,孔径对下表面平均接触应力的影响程度越小,灵敏度最大变化值为0.048;孔径偏差控制得越严格,孔径 R_1, R_4 对上表面平均接触应力的影响程度有所减小,孔径 R_2, R_3 对上表面平均接触应力的影响程度有所增大,但变化幅度都很小,因为橡胶硬度对接触应力影响显著程度远高于孔径。

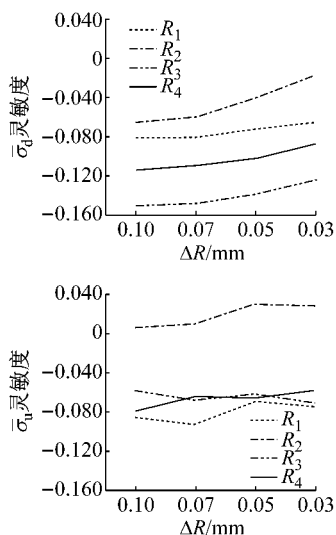


图7 孔径偏差对灵敏度的影响

Fig.7 The influence of pore size deviation of sensitivity

3 结论

(1) 着眼于盾构管片弹性橡胶密封垫的材料和几何尺寸随机小扰动变化时密封垫防水性能指标变化的灵敏度分析。在具体实例中,将密封垫的材料硬度、孔洞圆心位置坐标、孔径等参数作为随机变量

进行输入,利用 ANSYS-PDS 模块求解,得到各参数与密封垫平均接触应力的相关性,可以为今后盾构隧道接头弹性密封垫的优化设计提供参考。

(2) 通过依次控制各参数的公差,得到各参数对密封垫平均接触应力的影响程度,结果表明:橡胶材料力学参数是影响抗水能力的主要因素,尤其是 C_{10} 。当橡胶硬度公差为 $\pm 5^\circ \sim \pm 3^\circ$ 时,橡胶硬度对接触应力的影响最显著;当采取更严格的生产标准将橡胶硬度公差控制在 $\pm 2^\circ$ 以内时,橡胶硬度变化对接触应力的影响程度明显减小,其他参数对接触应力的影响程度显著增加。

(3) 几何参数中,断面底部圆孔的位置改变对橡胶表面接触应力影响最大;断面中部的两个圆孔的大小对表面接触应力影响较其他孔更大。

参考文献:

- [1] 薛绍祖. 地下建筑工程防水技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
XUE Shaozu. Waterproofing technology of underground engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [2] 吴挺. 盾构越江隧道密封垫长期防水能力研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2014.
WU Ting. Study on the long term waterproof property on the sealing gasket of shield tunnel [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2014.
- [3] 雷震宇. 盾构隧道管片橡胶密封垫的优化设计方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 770.
LEI Zhenyu. An optimal design for the rubber sealing gasket in shield tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 770.
- [4] 罗驰, 雷震宇. 孔洞排布型式对盾构隧道橡胶密封垫的受力差异及稳定性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(5): 44.
LUO Chi, LEI Zhenyu. Stress difference and stability of shield tunnel rubber sealing gasket induced by different hole arrangements [J]. Urban Mass Transit, 2015(5): 44.
- [5] 向科, 石修巍. 盾构管片弹性密封垫断面设计与优化[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 361.
XIANG Ke, SHI Xiwei. Design and optimization of elastic gasket section of shield tunnel lining [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 361.
- [6] 陆明, 雷震宇, 张勇, 等. 上海长江隧道衬砌接缝和连接通道的防水试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2008(4): 12.
LU Ming, LEI Zhenyu, ZHANG Yong, et al. Waterproofing test of lining joint and cross passage of Shanghai Changjiang River [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2008(4): 12.
- [7] 上海申通地铁公司. STB-DQ-010201 上海地铁盾构管片弹性橡胶密封垫(三元乙丙)生产工艺及产品标准[S]. 上海: 上海申通地铁公司, 2007.
Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd. STB-DQ-010201

- Production technology and product standard of elastic rubber gasket (EPDM) in Shanghai metro shield tunnel lining[S]. Shanghai: Shanghai Shentong Metro Group Co.Ltd., 2007.
- [8] 安伟光,朱卫兵,严心池. 随机有限元法在不确定性分析中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报,2002,23(1): 132.
AN Weiguang, ZHU Weibing, YAN Xinchu. Application of stochastic finite element method to analysis of uncertainties [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002, 23(1): 132.
- [9] 高娟,罗奇峰,车伟. 蒙特卡罗法理论及其在ANSYS中的实现[J]. 青岛理工大学学报,2008,29(4):18.
GAO Juan, LUO Qifeng, CHE Wei. Theory of Monte-Carlo method and implementation in ANSYS[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2008, 29(4): 18.
- [10] LEI Zhenyu, CHEN Qiu. Stochastic finite element analysis of plate and shell construction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University; English Edition, 2000, 8(1):45.
- [11] Stefan Reh, Jean-Daniel Beley, Siddhartha Mukherjee, *et al.* Probabilistic finite element analysis using ANSYS [J]. Structural Safety, 2006, 28(1/2):17.
- [12] 金路,张壮南,王春刚,等. 基于蒙特卡罗的考虑随机初始缺陷的分析方法[J]. 工程力学,2012, 29(增刊 II):93.
JIN Lu, ZHANG Zhuangnan, WANG Chungang, *et al.* Monte Carlo-based analysis method considering random initial imperfections[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(Suppl II): 93.
- [13] 特雷劳尔. 橡胶弹性物理学[M]. 王梦蛟,王培国,薛广智,译. 北京:化学工业出版社,1982.
Treloar. The physics of rubber elasticity [M]. Translated by WANG Mengjiao, WANG Peiguo, XUE Guangzhi. Beijing: Chemical Industry Press, 1982.
- [14] 郑明军,谢基龙. 压缩状态下橡胶件大变形有限元分析[J]. 北方交通大学学报,2001, 25(1): 76.
ZHENG Mingjun, XIE Jilong. Finite element analysis of large deformation of compressed rubber component [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2001, 25(1):76.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GBT 3672.1—2002 橡胶制品的公差第1部分:尺寸公差[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GBT 3672.1—2002 Tolerance of rubber products-part 1: size tolerance[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [16] George Deodatis. Stochastic FEM sensitivity analysis of nonlinear dynamic problems [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1989, 4(3): 135.
- [17] 屠义强,江克斌,胡业平,等. 基于随机有限元方法的结构响应灵敏度分析[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2001, 2(2): 78.
TU Yiqiang, JIANG Kebin, HU Yeping, *et al.* Analyzing sensitivity of structure response based on SFEM[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(2): 78.
- [18] 赵金刚,赵人达,占玉林,等. 基于支持向量随机和蒙特卡罗法的结构随机灵敏度分析方法[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 195.
ZHAO Jingang, ZHAO Renda, ZHAN Yulin, *et al.* Stochastic sensitivity analysis method based on support vector machine and Monte-Carlo[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 195.
- [19] Payel Das, Clive Shrubsole, Benjamin Jones, *et al.* Using probabilistic sampling-based sensitivity analyses for indoor air quality modelling [J]. Building and Environment, 2014, 78: 171.
- [20] 杨大彬,张毅刚,吴金志. 基于ANSYS的灵敏度分析及其在单层网壳中的应用[J]. 世界地震工程,2009, 25(4): 87.
YANG Dabin, ZHANG Yigang, WU Jinzhi. Sensitivity analysis based on ANSYS and its application to single-layer reticulated shell[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4):87.