

锈蚀铸铁管片接头力学性能数值模拟研究

李超祥¹, 程 森², 梁海泰³, 李 金⁴, 李 洲⁴, 李福海⁴

[1. 中铁二十五局集团第一工程有限公司, 广东 广州 510000; 2. 中国铁建(香港)有限公司, 香港 999077;

3. 香港铁路有限公司, 香港 999077; 4. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031]

摘 要: 为探究锈蚀对地铁隧道铸铁管片接头压弯力学性能的影响, 以香港地铁铸铁管片为研究对象, 运用 ABAQUS 软件建立有限元模型, 设置接头锈蚀厚度(0、2、4 mm)、正负弯矩作用以及螺栓失效等工况进行数值模拟计算。结果表明: 锈蚀会显著削弱接头螺栓的力学性能及接头的抗弯极限承载力, 同时增大接头的几何变形能力, 且削弱效应会随着锈蚀厚度的增加而加剧; 负弯矩作用下, 锈蚀的削弱作用强于正弯矩; 螺栓失效后, 管片抗弯性能进一步降低, 产生与螺栓正常工作时相同应力或应变所需弯矩的降幅达 29%~33%, 接头失稳风险显著升高。研究结果可为锈蚀铸铁管片接头的安全评估与维修加固提供理论依据。

关键词: 锈蚀; 铸铁管片接头; 力学性能; ABAQUS; 数值模拟

中图分类号: U451.4; U457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0041-07

Numerical Simulation Study on Mechanical Properties of Rusty Cast Iron Pipe Segment Joints

LI Chaoxiang¹, CHENG Miao², LEUNG Hoitai³, LI Jin⁴, LI Zhou⁴, LI Fuhai⁴

[1. China Railway 25th Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. China Railway Construction (Hong Kong) Co., Ltd., Hong Kong 999077, China; 3. MTR Corporation Limited, Hong Kong 999077, China; 4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China]

Abstract: To explore the effect of corrosion on the flexural mechanical properties of cast iron segment joints in subway tunnels, a finite element model is established using ABAQUS software based on the cast iron segments of the subway in Hong Kong. The numerical simulation calculations are conducted under conditions such as the rust thickness of the joint (0, 2 and 4 mm), positive and negative bending moments, and bolt failure. The results indicate that corrosion significantly reduces the mechanical properties of the joint bolts and the ultimate bending load-bearing capacity of joints, while the geometric deformation capacity of joint is increased, and this weakening effect intensifies as the corrosion thickness increases. Under negative bending moments, the weakening effect of corrosion is stronger than under positive bending moments. After bolt failure, the bending resistance of the pipe segments further decreases, with the bending moment required to produce the same stress or strain decreasing by 29% to 33%, and the risk of joint instability significantly increases. The research result can provide a theoretical basis for the safety assessment and repair/reinforcement of corroded cast iron pipe segment joints.

Keywords: corrosion; cast iron segment joint; mechanical property; ABAQUS; numerical modeling

0 引 言

当管片出现锈蚀时, 接头部位的力学性能变化将更为敏感和复杂^[1]。在实际工程中, 管片接头可能会承受来自不同方向的荷载, 如弯矩、轴力、剪力等, 而锈蚀会导致接头的刚度下降、变形增大, 甚至

可能引发结构损伤, 从而降低其承载能力^[2]。因此, 研究锈蚀铸铁管片接头的力学性能具有极其迫切且重要的意义。

截至 2024 年 12 月 31 日, 我国轨道交通运营总里程已达 11 949.7 km (不包括香港、澳门特别行政区及台湾省数据), 其中以地铁形式为主。如今在全国范围内已有 61 个城市开通了城市轨道交通线路, 2024 年全国新开通 25 条(段)轨道交通运营线路, 总里程 979 km, 保持着持续增长的态势^[3]。截至 2024 年 5 月 31 日, 香港特别行政区已开通的铁路运输网络全长约 271 km, 由 9 条地铁路线、机场快线、广深港高

收稿日期: 2026-04-13

作者简介: 李超祥(1989—), 男, 学士, 高级工程师, 从事土木工程施工技术研究工作。

通信作者: 李福海(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事结构及材料耐久性研究工作。电子信箱: lifuhai2007@swjtu.edu.cn

铁(香港段)和满足新界西北部交通运输需求的轻铁组成^[4]。而作为轨道交通工程的重要分部工程之一,隧道开挖与支护的高质量开展为地铁等轨道交通工程的长期安稳运营提供了极其重要的先决条件。

盾构法具有对周边环境影响小、可避免涌水等现象的优点,其施工安全性、机械化水平、施工效率等都很高^[5],因而被广泛应用于世界各地的隧道开挖工程中。盾构法是指利用千斤顶的反力使得盾构机械在地层中按预定路线前进,其中的切削装置在开挖面对泥土和碎石等土体进行切削,并将切削下来的土体采用传送装置运出隧道,同时在开挖出来的隧道壁拼装管片等衬砌构件以修筑隧道的施工方法^[6]。1869年,Barlow等就采用铸铁管片的圆形盾构修建了1条位于泰晤士河下的盾构隧道。随后盾构工法迅速传播到美国、德国、苏联及中国并逐渐发展成熟,诞生了诸如英法海峡隧道、荷兰绿色心脏隧道等闻名世界的工程^[7]。

铁碳合金中碳含量大于2.11%时即为铸铁,铸铁中的碳与其他化学成分通常以石墨形态析出,当石墨为片条状时称为灰口铸铁;为蠕虫状时称为蠕墨铸铁;为团絮状时称为可锻铸铁;而当石墨以球状析出时即为球墨铸铁。作为早期盾构隧道的核心材料,铸铁凭借其独特的材料特性奠定了管片结构的关键性能:通过调控石墨形态,灰口铸铁与球墨铸铁在保留铸铁较高抗压强度的同时,还得益于石墨的润滑作用,从而大大提升了其密封性能,符合盾构隧道领域内对结构刚度和防水性能的要求^[8]。

然而在长期的运营过程中,铸铁管片始终处于复杂多变的地质环境之中,随之而来的就是其会受到多种因素的侵蚀,其中锈蚀问题日渐凸出并引起了运营维修人员的高度关注^[9]。管片通常承担着巨大的土压力、水压力及其他复杂的荷载作用,若出现锈蚀,其力学性能会发生显著变化,进而可能危及整个地下结构的安全稳定。铸铁管片接头作为管片之间的连接关键部位,起着传递内力和保证结构整体性的重要作用^[10]。

1 工程概况

本研究基于香港地铁部分线路的隧道铸铁管片进行。作为全球高密度城市轨道交通的典范工程,香港隧道结构设计充分适应了复杂的地质条件与严苛的海洋性气候环境^[11]。早期建设的市区地铁核心

线路包括荃湾线(上行2.2 km、下行1.7 km),港岛线(上行2.5 km、下行1.9 km)及观塘线(上行0.7 km、下行0.9 km)的部分区段,总计9.9 km。这些线路主要建于20世纪70年代至80年代,广泛采用铸铁管片作为隧道衬砌结构,穿越了香港典型的地质条件,包括填海软土、风化花岗岩及海陆交互相沉积层^[12]。香港地铁路线图见图1。

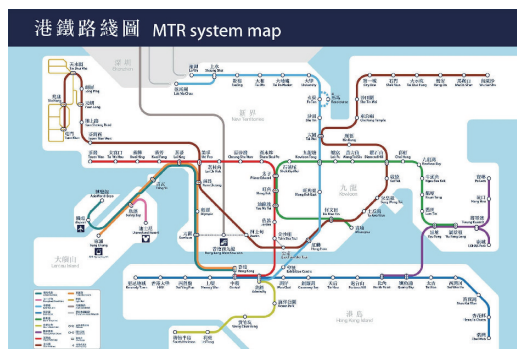


图1 香港地铁路线图

以港岛线的湾仔地铁站为例,在实地调研中发现了铸铁管片接头锈蚀现象,见图2。

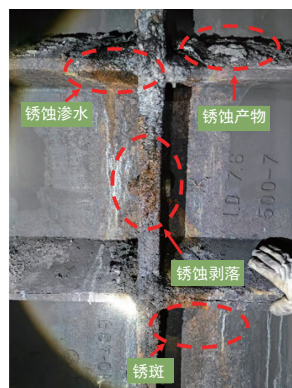


图2 铸铁管片接头锈蚀问题

2 模型建立

2.1 计算工况

管片接头力学性能的计算工况设置见表1。

在软件中,对于管片接头锈蚀的模拟采用对接头向内切削的方式实现;弯矩方向的改变通过改变竖向荷载的方向实现;螺栓失效工况通过在对模型中删除螺栓单元进行模拟。

2.2 有限元模型建立

基于工程图纸,运用ABAQUS软件模拟荷载作用下的管片接头响应。计算基于荷载-结构法^[13]。管片接头的有限元模型见图3。

2.3 参数选取

螺栓采用8.8级的M24螺栓,管片采用Q345钢,且螺栓与管片采用双线性应力-应变(σ - ε)本构关

表 1 工况设置

工况	接头锈蚀厚度/mm	弯矩方向	螺栓是否失效
1	0	正	是
2	0	正	否
3	0	负	是
4	0	负	否
5	2	正	是
6	2	正	否
7	2	负	是
8	2	负	否
9	4	正	是
10	4	正	否
11	4	负	是
12	4	负	否

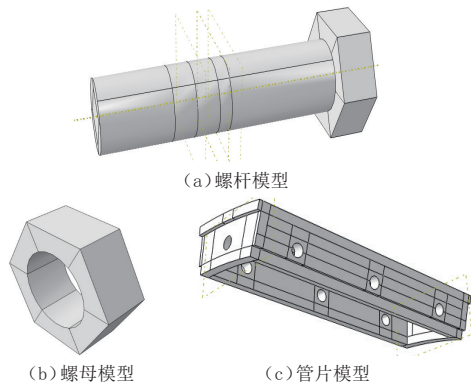


图 3 管片接头的有限元模型

系^[14](见图 4)。材料参数见表 2。

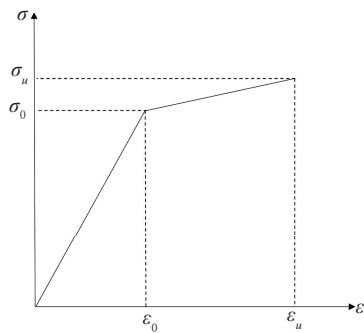


图 4 双线性应力-应变本构关系

表 2 材料参数

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	极限应力/MPa	塑性应变
LS	210	0.3	800	0.076 19
Q345	210	0.3	470	0.059 52

2.4 相互作用

主要用到“摩擦”的表面与表面接触,以及“绑定”约束(Tie)。

2.5 边界条件

边界条件分为位移边界条件和荷载边界条件^[15]。

2.5.1 位移边界条件

管片接头试验的位移边界条件为管片接头一端

的固定铰接支座以及另一端的可动铰接支座。

固定铰接支座需要设置在绕 z 轴方向可自由转动之处;可动铰接支座需要设置在沿 x 轴方向可自由平动及绕 z 轴方向可自由转动之处,两支座自由度约束情况见表 3。表 3 中, U_1 、 U_2 、 U_3 分别为沿 x 、 y 、 z 方向的平动位移; UR_1 、 UR_2 、 UR_3 分别为绕 x 、 y 、 z 轴方向的转动位移。

表 3 支座自由度约束情况

支座	自由度约束(所列即为被固定)
固定支座	U_1 、 U_2 、 U_3 、 UR_1 、 UR_2
可动支座	U_2 、 U_3 、 UR_1 、 UR_2

1、2、3 方向分别为 x 、 y 、 z 方向。其中, x 方向为本页面的水平方向; y 方向为本页面的竖直方向; z 方向为垂直于本页面方向。

固定铰接支座与可动铰接支座力学示意图见图 5,图中 F 为支座环向压力; L 为环向压力与固定铰接支座的距离; N 为支座水平荷载。

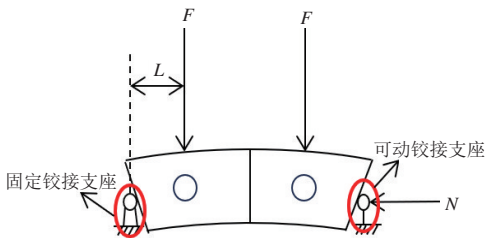


图 5 固定铰接支座与可动铰接支座力学示意图

2.5.2 荷载边界条件

设置作用于构件外表面沿带状分布的环向压力 F 、作用于构件右端沿 x 轴负方向的表面荷载 N 以及作用于螺杆上的螺栓预紧力 P_0 ^[16]。

同时为比较构件在正弯矩作用下与负弯矩作用下 2 种受力情况下的力学性能,将环向压力反向后加载至管片内侧以模拟管片反向受弯^[17]。

各荷载名称及取值见表 4;各荷载图例见图 6。

表 4 各荷载名称及取值

荷载名称	荷载值
环向压力 F /MPa	10
水平荷载 N /MPa	0.5
螺栓预紧力 P_0 /kN	50

3 计算结果分析

设置正弯矩作用(接头受弯矩作用导致内侧张开)与负弯矩作用(接头受弯矩作用导致外侧张开)2 种弯曲模式^[10],见图 7。

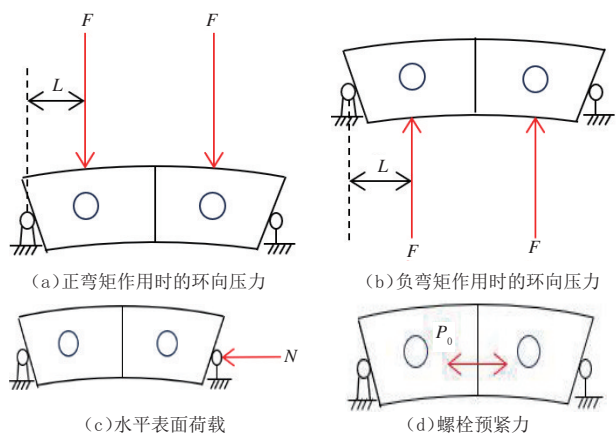


图6 各荷载图例

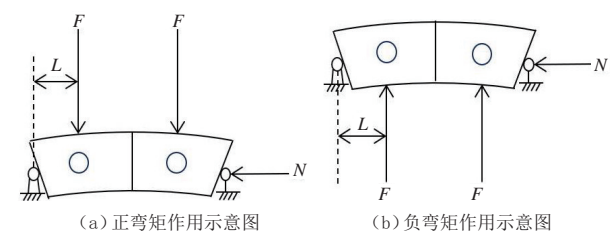


图7 2种弯曲模式

3.1 正弯矩作用下管片接头力学性能分析

根据既有研究^[18]的测点设置情况,本研究的应力与接头张开量测点布置见图8。

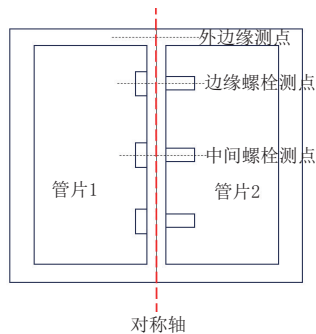


图8 管片接头张开量测点

在后续不同接头锈蚀厚度下管片接头的应力-应变分析中,将对“边缘螺栓”处螺栓应力-应变数据进行提取分析;在管片接头张开量分析中,将对3个测点处接头内外侧的管片接头张开量数据进行提取分析。

3.1.1 不同接头锈蚀厚度、不同螺栓服役状态下的螺栓应力-应变分析

图9为边缘螺栓在正弯矩作用下的应力分布云图。

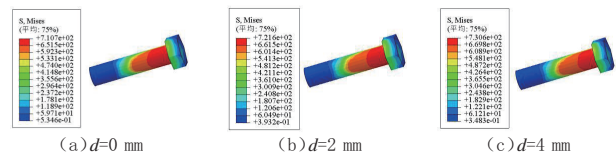


图9 正弯矩作用下边缘螺栓的应力分布云图(单位:MPa)

由图9可知,边缘螺栓上下两侧应力值较大,下侧应力值略大于上侧应力值,均在管片接头附近区段内出现应力集中效应,且应力集中效应首先出现在螺杆下侧。正弯矩作用下,应力集中出现在从螺杆头起螺纹开始侧。对比外力产生弯矩15.06 kN·m时,不同接头锈蚀厚度情况下的螺栓应力峰值发现,该峰值随着接头锈蚀厚度的增加而逐渐增大。在接头锈蚀厚度 d 分别为2、4 mm情况下,螺栓应力峰值分别为721.6、730.6 MPa,相较于未锈蚀情况下的710.7 MPa,增幅分别为1.53%、2.80%,且在接头锈蚀厚度倍增的情况下,应力增大1.83倍。显然,锈蚀劣化对边缘螺栓的应力分布存在着明显的削弱作用。

提取螺栓失效工况下,接头锈蚀厚度不同的边缘螺栓在正弯矩作用下的应力数据,可得到边缘螺栓产生与螺栓服役工况下相同应力所需弯矩,如表5所示。

表5 螺栓失效时产生与正常服役状态相同应力

		所需弯矩		单位: kN·m
服役状态弯矩	产生与正常服役状态相同应力所需弯矩			
	d=0 mm	d=2 mm	d=4 mm	
15.06	11.24	10.84	10.67	

由表5可知,基于正常服役状态下的弯矩值,3种接头锈蚀厚度下,边缘螺栓若要产生与正常服役状态相同的应力,则其所需弯矩要分别下降25.37%、28.02%、29.15%。显然,螺栓失效后对边缘螺栓应力分布产生了显著影响,且随着接头锈蚀厚度的增加,影响逐渐加重。

正弯矩作用下边缘螺栓的应变分布云图见图10。

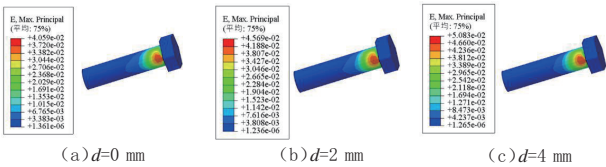


图10 正弯矩作用下边缘螺栓应变分布云图

由图10可知,边缘螺栓上下两侧应变较大,下侧应变显著大于上侧应变值,正弯矩作用下最大应变值出现在螺纹与螺杆头交界处下侧。对比同一时刻不同接头锈蚀厚度情况下螺栓应变峰值发现,该峰值随着接头锈蚀厚度的增加而增大。在接头锈蚀厚度 d 分别为2、4 mm情况下,螺栓应变峰值分别为0.045 69、0.050 83,与未锈蚀情况下的0.040 59相比,增幅分别为12.56%、25.23%,且在接头锈蚀厚度倍增的情况下,应变增大2.01倍。显然,锈蚀劣化对边缘

螺栓的应变分布存在着显著的削弱作用。

提取螺栓失效工况下,不同接头锈蚀厚度的边缘螺栓在正弯矩作用下的应变数据,可得到边缘螺栓产生与螺栓服役状态下相同应变所需弯矩,如表 6 所示。

表 6 螺栓失效时产生与正常服役状态相同应变			
服役状态弯矩	所需弯矩		
	单位: kN·m		
	产生与正常服役状态相同应变所需弯矩		
	d=0 mm	d=2 mm	d=4 mm
15.06	11.21	10.89	10.67

由表 6 可知,基于正常服役状态下的弯矩值,3 种接头锈蚀厚度下,边缘螺栓若要产生与正常服役状态相同的应变,则其所需弯矩要分别下降 25.56%、27.69%、29.15%。显然,螺栓失效后对边缘螺栓应变分布产生了显著影响,且随着接头锈蚀厚度的增加,影响逐渐加重。

3.1.2 不同接头锈蚀厚度、不同螺栓服役状态下管片接头张开量分析

铸铁管片接头在正弯矩作用下的变形图见图 11。

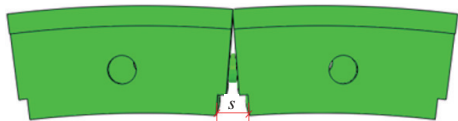


图 11 正弯矩作用下接头变形图(s为接头张开量)

分析接头张开量数据可以看出,在加载初期,管片处于弹性阶段,接头张开量随着弯矩的增加呈线性增长;随着弯矩逐渐增大,管片材料逐渐达到其屈服强度,接头张开量随之呈非线性增长。

在正常服役状态下,以 $d=0\text{ mm}$ 情况下弯矩为 $15.06\text{ kN}\cdot\text{m}$ 为基准,可得到 3 种接头锈蚀厚度下,外边缘、边缘螺栓、中间螺栓测点处的接头张开量,见表 7。

表 7 同一弯矩下不同测点处不同接头锈蚀厚度下的			
d	接头张开量		
	外边缘测点处	边缘螺栓测点处	中间螺栓测点处
0	11.56	10.57	9.78
2	12.16	11.31	10.44
4	13.32	12.15	11.21

根据现有研究^[18],与中间螺栓测点处接头张开量相比,边缘螺栓测点处、外边缘测点处的接头张开量受螺栓预紧力的影响而依次减小,故引起在同一接头锈蚀厚度下,沿图 8 中对称轴方向由内向外,3 个测点处的接头张开量呈增大趋势。同时针对边缘螺栓测点和中间螺栓测点,同一测点处的接头张开量随着接头锈蚀厚度的增加而增加。

基于表 7 中不同测点处不同接头锈蚀厚度下的接头张开量数据,在螺栓失效状态下产生与正常服役状态相同接头张开量所需弯矩如表 8 所示。

表 8 螺栓失效时不同测点处产生与正常服役状态相同接头			
d/mm	张开量所需弯矩		
	单位: kN·m		
	产生与正常服役状态相同接头张开量所需弯矩		
	外边缘测点处	边缘螺栓测点处	中间螺栓测点处
0	10.590	10.585	10.568
2	10.568	10.571	10.553
4	10.570	10.566	10.550

由表 8 可知,基于正常服役状态下的弯矩值 $15.06\text{ kN}\cdot\text{m}$,在螺栓失效后,不同接头锈蚀厚度下所有测点处的弯矩值均有所减小,接头未锈蚀工况的外边缘测点处降幅最小,为 29.68%;接头锈蚀厚度为 4 mm 时中间螺栓测点处降幅最大,为 29.94%。说明在螺栓失效后,管片接头几何变形能力大大增加,接头失稳风险升高。

3.2 负弯矩作用下锈蚀管片接头力学性能分析

3.2.1 不同接头锈蚀厚度、不同螺栓服役状态下螺栓应力-应变分析

图 12 为边缘螺栓在负弯矩作用下的应力分布云图。

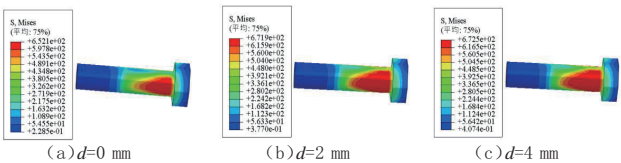


图 12 负弯矩下边缘螺栓应力分布云图(单位:MPa)

由图 12 可知,边缘螺栓上下两侧应力值较大,上侧应力值大于下侧应力值,均在管片接头附近区段内出现应力集中效应且该效应首先出现在管片上侧。对比外力产生弯矩 $6.43\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,不同接头锈蚀厚度情况下的螺栓应力峰值发现,该峰值随着接头锈蚀厚度的增加而逐渐增大。相较于未锈蚀情况下的 652.1 MPa ,在接头锈蚀厚度 d 分别为 $2、4\text{ mm}$ 情况下,螺栓应力峰值分别为 $671.9、673.5\text{ MPa}$,增幅分别为 $3.09\%、3.28\%$,且在接头锈蚀厚度倍增的情况下,应力增大 1.08 倍。显然,锈蚀劣化对负弯矩作用下的边缘螺栓应力分布有着明显的削弱作用。

提取螺栓失效工况下不同接头锈蚀厚度的边缘螺栓在负弯矩作用下的应力数据,可得到边缘螺栓产生与螺栓服役工况下相同应力所需弯矩,如表 9 所示。

由表 9 可知,基于正常服役状态下的弯矩值,3 种接头锈蚀厚度下,边缘螺栓若要产生与正常服役

表9 螺栓失效时产生与正常服役状态相同应力

服役状态弯矩	所需弯矩			单位:kN·m
	产生与正常服役状态相同应力所需弯矩			
	d=0 mm	d=2 mm	d=4 mm	
6.43	4.32	4.35	4.34	

状态相同的应力,则其所需弯矩要分别下降32.81%、32.35%、32.50%。显然,螺栓失效后对边缘螺栓应力分布产生了显著影响,且随着接头锈蚀厚度的增加,影响基本不变。

图13为边缘螺栓在负弯矩作用下的应变分布云图。对比不同接头锈蚀厚度下的应变云图可知,边缘螺栓上下两侧应变较大,上侧应变显著大于下侧。负弯矩作用下最大应变值出现在螺纹与螺杆头交界处上侧。对比同一时刻不同接头锈蚀厚度下的螺栓应变峰值发现,该峰值随着接头锈蚀厚度的增加而增加。在接头锈蚀厚度d分别为2、4 mm情况下,螺栓应变峰值分别为0.01 958、0.02 055,与未锈蚀情况下的应变峰值0.00 928相比,增幅分别为110.99%、121.44%,且在接头锈蚀厚度倍增条件下,应变增大1.09倍。显然,锈蚀劣化对负弯矩作用下的边缘螺栓应变分布存在着显著的削弱作用。

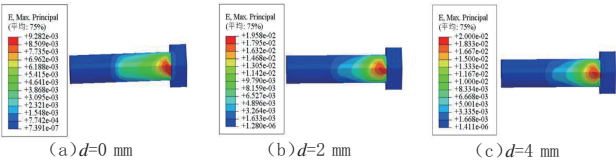


图13 负弯矩下边缘螺栓应变分布云图

提取螺栓失效工况下不同接头锈蚀厚度的边缘螺栓在负弯矩作用下的应变数据,可得到边缘螺栓产生与螺栓服役状态下相同应变所需弯矩,如表10所示。

表10 螺栓失效时产生与正常服役状态相同应变

服役状态弯矩	所需弯矩			单位:kN·m
	产生与正常服役状态相同应变所需弯矩			
	d=0 mm	d=2 mm	d=4 mm	
6.43	4.32	4.35	4.33	

由表10可知,基于正常服役状态下的弯矩值,3种锈蚀厚度下,边缘螺栓若要产生与正常服役状态相同的应变,则其所需弯矩要分别下降32.81%、32.35%、32.66%。显然,螺栓失效后对边缘螺栓应变分布产生了显著影响,且随着接头锈蚀厚度的增加,影响基本不变。

3.2.2 不同接头锈蚀厚度、不同螺栓服役状态下接头张开量分析

铸铁管片接头在负弯矩作用下的接头变形图见图14。

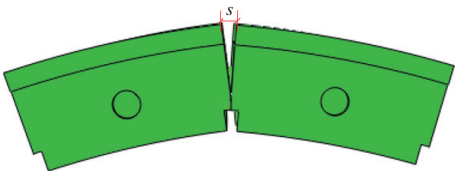


图14 负弯矩作用下接头变形图(s为接头张开量)

分析接头张开量数据可知,在加载初期,管片处于弹性阶段,接头张开量随着弯矩的增加呈线性增长;随着弯矩逐渐增大,管片材料逐渐达到其屈服强度,接头张开量随之呈非线性增长。

在管片弹性阶段内,3个测点处接头张开量增长趋势近乎一致;管片达到屈服强度后,接头张开量开始呈非线性增长,且增长趋势呈现出较大差异。以弯矩为7.33 kN·m为基准,在3个测点处,3种接头锈蚀厚度下的管片接头张开量如表11所示。

表11 同一弯矩下不同测点处不同接头锈蚀厚度的

d/mm	接头张开量			单位:mm
	外边缘测点处	边缘螺栓测点处	中间螺栓测点处	
0	12.02	11.97	11.92	
2	13.06	12.98	12.91	
4	14.56	14.47	14.40	

边缘螺栓测点处与外边缘测点处受螺栓预紧力影响,相较于中间螺栓测点处的接头张开量有所减小,导致同一接头锈蚀厚度下3个测点位置的接头张开量由中间向边缘逐渐递增。同时还可以看出,在同一测点处的接头张开量随着接头锈蚀厚度的增加而增加。

基于表11中不同测点处不同接头锈蚀厚度下的接头张开量数据,在螺栓失效状态下产生与正常服役状态相同接头张开量所需弯矩如表12所示。

表12 螺栓失效时不同测点处产生与正常服役状态相同接头

张 开 量 所 需 弯 矩			单 位 : kN·m
d/mm	产生与正常服役状态相同接头张开量所需弯矩		
	外边缘测点处	边缘螺栓测点处	中间螺栓测点处
0	4.986	4.962	4.944
2	5.061	5.038	4.992
4	5.063	5.043	5.004

由表12可知,基于正常服役状态下的弯矩值7.33 kN·m,在螺栓失效后,不同接头锈蚀厚度下,所有测点处的弯矩均有所降低,且降幅达30.93%至32.55%。说明在螺栓失效后,管片接头几何变形能力大大增加,接头失稳风险升高。

4 结 语

(1) 锈蚀使得正负弯矩作用下螺栓的力学性能

明显降低。在正弯矩作用下,当接头锈蚀厚度达 4 mm 时,边缘螺栓的应力增幅为 2.8%。负弯矩使得螺栓力学性能削弱更加明显,在负弯矩作用下,边缘螺栓对应应力增幅为 3.28%。

(2) 锈蚀使得正负弯矩作用下管片的几何变形能力显著增加。在正弯矩作用下,当接头锈蚀厚度达 4 mm 时,边缘螺栓处接头张开量增幅为 15.22%;负弯矩使得管片几何变形能力增加更加明显,在负弯矩作用下,边缘螺栓对应接头张开量增幅为 21.13%。

(3) 螺栓失效使得正负弯矩作用下的螺栓力学性能相较于螺栓正常工作时显著降低。在正弯矩作用下,接头锈蚀厚度达 4 mm 时,螺栓失效使得边缘螺栓产生与螺栓正常工作时相同应力值所需弯矩降幅为 29.15%;在负弯矩作用下,边缘螺栓对应应力降幅为 32.50%。

(4) 螺栓失效使得正负弯矩作用下的管片几何变形能力大大增加。在正弯矩作用下,产生与螺栓正常服役状态相同的接头张开量所需弯矩降幅最小为 29.68%;在负弯矩作用下,产生与螺栓正常服役状态相同的接头张开量所需弯矩降幅最大为 32.55%。

参考文献:

[1] 张延年,李峥,海洪,等.酸性盐腐蚀球墨铸铁管连接件抗弯性能试验[J].沈阳工业大学学报,2023,45(4):465-471.
[2] 黄宏伟,沈贤达,王飞,等.盾构隧道管片接头的易损性分析和评价[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(2):198-206.
[3] 王福文,梁帅文,冯爱军.2024 年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J].隧道建设(中英文),2025,45(2):425-434.

[4] 香港特别行政区政府运输署-铁路[EB/OL].(2026-03-19)[2026-03-27]. https://www.td.gov.hk/sc/transport_in_hong_kong/public_transport/railways/index.html.
[5] 何川,封坤,方勇.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].西南交通大学学报,2015,28(1):97-109.
[6] 王明,程勇东,刘学,等.空推隧道盾构机反作用力计算方法研究[J].地基处理,2021,3(3):206-210.
[7] 肖明清.国内大直径盾构隧道的设计技术进展[J].铁道标准设计通讯,2008(8):84-87.
[8] 武岳,李建平,杨忠,等.含有 Cu、Mo、Sn 的高强度蠕墨铸铁的蠕变行为[J].材料研究学报,2019,33(1):43-52.
[9] Liu M, Du C, Luo X. Failure analysis in buried ductile iron pipelines: A study of leakage in drinking water distribution systems[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 151: 107361.
[10] 朱合华,黄伯麒,李晓军,等.盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析[J].岩土工程学报,2014,36(12):2153-2160.
[11] 林鸣,王青娥,王孟钧,等.港珠澳大桥岛隧工程智能建造探索与实践[J].科技进步与对策,2018,35(24):81-85.
[12] 庄晓峰.香港地铁 602 工程隧道临时围堰的设计施工方法介绍[J].隧道建设,2002,22(4):17-19.
[13] 肖明清,王少锋,陈立保,等.基于荷载结构法的隧道初期支护设计方法研究[J].铁道工程学报,2018,35(4):60-64.
[14] 赵均海,张磊,张常光,等.双线性强化隧道和桩孔三剪弹塑性解[J].交通运输工程学报,2018,18(1):51-60.
[15] Zienkiewicz O C, Taylor R L, Zhu J Z. The finite element method: its basis and fundamentals[M]. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2013.
[16] 张厚美,傅德明,过迟.盾构隧道管片接头荷载试验研究[J].现代隧道技术,2002,39(6):28-33.
[17] 刘四进,封坤,何川,等.大断面盾构隧道管片接头抗弯力学模型研究[J].工程力学,2015,32(12):215-224.
[18] Tsiampousi A, Yu J, Standing J. Behaviour of bolted cast iron joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68: 113-129.

(上接第 30 页)

High Performance Concrete(UHPC)Deck with Joints subjected to an Improved Steel Wire Mesh(SWM)Treatment[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(5): 2163-2169.
[15] 张阳,张轶,邱俊峰,等.预制 UHPC-NC 板组合湿接缝抗弯性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(11):62-71.
[16] 张哲,靳文豪,张晨曦,等.预制主梁 UHPC 湿接缝受弯性能试验研究[J].公路交通科技,2025,42(4):105-111.
[17] Li Xuehong, Chen Zhiyong, Jia Wenjin, et al. Experimental study on

the flexural behavior of formwork-free wet joints between precast concrete bridge slabs[J]. Structures, Volume 79, 2025.
[18] Graybeal B A. Behavior of Field-cast Ultra-high Performance Concrete Bridge Deck Connections under Cyclic and Static Structural Loading[J]. Fiber Reinforced Concrete, 2010: 136083839.
[19] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S].
[20] CB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
[21] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S].