

# 中性盐侵蚀对球墨铸铁管法兰连接抗弯影响

赵俭斌<sup>1</sup>, 王 启<sup>1,2</sup>, 张延年<sup>1</sup>, 公彦法<sup>1</sup>, 穆鹏华<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 吉林建筑科技学院土木工程学院, 吉林 长春 130114; 3. 中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050200)

**摘 要** 目的 研究中性氯盐腐蚀对球墨铸铁管法兰连接的受弯性能影响, 解决地下管道腐蚀的有关力学问题。方法 采用  $\text{pH}=7$ , 质量分数为 3.0% 的氯化钠溶液进行干湿循环加速腐蚀, 将球墨铸铁管法兰连接分别进行 25、50、75、100 次的干湿循环腐蚀处理, 然后对其进行抗弯试验, 并对比不同腐蚀程度下各试件的极限承载力、极限弯矩、屈服弯矩和抗弯刚度。结果 干湿循环侵蚀次数的增多, 试件弯曲挠度增大, 抗弯刚度减小, 法兰盘变形更明显, 弹性阶段缩短, 更趋向发生脆性破坏, 极限承载力随之降低, 破坏现象也更严重。结论 土壤中的中性氯盐腐蚀对球墨管法兰连接危害较大, 对于弯曲强度的影响主要表现在降低抗弯刚度, 使得构件变形过大, 自身破坏的同时甚至影响相邻地下建(构)筑物。

**关键词** 中性氯盐; 球墨铸铁管法兰连接; 抗弯性能; 极限承载力

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

## Influence of Neutral Salt Corrosion on Bending Resistance for Flange Connection of Ductile Iron Pipe

ZHAO Jianbin<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yannian<sup>1</sup>, GONG Yanfa<sup>1</sup>, MU Penghua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Jilin University of Architecture and Technology, Changchun, China, 130114; 3. China Hebei Construction & Geotechnical Investigation Group Ltd., Shijiazhuang, China, 050200)

**Abstract:** In order to provide reference for the study of corrosion of underground pipeline, the influence of neutral chloride corrosion on bending mechanical properties of ductile iron pipe flange connection was studied. The  $\text{pH}=7$ , 3.0% sodium chloride solution was used for dry wet cycle to accelerate corrosion, with 25, 50, 75 and 100 times cycle corrosion respectively. The ultimate bearing capacity, ultimate bending moment, yield bending moment and flexural stiffness of each

收稿日期: 2021-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978422); 吉林省高教科研课题(JGJX2020D510)

作者简介: 赵俭斌(1960—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土与地下工程等方面研究。

specimen were compared by bending test under different corrosion degrees. The results show that with the increase of dry wet cycle erosion times, the bending deflection of the specimen increases, the bending stiffness decreases, the flange deformation is more obvious, the elastic stage shortens, the brittle failure tends to occur, the ultimate bearing capacity decreases, and the failure phenomenon is more serious. Therefore, the corrosion of the flange connection of ductile pipe is greatly affected by neutral chlorine salt in soil. The influence on bending strength is mainly reflected in the reduction of bending rigidity, which makes the members deformed too much, and even affects the adjacent underground buildings (structures) while the damage is caused.

**Key words:** neutral chloride salt; ductile iron pipe flange connection; bending resistance; ultimate bearing capacity

地下管道是城市生存发展的基础。铸铁管强度高,耐久性能好,是地下管道材料的首选<sup>[1]</sup>。但土壤中的盐离子,如  $\text{Cl}^-$  半径较小,可穿透防腐层渗入金属基材。当  $\text{Cl}^-$  质量分数大于 0.515% 时,局部腐蚀最为严重<sup>[2]</sup>。土壤 pH 值也属于腐蚀评价指标,一般认为酸性越大越易腐蚀<sup>[3]</sup>。目前国内外对于受侵蚀管道力学性能已有过一定研究。K. Miyazaki 等<sup>[4-8]</sup>对腐蚀后的管道进行了受弯特征分析,基本研究出腐蚀后管道的受弯破坏特征及腐蚀参数对地下管道有关失效荷载的影响,但其研究层面多集中于管道管体本身,且存在一定争议。H. A. Atika 等<sup>[9-10]</sup>先后提出了计算铸铁管内表面与外表面腐蚀应力强度因子的方法,对内压和表面载荷作用下的裂纹及有腐蚀缺陷中的裂纹进行了分析。针对更易于受腐蚀的球墨铸铁管接口的研究,秦严严等<sup>[11-12]</sup>分别对球墨铸铁管柔性接口进行了抗拉与抗弯分析,得出了最大轴向拉力计算方法与抗弯力学模型。周静海等<sup>[13]</sup>通过对承插式接口的拉拔试验研究,建立了水压和接口位移模型。谷伟等<sup>[14]</sup>通过碱性氯盐溶液对球墨铸铁双法兰连接的腐蚀试验,获得了球墨铸铁管法兰连接在碱性氯

盐侵蚀下的弯曲力学特征。球墨铸铁管本身具有良好的耐腐蚀性能,但管件之间的连接部分易受到侵蚀破知,当前研究多为管体本身及柔性接口抗腐蚀与力学性能研究,对于常用的球墨铸铁双法兰短管法兰连接的研究较少。而球墨管法兰连接易受土壤中  $\text{Cl}^-$  侵蚀,在实际工程中存在安全隐患。基于此,因中性土壤占有较大比重,笔者研究中性氯盐腐蚀对球墨铸铁管法兰连接的受弯性能影响,进行干湿循环腐蚀处理,然后对其进行抗弯试验,对比不同腐蚀程度下各试件的极限承载力、极限弯矩、屈服弯矩和抗弯刚度,解决地下管道腐蚀的有关力学问题。

1 试 验

1.1 试件设计

试件规格参数如表 1 所示,形状及尺寸如图 1 所示。根据《水及燃气管道用球墨铸铁管、管件和附件》(GB/T 13295—2008),试件全部选用工程中常用的球墨铸铁管,连接螺栓为 4.8 级 M16 的普通螺栓。试件共 6 个,其中 2 个是标准试件,另外 4 个是经中性 NaCl 溶液不同循环次数处理后的试件,试件分组如表 2 所示。

表 1 试件参数一览表

Table 1 Specimen parameters List					mm
管身长度	壁厚	外径	法兰厚度	法兰外径	法兰内径
1 000	6.1	118	15	220	100

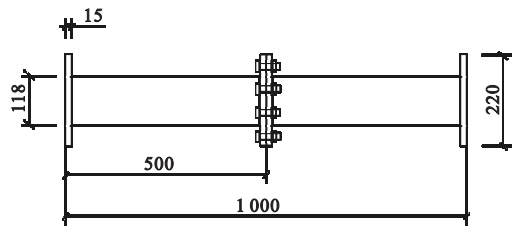


图1 试件的形状及尺寸

Fig.1 The shape and dimensions of the specimen

表2 试件分组

Table 2 Test group

试件/序号	试件编号	循环/次
1	B-BZ-01	0
2	B-BZ-02	0
3	B-ZY-25	25
4	B-ZY-50	50
5	B-ZY-75	75
6	B-ZY-100	100

1.2 试验方案

中性盐溶液为蒸馏水配制的质量分数3%的NaCl溶液,并在25℃加稀盐酸调节到pH=7。干湿循环过程:先将试件浸泡在盐溶液中12 h,后取出试样,将其放置在溶液上方12 h。在干湿循环腐蚀结束后,先用稀硝酸去除管件上的腐蚀物,再用清水洗净试件吹干。

1.3 加载方案

1.3.1 加载装置

采用3等分两点加载方式,在沈阳建筑大学结构试验室完成。试验装置包括1000 kN拉压千斤顶、600 kN竖向反力架、承载车床、数据采集器等(见图2)。

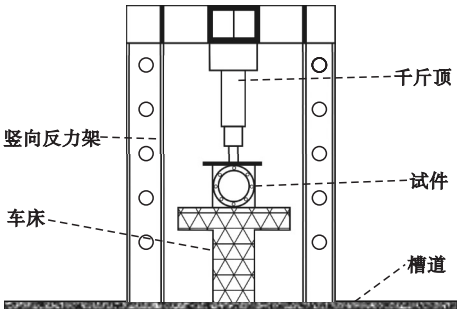


图2 加载设备

Fig.2 Loading equipment

试件上下为两个厚50 mm钢板焊接制成的弧形支座,且为防止弧形支座中间由于焊缝等凸起引起受力集中,在弧形处粘上一层10 mm厚橡胶。

1.3.2 测点布置

为了得到试件的整体位移-荷载曲线。试验过程共布置3个竖向位移计,管身6个,法兰12个,共18个应变片,用来测量试件位移。a为管身测点布置;b为法兰测点布置(见图3)。

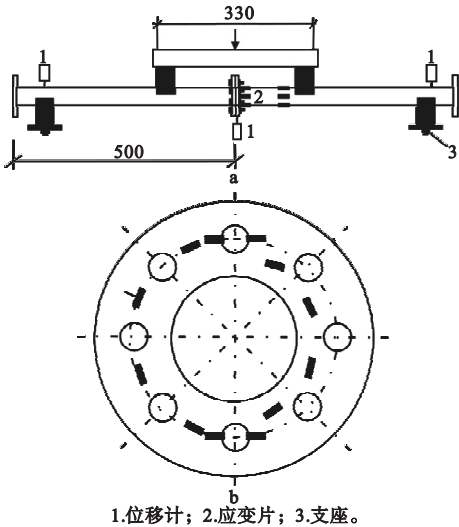


图3 试件的测点布置

Fig.3 Specimen measuring points

1.3.3 试验加载

试验采用分级加载,并进行预加载,以0.5 kN/s速率连续加载至4 kN,持荷2 min,然后再均匀卸载至零,记录初始值。加载速率0.5 kN/s,每级荷载增量为5 kN,持荷2 min,待稳定后记录位移,再进行下一级加载,直至试件破坏,然后均匀卸载至零。

2 试验现象

加载过程中,试件的变形相差不大。试件先经历弹性阶段,该阶段法兰接口的主要变形来自于上部橡胶垫圈挤压。试件的屈服阶段有一定差异,试件现象如表3所示,试件破坏情形如图4所示。

表3 试件现象

Table 3 Phenomena of specimen during test

试件编号	有无屈服阶段	屈服阶段表现	破坏形式
B-BZ-01	有	有啪啪响声	脆性
B-BZ-02	有	有啪啪响声	脆性
B-ZY-25	有	无异响	脆性
B-ZY-50	无	无异响	脆性
B-ZY-75	无	无异响	脆性
B-ZY-100	有	无异响	脆性

标准试件在屈服阶段出现响声是因为螺帽挤压螺杆上的螺纹,而经侵蚀后的试件因腐蚀生锈,未出现响声。标准试件屈服阶段主要变形来自螺栓中螺帽的滑丝。随着施加荷载的增大跨中挠度也逐渐加大,法兰连接的下端可以看出明显的变形。试件 B-ZY-25 与试件 B-ZY-50 可以明显在加载中看到法兰下部与下部螺栓挤压,螺帽陷入法兰中。而试件 B-ZY-75 与 B-ZY-100 没有明显看到螺帽陷入法兰中。

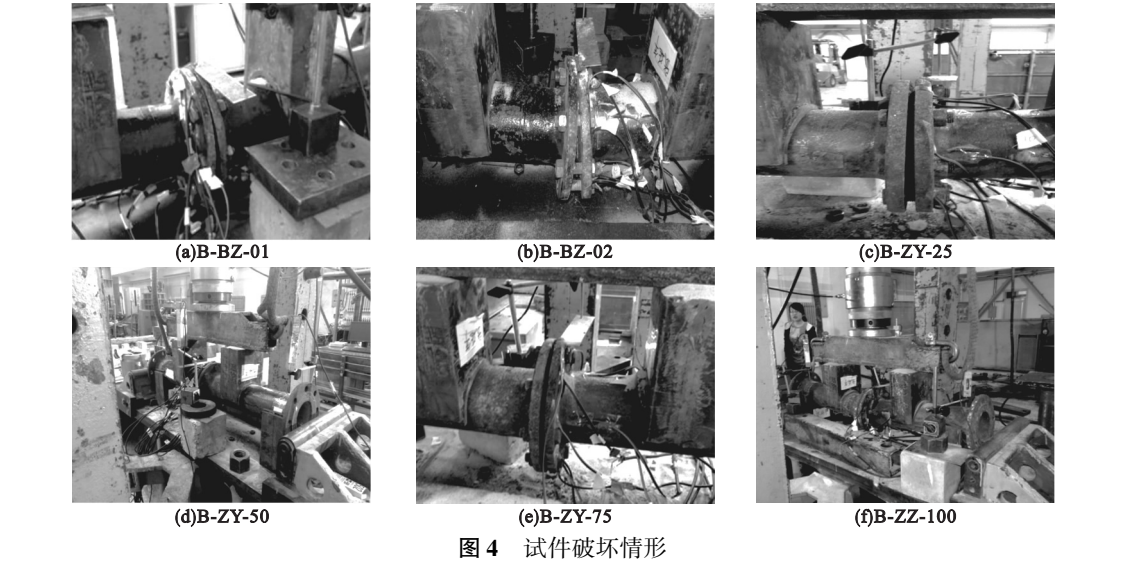


图4 试件破坏情形

Fig. 4 Destruction scenario of specimen

### 3 结果分析

#### 3.1 试验结果

试件弯矩的计算式:

$$M_{\text{中}} = \frac{FL}{6} \tag{1}$$

式中: $M_{\text{中}}$  为跨中弯矩; $F$  为荷载; $L$  为长度。  
试件弯矩值如表 4 所示。

表4 试件弯矩

Table 4 Bending moment of specimen

试件编号	屈服弯矩/ (kN·m)	极限弯矩/ (kN·m)	极限弯矩/ 屈服弯矩
B-BZ-01	47.5	49.8	1.05
B-BZ-02	38.25	41.61	1.09
B-ZY-25	42.76	58.85	1.38
B-ZY-50	38.05	50.87	1.34
B-ZY-75	34.47	45.15	1.31
B-ZY-100	32.65	41.57	1.27

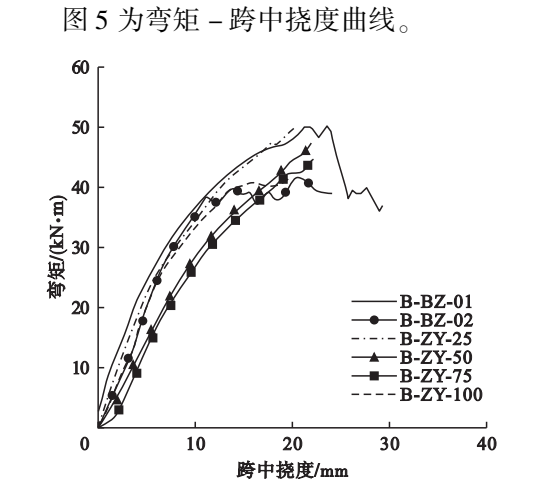


图5 试件的弯矩 – 跨中挠度曲线

Fig. 5 Moment-deflection curves of specimen

经侵蚀试件的屈服弯矩、极限弯矩、极限弯矩与屈服弯矩的比值均随着侵蚀次数的增加而减小。

3.2 承载力分析

图 6 为极限承载力衰减曲线。标准件的极限承载力并不是最大,是因为标准试件由于螺栓的滑丝,没有像经过腐蚀处理的试件破坏产生于法兰盘与管身连接处。但对比经腐蚀处理的试件可见,随着干湿循环侵蚀次数的增多,试件承载力逐渐下降,腐蚀确会大幅降低球墨铸铁管道的承载能力。

着侵蚀程度的加剧亦有减小的趋势。干湿循环侵蚀下试件的抗弯刚度受到较大影响,使得试件破坏时变形过大。

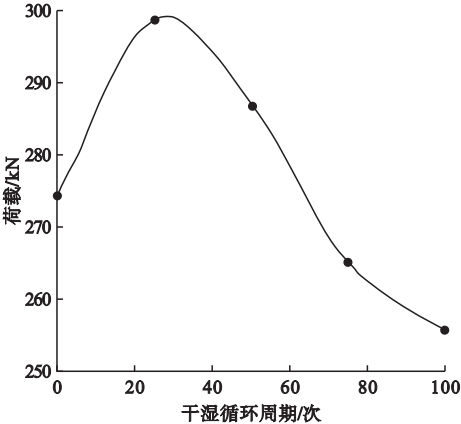


图 6 极限承载力衰减曲线

Fig. 6 Ultimate strength decay curves

3.3 抗弯刚度分析

图 7 为试件的抗弯刚度曲线,试件抗弯刚度随荷载增大呈明显的反比例关系,而随

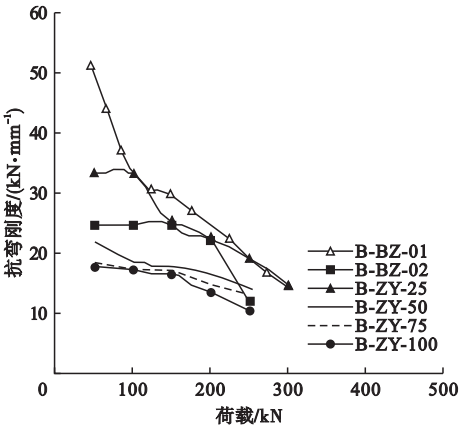


图 7 试件的抗弯刚度

Fig. 7 Flexural rigidity of the specimen

3.4 应变分析

3.4.1 法兰盘应变分析

法兰应变如图 8 所示。法兰盘布置应变片 12 个,序号 1-12,以逆时针为序。其中应变片 5、6 布置在下部螺栓周围,以测量受拉螺栓对法兰盘的影响;应变片 11、12 布置在上部螺栓周围,以测量受压螺栓对法兰盘的影响。

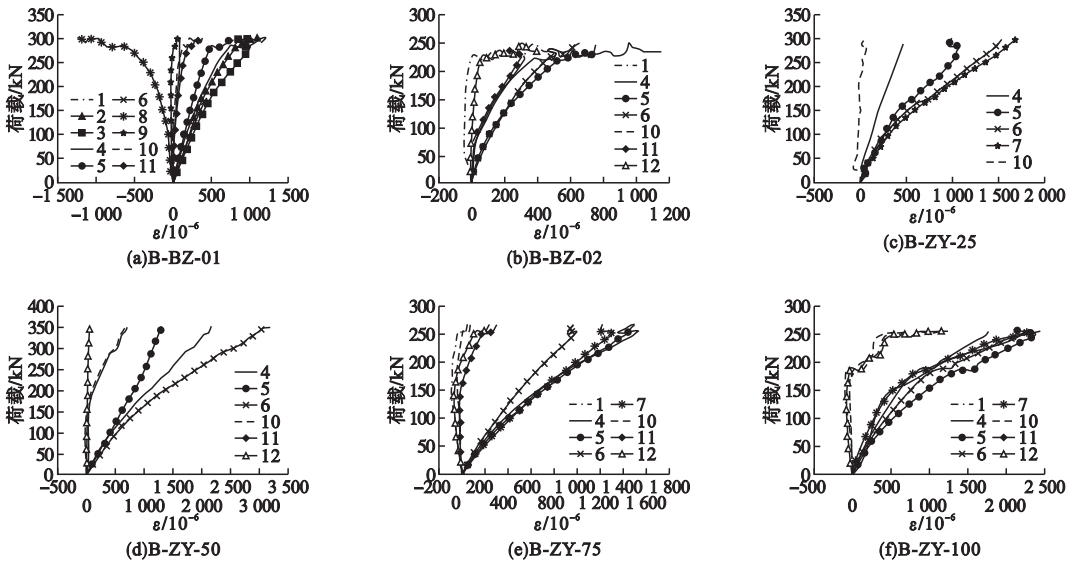


图 8 法兰盘应变分布

Fig. 8 Strain curves of flange plate

通过法兰盘的应变分布可知,应变随荷载增大,变化较大。在达到屈服阶段后,应变速率加剧。比较各处应变绝对值发现,整体上,法兰盘受拉螺栓周围布置的应变片4、5、6、7应变相对较大,法兰盘受压螺栓周围布置的应变片1、10、11、12应变较小,其他位置应变介于二者之间,越靠近螺栓处应变越大,是因为螺栓孔位置存在应力集中。

3.4.2 管身应变分析

布置应变片6个,序号13-18,于法兰盘根部与距法兰盘80 mm的管身处,并分别在管身的上、中、下部对称布置。其中应变片13、14布置在管身上部受压侧,应变片13紧贴法兰盘,应变片14距法兰盘88 mm,以测量管身受压侧的应变;应变片17、18布置在管身下部受拉侧,应变片17紧贴法兰盘,应变片18距法兰盘88 mm。以测量管身受拉侧的应变。图9为管身应变分布。管身应变随荷载增大,变化明显,进入屈服阶段后应变

速率加快。管身上部和下部受压、拉作用较大的部位应变较大。整体上受压侧应变片13、14的应变大于受拉侧应变片17、18的应变,分析试件顶部受压区在加载过程中出现局部屈曲破坏,致使变形过大。

为避免受压区存在屈曲破坏对法兰近端与远端应变大小对比的干扰,仅对比受拉区应变片17与18可以发现,法兰盘近端的应变整体上小于法兰盘远端的应变。

整体上管身中部的应变远大于法兰处,因此管身的变形明显大于法兰连接的变形。而试验过程观察发现,试件破坏从法兰盘根部开始,验证法兰连接处更易受腐蚀而破坏,是整个球墨管道的薄弱点。

通过各组试件间应变分布对比可知,随着侵蚀次数的增加,应变有增大的趋势,即受腐蚀程度加深会使得构件破坏变形加剧,若周围有相邻建(构)筑物,如基础、管廊等,可能会对其产生附加应力,造成工程事故。

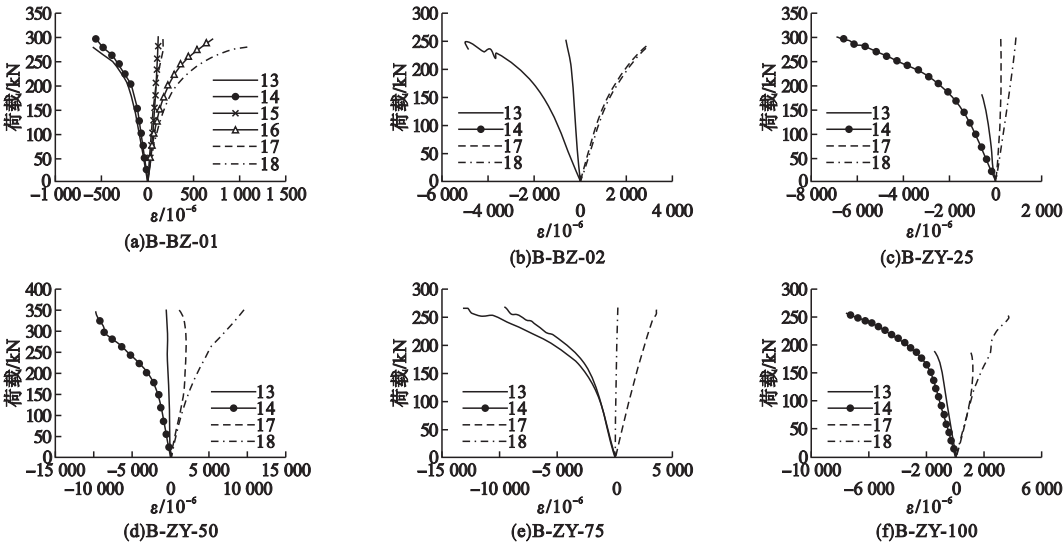


图9 管身应变分布

Fig. 9 Strain curves of the pipe surface

3.5 法兰接口安全储备分析

通过极限弯矩和屈服弯矩及其比值(见表4),可以发现经腐蚀处理的试件,其极限弯矩与屈服弯矩的比值约在1.3左右,且随

着干湿循环次数的增多而变小。是因为腐蚀次数增加使管壁变薄,极限弯矩比屈服弯矩下降略快,此外螺栓锈迹更重导致屈服极弯矩相对于极限弯矩增大。

## 4 结 论

(1) 地下球墨铸铁管道最易腐蚀部位为其法兰连接处,随着腐蚀程度加大,试件弯曲挠度越大,法兰盘变形越明显,弹性阶段缩短,更趋向脆性破坏,仅考虑受腐蚀试件,其极限承载力亦随之降低,试件中间法兰连接受弯下降,两端上翘,变形更大,破坏后果加剧。

(2) 随着荷载增大,试件抗弯刚度呈明显的反比例关系,而随着腐蚀程度的加剧亦有减小的趋势。

(3) 法兰界面的极限弯矩与屈服弯矩的比值随着腐蚀加剧而变小,其安全储备也越小。

(4) 对于法兰盘而言,越靠近螺栓处,其应力集中越大,越易破坏,同时受腐蚀程度加深会使得构件破坏变形加剧。对于管身而言,受腐蚀后上部受压区发生屈曲破坏,同样产生较大变形,甚至可能对相邻建(构)筑物产生附加压力而存在隐患。

## 参考文献

- [1] 朱智伟,邵新正,于军. 球墨铸铁管摩阻系数取值敏感性研究[J]. 中国给水排水,2021,37(10):147-153.  
(ZHU Zhiwei, SHAO Xinzheng, YU Jun. Sensitivity study on friction coefficient of ductile iron pipe [J]. China water & wastewater, 2021, 37(10): 147-153.)
- [2] 郭浩,田一梅,裴云生,等. 氯离子对球墨铸铁管土壤腐蚀影响机理研究[J]. 材料导报,2017,31(11):151-157.  
(GUO Hao, TIAN Yimei, PEI Yunsheng, et al. Mechanism of the effect of chloride ions on soil corrosion for ductile iron pipes [J]. Materials reports, 2017, 31(11): 151-157.)
- [3] 梁昌晶,谢波,刘延庆,等. 基于KPCA-GWO-SVM的埋地管道土壤腐蚀速率预测[J]. 油气储运,2021,40(8):938-944.  
(LIANG Changjing, XIE Bo, LIU Yanqing, et al. Prediction of soil corrosion rate of buried pipeline based on KPCA-GWO-SVM [J]. Oil & gas storage and transportation, 2021, 40(8): 938-944.)
- [4] MIYAZAKI K, KANNO S, ISHIWATA M, et al. Fracture behavior of carbonsteel pipe with local wall thinning subjected to bending load

- [J]. Nuclear engineering and design, 1999, 191:195-204.
- [5] MIYAZAKI K, KANNO S, ISHIWATA M, et al. Fracture and general yield for carbon steel pipes with local wall thinning [J]. Nuclear engineering and design, 2002, 211:61-68.
- [6] AHN S H, NAM K W, YOO Y S, et al. Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning [J]. Nuclear engineering and design, 2002, 211:91-103.
- [7] AHN S H, NAM K W, YOO Y S, et al. Comparison of experimental and finite element analytical results for the strength and the deformation of pipes with local wall thinning subjected to bending moment [J]. Nuclear engineering and design, 2006, 236:140-155.
- [8] KIM J W, PARK C Y. Effect of length of thinning area on the failure behavior of carbon steel pipe containing a defect of wall thinning [J]. Nuclear engineering and design, 2003, 220:274-284.
- [9] ATIKA H A, ASHUTOSH S D. Stress intensity factors for external corrosion and cracking of buried cast iron pipes [J]. Engineering fracture mechanics, 2021, 250:107778.
- [10] ATIKA H A, ASHUTOSH S D. Fracture parameters for buried cast iron pipes subjected to internal surface corrosion and cracks [J]. Journal of pipeline science and engineering, 2021(4):187-197.
- [11] 秦严严. 管道接口橡胶密封圈力学性能研究及应用[D]. 郑州:河南工业大学,2011.  
(QIN Yanyan. The mechanical properties study and application of the rubber ring joints on underground pipeline [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011.)
- [12] 段君峰. 球墨铸铁管道胶圈柔性接口的力学性能试验研究[D]. 郑州:河南工业大学,2011.  
(DUAN Junfeng. Experimental study on mechanical behavior of rubber gasketed joint with ductile cast iron pipe [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011.)
- [13] 周静海,赵海燕,魏立群. 球墨铸铁供水管线在地震作用下功能性实验分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(2):166-169.  
(ZHOU Jinghai, ZHAO Haiyan, WEI Liquan. Experimental research on functionality of ductile cast iron pipelines under the earthquake [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008, 24(2): 166-169.)
- [14] 谷伟,张延年,公彦法. 碱性盐侵蚀球墨铸铁双法兰连接受弯性能试验[J]. 工业建筑,2017,47(6):174-177.  
(GU Wei, ZHANG Yannian, GONG Yanfa. Flexural behavior of dual-flanged connection of ductile iron pipe under alkali-salt corrosion environment [J]. Industrial construction, 2017, 47(6): 174-177.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)