

腐蚀环境下 H 型钢柱局部点蚀对抗震性能影响分析

Analysis of the Impact of Local Pitting Corrosion on Seismic Performance of H-shaped Steel Columns in Corrosive Environments

张一鑫

(西安交通工程学院, 西安 710300)

摘要: 为研究腐蚀环境下钢结构局部点蚀对抗震性能的影响, 选择了 5 根 H 型 Q235 钢柱并对其不同位置进行了相同程度的点蚀, 采用低周反复加载试验, 评估不同位置局部点蚀对钢结构抗震性能的影响, 并通过数值模拟, 分析了点蚀损伤对钢柱的荷载和耗能能力的影响规律。结果表明: 局部点蚀会显著降低钢柱的峰值荷载、刚度以及承载力; 纯弯段点蚀对钢柱抗震性能的削弱程度远高于弯剪段点蚀, 且右半截面点蚀后钢柱的抗震性能降低程度同样高于下半截面点蚀; 针对局部点蚀钢柱提出修复方法, 包括表面处理、补强加固等, 为腐蚀环境下钢结构建筑的抗震性能研究提供了借鉴。

关键词: H 型钢柱; 局部点蚀; 抗震性能

中图分类号: TU391.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0097-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.017

ZHANG Yixin

(Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710300, China)

Abstract: To investigate the impact of localized pitting corrosion on seismic performance of steel structures in corrosive environments, five H-shaped Q235 steel columns were selected and subjected to varying degrees of pitting corrosion at same locations. Based on low cycle repeated loading tests, the influence of localized pitting corrosion at different locations on the seismic performance of steel structures was evaluated, and the impact of pitting damage on the load and energy dissipation capacity of steel columns was analyzed through numerical simulation. The results show that localized pitting corrosion significantly reduces the peak load, stiffness, and bearing capacity of steel columns. The seismic performance degradation caused by pitting in pure bending regions is far more severe than that in bending-shear regions. Additionally, pitting on the right half of the cross-section leads to a greater reduction in seismic performance compared to pitting on the lower half. To address localized pitting, repair methods such as surface treatment and reinforcement strengthening are proposed, offering practical references for the maintenance and rehabilitation of steel structures in corrosive environments.

Key words: H-shaped steel column; local pitting corrosion; seismic performance

0 引言

随着国家工业化的迅猛发展, 钢结构凭借轻质高强、抗震性能好、施工速度快、可回收利用等优势, 已广泛应用于建筑领域^[1]。然而, 在诸多工业建筑、海洋工程以及一些长期处于恶劣环境的钢结构构建(构)筑物中, 钢结构不可避免地会受到腐蚀

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划项目 (23JK0532)。

作者简介: 张一鑫 (1994—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向:

建筑结构抗震、绿色建筑。

收稿日期: 2024-12-19

建筑结构

作用,导致结构可靠性下降,对人们的生命安全造成威胁^[2-3]。

钢结构的腐蚀可分为均匀腐蚀和局部点蚀。局部点蚀指只发生在金属表面的局部,其危害性比均匀腐蚀严重得多,往往发生于钢柱的柱脚等局部位置^[3-4]。这种局部点蚀会导致钢柱截面削弱,从而影响其承载能力和抗震能力。目前,国内外学者就钢结构腐蚀已开展了许多研究。Hu 等^[5]、Zou 等^[6]通过研究蚀坑对钢材的影响,发现钢材的强度和延性随蚀坑密集程度和深度增加而显著降低;阮建等^[7]利用 Abaqus 有限元软件研究了局部腐蚀作用对钢结构承载性能的影响,结果发现局部腐蚀作用易导致钢柱出现应力集中现象,从而削弱其抗震性能;赵炳震等^[8]结合了有限元方法研究点蚀对钢结构性能产生的影响,提出的理论公式可较精确地预测点蚀后钢结构的承载力;张志强^[9]为了增强钢结构在大气腐蚀环境下的抗腐蚀能力,研发了石墨烯改性复合涂层,结果表明使用该防腐涂层的钢结构在一年半后无任何腐蚀现象,防腐保护时间相较传统的保护涂层提升了 3 倍;Wysokowski^[10]评估了腐蚀对在役铁路和公路钢桥结构疲劳承载力的影响,建立了一个大气腐蚀模拟设施进行测试,发现两种桥梁钢的疲劳极限均显著降低,最高可达初始状态的 50%。而对钢结构腐蚀防护措施,目前有在钢结构混凝土中添加粉煤灰、矿物掺合料^[11]等,或对钢结构涂防腐涂层,包括环氧涂层^[12],也可添加苯骈三唑^[13]、烷基氨基醇^[14]等防腐材料对钢结构进行防腐保护。除了采取以上防腐措施外,也可以采取一些技术手段直接对钢结构进行防腐,如热浸锌防腐技术和阴极保护技术等^[15]。何童童^[16]针对桥梁结构设计中的钢结构腐蚀防护,提出了涂防腐层、阴极保护和优化设计等措施,使钢结构长期保持优越的耐久性能。综上,多数学者的研究集中于均匀腐蚀对钢结构性能的影响,而对于钢结构的局部点蚀,尤其是在特殊环境下的局部点蚀对钢结构抗震性能的影响和修复措施鲜有研究。

为此,选择某桥梁工程用的 H 型钢柱作为研究对象,对钢柱的不同位置进行局部点蚀,采用低周反复加载试验,探究腐蚀环境下的点蚀作用对钢结构抗震性能的影响,并提出相应的修复策略,研究

结果为钢结构的点蚀防腐提供借鉴意义。

1 试验概况

1.1 工程概况

某大型桥梁工程采用 H 型 Q235 钢柱作为构件,截面尺寸为宽翼缘 HW 250 mm × 250 mm × 9 mm × 14 mm。工程所在地环境潮湿且含有腐蚀性介质(氯离子、二氧化硫等),H 型钢柱表面的防护层会逐渐被破坏,形成局部的点蚀坑。

1.2 试验设计

1.2.1 锈蚀试验

采用室内快速电化学腐蚀的方式对 H 型钢柱的纵向方向及横截面的不同位置进行点蚀,依次为纯弯段下半截面(Ⅰ)、纯弯段右半截面(Ⅱ)、弯剪段下半截面(Ⅲ)、弯剪段右半截面(Ⅳ)、未点蚀(对照组(Ⅴ)),点蚀数量为 1,腐蚀率均为 10%,点蚀具体位置如图 1 所示。

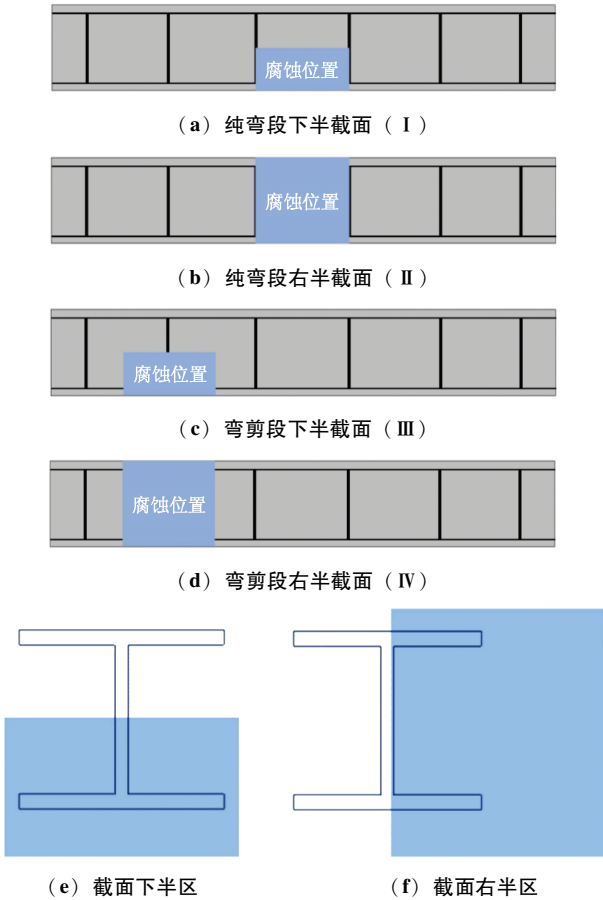


图 1 点蚀示意图
Fig.1 Schematic diagram of pitting corrosion

1.2.2 抗震试验

利用“横柱竖梁”的模式加载，柱的两端采用铰链连接，高度为 3 m；梁端施加低周循环荷载，半跨梁的长度为 3.5 m。采用位移控制的加载方法，通过 T 形试样的位移角控制，分为 ± 0.02 、 ± 0.04 、 ± 0.06 rad，每段需重复加载 2 次；若试样尚未达到最大荷载，则继续以 ± 0.06 rad 加载，直至试样的荷载值降至最大荷载值的 95% 以下，或无法继续承载为止。试验装置布置如图 2 所示。

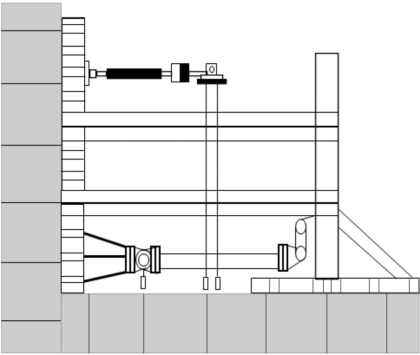


图 2 装置布置
Fig. 2 Device layout

1.3 局部点蚀模型

利用数值模拟软件构建点蚀 H 型钢柱损伤模型，选择圆柱形作为点蚀坑，直径为 20~60 mm，点蚀坑深度为板厚的 0.2~1.0 倍，钢柱不同位置的点蚀损伤模型如图 3 所示。

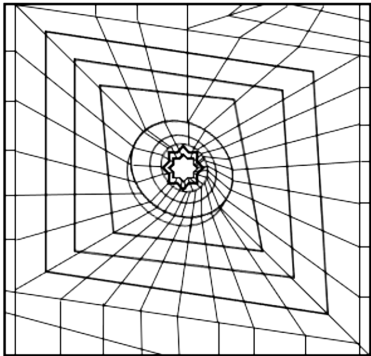


图 3 点蚀区域模型
Fig. 3 Model of pitting corrosion area

2 试验结果与分析

2.1 骨架曲线

点蚀前后的 H 型钢柱荷载 - 位移骨架曲线如图 4 所示。各钢柱的荷载随位移变化的趋势均一致，均随位移的增加荷载呈线性增大而后降低，且曲线斜

率同样呈先增大后再减小的趋势。施加位移初期，荷载增大速率较缓；后期随着荷载迅速增大，直至钢柱破坏。各钢柱的荷载峰值按从大到小排序为：未点蚀（V）>弯剪段下半截面点蚀（Ⅲ）>弯剪段右半截面点蚀（Ⅳ）>纯弯段下半截面点蚀（Ⅰ）>纯弯段右半截面点蚀（Ⅱ），表明未点蚀的钢柱承载能力最强，弯剪段点蚀的钢柱承载能力要高于纯弯段点蚀的钢柱，且抗震能力逐渐削弱。这是因为钢柱被点蚀后，试件表面的点蚀坑会产生应力集中，导致点蚀钢柱提前进入塑性变形，加速材料劣化，影响了钢柱在地震作用下的变形响应和内力分布。

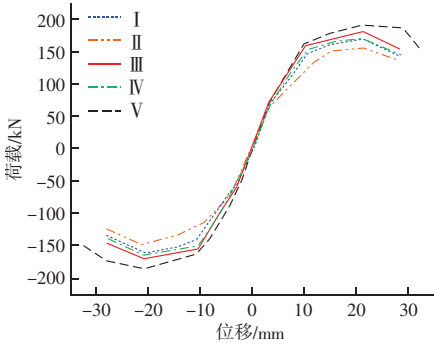


图 4 各钢柱荷载 - 位移曲线
Fig. 4 Load displacement curves of each steel column

2.2 承载力

通过点蚀前后钢柱每级循环的最大荷载与次数关系来评估不同点蚀位置对钢柱承载力造成的影响，如图 5 所示。

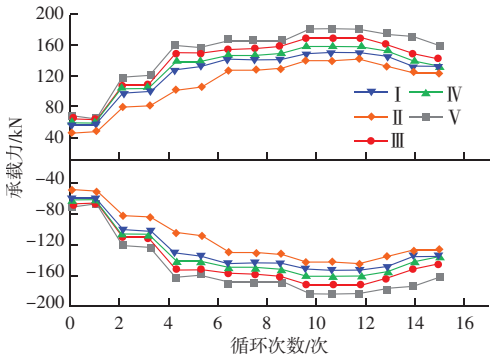


图 5 各钢柱承载力 - 循环次数
Fig. 5 Load bearing capacity cycle number diagram of each steel column

随着循环加载次数的增加，各钢柱的承载力呈先增大后减小的趋势。具体来说，在加载前期（循环次数不超过 12 次），各钢柱的承载力逐渐增大；待循环次数继续增加后，点蚀前后各钢柱的承载力

建筑结构

出现了衰减的迹象并逐渐趋于平稳。对比不同点蚀状态下的钢柱，未腐蚀状态下的钢柱承载力最高，承载力从大到小依次排序为未点蚀（V）>弯剪段下半截面点蚀（Ⅲ）>弯剪段右半截面点蚀（Ⅳ）>纯弯段下半截面点蚀（Ⅰ）>纯弯段右半截面点蚀（Ⅱ），原因在于不同的点蚀位置导致了不同钢柱出现了不同的性能劣化，其中纯弯段右半截面（Ⅱ）的腐蚀对钢柱承载力的削弱最为严重。

2.3 刚度退化

各钢柱的刚度随循环次数变化的规律如图 6 所示。在屈服前，各点蚀状态下钢柱的残余变形均很小，未出现明显的刚度退化迹象；屈服后，位移的增加导致钢柱刚度退化现象显著，并逐渐趋于稳定。随着循环次数增加，各钢柱的刚度呈阶梯式下降，表明刚度不断退化；而当循环次数超过 13 次后，各钢柱刚度的退化现象趋向于稳定。将不同点蚀状态下钢柱的刚度从大到小进行排列：未点蚀（V）>弯剪段下半截面点蚀（Ⅲ）>弯剪段右半截面点蚀（Ⅳ）>纯弯段下半截面点蚀（Ⅰ）>纯弯段右半截面点蚀（Ⅱ），这说明将钢柱的右半截面进行点蚀对刚度产生的影响要大于将钢柱下半截面进行点蚀造成的影响。原因在于当 H 型钢柱的右半截面被腐蚀时，其截面形状会发生显著变化，导致截面面积减小，且可能产生应力集中现象；相比之下，如果腐蚀发生在下半截面，虽同样会导致截面面积减小，但因 H 型钢柱翼缘与腹板独特的分布构造，下半截面的腐蚀对整体刚度的影响相对较小。

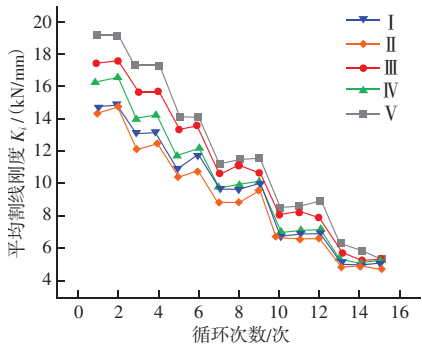


图 6 各钢柱刚度 - 循环次数

Fig. 6 Stiffness cycle number diagram of each steel column

2.4 滞回耗能

各钢柱的累积滞回耗能与循环次数关系如图 7 所示。随着循环次数增加，各钢柱的累积滞回耗能不

断增大，具体表现为循环次数低于 8 次时，累积滞回耗能增速缓慢，而当循环次数继续增大后，耗能增速变大，且各钢柱的滞回耗能差距越来越明显。不同点蚀状态下钢柱的滞回耗能从大到小排序为：未点蚀（V）>弯剪段下半截面点蚀（Ⅲ）>弯剪段右半截面点蚀（Ⅳ）>纯弯段下半截面点蚀（Ⅰ）>纯弯段右半截面点蚀（Ⅱ）。这是因为在纯弯段的右半截面点蚀（Ⅱ）使钢柱的质量损失率达到最大，该区域点蚀引发的应力集中效应最为强烈，使钢柱过早进入屈服状态，进而产生不均匀的塑性变形，最终导致钢柱的劣化速度加快。

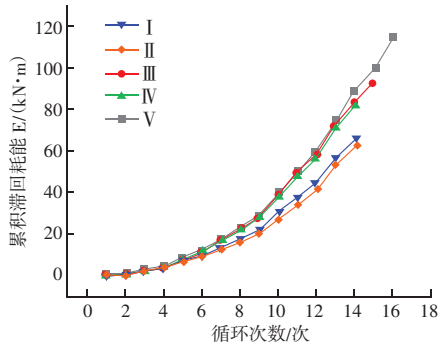


图 7 各钢柱累积滞回耗能 - 循环次数

Fig. 7 Cumulative hysteresis energy consumption cycle number diagram of each steel column

3 数值模拟结果分析

3.1 骨架位移曲线模拟结果

骨架位移曲线模拟结果如图 8 所示。不同位置点蚀后的荷载 - 位移曲线数值模拟结果与原曲线结果较为接近。特别是在位移为 -5 ~ +5 mm 期间，模拟曲线和原曲线几乎完全重合。由于各钢柱的点蚀率相同，而点蚀位置不同，所产生的荷载也有所不同。需

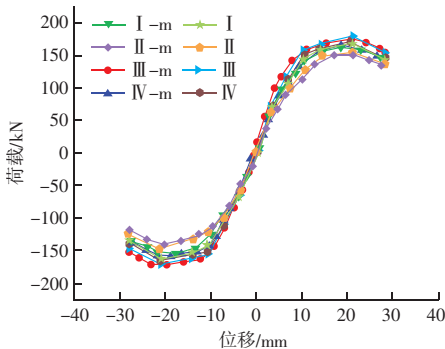


图 8 骨架位移曲线模拟结果

Fig. 8 Simulation results of skeleton displacement curve

要注意的是，数值模拟后各点蚀状态下的钢柱荷载峰值略低于原荷载峰值。

3.2 滞回耗能模拟结果

滞回耗能模拟结果如图 9 所示。点蚀后的累积滞回耗能试验曲线与数值模拟结果的曲线相接近，误差较小，但模拟结果的曲线更加饱满，证明了模拟结果的准确性和可靠性，说明该模型能够较好地模拟 H 型 Q235 钢柱局部腐蚀后经低周反复作用下的抗震性能。

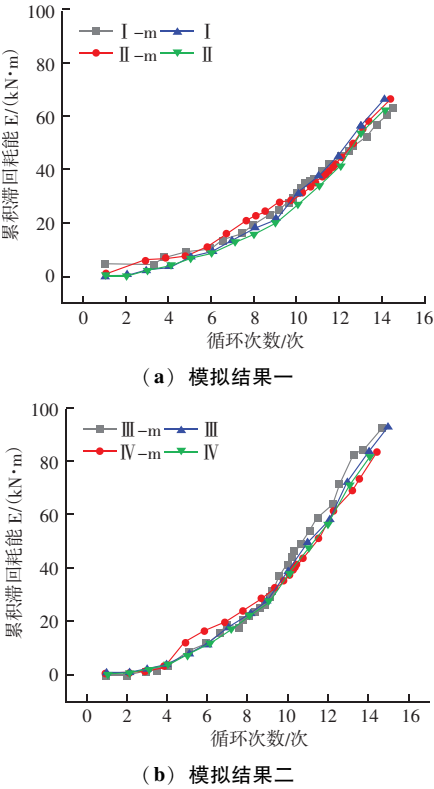


图 9 滞回耗能模拟结果
Fig. 9 Simulation results of hysteresis energy dissipation

4 修复策略

4.1 表面处理修复

采用喷砂、打磨等机械手段，去除钢柱表面及点蚀坑内锈蚀产物与腐蚀物，直至呈现金属光泽。针对较深点蚀坑，用手工或小型电动工具精细处理。在处理后的破损处依次涂抹一层界面剂与环氧胶泥，再加入水泥砂浆修补。在清理好的表面涂刷如环氧富锌漆、聚氨酯漆这类耐腐蚀性佳、附着力强的防腐涂层，一般需多层涂刷，每层涂刷需间隔一定时间，确保涂层厚度均匀，可有效防止腐蚀介质侵蚀。

4.2 补强加固修复

- (1) 粘贴钢板加固：针对因局部点蚀严重致使承载能力与刚度大幅下降的钢柱，可依其受力及点蚀状况，设计适配的钢板尺寸与粘贴位置。采用高强度结构胶，将钢板粘贴于钢柱受拉或受压侧，协同原钢柱工作，提升承载与刚度。
- (2) 增设支撑加固：在钢柱周边合理增设角钢、钢管等支撑构件，依据结构布局与钢柱实际情况设计支撑布置，构建稳定支撑体系，降低钢柱地震受力，增强整体稳定性，且支撑与钢柱连接要牢固，保障力的有效传递。

5 结论

通过室内快速电化学腐蚀的手段对 H 型 Q235 钢柱的不同部位进行局部点蚀，以低周反复加载试验，探究点蚀作用对钢柱抗震性能的影响，并提出相应的修复策略，得到主要结论如下：

- (1) 局部点蚀会导致钢柱的峰值荷载、承载力和刚度退化，对其抗震性能产生不利影响。随着循环次数增大，钢柱的承载力和累积滞回耗能总体呈增大趋势，而刚度却减小。
- (2) 纯弯段点蚀对钢柱抗震性能的削弱程度高于弯剪段点蚀，且右半截面点蚀较下半截面点蚀抗震能力下降得更快。
- (3) 数值模拟结果与试验结果相接近，而数值模拟的结果更加饱满，证明了模型的可行性。
- (4) 在实际工程中，应加强对钢结构建筑的定期检测和维护，及时发现和处理钢柱的腐蚀问题，采用合理的修复措施，确保结构在地震等灾害作用下的安全性和可靠性，延长钢结构建筑的使用寿命。

参 考 文 献

[1] 梁勇, 王进军, 陈波, 等. 大跨度桁架式钢结构管道支架极限强度分析方法 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (3): 24-28, 32.

[2] 赵峥. 钢结构梁柱加固节点框架损伤演化过程数值模拟分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 125-130.

[3] 李竹青, 钱若霖. 钢结构人行天桥主梁参数和约束条件合理性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 112-116.

[4] 朱榆萍. 煤炭行业钢结构腐蚀研究与分析 [J]. 价值工程, 2024, 43 (22): 19-22.

(下转第 123 页)

- (16): 2507–2517.
- [15] CAO C Y, LIU M, WANG Q Y, et al. Reliability assessment under combinations of snow load effect: the lightweight steel structures with gabled frames and components designs [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 1799 (166–169).
- [16] TOGAN V, DURMAZ M, DALOLU A. Optimization of roof trusses under the snow loads given in turkish code and the gis-based snow load map [J]. *Engineering structures*, 2022 (11): 62.
- [17] 孙绪杰, 王凤来, 张厚, 等. 改变结构体系加固方法的应用 [J]. *建筑结构*, 2013, 43 (14): 87–89, 99.
- [18] 谢阳, 戴阳, 王永泉. 门式刚架钢结构厂房新型加固技术的应用 [J]. *江苏建筑*, 2019 (4): 57–60.
- [19] 赵更歧, 倪克, 王庆辉, 等. 粘钢加固门式刚架 Γ 型梁柱节点锚固方法研究 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2021, 43 (2): 130–136.
- [20] 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范: GB 51022—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [21] Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1 – 3: general actions – Snow loads – National annex to NF EN 1991 – 1 – 3: 2004 – General actions – Snow loads: NF P06 – 113 – 1/NA/A1 – 2011 [S]. The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.
- [22] 倪桂和. 基于荷载规范的轻钢结构雪致破坏原因研究 [D]. 广州: 广州大学, 2017.

(上接第 78 页)

- [9] 高旭, 郭建波, 晏鄂川. 考虑止水帷幕的深基坑降水预测解析计算 [J]. *岩土力学*, 2018, 39 (4): 1431–1439.
- [10] 张军, 冯佳蕊, 翟少磊. 洞庭湖大桥锚定基坑降水及对地连墙影响分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14 (增刊 1): 256–262.
- [11] 马玉飞, 刘焕玉, 熊辉, 等. 深基坑开挖降水对周边环境的影响分析 [J]. *水利技术监督*, 2022 (7): 250–255.
- [12] 魏嵩琦. 兰州地铁车站深基坑开挖及降水对周边管道影响的数值分析研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [13] 周勇, 魏嵩琦, 朱彦鹏. 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36 (增刊 2): 495–499.
- [14] 朱大鹏, 谢昌建, 杨阳. 深基坑开挖及降水诱发邻近建筑物变形破坏机理及影响因素 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (3): 1166–1172.
- [15] 李曙光, 吴应明, 王洪坤. 富水软土地区不同降水开挖工况下深基坑变形研究 [J]. *施工技术 (中英文)*, 2022, 51 (1): 26–31.

(上接第 101 页)

- [5] HU J Z, LI S, ZHANG J, et al. Pitting corrosion initiated by $\text{SiO}_2\text{-MnO-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ -based inclusions in a 304 stainless steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31 (9): 2281–2293.
- [6] ZOU J Y, WANG Z W, MA Y L, et al. Role of gradient nano-structured surface in collapsed pitting corrosion on AISI 316L stainless steel during tribocorrosion [J]. *Corrosion Science*, 2022, 197: 110043.
- [7] 阮建, 王欣怡, 刘宏洲, 等. 基于均匀和局部腐蚀模型的海上风电单桩基础承载特性 [J]. *中国海洋平台*, 2023, 38 (4): 42–47.
- [8] 赵炳震, 杜颜胜, 李存良. 随机锈蚀 H 型钢柱偏压承载力分析 [J]. *结构工程师*, 2024, 40 (2): 33–41.
- [9] 张志强. 石墨烯改性复合涂层体系制备及其在环氧树脂生产装置钢结构设施的防腐蚀应用 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [10] WYSOKOWSKI A. The impact of corrosion on the fatigue strength of steel used in bridge structures [J]. *Ochrona przed Korozją*, 2024, 67 (1): 2–8.
- [11] ALMASHAKBEHY Y, SALEH E., AL-AKHARS N M, et al. Evaluation of half-cell potential measurements for reinforced concrete corrosion, *Coatings*, 2022, 12 (7): 975.
- [12] 张恩旺, 潘金龙, 梁鸿宇, 等. 钢结构的腐蚀及防腐措施的研究 [J]. *安徽建筑*, 2022, 29 (6): 70–71.
- [13] 刘新宇. 加装电梯钢结构防腐涂装的技术 [J]. *全面腐蚀控制*, 2024, 38 (10): 197–199.
- [14] 石廷阅, 杨晓红, 程馨, 等. 钢结构表面光电阴极保护材料及其光阳极最新研究进展 [J]. *表面技术*, 2024, 53 (19): 27–39.
- [15] 吴斌, 王晓天. 钢结构建筑锈蚀及防腐处理的技术研究 [J]. *全面腐蚀控制*, 2024, 38 (11): 93–95.
- [16] 何童童. 钢结构桥梁设计中的耐久性与腐蚀防护措施 [J]. *新城建科技*, 2024, 33 (3): 86–88.