

高盐高湿环境中钢腐蚀损伤对受力性能的影响

李佑榜

(江西赣江新区鸿雁人力资源服务有限公司, 江西 赣江新区 330029)

【摘要】 钢结构广泛用于关键基础设施, 但即便采取合理的防护措施, 也难以避免在恶劣环境中遭遇腐蚀损伤, 导致结构或构件的安全性降低和使用寿命缩短。为探讨高盐高湿环境下钢材表面腐蚀对其单向静拉伸荷载下的力学性能的影响, 本研究通过高盐分条件下的湿热试验, 系统分析了不同腐蚀程度的钢材表面对钢构件受力性能的影响。研究表明, 钢材的腐蚀过程从轻微的点蚀锈斑开始, 发展至显著的局部点蚀, 最终形成全面腐蚀与点蚀的结合, 且整个过程中点蚀系数一直维持在较高水平。此外, 当平均腐蚀深度低于 $155\mu\text{m}$ 时, 钢材的主要力学特征参数保持稳定, 但随着点蚀系数的增加, 其断后总伸长率首先出现下降。在遭遇较严重腐蚀 (平均腐蚀深度 $350\mu\text{m}$, 点蚀系数1.93) 的情况下, 钢材的塑性特征显著降低, 屈服点延伸率和断后总伸长率分别下降了17.56%和23.47%, 然而这种腐蚀程度对其承载力的影响却不明显。

【关键词】 腐蚀损伤; 高盐高湿; 全面腐蚀; 点蚀; 受力性能

引言

随着国民经济的增长, 建筑产业的不断扩大, 钢结构因其具有良好的性能而被广泛应用于建筑物如桥梁、油气管道及近海工程等建设中^[1]。其中, 对于长期大气暴露于恶劣海洋环境中的钢结构 (如跨海大桥), 即便采取了有效的涂层防护措施, 也无法避免其在服役期间的局部起泡、成片脱落直至锈蚀防护丧失殆尽, 造成这些钢构件面临着不同程度的腐蚀损伤, 从而削弱钢构件的有效承载面积, 穿孔甚至断裂, 缩短其使用寿命^{[2]-[3]}。这不仅造成昂贵的直接或间接经济损失, 还严重影响在役结构的安全性和可靠性。

近年来, 相关学者已经对锈蚀钢构件的锈蚀形态表征、受力性能以及寿命预测展开了一定的实验研究和理论分析。文献研究表明, 受拉开裂或受压局部屈曲往往出现在腐蚀钢构件的最薄弱面, 而在结构设计过程中, 基于均匀腐蚀的假设展开理论计算时, 往往高估结构或构件的承载能力, 存在不可忽视的安全隐患。Kioumars等基于蒙特卡洛模拟估计失效概率, 且考虑了材料属性、几何尺寸、承载方式以及腐蚀损伤的不确定性, 认为当点蚀存在时的构件失效概率比仅考虑均匀腐蚀的腐蚀形态条件下增加了若干数量级。徐善华等^[11]通过室内盐雾腐蚀促进试验, 对不同腐蚀程度的Q235钢板进行单轴拉伸试验, 认为随着锈蚀程度的增加, 钢材的弹性模量和屈服强度均下降, 但腐蚀后期的下降速率显著低于腐蚀初期。而Qin等通过实验方法与基于3D表面形貌数值模拟相结合的方式, 研究了腐蚀钢板力学性能的退化规律。结果表明, 当锈蚀质量损失率

高于15%时, 钢材的屈服平台、屈服强度、极限强度、断裂强度以及延性均显著下降; 反之, 除延性外, 其它各项力学性能指标基本不受影响。

然而, 上述研究的腐蚀钢材制备, 主要仍采用机械加工的方式模拟不同尺寸、数量的腐蚀锈坑, 或通过室内循环盐雾腐蚀试验的方式得到。然而, 由于服役环境腐蚀因子的复杂性 (例如: 温度、湿度、降雨量、飞来海盐量等), 以及结构或构件布置的多样性 (例如: 水平构件与垂直构件, 朝阳面与背阳面), 有必要考虑其它实际钢构件所暴露的恶劣海洋环境中, 钢材表面的腐蚀形态及损伤程度对力学性能的影响。

为此, 本文以大跨钢桥主梁下翼缘的背阳面的腐蚀案例为主要研究背景, 开展了钢材在高盐条件下的湿热腐蚀加速试验, 由此探讨了钢材经历不同腐蚀损失程度, 对其单向静拉伸荷载下的力学性能的影响。

一、试验概况

(一) 试件设计

参考我国《金属材料 拉伸试验》(GB/T 228.1-2021) 的试件设计规范要求, 本文所用材料为普通低碳钢, 成分的质量分数如下所示。试件类型为9mm厚的板型, 总长度为400mm, 平行长度及其对应的原始宽度分别为200mm和40mm。

钢材成分的质量分数百分比:

Fe : 98.06% C: 0.16% Si: 0.34% Mn: 1.42%

P: 0.014% S: 0.004%

为探讨不同腐蚀程度对试件轴向受力性能的影响

响, 本文共设计了四组腐蚀试件, 分别对应腐蚀时间为0h、360h、720h和1440h。试件编号如下所示, 其中字母NS和CS分别表示无腐蚀钢和有腐蚀钢, 随后的数字表示腐蚀时间。因此, 不同的腐蚀试件则依次对应了不同的腐蚀程度。每组试件重复3次, 以减少随机误差, 提高试验的准确性和可靠性。

以下试件皆采用喷砂处理表面, 并采用湿热试验进行腐蚀, 腐蚀程度如下(腐蚀程度/h):

NS: 无腐蚀 CS-360: 360
CS-720: 720 CS-1440: 1440

(二) 湿热腐蚀试验

结合工程应用背景, 大跨钢桥主梁下翼缘的背阳面, 该部分区域没有明显的干湿循环以及雨水冲洗效果, 导致钢表面能够积聚大量大气气溶胶的海盐和冬季常用的除冰盐, 同时长期暴露在高温高湿的海洋环境中, 使得钢材易出现严重的点蚀现象。

为了模拟这一实际现象, 首先, 将硅氧树脂涂抹在非腐蚀暴露区域, 避免试件在平行长度以外的区域发生腐蚀而影响试验精确度; 其次, 配置10%质量分数的盐水, 利用超声波盐雾仪将其喷雾持续20min, 使得这些细腻的盐雾尽量均匀且大量的沉积在钢表面; 最后, 将所有试件放置湿热试验箱中, 调节环境温度和

相对湿度分别为35℃和90%, 直至腐蚀360h、720h以及1440h。相应的试件取出后, 立刻放置烘箱中烘干并储存至真空干燥箱中, 直至加载前期。

(三) 加载方案

本文通过万能拉力试验机, 两端夹持长度均为40mm, 设置以2.0mm/min的恒定速率持续单轴拉伸加载, 直至钢板发生断裂。试验过程中, 在标距长度上布置了轴向位移计, 以测试钢板的标段范围内的整体位移; 此外, 在试件中央位置粘贴了双轴应变片, 以记录试件的应力-应变曲线。

二、腐蚀钢表面表征

(一) 腐蚀形态

经湿热加速试验得到的4种不同腐蚀程度的钢表面腐蚀形态, 如图1所示。腐蚀360h后, 表面覆盖了一层相对完整的薄锈层, 其中包括许多锈斑。随着暴露时间的增长(720h), 锈斑之间逐渐接壤而导致数量减少, 但其斑点面积增大, 锈蚀的颜色由黄色变为深棕色。腐蚀1440h后, 锈蚀的外观逐渐趋近于均匀腐蚀的特征, 但连续黑色锈斑数量更多。通过微观观察发现, 这样的锈层呈现出明显的多孔性和粗大裂纹的特点, 导致环境中的腐蚀介质能够轻松抵达钢基材, 故该类锈层几乎不具备腐蚀防护

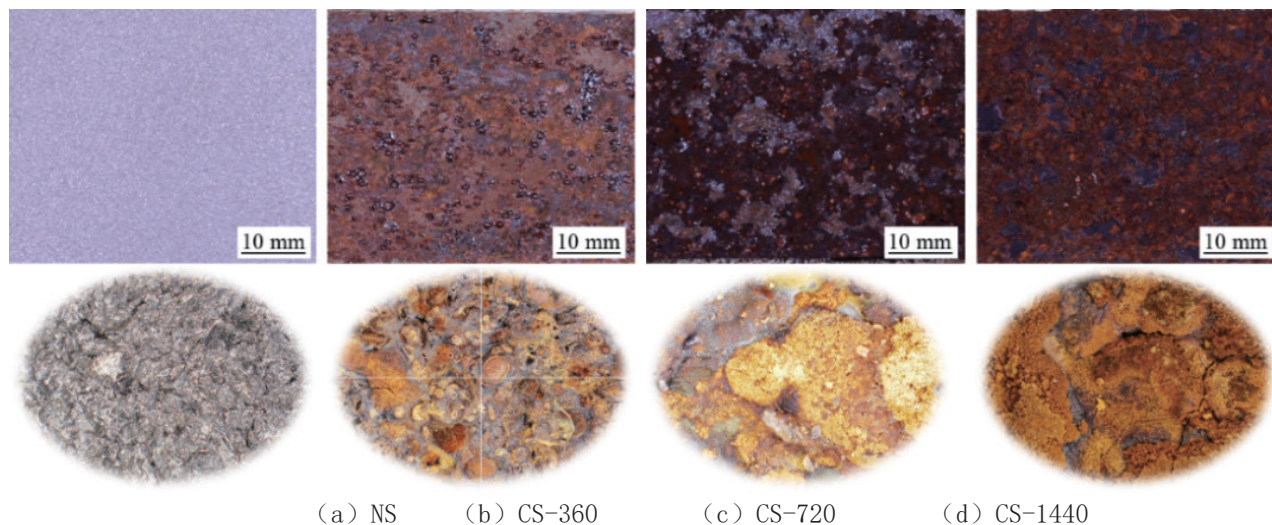


图1 钢表面腐蚀形态

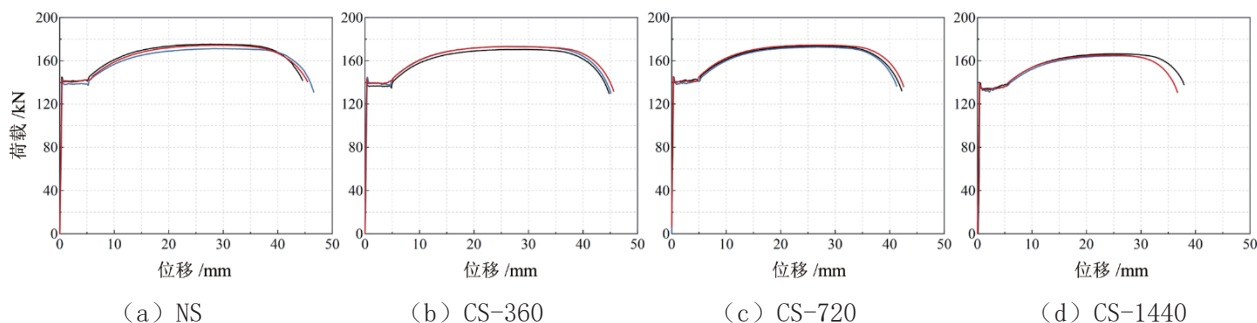


图2 荷载-位移曲线

表 3 试件参数

试件编号	屈服强度 P_y /kN	屈服点延伸率 A_0 /mm	极限强度 P_u /kN	断后总伸长率 A /%
NS	143.67±2.08	4.84±0.39	173.67±3.53	22.71±0.65
CS-360	143.42±2.84	4.49±0.42	172.32±2.53	22.53±0.42
CS-720	145.24±0.60	4.60±0.27	173.60±1.46	20.95±1.48
CS-1440	139.21±1.48	3.99±0.41	165.42±1.51	17.38±3.66

性。这也在一定程度上，解释了实际高盐高湿环境中钢桥下翼缘背阳面的钢材表面腐蚀速率居高不下的原因。

（二）腐蚀深度

腐蚀性指标的确定是评价腐蚀钢板对应不同腐蚀程度的量化基础。为此，本文通过规范规定的酸洗除锈的方式，可以得到腐蚀后洁净的钢基体，随后利用非接触3D扫描仪能够获取其表面形貌。然后，以平均腐蚀深度、最大腐蚀深度和点蚀系数作为腐蚀评价指标，并基于表面形貌的数据，依次计算各试验组对应的腐蚀结果。试件CS-360、CS-720和CS-1440的平均腐蚀深度分别为133 μm 、155 μm 和350 μm ，最大腐蚀深度分别为303 μm 、597 μm 和676 μm ，而相应的点蚀系数分别为2.28、3.86和1.93。由此可知，在该腐蚀环境条件下，腐蚀初期主要以点蚀为主，此时平均腐蚀深度基本不发生变化，但点蚀系数增加显著，而在腐蚀后期，钢表面腐蚀将趋向于均匀腐蚀。值得注意的是，在实际环境中由于气溶胶中的海盐是持续性附着在钢表面，即不断有新的氯离子向钢基体转移，由此可能导致点蚀系数会持续增加。

三、受力性能分析

各组试件的单轴拉伸试验的荷载-位移曲线，如图2所示，且在此过程中对应的特征力学参数的平均值及其标准差，汇总见表3。整体而言，腐蚀前后试件的受力性能仍可分为四个阶段：弹性阶段、屈服阶段、强化阶段以及颈缩阶段。腐蚀前期，与未腐蚀试件相比，试件CS-360的各项特征力学参数基本保持稳定，这主要是因为腐蚀前期还是以轻微的点蚀为主，不论是点蚀深度亦或是锈蚀面积损失都基本可以忽略，即腐蚀前后的钢板表面形貌基本不变。随着腐蚀程度的增加，试件CS-720的腐蚀坑继续迅速沿着深度（板厚）方向发展，断后总伸长率降低了7.75%，而其它力学参数下降不足5%，基本可以忽略。这表明，在平均腐蚀深度基本不变，而点蚀率很高时，腐蚀的影响主要体现在试件的断后总伸长率。

当钢材遭遇相对严重腐蚀后，即试件CS-1440，对应的屈服平台（或屈服点延伸率）由初始的

4.84mm降至3.99mm，缩短了17.56%，断后总伸长率由初始的22.71mm降至17.38mm，腐蚀钢材的塑性变形能力降低了23.47%；而对于承载力而言，试件的屈服强度和极限强度亦开始呈现下降的趋势，分别减小了3.10%和4.75%，但这与变形能力的变化相比仍然影响甚微。这表明，腐蚀后期的锈坑沿宽度和深度方向发展后，导致试件沿长度方向范围内开始出现相对明显的薄弱截面，一方面是横截面实际面积的削弱，另一方面归因于点蚀引起的应力集中现象，使得最大锈坑深度附近的应力成倍发展，塑性呈降低的趋势。

四、结论

（一）钢材表面在高盐分条件下的湿热试验，表现腐蚀由轻微的点蚀锈斑，到明显局部点蚀出现，至全面腐蚀与点蚀相结合，且点蚀系数始终处于较高水平。

（二）当平均腐蚀深度低于155 μm 时，试件的各项力学参数基本保持稳定，但当点蚀系数增加时，试件的断后总伸长率先呈降低的趋势。

（三）当遭遇相对严重腐蚀时，对应平均腐蚀深度为350 μm ，点蚀系数为1.93，试件的塑性特征受到显著影响，屈服点延伸率和断后总伸长率分别降低了17.56%和23.47%，但腐蚀对其承载力的影响甚微。

参考文献：

- [1]侯保荣，张盾，王鹏.海洋腐蚀防护的现状与未来[J].中国科学院院刊，2016，31（12）：1326-1331.
- [2]徐善华，余洁，聂彪.锈损冷成型钢表面形貌及力学性能[J].湖南大学学报（自然科学版），2021，48（1）：163-172.
- [3]金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法：GB/T228.1-2021[S].北京：中国标准出版社，2021.

作者简介：

李佑榜（1994年4月-），男，汉族，江西省丰城市，工作单位：江西赣江新区鸿雁人力资源服务有限公司，无职称，大学本科，建筑工程管理。