

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.042



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



中性盐雾环境下 Q460NH 与 Q460 钢的力学性能退化规律

熊刚^{a,b}, 郑奇松^a, 石宇^{a,b}, 张小月^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室 重庆 400045)

摘要: 高强度耐候钢强度高、耐腐蚀性能突出,广泛应用于桥梁、建筑等工程结构。中国滨海及山区环境具有高湿度、高盐雾等特点,该区域服役钢结构面临严重腐蚀危害,而针对高强度耐候钢在长期腐蚀条件下的力学性能退化规律及其本构模型的研究仍不充分。以高强度耐候钢 Q460NH 与同强度等级低合金高强度钢 Q460 为研究对象,对 36 个拉伸试件开展最长为期 180 d 的中性盐雾加速腐蚀试验。腐蚀试验结果表明,相同腐蚀时间下, Q460 的腐蚀质量损失率普遍高于 Q460NH 钢材,并表现出更为严重的损伤形貌;单向拉伸试验结果表明,短期腐蚀(<60 d)下,断口以“平齐状”或“弧形”为主;随腐蚀时间延长至 60 d 及以上,断裂模式向“斜向”或“锯齿状”破坏转变;两种钢材关键力学性能指标的折减系数均随腐蚀质量损失率 η 的增大呈线性降低趋势,其中断后伸长率对腐蚀最为敏感。基于修正的 Ramberg-Osgood 两阶段非线性本构模型,建立了第 2 阶段硬化指数 m 与 η 的线性回归关系。

关键词: 高强度耐候钢; 中性盐雾; 力学性能退化; 本构模型

中图分类号: TU511.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-14

Mechanical property degradation of Q460NH and Q460 steels in neutral salt spray environment

XIONG Gang^{a,b}, ZHENG Qisong^a, SHI Yu^{a,b}, ZHANG Xiaoyue^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: High-strength weathering steel (HSWS) is widely utilized in engineering structures such as bridges and buildings due to its high strength and superior corrosion resistance. Coastal and mountainous regions in China are characterized by high humidity and salt spray, posing severe corrosion hazards to steel structures in service. However, research regarding the mechanical property degradation and constitutive models of HSWS under long-term corrosive conditions remains insufficient. In this study, high-strength weathering steel Q460NH and low-alloy high-strength steel Q460 of the same strength grade were selected as research objects. Accelerated neutral salt spray (NSS) corrosion tests were conducted on 36 tensile specimens for a duration of up to 180

收稿日期: 2026-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(52078080)

作者简介: 熊刚(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构研究, E-mail: xionggang76@126.com。

张小月(通信作者), 女, 副教授, 博士生导师, E-mail: xiaoyuezhang@cqu.edu.cn。

Received: 2026-03-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52078080)

Author brief: XIONG Gang (1976-), PhD, professor, main research interest: steel structure, E-mail: xionggang76@126.com.

ZHANG Xiaoyue (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: xiaoyuezhang@cqu.edu.cn.

days. Corrosion test results indicate that, under identical corrosion durations, Q460 exhibits a consistently higher corrosion mass loss rate than Q460NH steel, while displaying more severe damage morphology. The uniaxial tensile test results demonstrate that under short-term corrosion (<60 days), the fracture surfaces are predominantly flat or arc-shaped. As the corrosion period extends to 60 days and beyond, the fracture surface morphology changes to oblique or jagged. The mechanical properties of both steels exhibit a linear downward trend with the increase of the corrosion mass loss rate η , among which the elongation at break is the most sensitive to corrosion. Finally, based on a modified two-stage nonlinear Ramberg-Osgood constitutive model, a linear regression relationship between the second-stage hardening index m and η was established.

Keywords: high-strength weathering steel; neutral salt spray; mechanical property degradation; constitutive model

钢结构凭借轻质高强、塑性韧性优良等优势,已广泛应用于建筑工程、桥梁交通等各类基建领域。其中高强度耐候钢,凭借优异的力学性能与耐候特性,成为腐蚀环境服役结构的核心用材,在提升结构跨越能力、延长服役寿命方面发挥着关键作用。但在长期服役过程中,大气环境、腐蚀介质等外界因素引发的钢材腐蚀问题,成为制约结构耐久性与安全性的核心瓶颈^[1-2]。腐蚀不仅会造成钢材截面均匀减薄,更会诱发局部点蚀坑生成,引发应力集中效应^[3],逐步劣化钢材弹性、强度、塑性等关键力学性能,甚至改变钢材断裂模式,诱发脆性断裂风险,严重威胁结构的长期安全服役^[4-7]。因此,揭示腐蚀作用下高强钢材的腐蚀动力学以及力学行为演化规律,构建适宜的腐蚀本构模型,对腐蚀钢结构的耐久性设计具有至关重要的理论价值与工程实践意义。

现阶段,诸多学者围绕腐蚀钢材力学性能开展了大量研究,在腐蚀损伤表征、力学性能劣化规律等方面取得了一定进展。Guo等^[8]对Q355NH耐候钢与Q355普通钢开展了长达180 d的中性盐雾加速腐蚀试验,将两者的腐蚀行为分为均匀腐蚀与点蚀,结果表明,两种钢材的均匀腐蚀厚度与点蚀深度均随腐蚀时间呈指数增长,且Q355NH钢与Q355钢的点蚀深宽比均呈先增大后稳定的趋势。Chen等^[9]通过对不同腐蚀程度的Q355B钢材进行拉伸试验发现,腐蚀质量损失率与钢材屈服强度、极限强度以及断裂延性之间存在明显相关关系,且随着腐蚀程度增加,材料断后伸长率显著降低。Xue^[10]通过试验分析了高强度钢在海水腐蚀环境下的疲劳失效机制,揭示了应力比、加载频率和温度对腐蚀疲劳性能的复合影响,并通过断口形态考察了损伤演化过程。Jia等^[11]通过150 d的盐雾腐蚀加速试验,研究了15个Q690高强钢拉伸试件的腐蚀行为,其有限元分析结果表明,在单轴拉伸载荷下,试件表现出明显的应力集中效应,大多数节点处于

多轴应力状态。

近年来,随着腐蚀钢材结构安全评估需求的不断提高,学者开始从宏观力学性能退化规律出发,建立考虑腐蚀损伤影响的本构模型与残余强度预测模型。Yang等^[12]通过单调拉伸试验研究了腐蚀Q420B钢的力学性能退化规律并建立了相关本构模型,结果表明,腐蚀对其变形能力的影响远大于强度指标。Liu等^[13]通过静力试验分析了腐蚀对Q345C的静力性能与破坏模式的影响,建立了锈蚀钢材本构模型与力学性能预测模型,提出了考虑随机蚀坑分布的剩余强度数值模拟方法。Zhao等^[14]对Q345和Q420结构钢腐蚀试样进行轴向拉伸试验,观察拉伸断裂行为并获取工程应力-应变曲线,同时建立了不同质量损失率下Q345和Q420结构钢的本构模型,最后基于试验数据提出预测腐蚀后残余强度与延展性的经验公式。Yang等^[15]将27块Q345耐候钢板和Q345碳钢板通过强酸腐蚀后进行单轴拉伸试验,并获取了应力-应变曲线,建立了试验钢材在强酸腐蚀条件下的本构模型。Sun等^[16]对腐蚀桁架桥梁的弦杆、斜杆以及竖杆的腐蚀试件进行拉伸试验,建立了最小残余截面率及材料性能的回归方程,并将所得方程与不同屈服强度、截面形状及腐蚀类型的钢材性能劣化情况进行对比,建立了未腐蚀与腐蚀试件真实本构模型的拟合公式。

尽管学者针对不同强度等级钢材的腐蚀劣化及本构关系已开展了大量研究,但对于Q460及以上级别高强度耐候钢与普通钢,其高屈强比特性使得材料对应力集中和局部损伤更为敏感,现有模型难以直接涵盖其强化段演化规律。此外,关于高强度耐候钢与普通高强钢在长时间腐蚀下的硬化指数退化机理的研究仍显匮乏。笔者通过长达180 d的中性盐雾试验,系统对比Q460NH与Q460钢材的力学指标退化差异,并基于两阶段Ramberg-Osgood修正模型,建立两种材料的硬化指数 m 随质量损失率 η 的演化规律。

1 腐蚀试验

1.1 腐蚀试件设计与材性试验

试验试件材料采用公称厚度为 5 mm,实测厚度为 4.75 mm 的 Q460NHB 以及 Q460C 钢板,参照《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[17],在钢板宽度 1/4 处采用全厚度方式横向切取样坯。

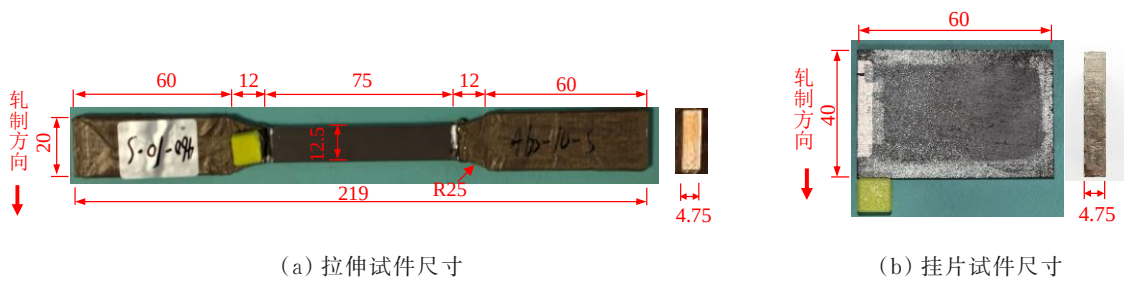


图 1 试件尺寸(mm)

Fig. 1 Dimensions of test specimens

表 1 钢材的化学成分

Table 1 Chemical composition of steel

单位: %									
钢材	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	V
Q460NH	0.12	0.35	0.75	0.001	0.013	0.32	0.58	0.18	0.003
Q460	0.14	0.05	0.81	0.002	0.015	0.022	0.036	0.013	0.001

用于腐蚀后静力拉伸试验的 Q460NH 与 Q460 钢材试件按照腐蚀时间进行分组设计,共设置 18 组腐蚀试件(10~180 d),以 10 d 为间隔,在每个腐蚀时段,每种材料分别设置 1 个拉伸试件,共计 18×2 个拉伸试件。试件命名采用“材料类型-时间”的形式(如 Q460NH-*t*),其中 *t* 为对应的腐蚀天数。

为保证试验材料质量合格,在腐蚀试验正式开始前,分别对 3 个 Q460NH 和 Q460 钢材未腐蚀试件进行静力拉伸试验。单向拉伸设备采用微机控制电液伺服万能试验机,最大加载荷载为 100 kN,同时使用标距为 50 mm,量程为 20 mm 的引伸计对试验过程中试件变形进行测量,如图 2 所示。

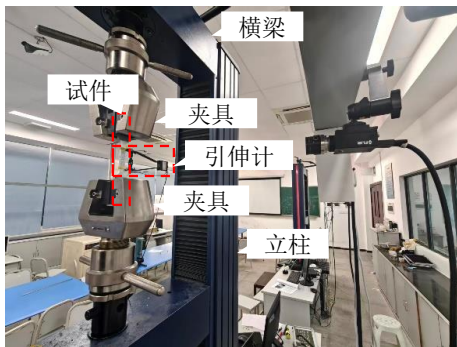


图 2 万能试验机

Fig. 2 Universal testing machine

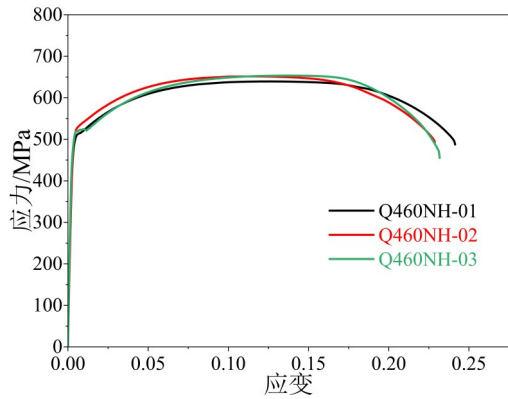
图 1(a)所示为拉伸试验试件,根据《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]确定其尺寸为 219 mm×20 mm×4.75 mm。鉴于拉伸试件可观测表面较小,设置相同腐蚀时间的挂片试件用于研究试件表面腐蚀形貌特征演化,其尺寸为 40 mm×60 mm×4.75 mm,如图 1(b)所示。两类试件的化学成分如表 1 所示。

根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]进行试验。材料拉伸试验通过引伸计反馈的应变速率控制加载速率,对应的加载方案为:在引伸计应变为 0~0.2% 时,即对应引伸计区间段内变形为 0~0.1 mm 时,采用应变率为 0.000 067 s⁻¹ 的定值加载,对应横梁位移速率为 0.2 mm/min;在引伸计的应变为 0.2%~0.6% 时,即对应引伸计区间段内变形为 0.1~0.3 mm 时,将应变率调整为 0.000 167 s⁻¹,对应加载速率为 0.5 mm/min;当试件的应变超过 0.6% 时,即对应引伸计区间段内变形超过 0.3 mm 时,将应变率调整为 0.000 333 s⁻¹,对应加载速率为 1.0 mm/min。未腐蚀试件应力-应变曲线如图 3 所示,选取各力学性能指标平均值作为代表值并与规范值对比结果如表 2 所示。由表 2 可知,两种钢材的力学性能均能满足规范要求。

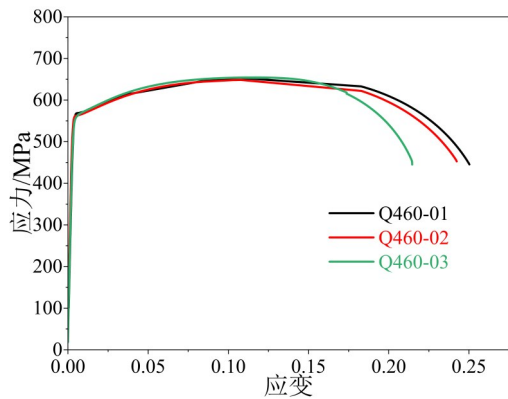
1.2 盐雾腐蚀方案

采用图 4 所示 YH-YW-90 盐雾试验机,参考规范《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》(GB/T 10125—2021)^[21]设计腐蚀试验。

配制(50±5)g/L 的氯化钠溶液,将溶液 pH 值控制在 6.5~7.2,盐雾箱内温度设置为 35 ℃,80 cm²



(a) Q460NH



(b) Q460

图3 Q460NH、Q460 钢材材性试验应力-应变曲线

Fig. 3 Q460NH, Q460 steel material properties test stress-strain curve

集雾管口采集盐雾沉降量为 $1 \sim 2 \text{ mL/h}$ 。

为防止试件表面原始氧化物与油污对加速腐蚀试验结果造成干扰^[22-23],并防止试件夹持段锈蚀,



图4 YH-YW-90 盐雾试验机

Fig. 4 YH-YW-90 Salt spray testing machine

表2 Q460NH、Q460 钢材材性试验关键力学性能指标

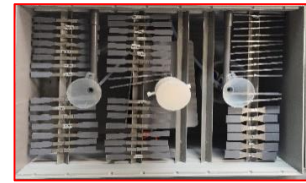
Table 2 Key parameters of Q460NH, Q460 steel material properties test

材料	数据源	屈服强度/MPa				极限强度/MPa				断后伸长率/%			
		试件 1	试件 2	试件 3	均值	试件 1	试件 2	试件 3	均值	试件 1	试件 2	试件 3	均值
Q460NH	试验	498.1	505.4	513.1	505.5	639.4	651.6	653.6	648.2	25.43	24.33	25.01	22.5
	规范 ^[19]	≥ 460				570~730				≥ 20			
Q460	试验	565.4	562.0	555.7	561.0	652.4	648.4	654.4	651.7	26.35	24.17	23.05	24.2
	规范 ^[20]	≥ 460				540~720				≥ 17			

采取以下步骤对试件进行预处理。

首先采用 400 目的砂纸打磨表面直到暴露出金属基体,打磨完成后采用精度为 0.01 g 的电子天平进行第 1 次称重并按面积分别计算出试件标距段原始重量 m_0 与夹持段原始重量 m_1 。随后采用环氧富锌底漆对保护区段刷涂,待其自然晾干 24 h 后在表面刷涂环氧树脂面漆,同样待其自然晾干 24 h 后采用耐高温耐蚀防水胶带缠绕覆盖整个保护区段,最后采用环氧树脂刷涂所有接缝,以保证夹持段不被腐蚀。整体防腐流程如图 5 所示。

富锌底漆刷涂



环氧面漆刷涂



耐蚀胶带与
接缝处理



图5 试件夹持段防腐处理

Fig. 5 Protection treatment of specimen holding ends

1.3 试件后处理与腐蚀动力学曲线

腐蚀完成后按《金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除》(GB/T 16545—2015)^[24]推荐的方法对试件表面进行清理。首先通过机械剥离去除试件表面块状腐蚀产物与防腐处理直至暴露出试件基体,随后按 100 g 草酸加 900 mL 蒸馏水的配比配制溶液,并在 40°C 的温度下浸泡 60 min ,然后用清水漂洗,再用石灰水中和并用清水冲洗干净,最后将试件放入烘干箱中完全干燥。

表面清理完成后用电子天平称量试件剩余总质量 m_c 。为减小酸洗液对金属基体的腐蚀影响,需

要对未腐蚀试件进行同等的酸洗流程并计算平行段酸洗后质量损失 Δm 。试件平行段质量损失率定义为

$$\eta = [m_0 - (m_c - m_1 + \Delta m)] / m_0 \tag{1}$$

Q460NH、Q460 钢材各试件的质量损失率如表 3 所示。

表 3 拉伸试件腐蚀损失

Table 3 Corrosion loss of tensile test specimens

腐蚀时 间/d	$\eta/\%$		腐蚀时 间/d	$\eta/\%$	
	Q460NH	Q460		Q460NH	Q460
10	0.46	1.03	100	9.96	10.72
20	1.77	1.99	110	10.96	11.92
30	2.92	3.49	120	10.62	13.12
40	3.75	3.9	130	10.47	13.53
50	3.98	4.58	140	13.23	14.46
60	5.99	5.10	150	14.60	14.84
70	8.18	7.49	160	15.05	16.58
80	7.12	9.30	170	17.04	16.83
90	10.13	9.92	180	15.46	15.92

在金属材料腐蚀动力学研究中,质量损失率 η 通常采用半经验的幂函数模型 $\eta = A \cdot t^B$ 进行描述^[25-27]。其中,参数 A 反映了材料在腐蚀初期的反应活性与环境敏感性;时间指数 B 反映了腐蚀产物随腐蚀时间 t 的推移对金属基体的保护能力。当 $B < 1$ 时,表明随着腐蚀时间增长,锈层趋于致密,腐蚀速率呈现衰减趋势。

鉴于此,选用幂函数模型对平行段质量损失率进行回归分析,分别拟合得到 Q460NH 和 Q460 两种钢材的平行段质量损失率 η 与腐蚀时间 t 的函数关系,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } \eta &= 0.00122t^{0.947}, R^2 = 0.97 \\ \text{Q460: } \eta &= 0.00152t^{0.916}, R^2 = 0.98 \end{aligned} \tag{2}$$

由图 6 所示试验数据点与拟合曲线可知,当腐蚀时间小于 40 d 时,两种钢材的质量损失率差异较

小,随着腐蚀时间的延长,其差异逐渐增大。值得注意的是,Q460NH 与 Q460 钢材在 160~180 d 区间内的质量损失率出现了小幅波动。主要原因在于腐蚀后期试件点蚀与锈层剥落等腐蚀行为的不确定性增加了质量损失率的离散性,同时不同试件所在区域在腐蚀过程中的盐雾沉降率与温湿度可能存在微小差异。Q460NH 钢材的拟合函数系数为 0.001 22,略小于 Q460 钢材的 0.001 52,表明在本试验中 Q460NH 钢材在腐蚀早期表现出更优的耐腐蚀性能。此外,两种钢材拟合方程的时间指数均小于 1,说明随着腐蚀时间的增加,试件表面逐渐堆积的腐蚀产物层增加了环境中 Cl⁻ 以及溶解氧向金属基体扩散的阻力,从而导致宏观质量损失率呈逐渐衰减的趋势。Q460NH 钢材的指数为 0.947,略高于 Q460 钢材的 0.916,表明其腐蚀速率随时间衰减的程度略小。然而,由于 Q460NH 的初始腐蚀系数较低,在整个腐蚀时段内其质量损失率整体仍低于 Q460 钢材。

1.4 腐蚀形貌演化

基于挂片试件观测得到两种材料在腐蚀环境中的形貌演化如图 7 所示。

在腐蚀时间为 30 d 时,Q460NH 钢表面可观察到大量浅层的“沟壑”状蚀坑,这些蚀坑多数沿着表面纹理线条方向发育,分布略显集中。相较之下,Q460 钢虽然也表现出“沟壑”状蚀坑的存在,但蚀坑数量更多、尺度更小,分布不均。其表面整体粗糙度更高,腐蚀痕迹更为密集,局部区域甚至存在微小剥蚀坑洞。

在腐蚀时间为 60 d 时,Q460NH 钢的表面腐蚀特征进一步发展,表面粗糙度明显增大,蚀坑开始出现融合趋势,形成形态各异、面积较大的“块状”腐蚀区。而 Q460 钢在 60 d 腐蚀后,表面蚀坑密度进一步提升,蚀坑形态仍以“沟壑状”浅蚀为主,尽管尚未形成贯通性腐蚀区,但已有大量蚀坑相互靠近的趋势。

在腐蚀周期为 100 d 时,Q460NH 钢表面呈现区域性分布的浅蚀坑,蚀坑形态相对规整,多为“类椭圆”或“短条状”;Q460 钢表面则布满密集且深浅不均“蜂窝状”严重损伤形貌的蚀坑,腐蚀向基体纵深发展的趋势更为突出。

在腐蚀周期为 150 d 时,Q460NH 钢表面蚀坑有向深度方向扩展趋势,局部仍存在少量较深的孤立蚀坑,此阶段蚀坑发育以相互融合为主;Q460 钢表面蚀坑分布较为均匀且由于大量蚀坑相互融合贯通,使得基体在厚度方向被整体削弱,基体完整性进一步削弱。

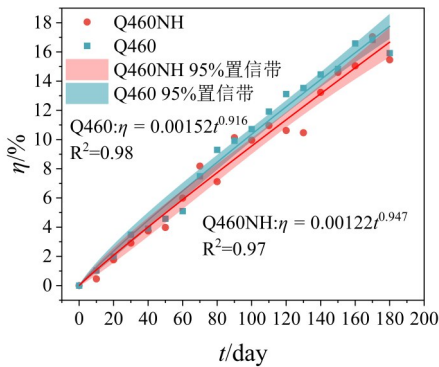


图 6 钢材 η - t 曲线

Fig. 6 η - t curves of steel

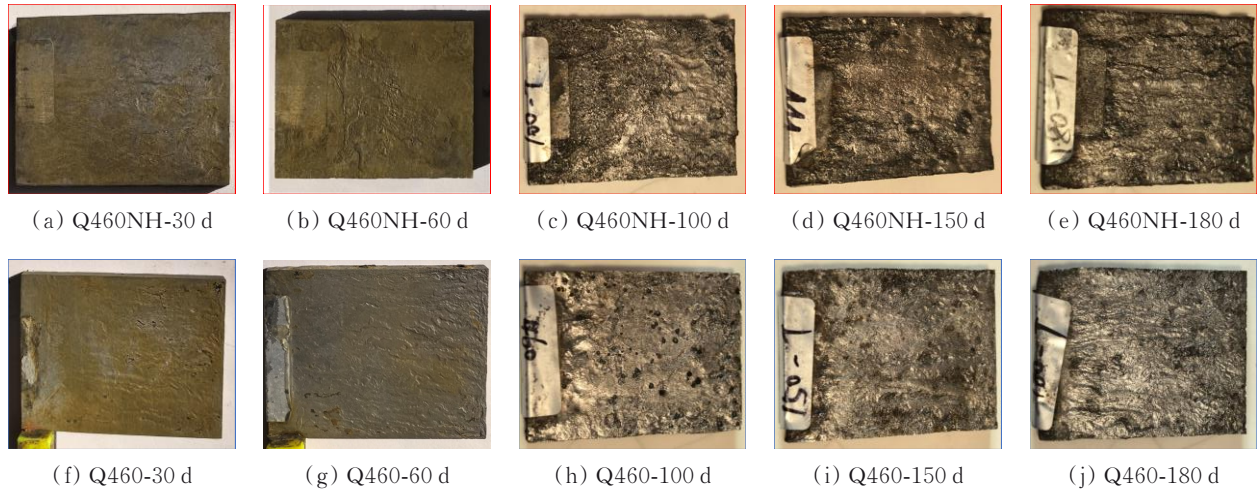


图7 钢材挂片试件腐蚀后形貌

Fig. 7 Surface morphology of plate specimens after corrosion

2 腐蚀后单向拉伸试验

2.1 试验现象

对腐蚀后试件开展拉伸试验,图8、图9所示为典型腐蚀时段下Q460NH与Q460钢材拉伸试件的破坏形态及其断口形貌特征。在腐蚀时间较短(60

d以下)时,试件沿主应力方向的应力分布较为均匀,材料能够保持较好的塑性变形能力。断口区域的塑性变形较为充分且分布均匀,断口形貌以“平齐状”或“弧形”为主。随着腐蚀时间延长至60 d及以上,试件断口附近材料的塑性变形分布不再均匀,断口形貌主要表现为“斜向”或“锯齿状”特征。

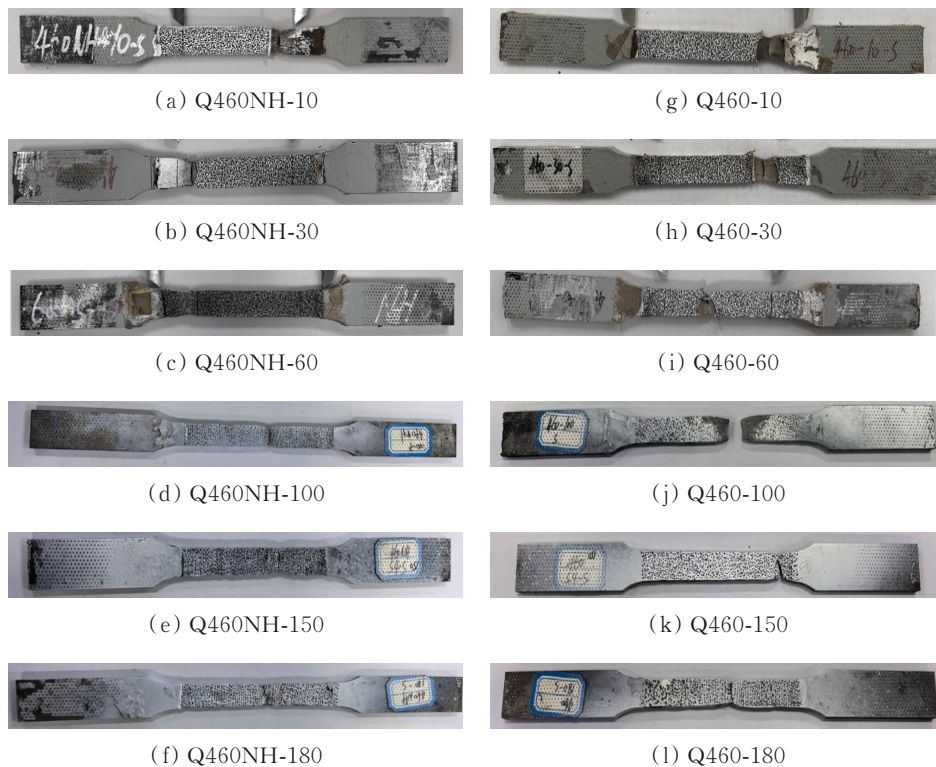


图8 典型腐蚀时段下Q460NH、Q460钢材破坏形态

Fig. 8 Failure mechanisms of Q460NH and Q460 steel in typical corrosion periods

2.2 名义应力-应变曲线

图10所示为基于试件原始横截面积 A_0 计算的不同腐蚀时间下Q460NH、Q460钢材名义应力-应变曲线。在弹性阶段,两种材料随腐蚀时间延长,

比例极限持续降低,表明腐蚀使材料更早脱离弹性变形。进入屈服阶段后,随着腐蚀时间的延长,试件的屈服强度呈持续下降趋势。对于Q460NH钢材,在部分腐蚀时间下可观察到较短的屈服平台,



图 9 典型腐蚀时段下 Q460NH、Q460 钢材断口形貌

Fig. 9 Fracture surface morphology of Q460NH and Q460 steel under typical corrosion periods

这可能与腐蚀导致标距段多处截面局部削弱有关,使得拉伸过程中塑性变形在多个位置同时发展,从而在应力-应变曲线上形成短暂的平台阶段^[28]。相比之下,Q460 钢材在各腐蚀时间下均未出现明显屈

服平台,表现为更为典型的连续屈服行为。在应变硬化阶段,随腐蚀时间延长,硬化阶段应变区间急剧缩短,材料应变强化能力持续减弱。在颈缩阶段,随腐蚀时间延长,两种钢材颈缩阶段应变区间均急剧缩短,且应力下降速率显著加快。

2.3 力学性能分析

Q460NH 和 Q460 钢材腐蚀试件的关键力学性能指标如表 4、表 5 所示。考虑到腐蚀导致试件表面呈现不规则的蚀坑形貌,其实际最小截面积难以精确量化,为便于工程评估与剩余承载力计算,所有强度指标均基于试件原始横截面积 A_0 计算。

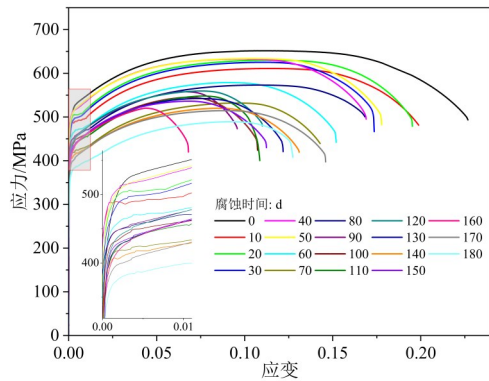
参考《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18]等相关标准,对相关力学指标采取如下定义。

为规避加载初期夹具滑移等非线性干扰,名义弹性模量 E 取名义应力为 $0.1f_y \sim 0.4f_y$ 弹性段的斜率。

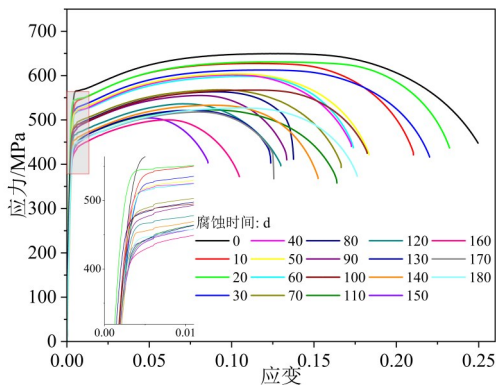
由于腐蚀试件屈服特征不明显,强度指标统一采用 0.2% 永久残余变形对应的名义应力作为名义屈服强度 f_y ,名义极限强度 f_u 与名义断裂应力 f_t 分别对应曲线的最大名义应力点与断裂终点名义应力;为更好地描述材料应变硬化性能,额外提取塑性应变为 0.01% 时对应的名义应力 $\sigma_{0.01}$ ^[29]。

对于延性指标,提取名义极限强度 f_u 对应的极限应变 ϵ_u 与断后伸长率 δ 。

为量化腐蚀作用对钢材各项力学性能的劣化效应,以腐蚀质量损失率为变量,通过引入性能折减系数 R_c 量化力学性能指标的衰减程度^[28-31],通用表达式如式(3)所示。



(a) Q460NH



(b) Q460

图 10 不同腐蚀时段下钢材的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves of steel under different corrosion periods

$$R_c = \frac{F_c}{F} = 1 - \beta\eta \tag{3}$$

式中： F_c 为腐蚀后钢材对应力学性能指标的剩余

值； F 为未腐蚀钢材对应力学性能指标的初始值； β 一般由试验数据拟合得到； η 为钢材的腐蚀质量损失率。

表 4 Q460NH 钢材关键力学性能指标
Table 4 Key mechanical properties parameters of Q460NH

腐蚀时间/d	E_s /MPa	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$f_{y=\sigma_{0.02}}$ /MPa	f_u /MPa	f_t /MPa	ϵ_u	$\delta/\%$
0	208 315	397.61	505.50	648.16	516.23	0.110 03	20.40
10	209 277	405.48	471.28	610.99	448.61	0.112 87	20.78
20	202 081	403.83	489.70	629.81	478.69	0.114 62	18.18
30	190 766	395.55	488.16	625.19	494.59	0.109 72	17.28
40	187 957	410.07	508.99	632.29	495.23	0.095 74	15.57
50	180 691	401.83	506.29	633.60	482.28	0.103 39	20.18
60	180 688	368.06	459.47	578.79	442.23	0.089 24	15.23
70	189 026	321.03	455.56	555.25	410.70	0.094 41	14.98
80	186 997	394.10	448.41	573.06	482.19	0.107 30	16.82
90	174 307	349.79	438.44	557.74	473.24	0.067 00	14.80
100	184 474	335.73	425.36	545.09	423.94	0.068 54	15.54
110	178 084	310.45	414.51	548.08	393.99	0.077 01	14.09
120	171 753	301.06	432.75	559.46	479.43	0.074 36	13.27
130	178 020	293.03	425.83	542.27	420.83	0.073 25	11.04
140	179 178	328.27	401.09	519.97	419.47	0.084 54	13.16
150	175 652	280.45	424.16	536.24	429.86	0.067 71	10.20
160	165 752	295.70	408.19	520.12	419.98	0.043 59	13.16
170	165 005	300.86	408.18	514.49	397.23	0.087 78	13.58
180	165 482	299.01	386.88	489.13	408.00	0.091 73	12.40

注： E 为名义弹性模量， $\sigma_{0.01}$ 为塑性应变为 0.01% 时对应的名义应力， f_y 为名义屈服强度， f_u 为名义极限强度， f_t 为名义断裂应力， ϵ_u 为极限应变， δ 为断后伸长率。

表 5 Q460 钢材关键力学性能指标
Table 5 Key mechanical properties parameters of Q460 steel

腐蚀时间/d	E_s /MPa	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$f_{y=\sigma_{0.02}}$ /MPa	f_u /MPa	f_t /MPa	ϵ_u	$\delta/\%$
0	207 815	450.33	561.03	651.73	456.73	0.123 34	24.24
10	203 815	431.25	535.57	627.39	421.27	0.110 53	18.19
20	196 678	390.55	541.43	630.77	436.83	0.125 38	22.74
30	194 644	433.32	525.84	612.65	416.35	0.118 45	21.62
40	180 344	413.77	508.97	601.50	440.13	0.100 17	16.32
50	182 732	423.09	514.09	603.90	421.33	0.101 61	17.32
60	182 057	358.64	504.35	597.60	437.25	0.108 29	17.78
70	182 551	386.68	488.68	568.04	392.71	0.091 21	14.85
80	179 876	398.01	480.97	567.39	411.44	0.090 46	13.51
90	170 461	376.05	474.69	555.13	409.90	0.079 97	11.17
100	167 473	376.39	486.54	567.39	424.93	0.110 80	17.72
110	169 092	347.23	449.44	522.84	357.70	0.085 63	15.00
120	166 711	349.08	460.44	536.33	396.46	0.069 73	12.05
130	159 051	368.21	451.32	521.62	402.81	0.074 13	12.38
140	156 167	338.44	455.42	533.12	367.83	0.088 10	14.96
150	168 891	354.16	432.15	486.76	341.03	0.049 20	10.03
160	169 520	345.32	428.64	503.50	338.33	0.060 52	13.82
170	165 617	328.04	445.20	517.84	367.14	0.080 17	10.64
180	170 247	337.54	456.03	526.71	373.23	0.104 47	13.48

注： E 为名义弹性模量， $\sigma_{0.01}$ 为塑性应变为 0.01% 时对应的名义应力， f_y 为名义屈服强度， f_u 为名义极限强度， f_t 为名义断裂应力， ϵ_u 为极限应变， δ 为断后伸长率。

2.3.1 名义弹性模量回归分析

采用折减系数模型分别对 Q460NH 与 Q460 钢材名义弹性模量的折减系数 R_E 进行回归分析,分别得到两种材料名义弹性模量的折减系数 R_E 与质量损失率 η 的函数关系,如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_E &= 1 - 1.34\eta, R^2 = 0.73 \\ \text{Q460: } R_E &= 1 - 1.46\eta, R^2 = 0.70 \end{aligned} \quad (4)$$

由图 11 的试验数据与拟合曲线可见,两种钢材名义弹性模量的折减系数均随腐蚀质量损失率的增加而呈线性下降趋势,表明在腐蚀作用下材料弹性阶段的整体刚度持续削弱。两种钢材的 β 均大于 1,表明名义弹性模量的退化不仅与腐蚀导致的有效承载截面削弱有关,同时与点蚀引起的局部应力集中及微损伤累积有关。Q460NH 钢材的 β (1.34) 略小于 Q460 钢材 (1.46),表现为质量损失率小于 7% 时,两种钢材的名义弹性模量退化量基本一致;随着质量损失率超过 7%,Q460NH 钢材曲线整体明显高于 Q460 钢材,表明在长期腐蚀环境下 Q460NH 钢材的刚度衰减相对更为缓慢。

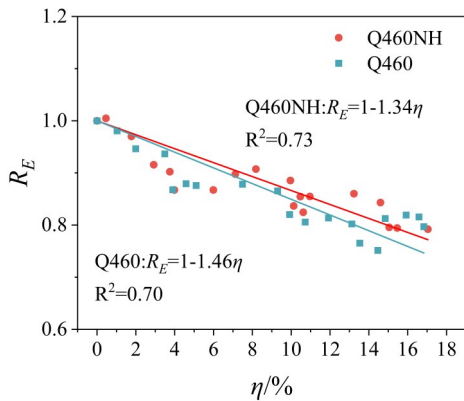


图 11 钢材的 R_E - η 曲线

Fig. 11 R_E - η curves of steel

2.3.2 强度回归分析

采用折减系数模型分别对 Q460NH 与 Q460 钢材塑性应变为 0.01% 时对应名义应力的折减系数 $R_{\sigma_{0.01}}$ 进行回归分析,分别得到两种材料在塑性应变为 0.01% 时对应的名义应力的折减系数 $R_{\sigma_{0.01}}$ 与质量损失率 η 的函数关系,如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_{\sigma_{0.01}} &= 1 - 1.64\eta, R^2 = 0.77 \\ \text{Q460: } R_{\sigma_{0.01}} &= 1 - 1.61\eta, R^2 = 0.73 \end{aligned} \quad (5)$$

由图 12 的试验数据与拟合曲线可见,两种钢材在塑性应变为 0.01% 时对应的名义应力的折减系数均随腐蚀质量损失率的增加而呈近乎一致的线性下降趋势。两种钢材的 β 值极为接近 (1.64 与 1.61),表明在相同腐蚀质量损失率条件下, Q460NH 与 Q460 钢材在 0.01% 塑性应变下的名义

应力削弱程度基本一致,二者的腐蚀力学响应规律具有高度的相似性。

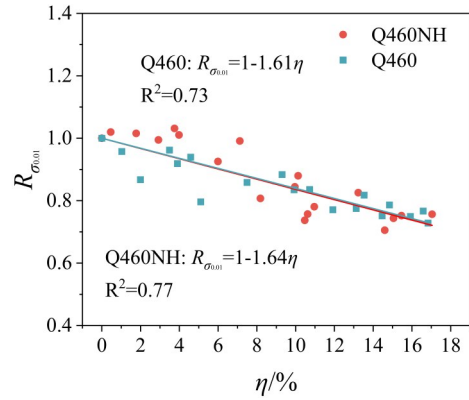


图 12 钢材的 $R_{\sigma_{0.01}}$ - η 曲线

Fig. 12 $R_{\sigma_{0.01}}$ - η curves of steel

采用折减系数模型分别对 Q460NH 与 Q460 钢材名义屈服强度的折减系数 R_f 进行回归分析,分别得到两种材料名义屈服强度的折减系数 R_f 与质量损失率 η 的函数关系,如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_f &= 1 - 1.34\eta, R^2 = 0.84 \\ \text{Q460: } R_f &= 1 - 1.29\eta, R^2 = 0.93 \end{aligned} \quad (6)$$

由图 13 的试验数据与拟合曲线可见,两种钢材的名义屈服强度的折减系数均随腐蚀质量损失率的增加而呈线性下降趋势,表明腐蚀作用会显著削弱材料进入塑性阶段时的承载能力。两种材料的 β 均大于 1,表明屈服强度的退化程度大于单纯由截面削弱所引起的强度降低,这反映了蚀坑引起的应力集中效应在屈服阶段同样发挥了作用。Q460NH 钢材的 β (1.34) 与 Q460 钢材 (1.29) 较为相近,表明在相同腐蚀条件下,腐蚀损伤对两种钢材屈服强度的削弱作用具有相似的影响规律。

采用折减系数模型分别对 Q460NH 与 Q460 钢

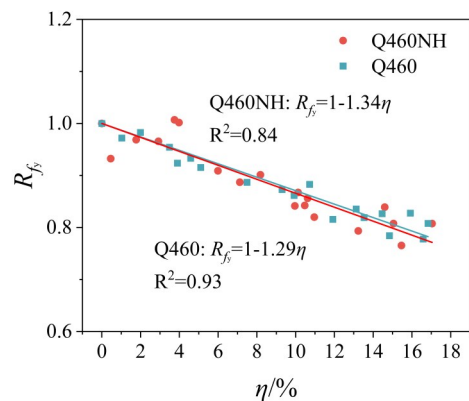


图 13 钢材的 R_f - η 曲线

Fig. 13 R_f - η curves of steel

材名义抗拉强度的折减系数 R_f 进行回归分析, 分别得到两种材料的名义抗拉强度的折减系数 R_f 与质量损失率 η 的函数关系如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_f &= 1 - 1.395\eta, R^2 = 0.89 \\ \text{Q460: } R_f &= 1 - 1.400\eta, R^2 = 0.92 \end{aligned} \quad (7)$$

从图 14 的试验数据与线性拟合结果可以看出, Q460NH 与 Q460 钢材的名义抗拉强度均随腐蚀质量损失率的升高呈现出几乎一致的线性退化趋势。两种钢材的 β 数值相近, 表明两种材料在塑性变形充分发展的阶段, 不规则点蚀所产生的局部应力集中效应逐渐被塑性变形所削弱。因此, 名义抗拉强度的降低主要由腐蚀引起的腐蚀区段最小有效截面面积减小所主导。

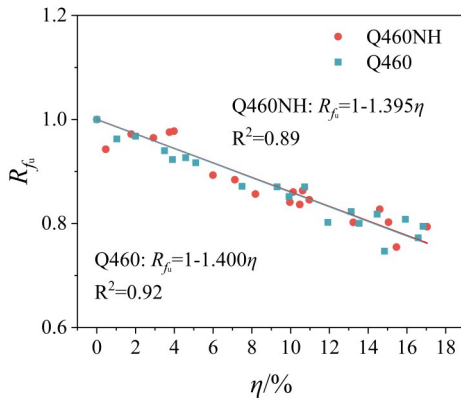


图 14 钢材的 R_f - η 曲线

Fig. 14 R_f - η curves of steel

采用折减系数模型分别对 Q460NH 与 Q460 钢材名义断裂应力的折减系数 R_f 进行回归分析, 分别得到两种材料的名义断裂应力的折减系数 R_f 与质量损失率 η 的函数关系如式(8)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_f &= 1 - 1.04\eta, R^2 = 0.63 \\ \text{Q460: } R_f &= 1 - 1.15\eta, R^2 = 0.71 \end{aligned} \quad (8)$$

从图 15 所示试验数据与线性拟合结果可以看出, 两种钢材的名义断裂应力的折减系数均随腐蚀质量损失率的升高呈现线性下降的趋势。Q460NH 的拟合参数 β 为 1.04, 低于 Q460 钢的 1.15, 表明钢材名义断裂应力的退化同样受点蚀坑引发的局部应力集中的影响, 且 Q460 钢材的名义断裂应力对腐蚀损伤的敏感性略高于 Q460NH 钢材, 相同腐蚀质量损失率下, 其断裂应力的衰减幅度更大。

2.3.3 极限应变回归分析

对极限应变的折减系数 R_{ϵ_s} 进行回归分析, 分别得到 Q460NH 与 Q460 钢材极限应变的折减系数 R_{ϵ_s} 与质量损失率的函数关系, 如式(9)所示。

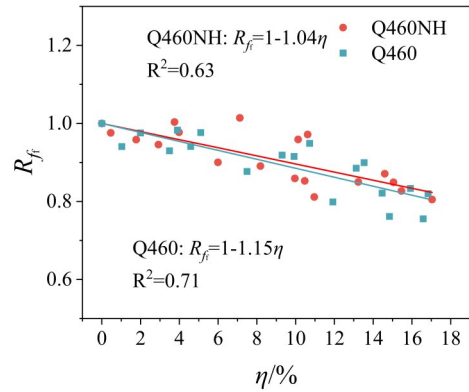


图 15 钢材的 R_{ϵ_s} - η 曲线

Fig. 15 R_{ϵ_s} - η curves of steel

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_{\epsilon_s} &= 1 - 2.38\eta, R^2 = 0.55 \\ \text{Q460: } R_{\epsilon_s} &= 1 - 2.58\eta, R^2 = 0.59 \end{aligned} \quad (9)$$

从图 16 的试验数据与线性拟合结果可以看出, 两种钢材极限应变的折减系数均随腐蚀质量损失率的升高呈现线性下降趋势。Q460NH 的拟合参数 β 为 2.38, 低于 Q460 钢的 2.58, 表明腐蚀对 Q460NH 钢强化阶段应变的折减效应相对更小, 进而说明其在强化阶段的塑性变形能力受腐蚀影响相对较弱。然而, 两种钢材的极限应变随质量损失率的变化均表现出较大的离散性, 表明随机腐蚀显著增大了钢材极限应变的不确定性。

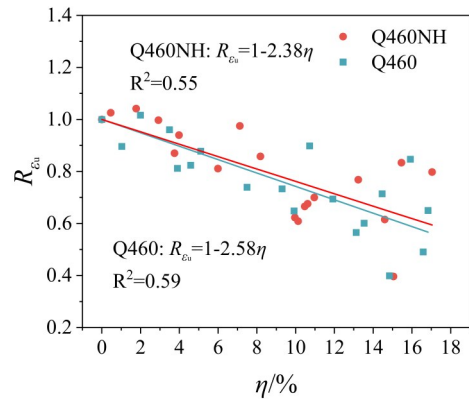


图 16 钢材的 R_{ϵ_s} - η 曲线

Fig. 16 R_{ϵ_s} - η curves of steel

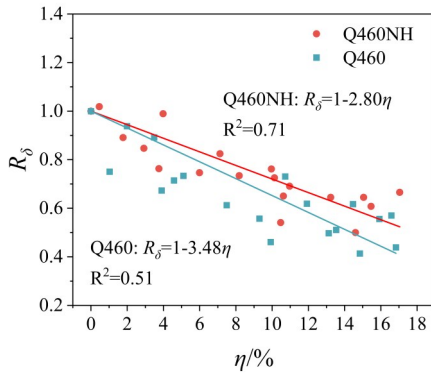
2.3.4 断后伸长率回归分析

对断后伸长率的折减系数 R_{δ} 进行回归分析, 分别得到 Q460NH 与 Q460 钢材断后伸长率的折减系数 R_{δ} 与质量损失率 η 的函数关系, 如式(10)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_{\delta} &= 1 - 2.80\eta, R^2 = 0.71 \\ \text{Q460: } R_{\delta} &= 1 - 3.48\eta, R^2 = 0.51 \end{aligned} \quad (10)$$

从图 17 的试验数据与线性拟合结果可以看出, 两种钢材断后伸长率的折减系数随腐蚀质量损失率的升高呈现线性下降趋势。两种钢材的断后伸

长率 β 远高于此前的强度指标与弹性模量对应的 β ,同时拟合结果的 R^2 也较低,这一结果表明,腐蚀对钢材塑性延性的影响,远比对强度、刚度性能的影响更为突出和剧烈。钢材断后伸长率的劣化,并非仅由腐蚀造成的有效承载截面缩减所主导,点蚀坑引发的应力集中、腐蚀导致材料基体微裂纹萌生与快速扩展,都会显著提前钢材的断裂时机,大幅压缩钢材的均匀塑性变形与集中塑性变形区间,最终造成断后伸长率的急剧衰减。

图 17 钢材的 R_δ - η 曲线Fig. 17 R_δ - η curves of steel

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n, \sigma \leq f_y \\ \epsilon = \left(\epsilon_u - \frac{f_u - f_y}{E_{0.2}} - \epsilon_{0.2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m + \epsilon_{0.2} + \frac{\sigma - f_y}{E_{0.2}}, f_y < \sigma \leq f_u \end{cases} \quad (11)$$

式中: E 为初始弹性模量; f_y 为0.2%塑性应变对应的条件屈服强度; $\epsilon_{0.2}$ 为塑性应变为0.2%时对应的全应变,可由 $\epsilon_{0.2} = f_y/E + 0.002$ 计算得出; n 为第1阶段应变硬化指数,可由式 $n = \ln(20)/\ln(f_y/\sigma_{0.01})$ 计算得出, $\sigma_{0.01}$ 为塑性应变0.01%对应的应力; $E_{0.2}$ 为第2阶段参考模量,可由式 $E_{0.2} = E/(1 + 0.002nE/f_y)$ 计算得出; m 为第2阶段应变硬化指数; f_u 、 ϵ_u 分别为极限抗拉强度及对应极限应变。

2.4.1 本构参数

在本构模型中, E 、 $\sigma_{0.01}$ 、 f_y 、 f_u 、 ϵ_u 等参数均由拉伸试验直接获取。考虑到腐蚀导致的有效截面削弱与应力集中效应,将质量损失率 η 作为损伤特征变量,并建立了指标随 η 演化的线性折减模型。同时基于前述定义计算出 $\epsilon_{0.2}$ 、 $E_{0.2}$ 、 n ,最后基于非线性最小二乘法,对屈服强度至抗拉强度段的试验数据($f_y < \sigma < f_u$)进行迭代拟合以计算 m ,相关参数结果见表6。

进一步对表中 m 参数的折减系数 R_m 进行回归分析,如式(12)所示。

2.4 本构模型

参考施刚等^[32]对Q460及以上级别高强钢的研究建议,采用修正的两阶段非线性本构模型对腐蚀后钢材的应力-应变关系进行描述,如图18所示。

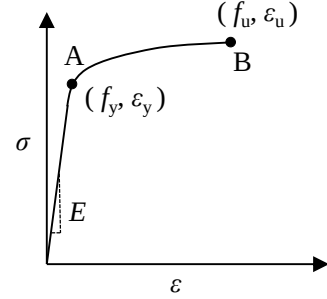


图 18 两阶段本构模型

Fig. 18 Two-stage constitutive model

该模型主要基于经典Ramberg-Osgood模型^[33]及Rasmussen提出的修正形式^[34],当 $\sigma \leq f_y$ 时采用经典Ramberg-Osgood形式,当 $f_y < \sigma \leq f_u$ 时采用Rasmussen修正形式,如式(11)所示。

$$\begin{aligned} \text{Q460NH: } R_m &= 1 - 1.49\eta, R^2 = 0.46 \\ \text{Q460: } R_m &= 1 - 1.50\eta, R^2 = 0.56 \end{aligned} \quad (12)$$

由图19中的数据点与拟合结果可知,随着质量损失率 η 的增大,两种钢材的 m 值的折减系数均呈线性下降趋势。 m 为修正模型中第2阶段的应变硬化指数,反映材料从 f_y 到 f_u 的强化速率, m 值越小,强化段曲线越平缓,材料后期承载能力增长越慢。腐蚀导致钢材截面削弱及微观缺陷增多,削弱了塑性阶段的硬化能力。这表明腐蚀损伤会显著降低材料在塑性强化段的应变硬化能力。两种钢材的 β 值十分接近,表明腐蚀环境对Q460NH与Q460钢材应变硬化能力的削弱作用具有相似的影响规律。同时两组数据点离散性较大,这是由于试验数据本身具有一定的离散性,同时在本构参数反演过程中,各模型参数之间存在一定程度的耦合关系,使得单个试件反演得到 m 值存在一定波动。

2.4.2 模型验证

为验证腐蚀后钢材本构模型的准确性,以实测试验获得的拉伸应力-应变曲线作为基准,分别采用两种方法绘制了腐蚀后钢材的完整应力-应变曲线:

表 6 Q460NH 与 Q460 钢材本构参数
Table 6 Constitutive parameters of Q460NH and Q460 steel

腐蚀时间/d	Q460NH					Q460				
	$\eta/\%$	$\epsilon_{0.2}$	$E_{0.2}/\text{MPa}$	n	m	$\eta/\%$	$\epsilon_{0.2}$	$E_{0.2}/\text{MPa}$	n	m
0	0.00	0.004 43	18 460	12.48	3.51	0.00	0.004 65	17 038	14.84	2.63
10	0.46	0.004 25	11 196	19.92	3.45	1.03	0.004 63	17 685	13.83	2.51
20	1.77	0.004 42	14 618	15.54	3.30	1.99	0.004 75	25 667	9.17	2.36
30	2.92	0.004 56	15 727	14.24	2.98	3.49	0.004 70	15 621	15.48	2.21
40	3.75	0.004 71	16 725	13.86	3.10	3.90	0.004 82	16 028	14.47	2.35
50	3.98	0.004 80	17 622	12.96	3.42	4.58	0.004 81	15 315	15.38	2.28
60	5.99	0.004 54	15 548	13.50	3.26	5.10	0.004 77	24 792	8.79	2.45
70	8.18	0.004 41	23 328	8.56	3.09	7.49	0.004 68	17 287	12.80	2.25
80	7.12	0.004 40	9 188	23.20	3.07	9.30	0.004 67	14 014	15.82	2.33
90	10.13	0.004 52	15 098	13.26	2.74	9.92	0.004 78	16 652	12.86	2.21
100	9.96	0.004 31	15 397	12.66	2.68	10.72	0.004 91	18 538	11.67	2.31
110	10.96	0.004 33	17 980	10.36	2.79	11.92	0.004 66	17 367	11.61	2.22
120	10.62	0.004 52	22 738	8.26	2.95	13.12	0.004 76	18 870	10.82	2.02
130	10.47	0.004 39	23 115	8.02	2.76	13.53	0.004 84	13 983	14.72	2.02
140	13.23	0.004 24	12 478	14.95	2.67	14.46	0.004 92	19 717	10.09	2.17
150	14.60	0.004 41	25 103	7.24	2.97	14.84	0.004 56	13 231	15.05	2.14
160	15.05	0.004 46	19 394	9.29	3.04	16.58	0.004 53	14 171	13.86	2.17
170	17.04	0.004 47	18 458	9.82	2.89	16.83	0.004 69	19 958	9.81	1.97
180	15.46	0.004 34	15 116	11.63	2.74	15.92	0.004 68	20 185	9.96	1.88

注： $\epsilon_{0.2}$ 为塑性应变为0.2%时对应的全应变， $E_{0.2}$ 为第二阶段参考模量， n 为第一阶段应变硬化指数， m 为第二阶段应变硬化指数。

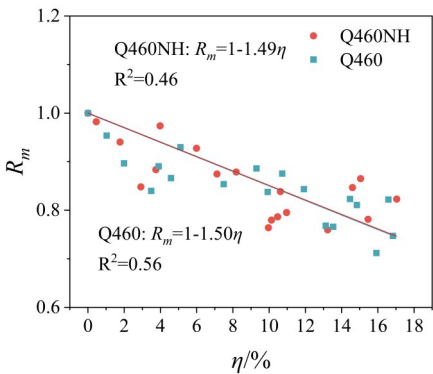


图 19 钢材的 R_m - η 曲线
Fig. 19 R_m - η curves of steel

一是采用最小二乘法直接对试验数据进行拟合；二是将本文得到的应变硬化指数 m 与质量损失率 η 的回归关系，以及其余力学性能指标 (E 、 $\sigma_{0.01}$ 、 f_y 、 f_u 、 ϵ_u 等) 与 η 的线性拟合关系代入本构模型进行计算。两种方法得到的典型试件曲线与试验曲线对比如图 20 所示。由图 20 可见，最小二乘法拟合曲线以及基于参数回归关系得到的预测曲线均与试验曲线吻合良好，表明本构模型对腐蚀后钢材的应力-应变全曲线具有较高的预测精度。

3 结论

通过单调拉伸试验研究了 Q460NH 耐候钢与

Q460 普通高强钢在不同腐蚀时间下的力学性能退化规律，并基于两阶段非线性本构模型构建了第 2 阶段硬化指数 m 与质量损失率 η 的线性回归关系，主要结论如下：

- 1) 腐蚀动力学演化规律：基于经典腐蚀动力学理论，采用幂函数模型建立了两种钢材的质量损失率随时间演化的预测模型。结果表明，相同腐蚀时间下，Q460 腐蚀质量损失率普遍高于 Q460NH 钢材。
- 2) 腐蚀形貌演化规律：Q460NH 钢表面蚀坑整体较浅，形貌相对规整，腐蚀主要表现为局部蚀坑的缓慢融合扩展；而 Q460 钢表面蚀坑数量更多、分布更为密集，随腐蚀发展逐渐形成“蜂窝状”严重损伤形貌，并呈现出更明显的向基体纵深发展的趋势。

3) 单向拉伸试验：单向拉伸试验现象表明，短期腐蚀 ($<60\text{ d}$) 下，断口以“平齐状”或“弧形”为主；随腐蚀时间延长至 60 d 及以上，局部应力集中加剧，断口形貌向“斜向”或“锯齿状”转变。

4) 力学性能退化规律：两种钢材的各力学性能指标的折减系数均随腐蚀质量损失率 η 呈线性下降趋势，其中断后伸长率对腐蚀最为敏感。力学性能的退化主要由有效承载截面削弱与微观缺陷共同控制。

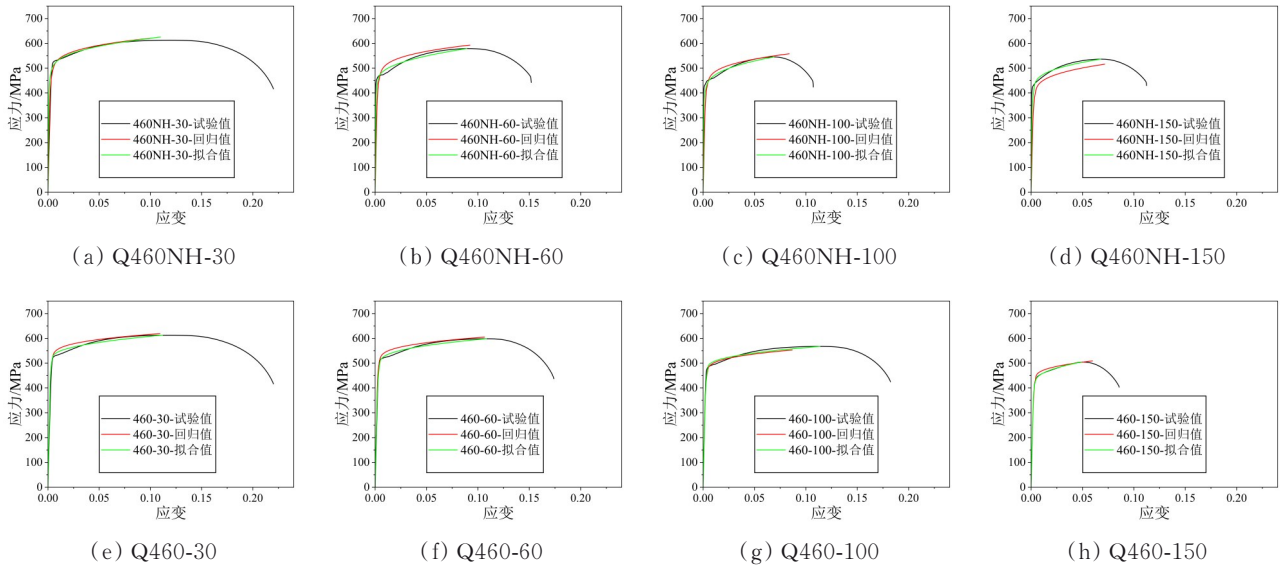


图 20 Q460NH 与 Q460 钢材应力-应变曲线对比

Fig. 20 Comparison of stress-strain curves for selected Q460NH and Q460 steel samples

5) 本构关系与验证: 基于修正的 Ramberg-Osgood 两阶段非线性本构模型, 建立了第 2 阶段硬化指数 m 的折减系数与 η 的线性回归关系, 验证结果表明, 基于最小二乘法拟合曲线以及基于参数回归关系得到的预测曲线均与试验曲线吻合良好。

参考文献

- [1] Liu C, Revilla R I, Zhang D W, et al. Role of Al_2O_3 inclusions on the localized corrosion of Q460NH weathering steel in marine environment[J]. Corrosion Science, 2018, 138: 96-104.
- [2] Wei H H, Tang Y Q, Liu Y P, et al. Research on durability and mechanical properties of high strength steel in corrosive environment: a review[J]. Structures, 2025, 78: 109324.
- [3] Ryan H, Mehmanparast A. Development of a new approach for corrosion-fatigue analysis of offshore steel structures[J]. Mechanics of Materials, 2023, 176: 104526.
- [4] 聂建国, 王宇航. 钢板-混凝土组合受弯加固梁疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011(2): 1-9.
Nie J G, Wang Y H. Experimental research on fatigue behavior of RC beams strengthened by steel plate-concrete composite technique[J]. Journal of Building Structures, 2011(2): 1-9. (in Chinese)
- [5] Manu K C, Madhushree C, Chandini M S, et al. Corrosion in steel structures: a review [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 2025: 189-198.
- [6] Riccioli F, Alkhateeb S, Mol A, et al. Feasibility assessment of non-contact acoustic emission monitoring of corrosion-fatigue damage in submerged steel structures [J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119296.
- [7] Chen M T, Pan Y, Ren F M, et al. Experimental investigation and predictive model on tensile behavior of corroded high-strength steel and butt-welded connections [J]. Thin-Walled Structures, 2025, 210: 112982.
- [8] Guo Q, Wu Z Y, Xing Y, et al. Corrosion evolution and mechanical property deterioration of Q355NH weathering steel in long-term neutral salt spray environment[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134193.
- [9] Chen Y, Ma B S, Lu R H. Experimental assessment of mechanical properties of corroded low-alloy structural steel[J]. Buildings, 2024, 14(5): 1457.
- [10] Xue S L. Fatigue failure analysis of high-strength steel in seawater corrosion environment[J]. npj Materials Degradation, 2025, 9: 153.
- [11] Jia C, Shao Y S, Guo L H, et al. Surface topography and stress concentration analysis for corroded high strength steel plate[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 187: 106952.
- [12] Yang H J, Xu S H, Wang Y D, et al. Fracture behavior and constitutive modeling of corroded Q420B steel: Experimental and numerical study[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2026, 237: 110133.
- [13] Liu Y, Peng J X, Lin Z W, et al. The effect of random pitting on the degradation of mechanical behavior of Q345C steel[J]. Construction and Building Materials, 2024, 449: 138524.
- [14] Zhao N, Zhang C T. Experimental investigation of the mechanical behavior of corroded Q345 and Q420 structural steels[J]. Buildings, 2023, 13(2): 475.
- [15] Yang F, Yuan M M, Qiao W J, et al. Mechanical degradation of Q345 weathering steel and Q345 carbon steel under acid corrosion[J]. Advances in Materials

- Science and Engineering, 2022, 2022: 6764915.
- [16] Sun M Y, Liu C Y, Hu Q, et al. An experimental investigation on the degradation of material properties of naturally corroded bailey truss[J]. Buildings, 2024, 14 (12): 3847.
- [17] GB/T 2975—2018 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备[S].
GB/T 2975—2018 Steel and steel products-Location and preparation of test pieces for mechanical testing[S]. (in Chinese)
- [18] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [19] GB/T 4171—2008 耐候结构钢[S].
GB/T 4171—2008 Atmospheric corrosion resisting structural steel[S].(in Chinese)
- [20] GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢[S].
GB/T 1591—2018 High strength low alloy structural steels[S].(in Chinese)
- [21] GB/T 10125—2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S].
GB/T 10125—2021 Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests[S].(in Chinese)
- [22] Dantas A, Dantas R, Cipriano G P, et al. A methodology to evaluate seawater corrosion on quasi-static tensile properties of a structural steel[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 164: 108613.
- [23] Blawert C, Serdechnova M, Bertram J, et al. Effects of mechanical surface pre-treatment on integrity and corrosion of bare and coated AA6082 substrates[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 844-859.
- [24] GB/T 16545—2015 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
GB/T 16545—2015 Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens[S].
- [25] Li N, Zhang W F, Xu H, et al. Corrosion behavior and mechanical properties of 30CrMnSiA high-strength steel under an indoor accelerated harsh marine atmospheric environment[J]. Materials, 2022, 15(2): 629.
- [26] He Y N, Liu Y W, Wang C, et al. Corrosion behavior of 700L automotive beam steel in marine atmospheric environment[J]. Materials, 2024, 17(20): 4964.
- [27] 姚勇, 刘国军, 黎石竹, 等. 金属材料腐蚀预测模型研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(5): 1-33.
Yao Y, Liu G J, Li S Z, et al. Research progress on corrosion prediction model of metallic materials for electrical equipment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(5): 1-33. (in Chinese)
- [28] 吴泽燕. 中性盐雾环境下 Q355NH 及 Q355 钢腐蚀行为演化及力学性能劣化研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
Wu Z Y. Research on the corrosion behavior evolution and mechanical property deterioration of Q355NH and Q355 steels in neutral salt spray environment[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [29] Chen L, Yang L, Ning K Y. A new two-stage constitutive model for characterizing stainless steel stress-strain curves[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 228: 109428.
- [30] Sun M, Zhang Y N, Cui X Z, et al. Experimental and numerical simulation study of tensile mechanical properties of corroded carbon steel utilizing galvanostatic corrosion and 3D scanning[J]. Structures, 2025, 71: 108132.
- [31] 陈尧. 腐蚀环境下基于全寿命设计需求与时变可靠度的钢结构性能退化规律研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
Chen Y. Research on the degradation of steel structures for the needs of structural life-cycle design and time-dependent reliability in corrosive environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [32] 施刚, 朱希. 高强度结构钢材单调荷载作用下的本构模型研究[J]. 工程力学, 2017, 34(2): 50-59.
Shi G, Zhu X. Study on constitutive model of high-strength structural steel under monotonic loading[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(2): 50-59. (in Chinese)
- [33] Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters[R]. 1943.
- [34] Rasmussen K J R. Full-range stress - strain curves for stainless steel alloys[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(1): 47-61.