

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.10.008

腐蚀对高性能钢 Q550E 力学指标影响的 试验研究

彭建新, 张伟, 阳逸鸣, 肖林发, 张建仁
(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为深入研究腐蚀对高性能钢 Q550E 力学指标的影响, 分为 5 组, 共制作了 30 个钢材试件, 目标质量锈蚀率分别为 0, 5%, 10%, 15% 和 20%, 在实验室对钢材试件进行了不同程度的加速锈蚀试验, 开展了拉伸试验以及使用 FARO 3D 激光扫描仪扫描锈蚀试件。建立了腐蚀影响下高性能钢 Q550E 的本构关系模型。对比分析了在相同锈蚀率下高性能钢 Q550E 和普通钢 Q235B 力学指标的退化程度。试验研究表明: (1) 随着质量锈蚀率的增加, Q550E 高性能钢材的屈服强度、抗拉强度、伸长率、弹性模量逐渐下降, 锈蚀过程中试件表面蚀坑深度增长明显, 蚀坑呈椭球型和马鞍型, 随着锈蚀率增加到 20%, 蚀坑逐渐增长为局部大蚀坑; (2) 在腐蚀试件的应力-应变曲线中, 随着腐蚀率增加, 钢材的延性性能减小, 逐渐由延性破坏转变为脆性破坏, 屈服平台逐渐缩短甚至消失, 得到了 Q550E 高性能钢材的屈服平台消失时的临界质量锈蚀率。(3) 在锈蚀率变化相同时, 高性能钢比普通钢有更强的抵抗腐蚀退化和变形的能力。

关键词: 桥梁工程; 腐蚀; 力学指标; 高性能钢; 本构关系

中图分类号: U445.47⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 10-0056-07

Experimental Study on Influence of Corrosion on Mechanical Index of High Performance Steel Q550E

PENG Jian-xin, ZHANG Wei, YANG Yi-ming, XIAO Lin-fa, ZHANG Jian-ren

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China)

Abstract: To study the influence of corrosion on the mechanical index of high performance steel Q550E, 30 high-performance steel specimens are fabricated and divided into 5 groups with a designed mass corrosion rate of 0, 5%, 10%, 15% and 20%. The accelerated corrosion test with different degrees and the tensile test on these steel specimens are conducted, and the corroded specimens are scanned by FARO 3D laser scanner in the laboratory. The constitutive relation model is established considering the influence of corrosion. The degradation degrees of the mechanical index of high performance steel Q550E and ordinary steel Q235B is compared and analyzed at same corrosion rate. It is concluded that (1) The yield strength, the tensile strength, the percentage elongation and the elastic modulus of high performance steel Q550E gradually decrease as corrosion rate increases, the depth of corrosion pits at surface of corroded specimens increases and appears ellipsoidal type and saddleback type, and the corrosion pits develop into local large pit when the corrosion rate increases up to 20%; (2) the ductility of the steel specimens reduces and the failure mode

收稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (九七三计划) 项目 (2015CB057701); 国家自然科学基金面上项目 (51378081); 湖南省自然科学基金面上项目 (2018JJ2438); 广东省自然科学基金项目 (2015A030310141)

作者简介: 彭建新 (1978-), 男, 江西安福人, 工学博士, 副教授. (jianxin_peng78@163.com)

varies from ductile to brittle as the corrosion rate increases in the stress-strain curve of corrosion specimen, the yielding plateau of Q550E steel material shortens gradually to disappear, and the critical mass corrosion rate is obtained while the yielding plateau disappeared; (3) the high performance steel has greater ability to resist corrosion degradation and distortion than ordinary steel when at same corrosion rate.

Key words: bridge engineering; corrosion; mechanical index; high performance steel; constitutive relation

0 引言

随着对桥梁结构在荷载等级、跨度、整个寿命周期的成本等方面提出了更高的要求, 设计施工对材料的要求也相应提高。与普通桥梁用钢相比, 高性能钢 (HPS) 在强度、延性、耐候性和疲劳性方面都有自身的优越性。

目前, 国内外对锈蚀钢筋和高强钢筋已进行了大量研究, 建立了不同腐蚀条件下锈蚀钢筋的本构模型^[1-4]。在高性能钢方面, 施刚和班慧勇等通过对 Q460 和 Q960 高强度结构钢材力学性能的研究和总结, 提出了高强钢多折线材料本构模型^[5-7]。王卫永等主要研究了 Q460 钢材的高温力学性能, 得到了钢材的力学性能指标随温度变化的函数表达式^[8]。段兰对 HPS485W 试件进行拉伸试验, 得到了不同板厚 HPS485W 的屈服强度等力学性能指标^[9]。张全成等研究了近海大气中耐候钢和碳钢抗腐蚀性能, 得出两类材料的腐蚀深度和腐蚀时间的关系方程^[10]。史炜洲等研究了在盐雾加速腐蚀下 Q235B 钢材的力学性能, 得到了各力学指标与失重

率的关系式^[11-12]。

高性能钢桥梁结构在腐蚀环境下, 其安全性和耐久性会降低。因此研究腐蚀对高性能钢力学性能的影响十分重要。本研究着重研究在通电加速腐蚀下锈蚀对高性能钢 Q550E 力学性能指标的影响, 建立了腐蚀影响下高性能钢本构关系模型。

1 试验设计

1.1 试件的制作

本试验试件以山东某股份有限公司济南分公司生产的 8 mm 厚 Q550E 钢板为试验材料, 参照 GB/T 2975—1998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》^[13]的具体要求, 在钢板宽度 1/4 处采用全厚度方式切取样坯。钢板材料的化学成分和机械性能符合 GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》^[14]中的标准要求, 相关数据如表 1 所示。钢板质量保证书提供了 Q550E 钢板的拉伸试验数据: 屈服强度为 671 MPa, 抗拉强度为 693 MPa。

表 1 Q550E 化学成分 (单位: %)

Tab. 1 Chemical composition of Q550E steel (unit: %)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Ceq	Cr	Nb	Ni	Cu	V	Ti	Mo	B	Alt
Q550E	0.16	0.21	1.48	0.014	0.005	0.42	0.04	0.19	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.001 9	0.028

材料拉伸试验的试件均为矩形截面, 具体尺寸根据 GB/T 228.1—2010《金属材料室温拉伸试验方法》^[15-16]确定, 如图 1 所示。试验设计了 5 个目标质量锈蚀率为: 0, 5%, 10%, 15%, 20%。其中每个锈蚀率试件个数为 6 个, 共计 30 个。

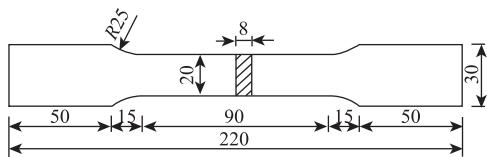


图 1 拉伸试验试件尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Dimensions of specimen for tensile test (unit: mm)

1.2 腐蚀方案

试验前用电子天平 (精确至 0.01 g) 称量并记

录每件试件初始质量, 然后采用实验室外加电流局部加速锈蚀试件, 来模拟桥梁结构用钢在实际工程中的腐蚀状况。具体方法是: 首先为防止拉伸试验时试件夹持两端锈蚀破坏, 用环氧树脂涂抹夹持端并用绝缘胶带将其包裹密实; 然后用铜丝将 24 个标准试件中间平行段 (即试件拉伸时工作段) 串联起来, 将其放进质量分数约 5% 的氯化钠溶液塑料槽中浸泡; 最后用电线将直流稳压稳流电源的正负极分别与试件上的铜丝及用作负极的不锈钢相连。外加电流加速腐蚀过程见图 2。本试验将电流控制在 3 A, 根据法拉第定律, 通过控制时间来控制质量锈蚀率, 以便获取不同目标质量锈蚀率的钢板试件。

在每达到一个预定锈蚀通电时间后, 依次取出 6 个试件。参考 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期

性能和耐久性能试验方法标准》^[16]中的钢筋锈蚀试验：用12%的盐酸溶液对锈蚀试件进行酸洗，经清水漂洗后，再用石灰水中和，最后用清水冲洗干净，放入干燥皿中6 h。然后对锈蚀试件进行编号，用电子天平（精确至0.01 g）称量试件的质量，计算试件的质量锈蚀率。其中，试件质量锈蚀率定义为：

$$\eta_s = (m_0 - m) / m_0, \quad (1)$$

式中， η_s 为腐蚀钢材试件的质量锈蚀率； m_0 为构件腐蚀前的质量； m 为构件腐蚀后的质量。

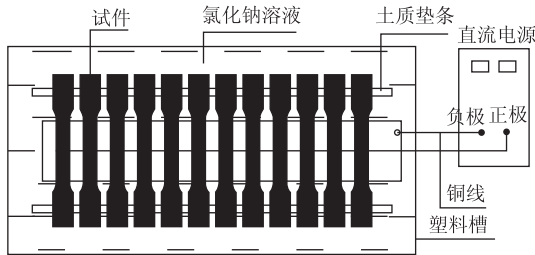


图2 外加电流加速腐蚀过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of accelerated corrosion process by impressing direct current

1.3 拉伸试验

试验根据 GB/T 228.1—2010《金属材料室温拉伸试验方法》^[15]进行，试验拉伸设备采用微机控制电液伺服万能试验机，准确度等级为0.5级。

材料拉伸试验采用位移控制的加载方式。试验开始前，将标距为50 mm的引伸计尽量夹在试件锈蚀最严重的部位。在试件的弹性阶段和屈服阶段，采用位移速度为2 mm/min的定值加载。试件屈服后将位移速度调整为10 mm/min。此后在荷载出现下降趋势时，为防止引伸计被破坏，及时摘下引伸

计。然后继续以10 mm/min的位移速度将试件拉断。试件拉断后，用电子游标卡尺（精确至0.01 mm）量取标距范围内试件的伸长量，计算试件的伸长率。

2 试验结果及分析

2.1 3D 激光扫描

通过 FARO 3D 激光扫描仪扫描试件，扫描结果如图3所示。从图3可以看出：锈蚀率在5%左右时，试件表面蚀坑主要呈椭球形，蚀坑宽度大，深度小，分布分散；当锈蚀率达到10%时，蚀坑宽度和深度继续增长，部分区域连接在一起。同时蚀坑数量增长速度很快，在试件表面形成密集的小蚀坑群。锈蚀率在达到15%的过程中，试件表面蚀坑深度增长明显，蚀坑呈椭球型和马鞍形，并连接在一起形成平行于试件方向的长条状蚀坑。随着锈蚀率增加到20%，蚀坑逐渐增长为局部大蚀坑。这一研究发现与文献[16-17]的结论是一致的。

2.2 破坏形态

各腐蚀试件拉断后，断裂面发生在截面锈蚀最严重的部位。未锈蚀的试件有明显的颈缩现象，随着锈蚀率的增加，颈缩现象逐渐不明显。这是因为随着锈蚀率的增大，腐蚀试件表面的蚀坑深度和数量均增大，延性下降，表现为脆性破坏。

腐蚀试件的断面形式主要有3种：一是锯齿状断面，包括未腐蚀和锈蚀率小于10%的试件；二是劈裂式断面，断面较平整，与试件轴线大致呈45°夹角。锈蚀率大于20%的试件发生这种形式断裂。三

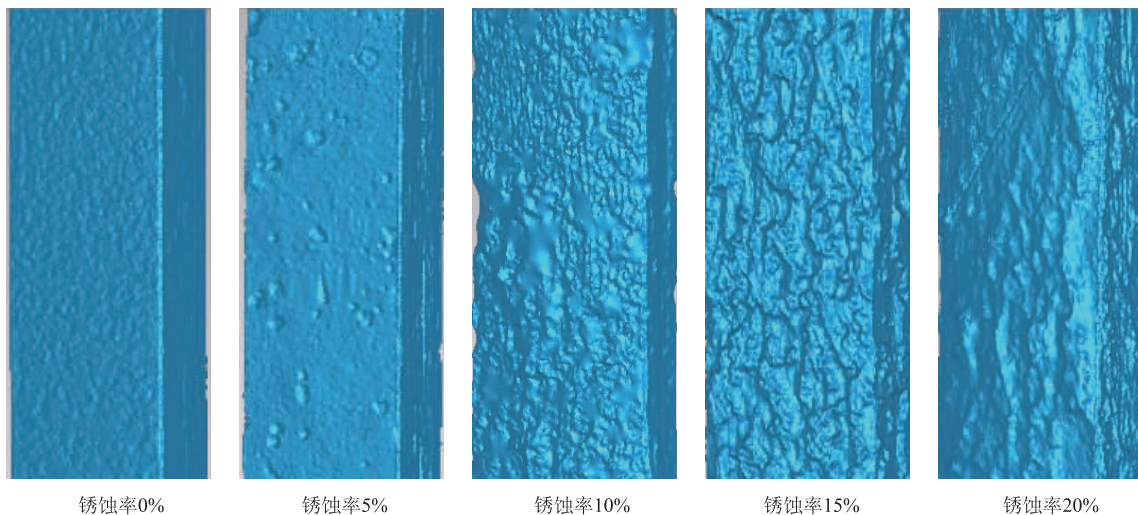


图3 腐蚀试件3D扫描图

Fig. 3 3D scanning images of corroded specimens

是锯齿状和劈裂式两者的结合。具体断面形式如图 4 所示。

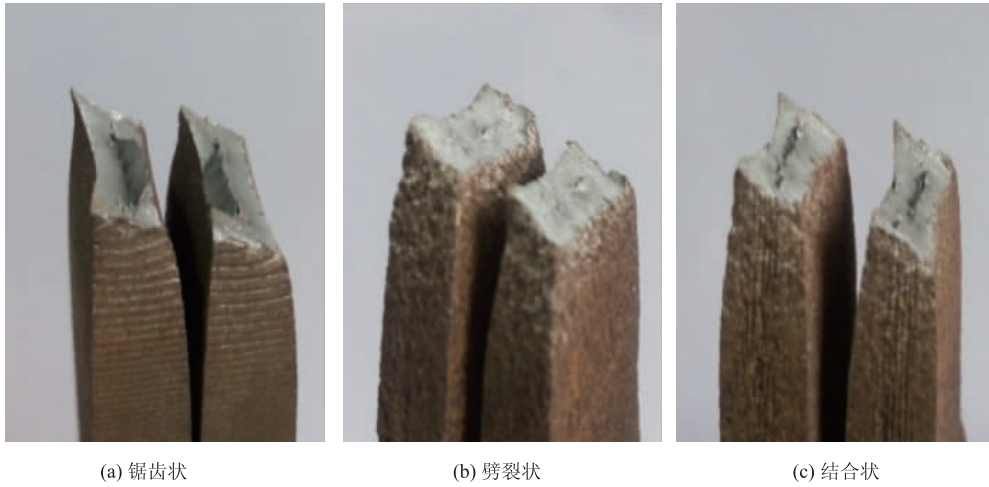


图 4 腐蚀试件断面形式

Fig. 4 Fracture section modes of corroded specimens

2.3 荷载 - 位移曲线

按照上述拉伸试验方法完成试验后, 得到了高性能钢 Q550E 各锈蚀试件的屈服强度、抗拉强度、伸长率及弹性模量。试验分为 5 组, 每组包含 6 个试件, 表 2 列出了每组试件在对应腐蚀率条件下的力学指标平均值。

表 2 腐蚀钢材试件拉伸试验数据

Tab. 2 Tensile test data of corroded steep specimens

试件 编号	目标质 量锈蚀 率/%	平均质量 锈蚀率 η_s /%	屈服 强度 f_y /MPa	抗拉 强度 f_u /MPa	屈服比 f_y/f_u	伸长率 δ_s /%	弹性 模量 E_s /GPa
B0	0	0	639.0	696.8	0.91	20.56	203.9
B5	5	6.22	607.4	664.1	0.91	18.33	183.9
B10	10	11.10	584.0	633.5	0.92	16.60	172.2
B15	15	15.70	560.0	605.7	0.92	14.76	166.1
B20	20	20.37	524.8	583.2	0.90	12.34	157.6

注: 力学性能指标均为 6 个材性锈蚀试件试验结果的平均值。

图 5 给出了高性能钢 Q550E 部分拉伸试件 (每个锈蚀率取 6 个试件) 的荷载 - 位移曲线。试验结果表明: 在实验室外加电流加速腐蚀高性能钢 Q550E 试件, 随着质量锈蚀率的增加, 腐蚀试件承受屈服荷载和极限荷载的能力逐渐降低, 变形能力也逐渐下降。当试件的质量锈蚀率达到 20% 时, 试件在拉伸过程中无明显的屈服现象, 屈服平台逐渐减短至消失。

2.4 高性能钢腐蚀试件力学性能分析

受腐蚀高性能钢力学性能的变化与腐蚀程度有直接关系。参考文献 [18] 的力学指标, 本研究着

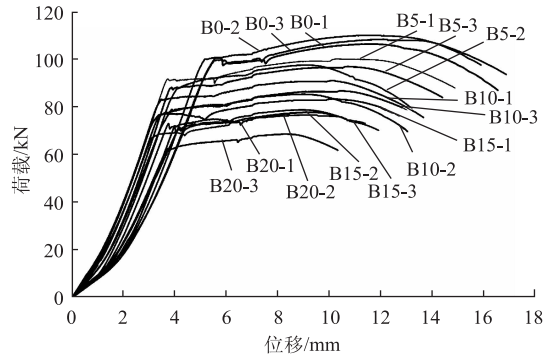


图 5 部分腐蚀试件荷载 - 位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of partial corroded specimens

重研究受腐蚀 Q550E 钢材的屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 、延伸率 δ_s 及弹性模量 E_s 的下降与钢材质量锈蚀率 η_s 的关系。

通过对表 2 中各项力学性能数据运用最小二乘法线性回归 (图 6), 得到受腐蚀后 Q550E 钢材的屈服强度 f_{yc} 、抗拉强度 f_{uc} 、伸长率 δ_{sc} 及弹性模量 E_{sc} 的变化与锈蚀率 η_s 的关系式分别为:

$$f_{yc} = (1 - 0.832\eta_s)f_y, \quad (2)$$

$$f_{uc} = (1 - 0.812\eta_s)f_u, \quad (3)$$

$$\delta_{sc} = (1 - 1.869\eta_s)\delta_s, \quad (4)$$

$$E_{sc} = (1 - 1.196\eta_s)E_s. \quad (5)$$

图 6 中屈服强度相对值、抗拉强度相对值、伸长率相对值、弹性模量相对值分别为腐蚀试件屈服强度 f_{yc} 、抗拉强度 f_{uc} 、伸长率 δ_{sc} 、弹性模量 E_{sc} 与未腐蚀试件屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 、伸长率 δ_s 、弹性模量 E_s 的比值。

由图 6 可知, 高性能钢 Q550E 的力学性能随着锈蚀率的增大表现出如下特征:

(1) 随着锈蚀率的增大, 钢材的屈服强度, 抗拉强度呈现出逐渐下降的趋势。由于蚀坑的不均匀分布, 使试件的应力-应变曲线发生变化, 钢材的屈服点和应力峰值降低。

(2) 伸长率随着锈蚀率的增大呈现显著下降的规律。试件伸长率的下降程度远大于试件锈蚀率、屈服强度、极限强度的下降程度。锈蚀率为

6.71%, 12.09%, 16.71%, 21.64% 的试件的伸长率分别下降了 12.31%, 21.94%, 30.69%, 41.48%。

(3) 在腐蚀试件的应力-应变曲线中, 屈服平台逐渐缩短直至消失。原因是随着锈蚀率的增大, 蚀坑的数量和深度相应变大, 钢材的延性性能减小, 逐渐由延性破坏转变为脆性破坏。

(4) 随着锈蚀程度的增加, 钢材的弹性模量逐渐减小, 屈服比保持不变。

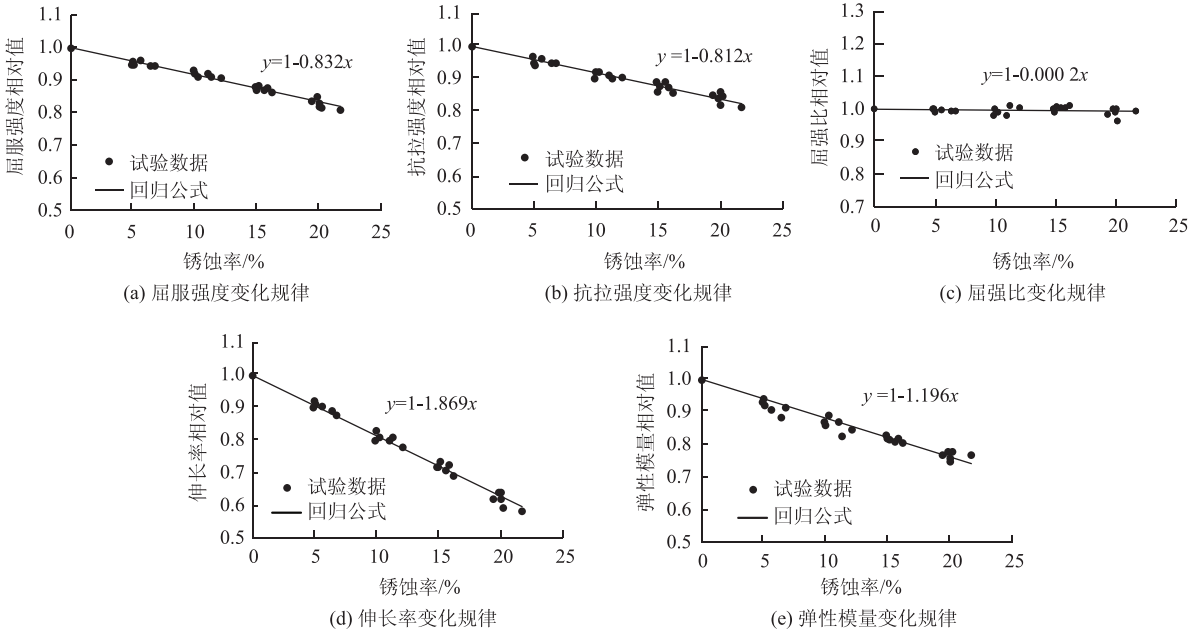


图 6 腐蚀试件力学性能与质量锈蚀率的关系

Fig. 6 Relationship between mechanical property of corroded specimen and mass corrosion rate

3 腐蚀高性能钢与普通钢试件力学性能对比分析

同济大学史炜洲等人^[11]在 2012 年通过室内盐雾加速腐蚀的试验方法研究了普通钢结构用钢 Q235B 试件腐蚀后的力学性能。在史炜洲等人的研究中, 重点探讨了受腐蚀 Q235B 钢材的屈服强度、抗拉强度以及延伸率的下降与钢材失重率的关系。其失重率的定义与本研究质量锈蚀率的定义相同。现在我们对两种材料的力学性能退化程度进行定量的对比分析。为了避免试件厚度的影响, 我们从中提取 8 mm 厚腐蚀试件的试验数据。对比结果发现: 高性能钢比普通钢有更强的抵抗腐蚀退化和变形的能力。

4 腐蚀影响下高性能钢应力-应变关系模型

根据腐蚀影响下高性能钢试件拉伸试验数据以及对各项力学性能指标的分析, 发现试件的力学性能呈现出明显的退化现象。随着质量锈蚀率的增大,

表 3 两种钢材力学指标退化对比表

Tab. 3 Comparison of mechanical index degradation of 2 kinds of steel

钢材名称	Q235B				Q550E			
锈蚀率/%	5.67	8.83	12.03	21.06	5.60	9.95	12.03	21.64
屈服强度退化程度/%	11.3	11.5	15.9	17.7	3.8	7.9	9.1	19.1
抗拉强度退化程度/%	6.2	7.7	9.8	19.9	4.1	8.6	10.4	20.3
伸长率退化程度/%	12.8	18.8	27.7	40.9	9.4	16.8	21.9	41.5

钢材的屈服强度、抗拉强度和极限变形能力降低, 屈服平台逐渐缩短直至消失。通过试验结果分析, 腐蚀试件屈服平台消失时的临界锈蚀率是 20%。因此本研究使用如图 7 所示的腐蚀试件本构关系模型。

假设试件的屈服平台长度随着锈蚀率的增大按照线性规律缩短, 并考虑锈蚀率的影响, 图 7 中各关键参数的计算方法如下:

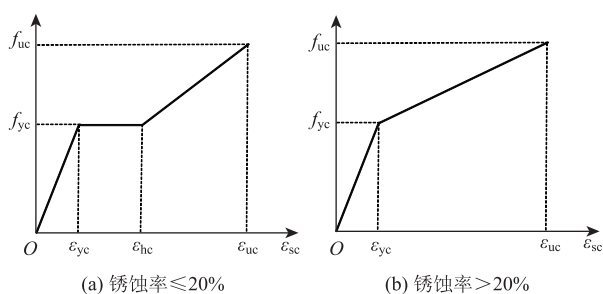


图 7 腐蚀试件本构关系模型

Fig. 7 Constitutive relation models of corroded specimens

$$\varepsilon_{yc} = \frac{f_{yc}}{E_{sc}}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{hc} = \frac{f_{yc}}{E_{sc}} + \lambda_1 \frac{f_{yc}}{E_{sc}} \left(1 - \frac{\eta_s}{\eta_{cr}}\right), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{uc} = \lambda_2 (1 - 1.869\eta_s) \frac{f_{yc}}{E_{sc}}, \quad (8)$$

式中, f_{yc} , f_{uc} 由式 (2) 和式 (3) 确定。考虑到试件拉伸试验过程中应变变化与伸长率变化规律相同, 所以极限应变的计算参考伸长率退化回归公式。参数 λ_1 , λ_2 的取值由拉伸试验中 6 个未锈蚀试件的试验数据统计确定, 取 $\lambda_1 = 7$, $\lambda_2 = 27$ 。其取值意义是在未锈蚀试件的应力-应变曲线上, 屈服平台长度是屈服应变的 λ_1 倍; 未锈蚀试件极限应变是屈服应变的 λ_2 倍。

5 结论

通过对加速锈蚀的 Q550E 钢材试件进行拉伸试验, 发现了锈蚀率对高性能钢材力学性能的影响规律, 建立了本构关系模型, 对比分析了相同锈蚀率下 Q550E 和 Q235B 的力学性能退化程度, 得出以下主要结论:

(1) 腐蚀影响下高性能钢力学性能的退化与腐蚀程度有直接关系。钢材的屈服强度、抗拉强度、伸长率、弹性模量随着质量锈蚀率的增大而逐渐下降。其中伸长率的下降程度远大于钢材屈服强度、抗拉强度的下降程度。

(2) 在腐蚀试件的应力-应变曲线中, 屈服平台逐渐缩短甚至消失。随着质量锈蚀率的增大, 蚀坑的数量和宽度变大, 钢材的延性性能减小, 逐渐由延性破坏转变为脆性破坏。

(3) 在增加相同锈蚀率下, Q550E 的屈服强度、抗拉强度和伸长率比 Q235B 的下降程度小, 高性能钢比普通钢有更强的抵抗腐蚀退化和变形的能力。

(4) 根据试验结果, 运用线性回归的方法得到

腐蚀影响下 Q550E 钢材试件屈服强度、抗拉强度、伸长率、屈强比及弹性模量与质量锈蚀率之间的数学关系式, 建立了应力-应变本构关系模型, 为腐蚀环境下高性能钢 Q550E 在桥梁工程结构中可靠性与耐久性的评估提供了参考。

参考文献:

References:

- [1] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34 (5): 586-592.
ZHANG Wei-ping, SHANG Deng-feng, GU Xiang-lin. Stress-strain Relationship of Corroded Steel Bars [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2006, 34 (5): 586-592.
- [2] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008, 41 (12): 42-47.
WU Qing, YUAN Ying-shu. Experimental Study on the Deterioration of Mechanical Properties of Corroded Steel Bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (12): 42-47.
- [3] 惠云玲, 林志仲, 李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析 [J]. 工业建筑, 1997, 27 (6): 10-13, 33.
HUI Yun-ling, LIN Zhi-shen, LI Rong. Experimental Study and Analysis on the Property of Corroded Rebar [J]. Industrial Construction, 1997, 27 (6): 10-13, 33.
- [4] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡悦. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型 [J]. 土木工程学报, 2001, 34 (3): 47-52, 96.
YUAN Ying-shu, JIA Fu-ping, CAI Yue. The Structural Behavior Deterioration Model for Corroded Reinforced Concrete Beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34 (3): 47-52, 96.
- [5] 施刚, 班慧勇, 石永久, 等. 高强度钢材钢结构的工程应用及研究进展 [J]. 工业建筑, 2012, 42 (1): 1-7, 61.
SHI Gang, BAN Hui-yong, SHI Yong-jiu, et al. Engineering Application and Recent Research Progress on High Strength Steel Structures [J]. Industrial Construction, 2012, 42 (1): 1-7, 61.
- [6] 班慧勇, 施刚, 石永久. 高强钢焊接箱形轴压构件整体稳定设计方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (5): 57-64.
BAN Hui-yong, SHI Gang, SHI Yong-jiu. Research on Design Method for Overall Buckling Behavior of Welded Box Columns Fabricated from High-strength Steels [J].

- Journal of Building Structure, 2014, 35 (5): 57-64.
- [7] 班慧勇, 施刚, 石永久. 不同等级高强钢焊接工形轴压柱整体稳定性能及设计方法研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47 (11): 19-28.
- BAN Hui-yong, SHI Gang, SHI Yong-jiu. Overall Buckling Behavior and Design Method for Axially Compressed Welded I-sectional Columns Constructed with Different Grades of High-strength Steels [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (11): 19-28.
- [8] 王卫永, 刘兵, 李国强. 高强度 Q460 钢材高温力学性能试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 22 (增 1): 30-35.
- WANG Wei-yong, LIU Bing, LI Guo-qiang. Experimental Study on Mechanical Properties of Q460 High Strength Steel at Elevated Temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 22 (S1): 30-35.
- [9] 段兰. 高性能钢 HPS485W 力学性能及混合钢梁的抗弯性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- DUAN Lan. Study on Mechanical Characteristics of High Performance Steel HPS485W and Bending Behavior of Hybrid Girder [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [10] 张全成, 吴建生, 陈家光, 等. 近海大气中耐候钢和碳钢抗腐蚀性能的研究 [J]. 材料科学与工程, 2001, 19 (2): 12-15, 25.
- ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng, CHEN Jia-guang, et al. The Study on Corrosion Resistance of Rust Layer on Surface of Weathering Steel in Marine Atmosphere [J]. Materials Science & Engineering, 2001, 19 (2): 12-15, 25.
- [11] 史炜洲, 童乐为, 陈以一, 等. 腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33 (7): 53-60.
- SHI Wei-zhou, TONG Le-wei, CHEN Yi-yi, et al. Experimental Study on Influence of Corrosion on Behavior of Steel Material and Steel Beams [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33 (7): 53-60.
- [12] 孙飞飞, 谢黎明, 崔崑, 等. Q460 高强钢单调与反复加载性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (1): 30-35.
- SUN Fei-fei, XIE Li-ming, CUI Wei, et al. Experimental Study on Material Properties of Q460 High Strength Steel under Monotonic and Cyclic Loading [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (1): 30-35.
- [13] GB/T 2975—1998, 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备 [S].
- GB/T 2975—1998, Steel and Steel Products—Location and Preparation of Test Pieces for Mechanical Testing [S].
- [14] GB/T 1591—2008, 低合金高强度结构钢 [S].
- GB/T 1591—2008, High Strength Low Alloy Structural Steels [S].
- [15] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验: 第一部分: 室温拉伸试验方法 [S].
- GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials-Tensile Testing-Part 1: Method of Test at Room Temperature [S].
- [16] 彭建新, 胡守旺, 宋波, 等. 锈蚀 RC 梁抗弯性能试验与数值分析 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (6): 34-41, 50.
- PENG Jian-xin, HU Shou-wang, SONG bo, et al. Experimental and Numerical Analysis of Flexural Performance for Corroded RC Beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (6): 34-41, 50.
- [17] 李富民, 袁迎曙. 氯盐腐蚀钢绞线蚀坑几何尺寸的分布特征 [J]. 煤炭学报, 2011, 36 (11): 1826-1830.
- LI Fu-min, YUAN Ying-shu. Distributing Character of Size of Pits on Steel Strands Corroded by Chloride [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36 (11): 1826-1830.
- [18] 彭建新, 阳逸鸣, 唐皇, 等. 锈蚀钢筋蚀坑特征分析及其对力学性能的影响 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2015, 12 (3): 50-55.
- PENG Jian-xin, YANG Yi-ming, TANG Huang, et al. Characteristics of Pitting Corrosion for Steel Reinforcement and Its Effect on Mechanical Properties [J]. Journal of Changsha University of Science and technology: Natural Science Edition, 2015, 12 (3): 50-55.