

考虑蚀坑影响的腐蚀钢板力学性能退化试验研究

徐善华¹, 张宗星¹, 何羽玲², 秦广冲¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 广西建工集团第五建筑工程有限责任公司, 广西 柳州 545001)

摘要: 通过对腐蚀钢板的拉伸试验, 研究表征参数与力学性能的关系, 分析不同锈蚀程度钢材破坏形态、应力-应变关系的差异, 发现锈蚀钢板表面形貌对钢板力学性能退化有一定影响, 比如随着腐蚀程度增加, 屈服平台长度缩短, 甚至逐渐消失等。研究表明: 锈蚀率、局部腐蚀深度及蚀坑的相对尺寸是影响锈蚀钢材拉伸性能的主要因素, 并在试验结果分析基础上, 建立与表面形貌相关的锈蚀钢板力学性能退化模型, 揭示锈蚀钢板力学性能的退化规律, 为钢结构加固设计提供应用参考。

关键词: 腐蚀钢板; 表面形貌; 屈服平台; 退化规律

中图分类号: TU511

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0164-08

Experimental study on monotonic tensile behavior of corroded steel in neutral salt spray environment

XU Shanhua¹, ZHANG Zongxing¹, HE Yuling², QIN Guangchong¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China;

2. Fifth Construction Engineering Company of Guangxi Construction Engineering Group, Liuzhou 545001, China)

Abstract: Through the monotonic tensile tests of steel, the failure pattern and the stress-strain curve of steel in different corrosion degrees were compared. It is found that the surface characteristics of the corroded steel plate have certain influence on the mechanical properties of the steel plate. For example, the larger the corrosion ratio, the shorter significantly the yield platform length got, and even the yield platform of some individual specimens gradually disappeared. The research shows that the corrosion ratio of steel, the local corrosion depth and the relative size of the corrosion pits are the main factors that influence the monotonic tensile properties of corroded steel. According to the variation of mechanical properties of corroded steel with different parameters, the constitutive model of multi parameters of corroded steel in neutral salt spray environment was established, which revealed the degradation rule of corroded steel in material performance and provided application reference for reinforcement design of aging steel structure.

Key words: corrosion steel; surface topography; yield platform; degradation rule

钢结构工程在生命周期全过程中经常会受到多因素的耦合作用, 由之造成的累积损伤历史无疑会影响既有钢结构后续服役期性能, 特别是钢材受环境作用产生不同程度的锈蚀, 而锈蚀必然会导致钢材各项力学性能发生不可逆转的退化, 所以, 评估构件的承载能力下降程度, 准确掌握钢材锈蚀后引起的结构性能变化, 就要充分认识其力学性能的退化规律。

国内外关于锈蚀钢材的力学性能及承载能力研究起步较晚, 相关资料和文献也鲜有报道。现有文献主要研究钢材的腐蚀程度对混凝土结构性

能的影响^[1-4]。关于腐蚀钢材在腐蚀类型、腐蚀形貌与力学性能之间的定量关系研究鲜见极道, 而这些恰恰是研究腐蚀钢材性能退化的关键问题。文献[5]发现锈蚀钢板的强度随锈蚀程度增大服从较显著的两折线退化规律, 退化速率与锈蚀钢板表面锈蚀形貌特征密切相关。文献[6-7]发现锈坑对腐蚀钢材的强度和延性有显著影响, 强度和延性随锈坑深度和密度的增大显著降低。文献[8]则在试验结果分析基础上, 建立与锈蚀率相关的钢筋本构关系模型。

然而到目前为止, 锈蚀钢板的力学性能退化

收稿日期: 2016-04-14

修改稿日期: 2017-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378417); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT13089)

作者简介: 徐善华(1963—), 男, 博导, 主要研究方向为工程结构耐久性。E-mail: xushanhua@163.com

模型鲜有报道^[9]. 作者通过对腐蚀钢板的拉伸试验, 研究力学性能与表征参数的关系, 分析不同锈蚀程度钢材破坏形态、应力-应变关系的差异, 并在试验结果分析基础上, 建立了与表面形貌相关的钢材力学性能退化模型, 揭示锈蚀钢板力学性能退化规律.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验用材料为热轧 Q235 B 钢板, 以 5% (质量比) 的氯化钠溶液为试剂, 将 8 组 (每组 3 个) 试样按顺序斜靠放置, 喷洒试样的一个面至湿润, 为确保两面锈蚀状况一致, 需每周翻转一次并进行喷洒, 锈蚀时间为 440 d. 得到腐蚀试样之后, 将试件浸入在缓蚀剂为 12% (体积比) 的盐酸溶液中, 达 30 min 左右, 用钢刷清洗表面腐蚀产物, 再用氢氧化钙溶液中和, 然后用水冲洗干净, 取出后放在干燥箱中烘干并称重^[10], 腐蚀试件除锈前后如图 2 所示.



图 1 腐蚀试件摆放图
Fig. 1 Arrangement of corrosion specimens

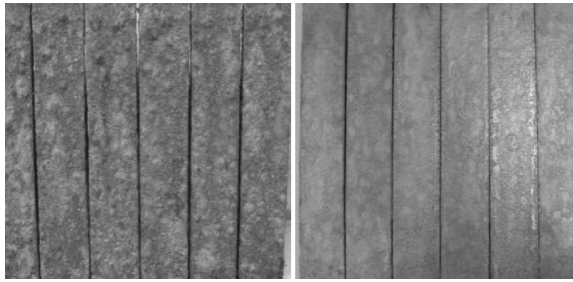


图 2 腐蚀试件除锈前后示意图
Fig. 2 The specimens after rust cleaning

1.2 试验方案

试样的表面形貌采用 PS50 型号三维非接触式表面形貌仪, 采样区域为 40 mm×20 mm. 将锈蚀试样制成尺寸为 250 mm×40 mm×8 mm 的拉伸试样, 预留一组试样作为对比试样, 在 DNS300 型号电子万能试验机上对锈蚀前后试样进行室温拉伸试验, 试件标距之间的变形利用引伸计进行测量, 标距为 50 mm. 试验过程中, 数据采集系统对力和变形进行自动实时采集、记录. 按照 GB/T228.1-2010 要求, 弹性阶段与屈服阶段试验加载速率设为 0.75 mm/min; 强化阶段试验加载速率设为 5 mm/min. 为防止引伸计被拉坏, 当荷载曲线下降时, 加载速率设为 0.25 mm/min, 直至试件拉断, 试验结束, 取下引伸计.

2 试验结果分析

2.1 表面形貌扫描结果

由 NANOVER 专业的 3D 分析软件计算得到的 A01-A81 试件三维粗糙度参数平均值见表 1.

表 1 A01-A81 锈蚀率与平均三维粗糙度参数 (试验数据平均值汇总)
Tab. 1 A01-A81 corrosion rate and average 3D roughness parameters

编号	时间 <i>t</i> /d	锈蚀率 <i>η</i> /%	三维粗糙度参数均值						
			<i>S</i> _a /μm	<i>S</i> _q /μm	<i>S</i> _p /μm	<i>S</i> _v /μm	<i>S</i> _z /μm	<i>S</i> _{sk} /μm	<i>S</i> _{ku} /μm
A01	0	0	5.381	6.521	35.294	43.151	78.445	0.958 6	1.823
A11	30	1.553	31.963	38.824	114.352	137.79	252.140	−0.191 0	2.565
A21	70	5.078	80.138	94.110	189.155	263.305	452.460	−0.195 1	2.110
A31	110	7.486	88.081	101.763	203.595	283.280	486.880	−0.207 1	2.060
A41	150	7.894	91.709	111.374	229.045	305.305	534.350	−0.243 6	2.825
A51	250	9.401	97.958	119.780	305.445	367.835	673.280	−0.313 2	2.726
A61	310	10.467	90.364	111.805	260.955	394.220	655.175	−0.653 0	3.060
A71	370	14.803	109.066	133.050	371.420	353.345	724.770	−0.051 0	2.611
A81	440	18.82	124.655	157.975	460.905	518.145	979.050	−0.081 0	2.945

本试验腐蚀钢材表面 *S*_a、*S*_q 与腐蚀时间关系坐标图见图 3. 由图可知, 在腐蚀 0~70 d, 粗糙度参数 *S*_a、*S*_q 随时间上升而增大, 基本呈线性增长; 腐蚀 70~310 d, *S*_a、*S*_q 随时间变化增长减

缓, 趋于平稳; 腐蚀 310~440 d, S_a 、 S_q 随时间的增长而增大。

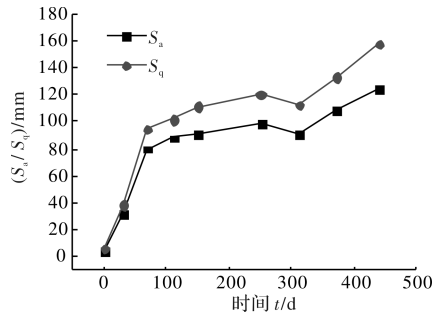


图 3 S_a/S_q 与时间关系

Fig. 3 Relationship between S_a/S_q and time

说明随着腐蚀过程的进行, 当锈蚀钢材 S_a 、 S_q 上升到某一值时, 锈层开始阻止腐蚀介质过多

地接触钢材基体, 成为溶解氧到达钢材腐蚀界面的障碍, 使得溶解氧在锈层中的扩散有浓度梯度, 蚀坑处的腐蚀比其他地方的腐蚀缓慢, 腐蚀中期试件表面无明显的针尖状蚀坑, 而锈层随时间增厚到一定程度开始剥落, 致使到腐蚀后期, 阻止腐蚀介质接触钢材基体的能力减弱, 腐蚀速率加快。

利用 GetData2.20 软件提取腐蚀形貌平面图蚀坑边缘坐标值, 计算得到蚀坑宽度 w (沿 X 轴方向)。通过确定蚀坑 XY 坐标范围, 提取蚀坑的最大局部腐蚀深度 d_1 , 以及蚀坑边缘腐蚀深度 d_2 , 二者的腐蚀深度差即为最大蚀坑深 Δd 。计算得到最大蚀坑深宽比见表 2。

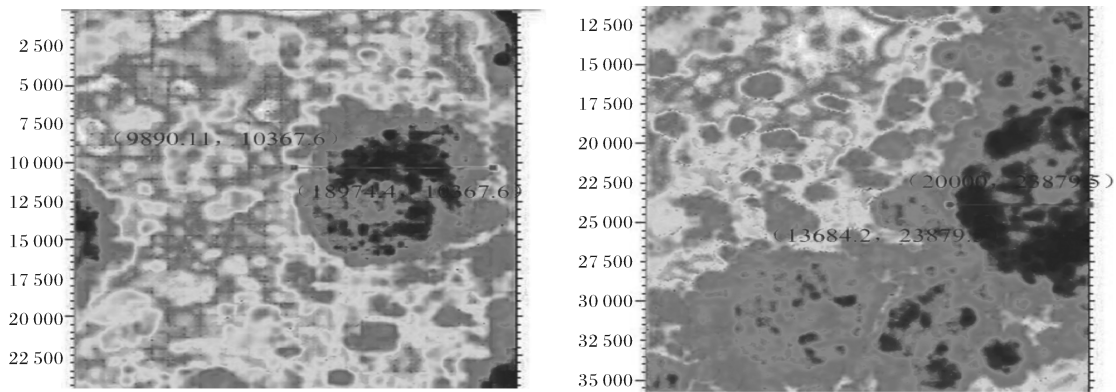


图 4 部分试件表面最大腐蚀坑宽度测量

Fig. 4 Width of maximum corrosion pits on the surface

表 2 最大蚀坑深宽比计算表

Tab. 2 Depth-to-width ratio of maximum corrosion pit

编号		$d_1/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	$\Delta d/\mu\text{m}$		$w/\mu\text{m}$		$\Delta(d/w)$
A11	1	291.87	174.22	117.65	99.5	4 095.6	4 871.7	0.028 73
	2	192.68	111.25	81.43		5 647.8		0.014 42
A21	1	413.46	89.06	324.40	347.0	7 243.6	8 173.3	0.044 78
	2	481.62	112.08	369.54		9 102.9		0.040 60
A31	1	490.353	165.54	324.81	361.8	6 149.6	5 307.1	0.052 819
	2	482.01	83.21	398.80		4 464.57		0.089 325
A41	1	537.529	118.74	418.79	420.6	10 774.6	7 567.8	0.038 868
	2	530.365	108.02	422.35		4 360.9		0.096 848
A51	1	640.501	188.30	452.20	412.1	14 958.3	11 461.5	0.030 231
	2	665.015	292.98	372.04		7 964.6		0.046 711
A61	1	710.352	256.00	454.35	434.3	7 025.5	8 369.9	0.064 672
	2	582.716	168.50	414.22		9 714.33		0.042 64
A71	1	668.328	176.09	492.24	494.6	9 084.29	8 450.0	0.054 186
	2	777.878	280.95	496.93		7 815.8		0.063 58
A81	1	795.007	257.82	537.19	564.3	9 863.1	8 997.9	0.054 464
	2	1 151.314	560.00	591.31		8 132.7		0.072 708

2.2 破坏形态分析

图 5 为 A02—A82、A03—A83 试件拉伸破坏形态。观察所有试件拉伸破坏后仍有颈缩现象, 断裂位置随着锈蚀率的增大, 由试件中间向不确

定方向发展。随着锈蚀率增大, 腐蚀造成的表面缺陷明显, 使得应力分布不均匀, 试件在最薄弱处断裂, 其中 A62 和 A83 的断裂位置已超出标距范围。

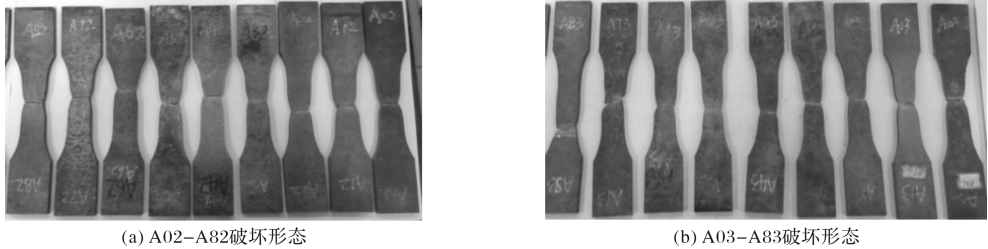


图 5 A02—A82、A03—A83 试件拉伸破坏形态
Fig. 5 Tensile failure modes of A02—A82 and A03—A83 specimens

2.3 不同锈蚀程度的钢板应力-应变曲线

本次试验取 A02—A82 试件所获得的应力-应变曲线见图 6。对比发现, 随着锈蚀程度的逐渐增加, 锈蚀的不均匀性和离散性增大, 应力-应变曲线将发生明显变化, 表现出钢筋的屈服强度降低

且变得越来越不明显; 屈服平台逐渐变短甚至逐渐消失, 屈服后强度增长不多, 即强屈比变小; 断后应变随锈蚀率的增加明显减少, 见图 6 (b) 中 A82 应力-应变局部放大图。

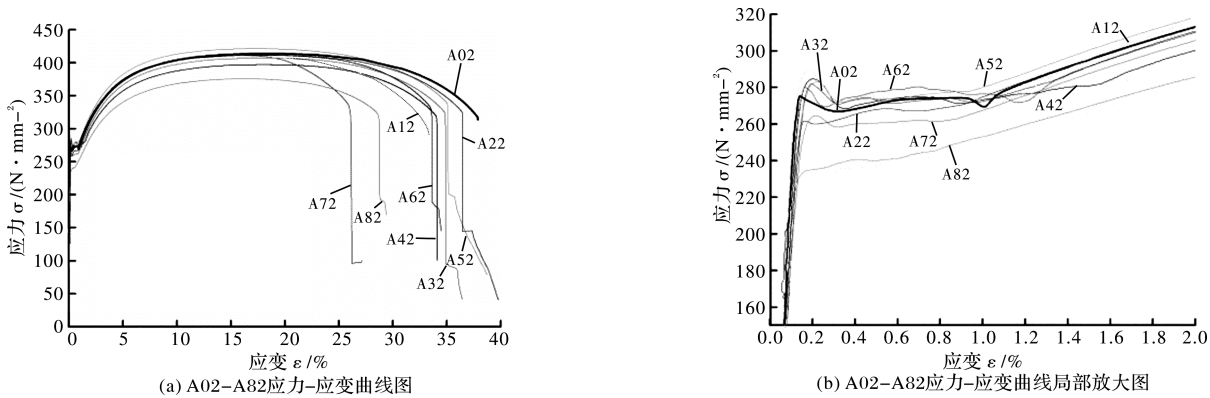


图 6 A02—A82 应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of A02—A82

2.4 力学性能分析

为方便研究锈蚀钢材本构关系, 将主要力学性能指标列入表 3。E_s 为钢材名义弹性模量, f_y

为钢材名义屈服强度, f_u 为钢材名义抗拉强度, ε_u 为抗拉强度所对应的应变, f_{u2} 为断裂应力, ε_{u2} 为断裂应变, ε_Δ 为屈服平台。

表 3 试件拉伸试验主要力学性能指标

Tab. 3 Main mechanical properties of test specimens									
编号	$\eta / \%$	$\eta_1 / \%$	$E_s / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$f_y / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$f_u / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\epsilon_u / \%$	$f_{u2} / \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	$\epsilon_{u2} / \%$	$\epsilon_{\Delta} / \%$
A02	0	0	221 530.02	268.16	416.65	18.346	313.71	37.994	0.950
A12	1.737	1.737	218 946.10	270.84	415.49	17.728	313.77	36.277	0.879
A22	5.154	5.060	199 491.27	267.24	413.26	17.716	326.01	36.420	0.860
A32	7.004	5.220	195 047.01	261.53	408.39	17.782	323.46	34.820	0.717
A42	7.986	5.704	203 064.13	269.93	396.57	18.054	317.89	34.080	1.404
A52	9.185	6.136	206 472.22	274.77	419.52	17.202	335.54	35.070	0.792
A62	10.964	6.305	200 806.06	269.34	407.45	—	317.80	—	1.104
A72	15.623	7.901	189 647.10	271.00	410.59	17.700	323.79	33.594	0.894
A82	19.457	9.021	209 561.93	240.11	374.37	16.386	319.10	28.722	0.656

注: A62 断裂位置异常, 对 A62 的 ε_u、ε_{u2} 不作记录。

不少文献关于蚀坑对锈蚀钢筋力学性能影响进行研究^[11-14], 讨论蚀坑尺寸对锈蚀钢筋强度的影响, 其中文献[11]对锈蚀钢筋蚀坑进行了三维尺寸的测量, 发现钢筋屈服强度的退化与蚀坑的深径比、宽深比有关, 建立相应的函数关系, 从而得到与三维尺寸相关的单坑屈服强度退化模型。本次试验从最大蚀坑角度, 考虑最大蚀坑的深宽比 $(\Delta d/w)_{\max}$ 对力学性能的影响, 但由于钢板腐蚀会造成截面的削减, 造成试件的厚度各不一样, 即使相同大小的蚀坑, 也会产生不同的应力关系。

因此, 采用最大蚀坑深度 Δd_{\max} 与厚度 h 的比值来表征最大蚀坑大小相对值。将最大蚀坑大小相对值与最大蚀坑的深宽比的乘积定义为最大蚀坑影响系数 ζ_{\max} , 其公式如下:

$$\zeta_{\max} = \frac{(\Delta d)^2}{wh} \quad (1)$$

式中: Δd 为最大蚀坑深度, w 为最大蚀坑宽度, h 为试件板厚。计算各组最大蚀坑影响系数列如下表4, 并对各力学性能指标进行拟合, 见图7。

表4 最大蚀坑影响系数与力学性能指标均值

Tab. 4 Mechanical properties and maximum corrosion pit influence coefficient

编号	h/mm	$(\Delta d/w)_{\max}$	ζ_{\max}	$E_s/N \cdot \text{mm}^{-2}$	$f_y/N \cdot \text{mm}^{-2}$	$f_u/N \cdot \text{mm}^{-2}$	$\epsilon_{u2} / \%$	$\epsilon \Delta / \%$
A0	7.260	0.000 00	0.000 0	216 324.6	273.10	420.78	38.029	0.932
A1	7.205	0.028 73	0.469 1	209 968.8	271.78	418.56	36.890	0.994
A2	7.195	0.044 78	2.085 0	208 917.1	271.59	416.09	35.440	0.900
A3	7.135	0.089 33	4.992 7	190 153.2	260.73	405.17	37.270	0.739
A4	7.135	0.096 85	5.732 8	197 013.2	262.27	395.16	34.130	0.840
A5	7.060	0.046 71	2.461 5	204 822.2	268.67	412.54	34.825	0.782
A6	7.020	0.064 67	4.185 7	192 963.2	267.22	407.41	31.434	0.968
A7	6.825	0.063 58	4.629 3	183 919.2	267.17	408.46	33.167	0.859
A8	6.540	0.072 71	6.573 9	194 824.9	255.89	397.81	28.722	0.561

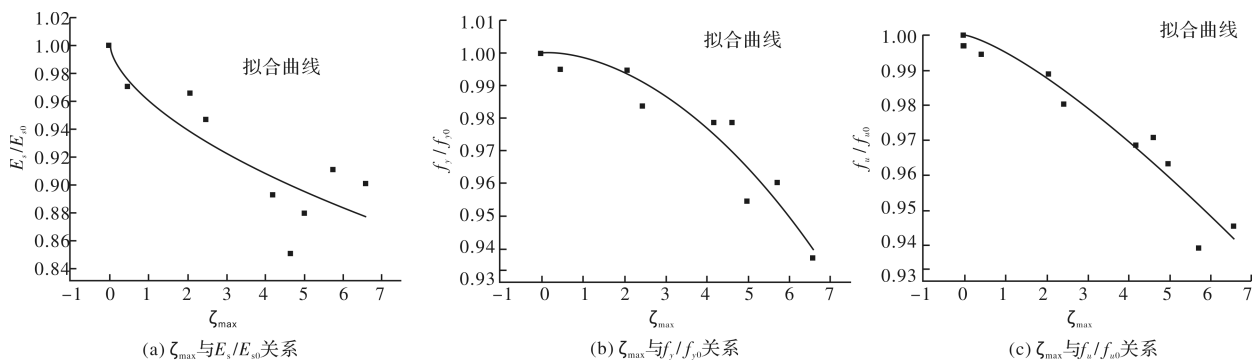


图7 力学性能与最大蚀坑影响系数关系

Fig. 7 Mechanical properties and maximum corrosion pit influence coefficient

$$E_s = E_{s0} (1 - 0.038 78 \zeta_{\max}^{0.614 16}) \quad (2)$$

$$R^2 = 0.698 45$$

$$f_y = f_{y0} (1 - 0.00 149 \zeta_{\max}^{1.962 22}), R^2 = 0.900 02 \quad (3)$$

$$f_u = f_{u0} (1 - 0.004 73 \zeta_{\max}^{1.335 45}), R^2 = 0.916 65 \quad (4)$$

由表4可以发现, 随着锈蚀率的增加, 力学性能指标与锈蚀率的相关性并不明显。文献[5]发现影响锈蚀钢板强度的因素除锈蚀率外, 还与锈蚀5

钢板表面锈蚀形貌特征有关。笔者提出最大蚀坑影响系数的概念, 并与力学性能指标拟合发现, 屈服强度及极限强度与最大蚀坑影响系数 ζ_{\max} 相关性较好, 说明表面蚀坑引起的应力集中导致锈蚀钢材强度退化, 而锈蚀率主要表征平均锈蚀程度, 其造成的截面损失则是试件承载力下降的主要原因。

3 锈蚀钢材性能退化模型分析

K_1 为强化阶段初始应变与屈服应变比值, K_2 为峰值应变与屈服应变比值, K_3 为断裂应变与屈

服应变比值, K_4 为抗拉强度与屈服强度比值, 即强屈比. 参数 K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 用于控制单调拉伸应力-应变曲线形状. 计算各试件的参数值, 并列于下表中.

表 5 拉伸试验模型参数
Tab. 5 Parameters of monotonic tension model

编号	ϵ_y	K_1	K_2	K_3	K_4
A0	0.126 4	8.390 3	144.717 0	301.448	1.541
A1	0.129 7	8.635 8	136.212 5	284.827	1.540 1
A2	0.130 2	7.929 0	134.152	272.276	1.532 3
A3	0.137 2	6.389 2	134.167	271.389	1.554 0
A4	0.133 1	9.431 2	137.572	256.370	1.507 9
A5	0.131 2	6.951 4	132.834	265.555	1.535 7
A6	0.138 7	8.495 2	115.694	219.502	1.524 8
A7	0.145 4	8.052 2	121.444	228.313	1.529 0
A8	0.132 8	8.019 2	143.016	250.684	1.554 9

注: 表内数据为计算均值

对模型各参数进行拟合分析, 因 $\epsilon_y = f_y/E_s$, 所以对 ϵ_y 不做分析, E_s 、 f_y 采用公式(2)-(3). 由于 K_4 离散度较大无法建立拟合公式, 其值在模

型中起到确定 f_u 的作用, 因此在模型中采用公式(4), K_1 、 K_2 、 K_3 拟合曲线与公式见图 8 与式(5)-(7).

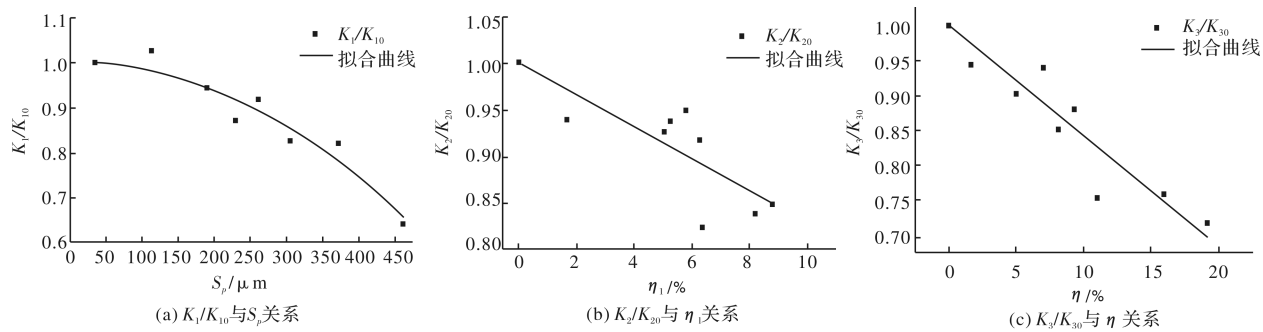


图 8 模型参数与腐蚀参数关系

Fig. 8 Relationship between model parameters and corrosion parameters

$$K_1 = K_{10} [1 - 3.819\,65 \times 10^{-6} (S_p - S_{p0})^{1.883\,13}],$$
$$R^2 = 0.908\,58 \tag{5}$$

$$K_2 = K_{20} (1 - 0.009\,63 \eta_1), R^2 = 0.652\,99 \tag{6}$$

$$K_3 = K_{30} (1 - 0.015\,76 \eta), R^2 = 0.859\,54 \tag{7}$$

参考文献[15]的抛物线模型, 整理得到锈蚀钢材力学性能退化模型如下:

$$\sigma = \begin{cases} E_s & \epsilon (\epsilon > \epsilon_y) \\ f_y & (\epsilon_y \leq \epsilon \leq K_1 \epsilon_y) \\ f_y + \frac{f_u - f_y}{(K_1 - K_1) \epsilon_y} \sqrt{(K_2 - K_1)^2 \epsilon_y^2 - (\epsilon - K_2 \epsilon_y)^2} & (K_1 \epsilon_y \leq \epsilon \leq K_3 \epsilon_y) \end{cases} \tag{8}$$

将各组测得的锈蚀率 η 、局部锈蚀率 η_l 、平均局部腐蚀深度 S_p 及最大蚀坑影响系数 ζ_{\max} 代入上式, 计算得到各组试件锈蚀钢材本构模型参数见下表 6, 并用 Origin8.6 软件绘制模型曲线, 与试

验曲线进行比较验证模型. 由于篇幅限制, 仅列出有代表性的锈蚀钢板模型曲线与试验曲线的对比, 见图 9.

表 6 本构模型参数计算表
Tab. 6 Constitutive model parameters

编号	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
$E_s/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	216 325	211 108	200 735	199 971	198 282	196 784	196 601	190 675	189 270
$f_y/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	273.10	273.01	271.38	263.55	260.58	270.72	266.35	264.87	256.72
$f_u/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	420.78	420.06	415.47	403.74	400.28	414.15	407.31	405.37	396.17
$\epsilon_y/\%$	0.126 2	0.129 3	0.135 2	0.131 8	0.131 4	0.137 6	0.135 5	0.138 9	0.135 6
K_1	8.390 3	8.270 1	7.969 2	7.891 7	7.740 3	7.174 8	7.524 1	6.556 0	5.529 4
K_2	144.72	142.38	137.67	134.90	133.45	131.71	129.39	122.46	118.05
K_3	301.45	293.48	277.42	268.00	263.05	257.12	249.19	225.59	210.55
K_{1ey}	1.059 2	1.069 5	1.077 4	1.040 1	1.017 2	0.987 0	1.019 3	0.910 7	0.750 0
K_{2ey}	18.270	18.413	18.612	17.780	17.538	18.120	17.529	17.012	16.012
K_{3ey}	38.056	37.953	37.505	35.321	34.570	35.372	33.759	31.337	28.559
M	8.580 8	8.478 7	8.217 7	8.374 3	8.456 0	8.372 0	8.538 5	8.726 4	9.136 8
N	296.20	300.79	307.45	280.22	272.95	293.54	272.57	259.24	232.94

注: $M = \frac{f_u - f_y}{(K_2 - K_1)\epsilon_y}$, $N = (K_2 - K_1)^2 \epsilon_y^2$

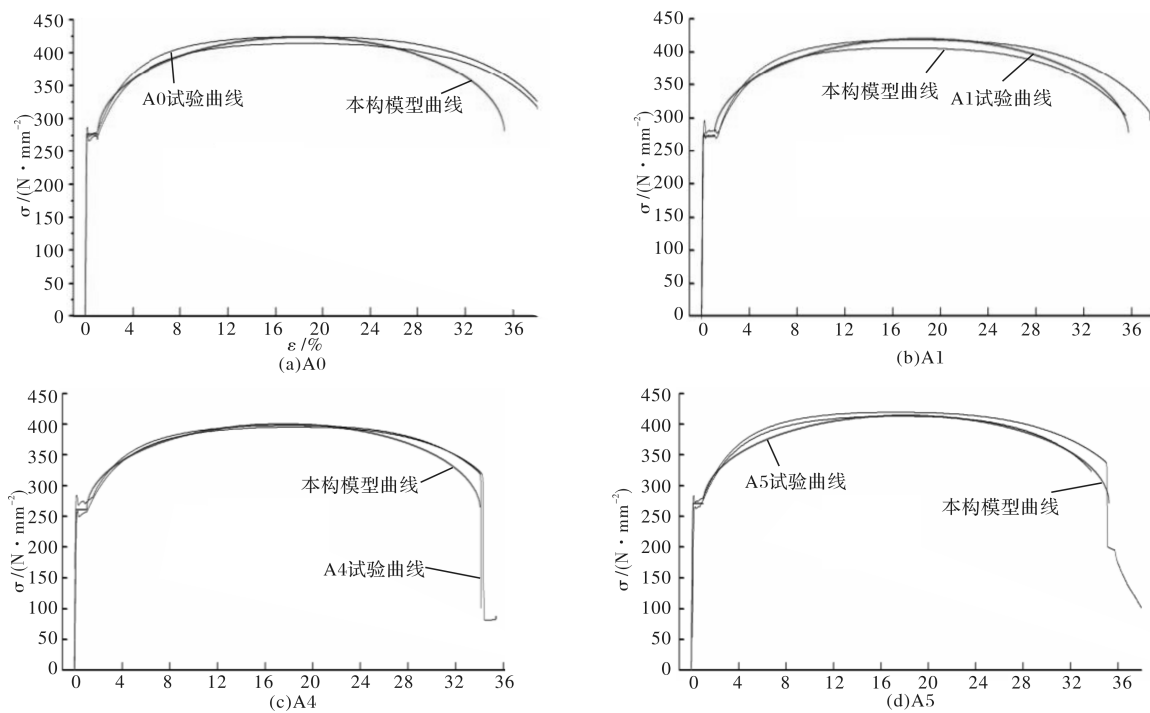


图 9 试验曲线与本构模型曲线对比

Fig. 9 Comparison of the experimental curve and the constitutive model

从图 9 中可以看出,退化模型曲线与试验曲线拟合效果较好,说明其能很好地描述不同的腐蚀时间、锈蚀率及腐蚀形貌的锈蚀钢材力学性能退化,对于老化钢结构的加固设计有一定的指导意义,但该模型仅适用于一定锈蚀率范围内,不适用于屈服平台退化的情况.

4 结论

通过对腐蚀钢材进行单调拉伸性能试验研究,分析钢材腐蚀表面形貌与力学性能之间关系,得到如下结论:

(1)随着锈蚀程度的增加,锈蚀的不均匀性和离散性增大,应力-应变曲线将发生明显变化,表

现出钢筋的屈服强度降低且变得越来越不明显;屈服平台逐渐变短甚至逐渐消失,屈服后强度增长不多,即强屈比变小;锈蚀钢板的断后伸长率随锈蚀程度的增大显著退化。

(2)随着锈蚀程度的增加,力学性能指标与锈蚀率的相关性并不明显。因此笔者引入最大蚀坑影响系数 ζ_{\max} ,并与力学性能指标拟合发现,屈服强度及极限强度与最大蚀坑影响系数 ζ_{\max} 相关性较好,说明表面蚀坑引起的应力集中导致锈蚀钢材强度退化,而锈蚀率主要表征平均锈蚀程度,其造成的截面损失则是试件承载力下降的主要原因。

(3)根据腐蚀钢板力学性能随不同表征参数变化规律,建立与表面形貌相关的锈蚀钢材力学性能退化模型。该模型曲线与试验曲线拟合效果较好,能较准确地描述不同的腐蚀时间、锈蚀率及腐蚀形貌的锈蚀钢材力学性能退化,对于老化钢结构的加固设计有一定的指导意义,但该模型仅适用于一定锈蚀率范围内,不适用于屈服平台退化的情况。

参考文献 References

- [1] 张霞,柳超,刘小清,等. 钢结构耐久性研究现状[J]. 钢结构, 2011, 26(11): 72-74.
ZHANG Xian, LIU Chao, LIU Xiaoqing, et al. Research status on durability of steel structure[J]. Steel Construction, 2011, 26(11): 72-74.
- [2] 史炜洲. 钢材腐蚀对住宅钢结构性能影响的研究与评估[D]. 上海: 同济大学, 2009.
SHI Weizhou. Research and evaluation on the influence of corrosion steel structure to residential steel structure[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [3] 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 Weizhou, TONG Lewei, CHEN Yiyi, 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.
- [4] 徐善华,秦广冲,张宗星,等. 中性盐雾腐蚀钢板的滞回性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(11): 183-188.
XU Shanhua, QIN Guangchong, ZHANG Zongxing, et al. Experimental study on hysteretic behavior of corrosion steel in the neutral salt spray[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11): 183-188.
- [5] 邱斌,徐善华. 锈蚀钢板力学性能的退化规律[J]. 机械工程材料, 2014, 38(10): 60-63.
QIU Bin, XU Shanhua. Deterioration law of mechanical properties of corroded steel plates [J]. Materials for mechanical engineering, 2014, 38(10): 60-63.
- [6] NAKAI T, MATSUSHITA H, NORIO Y, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report)[J]. Marine Structures, 2004, 17(5): 403-432.
- [7] NAKAI T, MATSUSHITA H, NORIO Y. Effect of pitting corrosion on strength of web plates subjected to patch loading[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(1): 10-19.
- [8] 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 Yingshu. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42-47.
- [9] 张伟平,商登峰,顾祥林. 锈蚀钢筋力学性能研究现状分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(s1): 706-709.
ZHANG Weiping, SHANG Dengfeng, GU Xianglin. State-of-the-art of the mechanical properties of corroded steel bars[J]. Industrial Construction, 2005, 35(s1): 706-709.
- [10] ISO/TC 156. Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens: ISO Standard 8407 [S], Switzerland: ISO, 1502009.
- [11] 王波,袁迎曙,李富民,等. 氯盐锈蚀钢筋的屈服强度退化分析及其概率模型[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 597-603.
WANG Bo, YUAN Yingshu, LI Fumin, et al. Deterioration analysis of yield strength and its probabilistic model of steel bar corroded by chloride[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 597-603.
- [12] 范颖芳,周晶. 考虑蚀坑影响的锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(3): 248-252.
FAN Yingfang, ZHOU Jing. Mechanical property of rusty rebar considering the effects of corrosion pits [J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(3): 248-252.
- [13] 宋嘉文,詹元,金慧珍,等. 锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(6): 8-10.
SONG Jiawen, ZHAN Yuan, JIN Huizhen. Study on mechanical properties of corroded steel bars[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(6): 8-10.
- [14] 陈瑞,杨明宇,彭涛,等. 钢筋蚀坑模型及其对应力分布的影响[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2009, 9(1): 17-19.
CHEN Rui, YANG MingYu, PENG Tao, et al. Reinforced pit model and its influences on stress distribution[J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2009, 9(1): 17-19.
- [15] ESMAILLY A. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads[J]. Aci Structural Journal, 2004, 101(1): 124-132.

(编辑 沈波)