

文章编号:1007-9629(2021)04-0781-07

## 海洋环境下锈蚀高强度钢材滞回性能

郭宏超<sup>1,2</sup>, 李彤宇<sup>1</sup>, 王德法<sup>1,2</sup>, 高兑现<sup>1,2</sup>, 李晓蕾<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为研究海洋腐蚀对 Q690 高强度钢材(简称高强钢)滞回性能的影响,针对通过室内人工加速模拟腐蚀方法获得的 Q690 高强钢锈蚀试件,进行形貌扫描和循环加载试验,分析了不同腐蚀程度对其滞回性能的影响规律,建立了锈蚀钢材滞回曲线模型参数与其锈蚀率之间的关系。结果表明:Q690 高强钢抗震性能随腐蚀程度的增加而下降,腐蚀 100 d 后试件的滞回耗能降低 15.2%,极限抗拉强度降低 14.6%,锈坑深度达 600  $\mu\text{m}$ ;采用 Ramberg-Osgood 模型可以较好地模拟锈蚀高强钢在循环荷载作用下的力学性能,该本构模型具有较好的实用性。

**关键词:** Q690 高强钢; 海洋腐蚀; 形貌扫描; 滞回曲线; 本构模型

**中图分类号:** TU 391; TU512      **文献标志码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.015

## Hysteretic Properties of Corroded High Strength Steel in Marine Environment

GUO Hongchao<sup>1,2</sup>, LI Tongyu<sup>1</sup>, WANG Defa<sup>1,2</sup>, GAO Duixian<sup>1,2</sup>, LI Xiaolei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy Engineering in Northwest Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the influence of marine corrosion on hysteretic performance of Q690 high strength steel, the corroded specimens of Q690 high strength steel obtained by the indoor artificial accelerated simulation corrosion method were subjected to morphology scan and cyclic loading tests under different corrosion conditions. The degree of influence on the hysteresis performance of the material, the relationship between the hysteresis curve model parameters of the corroded steel and the corrosion rate were established. The results show that the seismic performance of Q690 high strength steel decreases with the increase of the corrosion degree. After 100 days of corrosion, the hysteretic energy consumption of the specimen is reduced by 15.2%, the ultimate tensile strength is reduced by 14.6%, and the depth of the rust pit reaches 600  $\mu\text{m}$ . The Ramberg-Osgood model can be used. The mechanical properties of corroded high strength steel under cyclic loading are well simulated, and the constitutive model has good practicability.

**Key words:** Q690 high strength steel; marine corrosion; morphology scan; hysteresis curve; constitutive model

在实际工程中,一些钢结构建筑因长期处于湿热、盐雾和酸雨等腐蚀环境中,会出现严重锈蚀问题。锈蚀不仅破坏构件截面,还影响钢结构建筑的稳定性,导致其安全强度下降,钢材延性降低,构件性能退化,严重影响结构的安全性<sup>[1-2]</sup>。徐善华等<sup>[3]</sup>和

Xu 等<sup>[4]</sup>对锈蚀钢材进行单调拉伸试验,发现腐蚀使钢材的屈服强度和极限抗拉强度线性下降,显著影响钢材的延性。梁岩等<sup>[5]</sup>通过锈蚀高强钢筋往复加载试验,发现随着锈蚀率的上升,高强钢筋的耗能能力下降,在地震环境中极易发生脆性破坏。郑山锁

收稿日期:2020-02-17; 修订日期:2020-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978571);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2021JC-41)

第一作者:郭宏超(1981—),男,甘肃庆阳人,西安理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail:ghc-1209@163.com

等<sup>[6]</sup>进行了室内快速腐蚀试验和低周往复加载试验,分析了不同锈蚀程度对框架梁破坏模式、承载力、变形和耗能能力的影响。

高强度钢材(简称高强钢)是指名义屈服强度超过 420 MPa 的钢材。在近海及海岸建构筑物中采用高强钢能够有效降低成本,减小构件截面、焊缝尺寸,提高波浪荷载作用下结构的疲劳强度,延长海洋腐蚀环境下结构的使用寿命,具有良好的经济效益和社会效益<sup>[7-10]</sup>。

目前,大量研究集中在普通钢材锈蚀后的力学性能退化规律方面,而对锈蚀高强钢的相关研究甚少。鉴于此,本文通过室内快速腐蚀试验,获得不同腐蚀程度下 Q690 高强钢试件,对其进行循环往复加载试验。采用 Ramberg-Osgood 模型<sup>[11]</sup>拟合了不同腐蚀程度下高强钢的骨架曲线,分析不同腐蚀周期下关键控制参数的变化规律,并建立了锈蚀 Q690 高强钢的滞回本构模型,同时验证了模型的准确性和实用性,以期为海洋环境下 Q690 高强钢抗锈蚀能力和结构安全评估提供基础理论和科学依据。

## 1 试验

### 1.1 腐蚀试验

浪溅区是海洋环境中腐蚀最为严重的区域。根据 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》,采用盐雾湿热循环方法模拟海洋浪溅区环境。以无涂层 Q690 高强钢为研究对象,进行浸润—潮湿—干燥循环处理,具体处理步骤如下:首先将试件用饱和 NaCl 溶液浸泡 6 h;随后放入湿热箱内养护 12 h,箱内温度恒定在 35 ℃,相对湿度恒定在(93±3)%;最后将试件依次取出,置于室内自然晾干。

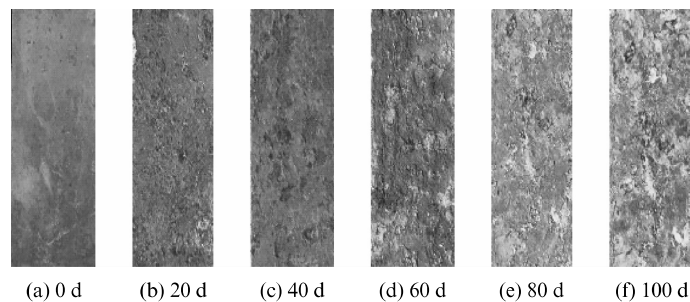


图2 不同腐蚀时间下试件的表面形貌

Fig. 2 Morphology of specimens at different corrosion times

### 2.2 锈蚀率

钢材的锈蚀率  $\eta_s$  (%) 采用质量损失率来表征,其计算表达式为:

$$\eta_s = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为钢材锈蚀前的质量, g;  $m$  为钢材锈蚀后

### 1.2 试件设计

分别对 5 批(每批 2 个)Q690 高强钢试件进行 20、40、60、80、100 d 周期性腐蚀,编号分别为 ZH-2、ZH-3、ZH-4、ZH-5、ZH-6;同时取另外 1 批试件(2 个未锈蚀试件)作为对比试件,编号为 ZH-1。试件尺寸如图 1 所示。

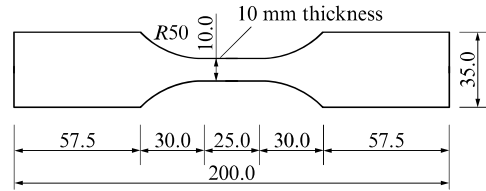


图1 试件尺寸图

Fig. 1 Specimen drawing(size:mm)

### 1.3 循环加载方案

采用 HT-9711 动态材料试验机,对 6 批试件进行低周往复加载试验。加载采用应变控制,第 1 级荷载以 1% 为应变峰值,随后应变以 1% 的增幅进行变幅加载,每级荷载循环 2 次,当应变达到 6% 时停止加载。

## 2 腐蚀结果及分析

### 2.1 宏观形貌

不同腐蚀时间下试件的表面形貌如图 2 所示。由图 2 可见:腐蚀初期,试件锈蚀程度较小,以局部点蚀为主;随着腐蚀时间的延长,试件锈蚀区域逐渐连通,由局部点蚀向均匀锈蚀过渡;随着腐蚀程度进一步增加,试件表面出现红褐色锈蚀产物,部分区域出现锈蚀物堆积现象;腐蚀后期,试件表面产生大量红褐色锈蚀产物,有明显鼓起现象,部分锈层开始脱落。

的质量, g.

各试件的锈蚀率如表 1 所示.

表 1 各试件的锈蚀率  
Table 1 Corrosion rates of specimens

Code	Corrosion time/d	$m_0/g$	$m/g$	$\eta_s/\%$
ZH-2	20	1 312.98	1 296.86	1.23
ZH-3	40	1 310.64	1 270.99	3.03
ZH-4	60	1 308.75	1 255.73	4.05
ZH-5	80	1 311.88	1 230.73	6.18
ZH-6	100	1 309.45	1 215.00	7.21

由表 1 可见,随着腐蚀时间的延长,试件锈蚀率呈增大趋势. 试件锈蚀率随时间变化的线性拟合式为:

$$\eta_s = 0.081t + 0.405, R^2 = 0.988 \quad (2)$$

### 2.3 微观形貌扫描分析

采用 LEXT OLS4000 3D 激光扫描共聚焦显微镜,得到试件表面 3D 微观形貌,如图 3 所示. 由图 3 可知:腐蚀初期,试件表面呈现大量针尖状点锈,锈坑深度较浅;随着腐蚀时间的增加,试件表面锈坑逐渐连通,锈坑尺寸和深度均逐渐扩大,由点蚀向大面

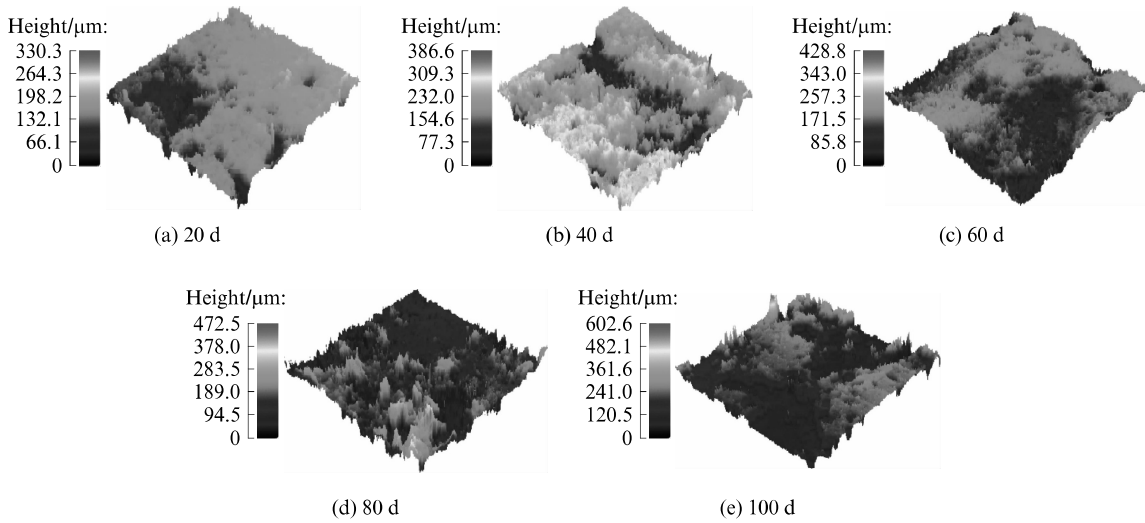


图 3 试件 3D 微观形貌扫描照片  
Fig. 3 3D morphology scan photos of specimens

积坑蚀发展;当腐蚀时间为 100 d 时,试件表面最大锈坑深度达到 600  $\mu\text{m}$ .

用表面算数平均高度  $S_a$  ( $\mu\text{m}$ ) 和表面均方根高度  $S_q$  ( $\mu\text{m}$ ) 这 2 个粗糙度参数来表征锈蚀钢材的形貌特征. 两者计算表达式为:

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_D |z(x,y)| dx dy \approx \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n |z(x_i, y_j)| \quad (3)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_D z^2(x,y) dx dy} \approx \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n z^2(x_i, y_j)} \quad (4)$$

式中:  $A$  为评定区域  $D$  的面积;  $z(x,y)$  为残存表面积;  $M, N$  为扫描区域内  $x, y$  方向离散点个数;  $l_x, l_y$  为采样区域  $x, y$  方向的边长.

试件的粗糙度参数如表 2 所示. 由表 2 可知: 腐蚀初期,试件的  $S_a, S_q$  随着腐蚀时间的增加而增大; 之后  $S_a, S_q$  随腐蚀时间延长逐渐变缓, 最终趋于平稳; 2 个粗糙度参数变化规律相似. 这说明随着腐蚀时间的增加, 试件表面的粗糙程度越来越大.

表 2 试件的粗糙度参数  
Table 2 Roughness parameters of specimens

Code	Corrosion time/d	$S_a/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$
ZH-2	20	26.763	29.824
ZH-3	40	27.750	34.746
ZH-4	60	41.341	54.217
ZH-5	80	44.439	56.780
ZH-6	100	44.168	54.895

## 3 试验结果分析

### 3.1 滞回曲线

循环荷载作用下各试件滞回曲线 ( $\sigma-\epsilon$ ) 如图 4 所示. 由图 4 可知: (1) 6 组试件的滞回曲线均十分饱满, 说明试件腐蚀程度较小, 仍具有较好的塑性变形能力和耗能能力. (2) 滞回曲线包括首次加载段、卸载段、再加载段和骨架曲线段. 在首次加载段, 弹性阶段并未出现明显的屈服平台, 随着应变的增加, 应力也在增加, 发生循环硬化现象, 但应力提高不明

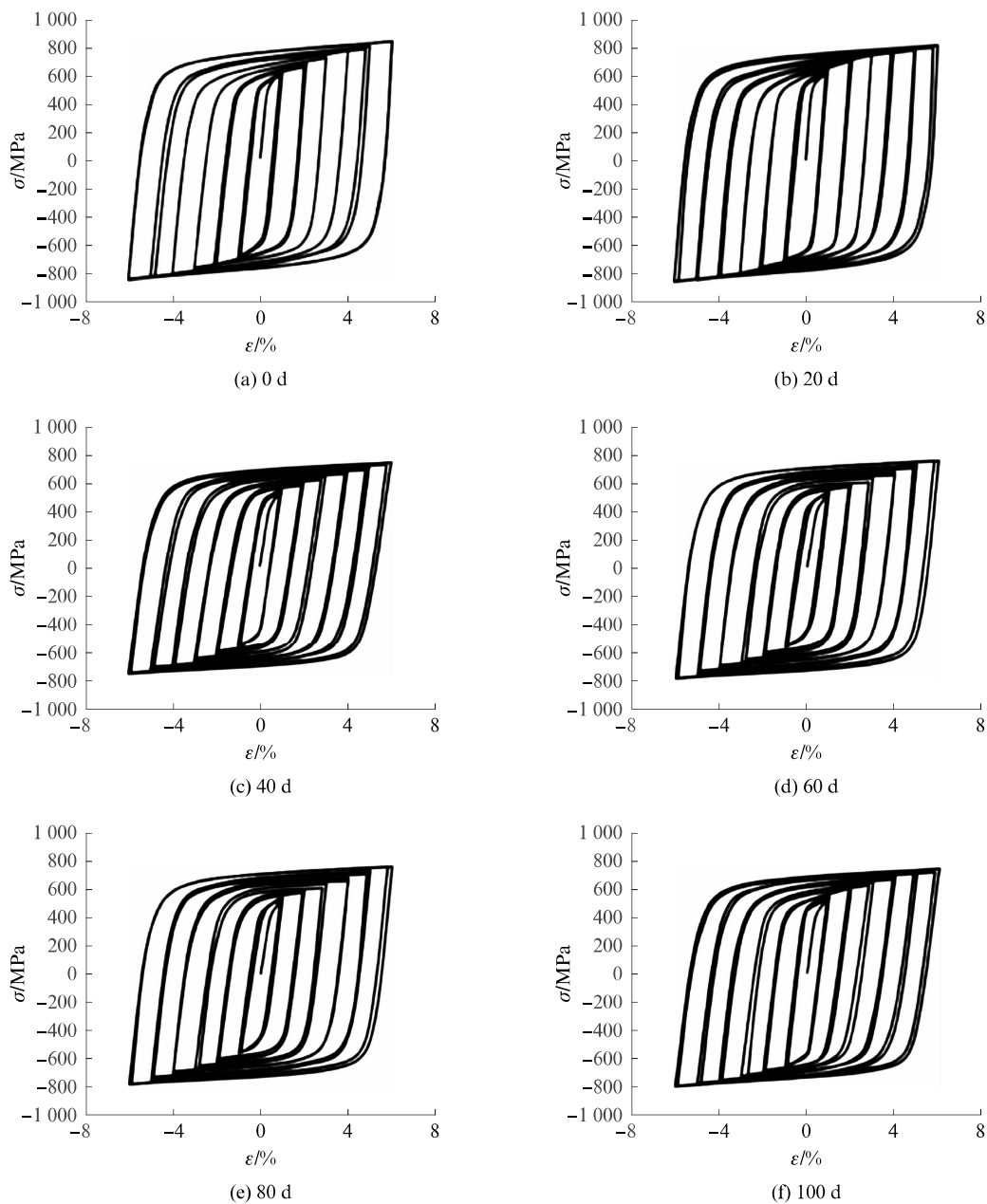


图4 各试件的滞回曲线  
Fig. 4 Hysteresis curves of specimens

显;在卸载段,卸载曲线与首次加载段弹性阶段斜率基本一致;在再加载段,滞回曲线的屈服极限有所降低,出现包辛格效应,钢材在塑性应变作用下为各向异性。

由图4还可见:(1)各试件的滞回曲线同一环体中受压极限应力均大于受拉应力,同一应变幅值下两滞回环并未完全重合,后圈要比前圈大。这是因为随着应变的增加,屈服面随循环次数增加而逐渐增大,出现了同向强化现象,随着循环应变幅值的不断增加,钢材的循环强化效应使得试件在相同应变下

应力不断增大,并逐渐趋于稳定。(2)随着腐蚀程度的加深,各级循环的卸载曲线弹性模量( $E = \sigma/\epsilon$ )略有降低,试件应力峰值呈下降趋势。

### 3.2 滞回耗能

高强钢的滞回耗能 $J$ 代表其在循环荷载作用下的耗能能力,通常以滞回曲线中所有滞回环所围成的面积之和表示。为方便对比,本试验将滞回耗能取均值。表3为试件的滞回耗能。由表3可知:在相同滞回圈数下,试件滞回耗能随腐蚀程度的增加而逐渐减小;相对未锈蚀试件,锈蚀率为7.21%的试件

表 3 试件的滞回耗能  
Table 3 Hysteretic energy consumption of specimens

Code	Number of hysteresis/times	J/MPa	$\eta_s/\%$
ZH-1	12	1 037.92	0
ZH-2	12	1 027.15	1.23
ZH-3	12	965.93	3.03
ZH-4	12	927.74	4.05
ZH-5	12	922.08	6.18
ZH-6	12	879.13	7.21

滞回耗能降低 15.3%。

高强钢试件的滞回耗能随腐蚀程度的增加而下降,对结构的抗震性能有较大影响.随着腐蚀时间的延长,试件表面出现大小不均的锈坑,在反复荷载作用下容易形成应力集中,促使局部出现裂纹并迅速扩展,最终发生脆性破坏.

### 3.3 骨架曲线

不同腐蚀程度下 Q690 高强钢试件骨架曲线如图 5 所示.由图 5 可知:试件在循环荷载作用下存在明显的硬化现象,基本没有屈服平台;随着腐蚀时间的延长,试件极限抗拉强度逐渐降低,腐蚀 100 d 后,试件极限抗拉强度下降 14.6%。

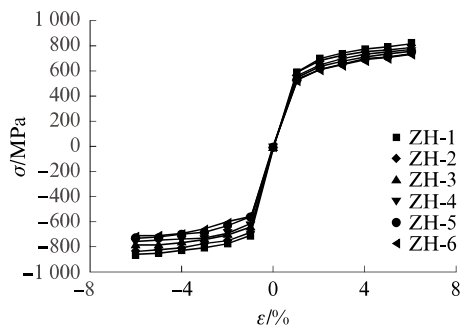


图 5 试件的骨架曲线  
Fig. 5 Skeleton curves of specimens

## 4 滞回本构模型

### 4.1 理论模型

Ramberg-Osgood 模型可以较好地模拟 Q690 高强钢的循环特性,其表达式为:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5)$$

式中: $\Delta\epsilon$  为总应变幅; $\Delta\epsilon_e$  为弹性应变幅; $\Delta\epsilon_p$  为塑性应变幅; $E$  为弹性模量; $K'$  为循环强化系数; $n'$  为循环强化指数; $\Delta\sigma$  为应力增量.

### 4.2 拟合模型参数

为便于比较不同锈蚀钢材的骨架曲线,对式(5)进行简化处理,如式(6)所示.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (6)$$

运用式(6)对高强钢试件的骨架曲线进行拟合,可得到循环强化系数  $K'$  和循环强化指数  $n'$ ,其具体拟合值如表 4 所示.

表 4 骨架曲线模型参数  
Table 4 Skeleton curve model parameters

Code	E/GPa	$\eta_s/\%$	$K'/\text{MPa}$	$n'$
ZH-1	226.961	0	1 331.56	0.036 72
ZH-2	218.104	1.23	1 298.12	0.036 10
ZH-3	215.476	3.03	1 288.28	0.037 23
ZH-4	211.325	4.05	1 279.96	0.048 42
ZH-5	224.908	6.18	1 269.78	0.049 14
ZH-6	198.547	7.21	1 195.62	0.037 07

由表 4 可见:随着腐蚀时间的延长,试件的循环强化系数  $K'$  呈线性下降趋势,钢材在循环荷载下的强化效应有所减弱,其腐蚀 100 d 时的  $K'$  较未腐蚀试件降低 10.20%;而循环强化指数  $n'$  变化规律不明显,未锈蚀 Q690 高强钢材为 0.036 72,腐蚀 100 d 后为 0.037 07,其变化范围在 3.34% 之内.对未腐蚀、腐蚀 60、100 d 试件的骨架曲线进行拟合,来研究腐蚀损伤对试件滞回性能影响.3 种试件的拟合骨架曲线见图 6.由图 6 可见:利用 Ramberg-Osgood 模型拟合的骨架曲线较为准确;骨架曲线上上升段和单调加载曲线基本一致,没有明显屈服点,存在循环硬化现象.

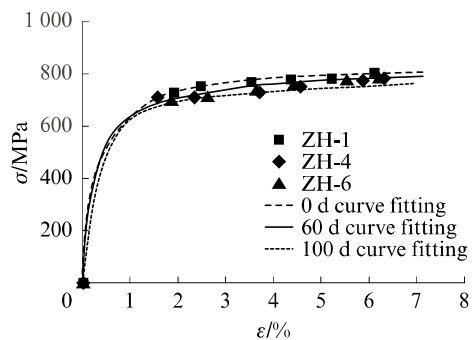


图 6 3 种试件的拟合骨架曲线  
Fig. 6 Fitting skeleton curves of three kinds of specimens

### 4.3 锈蚀高强钢滞回准则

Q690 腐蚀高强钢材循环本构模型由循环骨架曲线和滞回准则组成.试件的循环本构模型见图 7.由图 7(a)可见,再加载曲线的斜率处于卸载刚度  $E_s$  与起始点到终点的切线刚度  $E_k$  之间.为减少计算,将再加载曲线分为两段函数,表达式如式(7)、(8)所示.

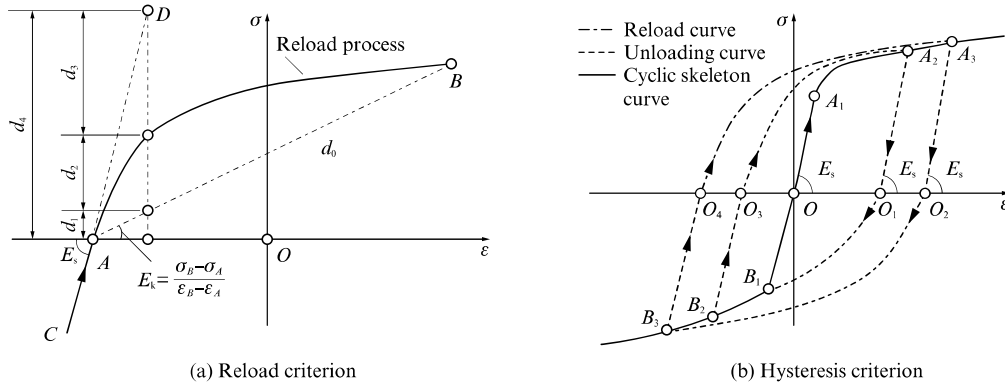


图 7 循环本构模型  
Fig. 7 Cyclic constitutive model

$$\begin{cases} \sigma = E_s(\epsilon - \epsilon_A) + \sigma_A - (E_s - E_k)(\epsilon - \epsilon_A) \\ E_k = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\epsilon_B - \epsilon_A} \\ \eta = \frac{d_3}{d_2 + d_3} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} d_4 = E_s(\epsilon - \epsilon_A) \\ d_2 + d_3 = (E_s - E_k)(\epsilon - \epsilon_A) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\sigma_A$ 、 $\epsilon_A$  为点 A 处的应力和应变； $\sigma_B$ 、 $\epsilon_B$  为点 B 处的应力和应变； $\eta$  为比例系数， $0 \leq \eta \leq 1$ 。

图 7(b)描述了试件完整的循环加载过程：首次加载时曲线沿着单调拉伸曲线  $O-A_1$  达到  $A_1$  点屈服强度；随后按照循环骨架曲线准则到达峰值点  $A_2$ ；在达到峰值点后，根据弹性模量弹性卸载，卸载刚度  $E_s$  与初始弹性模量相同，直到到达  $x$  轴得到再加载起始点  $O_1$ ，至此再加载过程开始。首次指向为受压方向的屈服点  $B_1$ ，峰值过后，曲线沿着循环骨架曲线继续进行，直到到达受压方向的卸载点  $B_2$ ，此点同样是下一周期的峰值指向点。卸载到  $x$  轴上的  $O_3$  点之后，再加载过程发生，受拉达到最大值  $A_3$  后，进行第 2 圈拟合时，重复上述过程。

图 8 为试件通过循环本构模型得到的计算值和试验值拟合曲线。由图 8 可见，试件的试验曲线与拟

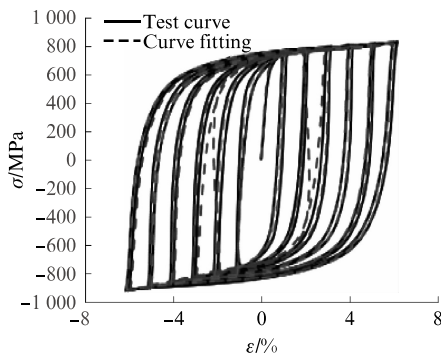


图 8 理论模型与试验数据对比  
Fig. 8 Model and test data comparison

合曲线吻合的较为良好，表明该本构模型可以预测高强钢在不同腐蚀程度下的滞回性能，同时也可以预测不同周期下锈蚀试件的剩余强度。

## 5 结论

(1)  $Q_{690}$  高强钢的锈蚀率与腐蚀时间呈线性增长，随着腐蚀时间的增加，试件表面粗糙度逐渐增大，锈坑逐渐连通，由点蚀向大面积坑蚀发展，最大锈坑深度可达  $600 \mu\text{m}$ 。

(2) 随着锈蚀程度的增加，试件的滞回耗能和抗拉强度均出现明显退化。锈蚀率为 7.21% 的试件滞回耗能较未锈蚀试件降低 15.2%，极限抗拉强度降低 14.6%。

(3) 随着腐蚀时间的增加，试件在循环荷载下的强化效应有降低的趋势，其循环强化系数与循环强化指数在腐蚀 100 d 后较未锈蚀试件分别降低 10.20% 和 3.34%。

(4) Ramberg-Osgood 模型能较好地预测锈蚀  $Q_{690}$  高强钢在循环荷载作用下的骨架曲线，滞回本构模型具有较好适用性。

## 参考文献：

[1] 刘薇, 王佳. 海洋浪溅区环境对材料腐蚀行为影响的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(6): 504-511.  
LIU Wei, WANG Jia. Research progress of the influence of environmental splash zone environment on material corrosion behavior[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2010, 30(6): 504-511. (in Chinese)

[2] 江旭, 柳伟, 路民旭. 钢铁海洋大气腐蚀试验方法的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(4): 282-286.  
JIANG Xu, LIU Wei, LU Minxu. Research progress of marine ocean atmospheric corrosion test methods[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(4): 282-286. (in Chinese)

[3] 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. Hysteresis performance test of steel plate corrode neutral salt spray[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11):183-188. (in Chinese)
- [4] XU S H, ZHANG Z X, QIN G C. Study on the seismic performance of corroded H-shaped steel columns[J]. Engineering Structures, 2019, 191:39-61.
- [5] 梁岩,罗小勇,张艳芳.反复荷载作用下锈蚀高强钢筋的性能变化[J].建筑材料学报,2015,18(1):145-149.
- LIANG Yan, LUO Xiaoyong, ZHANG Yanfang. Performance changes of corroded high strength steel bars under repeated loads[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1):145-149. (in Chinese)
- [6] 郑山锁,张晓辉,赵旭冉,等.近海大气环境下锈蚀钢框架梁抗震性能试验及恢复力模型研究[J].工程力学,2018,35(12):98-106,115.
- ZHENG Shansuo, ZHANG Xiaohui, ZHAO Xuran, et al. Experimental study on seismic performance and restoring force model of corroded steel frame beams in the offshore atmosphere[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12):98-106, 115. (in Chinese)
- [7] WANG J J, SHI G, SHI Y J. Experimental research on behavior of 460 MPa high strength steel I-section columns under cyclic loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(4):611-622.
- [8] GUO H C, WAN J H, LIU Y H, et al. Experimental study on fatigue performance of high strength steel welded joints[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131:45-54.
- [9] 郭宏超,毛宽宏,万金怀,等.高强度钢材疲劳性能研究进展[J].建筑结构学报,2019,40(4):17-28.
- GUO Hongchao, MAO Kuanhong, WAN Jinhui, et al. Research progress on fatigue properties of high strength steels[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4):17-28. (in Chinese)
- [10] SHI Y J, WANG M, WANG Y Q. Experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(8):1185-1197.
- [11] 石永久,王萌,王元清,等.循环荷载下钢材本构模型的应用研究[J].工程力学,2013,30(7):212-218.
- SHI Yongjiu, WANG Meng, WANG Yuanqing, et al. Application of steel constitutive model under cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7):212-218. (in Chinese)