

长期服役结构中钢筋的纵向随机锈蚀分布特征

刘晋宏¹, 罗小勇^{1†}, 梁应军², 何洋¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075;

2. 中建五局第三建设有限公司, 湖南长沙 410004)

摘要: 钢筋在服役结构中的自然锈蚀与试验室人工加速锈蚀存在差异. 为研究实际服役工程中钢筋的自然锈蚀特征, 从服役 50 余年的钢筋混凝土桥面板中获取一批钢筋试件, 通过三维激光扫描得到精确的锈蚀钢筋剩余表面信息, 以锈后剩余截面积直观表征钢筋沿纵向的锈损情况, 探究锈蚀程度、钢筋长度对锈蚀纵向不均匀性的影响, 经统计分析进行钢筋纵向随机锈蚀的概率分布特征研究, 提出相应的概率分布模型. 研究表明: 自然锈蚀钢筋具有多种典型锈蚀形态, 锈蚀区域及锈蚀程度沿钢筋纵向随机分布; 最大截面积损失率、剩余截面积方差随平均锈蚀率的增大而增大, 即平均锈蚀程度越大则锈蚀越不均匀; 钢筋长度对纵向锈蚀不均匀性有明显影响, 在钢筋来源及平均锈蚀率相同的情况下, 随钢筋长度的增大锈蚀不均匀性增大. 钢筋的纵向随机锈蚀具有明显的统计规律, 多峰正态分布模型可精确描述不同锈蚀程度钢筋的剩余截面积概率分布; Weibull 分布及单峰正态分布模型对实测截面积数据拟合优度略低, 但其形式简单便于运用, 适用于平均锈蚀率低于 10% 的钢筋.

关键词: 钢筋锈蚀; 自然锈蚀; 表面形态; 纵向非均匀锈蚀; 概率分布

中图分类号: U444; TU511.3

文献标志码: A

Longitudinal Stochastic Corrosion Distribution Characteristics of Steel Bar in Long-term Service Structure

LIU Jinhong¹, LUO Xiaoyong^{1†}, LIANG Yingjun², HE Yang¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction Fifth Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

Abstract: Natural corrosion of steel bars in service structures differs from experimental artificial accelerated corrosion. For investigating the natural corrosion characteristics of steel bars in practical engineering, a batch of corroded steel bar specimens was acquired from reinforced concrete bridge decks that have been in service for more than 50 years. Precise residual surface information of the corroded steel bars was obtained by three-dimensional laser scanning, and corrosion all along the bars was described by residual cross-sectional areas. The effects of corrosion degree and bar length on longitudinal corrosion non-uniformity were studied. The probability distribution characteristics of longitudinal stochastic corrosion were studied by statistical analysis, and the corresponding probability distribution models were proposed. Results show that naturally corroded steel bars have various typical corrosion morphol-

* 收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1361204), National Natural Science Foundation of China(U1361204)

作者简介: 刘晋宏(1991—), 女, 云南安宁人, 中南大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: csu-luox@csu.edu.cn

ogy. The corrosion zone and corrosion degree are random along the bars. The maximum cross-section loss ratio and variance of residual cross-sectional areas increase as the average corrosion degree increases, which indicates that the more severe the corrosion is, the more uneven the corrosion is. Bar length influences corrosion non-uniformity significantly. In the case of the same source and average corrosion degree, the non-uniformity increases with the increase of bar length. The longitudinal stochastic corrosion of steel bars has a statistical law. The probability distribution of residual cross-sectional areas of steel bars with different corrosion degrees can be accurately evaluated by the multimodal normal distribution model. In comparison, the Weibull distribution model and the unimodal Normal distribution model have a slightly poorer fitness, and are simple in form and easy to apply, which are suitable for steel bars with an average corrosion degree of less than 10%.

Key words: steel corrosion; natural corrosion; surface morphology; longitudinal non-uniform corrosion; probability distribution

钢筋锈蚀会造成钢筋力学性能退化^[1]、混凝土锈胀开裂^[2]、钢筋与混凝土黏结滑移^[3]等问题,严重影响钢筋混凝土结构的耐久性^[4-5]。近三十年来众多学者基于大量的锈蚀钢筋试验得到钢筋力学性能随锈蚀率的退化规律,但不同学者得到的退化模型差异较大、应用受限^[6]。究其原因,锈蚀钢筋力学性能退化受钢筋锈蚀特征的影响^[7-9],而既有退化模型往往仅以平均锈蚀率作为锈蚀参数,未能反映锈蚀特征的影响。因此,为了进一步探究锈蚀钢筋力学性能退化规律,有必要对钢筋锈蚀特征进行深入研究。

钢筋的脱钝及锈蚀是一个复杂的物理、化学过程,受到环境温湿度、侵蚀物质浓度、材料自身组织结构的影响^[10-11]。而钢筋混凝土本身是多向非均质复合材料^[12-13],加之生产缺陷、荷载作用、结构病害等不确定因素影响,使得锈蚀具有随机性,锈蚀在钢筋的纵向及圆周向分布不均^[11,14-15],即使来源相同、平均锈蚀率相等的钢筋也可能出现不同的锈蚀特征。近年来学者们逐步关注到钢筋的锈蚀特征,借助不同的量测方法及多种锈蚀表征量开展了相关研究。王波等^[16]采用游标卡尺及百分表量测钢筋蚀坑的深度、宽度、长度,探究了蚀坑三维尺寸的概率分布特征及演化规律。王青等^[17]借助称重法及游标卡尺量测,研究了最大坑蚀与平均锈蚀深度比值的概率分布模型。由于传统测量手段测量效率的限制,早期研究仅关注了蚀坑特征,未能考虑蚀坑分布的影响。

Zhang等^[18]采用三维激光扫描获取锈蚀钢筋的剩余表面形态信息,定义钢筋分段内截面积平均值与最小值之比为空间不均匀系数,探究整根钢筋的

锈蚀不均匀性。先进的量测手段推进了钢筋锈蚀特征研究,但现有研究中锈蚀钢筋多来源于人工加速锈蚀^[16-20]。人工加速锈蚀与自然锈蚀在原理、环境及速率方面存在差异^[21],可能产生不同的钢筋锈蚀形态,仅基于人工加速锈蚀钢筋的研究结果可能与工程实际情况有差异。此外,研究表明钢筋混凝土的腐蚀具有尺寸效应^[22],而试验条件的限制使人工加速锈蚀的钢筋长度远小于实际工程中的钢筋,钢筋长度对锈蚀不均匀性的影响也有待研究。

因此,本文从实际长期服役的钢筋混凝土桥面板中获取一批自然锈蚀钢筋,对其进行三维激光扫描得到精确的锈蚀钢筋剩余表面信息,以锈损剩余截面积表征钢筋各处的锈损情况,研究实际服役环境中钢筋锈蚀的纵向随机分布特征,分析锈蚀程度、钢筋长度对锈蚀不均匀性的影响,探究钢筋纵向随机锈蚀的统计规律,建立锈蚀钢筋的剩余截面积概率分布模型,为人工加速锈蚀钢筋的研究提供对比信息,为多年在役结构的耐久性评估、新建结构的全寿命周期设计提供参考。

1 锈蚀钢筋来源及量测

1.1 钢筋来源

自然锈蚀钢筋取自湖南省株洲市白石港闸桥的旧钢筋混凝土桥面板。该桥建于1958年,上部结构为11跨连续混凝土板,单孔跨径3.2 m。桥面板尺寸为980 mm × 300 mm × 3 200 mm,板内钢筋均为Ⅰ级光圆钢筋,混凝土保护层厚度30 mm,具体配筋如图1所示。板件拆除后从不同病害的桥面板中凿取

31段长约650 mm的锈蚀钢筋试件.试件取自板底纵向受拉钢筋,原始直径为16 mm.另截取未锈蚀钢筋段,测得其屈服强度为300.81 MPa,抗拉强度为423.44 MPa.对板件进行混凝土钻芯取样,测得混凝土抗压强度为29.07 MPa.原桥地处株洲市城市主干道,多年来承受各类客车、货车的繁重交通荷载,加之不利环境因素作用,使桥梁出现了接缝漏水、混凝土剥落、露筋、钢筋锈蚀、纵向裂缝等病害.当地气候四季分明、雨量充沛,年平均气温为16~18 °C,年平均相对湿度67%~84%,为我国华中、华东广大地区的典型气候.根据规范^[23],桥梁服役环境为I类一般环境,作用等级为B级,混凝土碳化是钢筋锈蚀的主要原因.

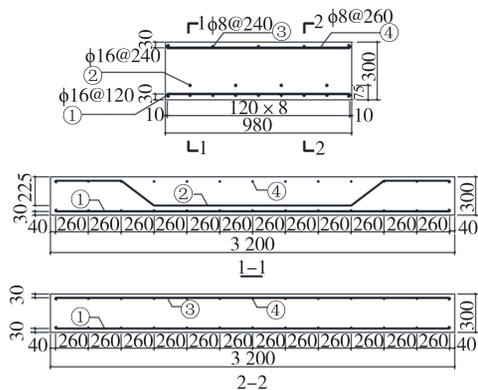


图1 钢筋混凝土桥面板布筋示意图(单位:mm)
Fig.1 Reinforcement of RC bridge deck(unit: mm)

1.2 钢筋三维扫描

将31段锈蚀钢筋试件表面的混凝土及锈蚀产物去除,并切除试件机械损伤严重的部分,避免对锈蚀数据的干扰.对钢筋试件进行三维激光扫描,扫描设备为形创Handyscan700三维扫描仪,扫描精度为0.03 mm.对扫描所得的锈蚀钢筋剩余表面点云数据进行预处理,再构建精确的锈蚀钢筋三维模型.在模型中沿试件全长每隔1 mm提取剩余截面积,用辛普森公式^[24]计算钢筋体积,再分别计算钢筋平均体积损失率 η_v 及最大截面积损失率 η_{max} :

$$\eta_v = \frac{V_0 - V_{res}}{V_0} \quad (1)$$

$$\eta_{max} = \frac{A_0 - A_{min}}{A_0} \quad (2)$$

式中: V_0 、 A_0 分别为采用公称直径计算的未锈蚀钢筋体积及截面积; V_{res} 、 A_{min} 分别为锈蚀钢筋剩余体积及最小截面积.理论上平均体积损失率 η_v 与平均质量损失率 η_p 相等,即为平均锈蚀率.将来源于实际工程同一根钢筋的试件截面积数据合成一根完整钢筋,

将整根钢筋编号为RE,将钢筋试件编号为RP,各RE钢筋、RP试件的编号、锈蚀率、尺寸及取材处结构病害信息如表1所示.所取试件中平均锈蚀率低于5%、5%~10%、10%~20%、大于20%的试件数量分别占54.84%、25.81%、6.47%、9.68%.

2 自然锈蚀特征

2.1 典型锈蚀形态

研究实际工程中钢筋的锈蚀形态可为其他来源的锈蚀钢筋提供对比参考.观测31段板底受拉钢筋试件的锈蚀形态,按照几何特征将钢筋的表观锈蚀程度分为无锈、轻微锈蚀、中度锈蚀及严重锈蚀,不同表观锈蚀程度的钢筋典型锈蚀形态如图2所示.

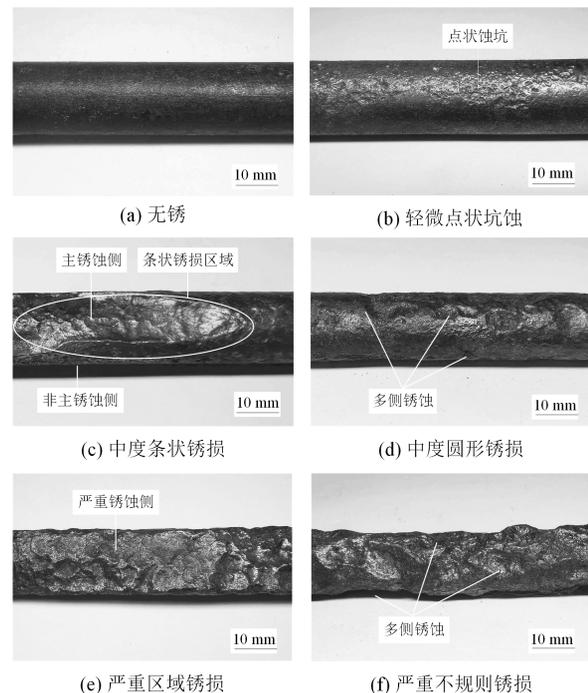


图2 不同锈蚀程度钢筋的典型锈蚀形态

Fig.2 Typical corrosion geometries for steel bars with different corrosion degree

无锈区段的钢筋表面平整.轻微锈蚀的钢筋有数十上百个点状小蚀坑密集分布在锈蚀区域,锈蚀区域大小不一,沿钢筋纵向随机分布.我国钢筋混凝土结构用钢筋主要为低碳钢,其基本组成为铁素体和珠光体,两者相间分布.珠光体是铁素体与渗碳体的机械混合物,其中铁素体电势较低,在自然锈蚀中作为微电池的阳极被腐蚀^[25],从而在钢筋锈蚀区域形成了密集的点状微小蚀坑.粗骨料的空间分布会影响侵蚀介质在混凝土内的传输及钢筋表面的堆

表1 锈蚀钢筋基本参数及结构病害

Tab.1 Basic parameters of corroded steel bars and corresponding structure diseases

RP试件编号	$\eta_v/\%$	$\eta_{max}/\%$	RE钢筋编号	长度/mm	$\eta_v/\%$	$\eta_{max}/\%$	结构病害
RP1	2.51	6.22	RE1	2 544	2.16	6.79	无
RP2	2.20	5.45					
RP3	2.01	5.25					
RP4	1.96	6.79					
RP5	3.43	7.79	RE2	2 037	3.07	15.80	无
RP6	1.13	4.99					
RP7	4.58	15.80					
RP8	3.86	9.22	RE3	2 651	3.23	9.81	无
RP9	4.08	8.46					
RP10	4.45	9.81					
RP11	0.54	6.99					
RP12	2.88	6.01	RE4	2 318	3.72	8.12	混凝土剥落
RP13	3.95	6.80					
RP14	3.45	6.03					
RP15	4.75	8.12					
RP16	7.05	28.11	RE5	2 455	6.36	28.11	接缝漏水,混凝土剥落
RP17	9.03	19.14					
RP18	2.63	6.89					
RP19	6.45	25.26					
RP20	8.97	18.16	RE6	1 956	6.96	18.16	纵向裂缝
RP21	4.74	12.03					
RP22	6.88	17.07					
RP23	11.80	23.63	RE7	2 644	8.70	23.63	接缝漏水,纵向裂缝
RP24	8.22	16.84					
RP25	8.53	20.75					
RP26	6.53	14.37					
RP27	27.60	54.61	RE8	3 015	31.39	78.30	混凝土剥落,钢筋裸露
RP28	26.00	50.07					
RP29	19.88	46.60					
RP30	25.96	47.91					
RP31	57.72	78.30					

积^[12],进而影响钢筋锈蚀的发展.箍筋及分布钢筋对交叉位置处纵向受力主筋的锈蚀有“保护作用”^[26].而混凝土初始缺陷^[13]及横向荷载裂缝^[27]则可能会加剧相应位置的钢筋锈蚀.上述多方面因素共同作用导致沿钢筋纵向锈蚀区域锈蚀分布不均.

中度锈蚀包括两类典型形态:条状锈损及圆形锈损.条状锈损为明显的单侧锈蚀,锈损区域沿钢筋纵向呈长条状,其内部又分布着近似圆形的小蚀坑.腐蚀介质从混凝土构件外经混凝土保护层侵入^[28],钢筋在靠近构件外一侧先发生锈蚀,点状蚀坑在锈蚀区域内不断发展联通,加之锈蚀产物堆积可能产生由内及外的混凝土纵向锈胀裂缝,进一步加剧该区域锈蚀,最终形成钢筋单侧的条状锈损.中度圆形

锈损则为非单侧锈蚀,直径3~13 mm的圆形或椭圆形蚀坑随机分布在钢筋表面,此类锈蚀形态可见于钢筋RE5、RE8,可能是由于混凝土严重剥落、钢筋裸露造成的.混凝土剥落、横向裂缝发展可能加速钢筋局部的脱钝活化,钢筋活化区与钝化区之间存在电势差形成宏电池腐蚀^[28],出现局部大蚀坑.

随锈蚀程度增加,中度条状锈损发展为严重区域锈损,锈损区域长50~91 cm,宽度覆盖钢筋全直径且深度增加,但仍为单侧锈蚀.中度圆形锈损不断发展联通,形成严重不规则锈损,锈蚀钢筋表面呈严重不平整、不规则的形态.

目前人工锈蚀方法主要包括通电加速锈蚀及人工气候环境加速锈蚀,钢筋状态又分为裸筋及埋置

于混凝土中两种.人工气候环境加速的锈蚀原理与工程自然锈蚀相似,文献[29]对裸筋及钢筋混凝土试件进行人工气候环境加速锈蚀,两种方法均可观察到圆形、椭圆形、联通不规则形状蚀坑的存在,但裸筋锈蚀的蚀坑深度较浅、底部扁平,与本文工程自然锈蚀钢筋呈现的碗状蚀坑有明显差异.文献[1]对裸筋进行浸泡通电加速锈蚀,所得钢筋在圆周向及纵向锈蚀均匀,且基圆及肋上锈损程度相似,无明显蚀坑,与工程自然锈蚀差异较大.钢筋混凝土试件的通电加速锈蚀又可分为全浸泡法、半浸泡法、干湿循环法三种.文献[30]比较了三种通电加速锈蚀下钢筋锈蚀的不均匀性,电流密度相同的情况下半浸泡法所得钢筋纵向锈蚀不均匀性较高.通电加速锈蚀试验中可通过控制负极位置来控制钢筋的主要锈蚀侧^[31],文献[19]试验采用负极置于混凝土板下部的半浸泡通电加速锈蚀法,所得锈蚀钢筋有明显单侧锈蚀及锈胀开裂多侧锈蚀,锈蚀形态可见轻微点蚀、条状锈损及严重区域锈损,与本文工程自然锈蚀部分锈蚀形态较接近.综上所述,裸筋人工锈蚀的锈蚀形态与工程自然锈蚀差异较大,钢筋混凝土试件的人工气候环境加速锈蚀可得到明显的坑蚀,改进的半浸泡通电加速锈蚀与工程自然锈蚀相近,且半浸泡法所得钢筋的纵向锈蚀不均匀性高于全浸泡法及干湿循环法.

2.2 纵向随机锈蚀

既有研究中描述锈蚀特征的参数主要有蚀坑三维尺寸^[16]、最大锈蚀深度与平均锈蚀深度之比^[17]、剩余截面积及相关参数^[19-20]、截面积平均值与最小值之比^[18,27]等.仅以锈蚀深度为对象的研究只考虑了锈蚀钢筋一个维度的变化;仅以蚀坑为对象的研究往往只能描述锈蚀较严重处的情况,未能反映蚀坑分布的影响.剩余截面积可全面地表征钢筋全长范围内的锈损情况,且便于以此进一步开展锈蚀钢筋力学性能退化的计算分析^[8].为研究锈蚀沿钢筋纵向的分布,统计了8根完整钢筋沿长度方向的锈损剩余截面积(如图3所示),图3中 A_{res} 为剩余截面积, d 为截面距钢筋一端的距离.截面积排布图的波谷越深说明该处锈蚀越严重,波动越剧烈则锈蚀程度变化越大.由图3可知,平均锈蚀率低于5%的钢筋锈蚀轻微,剩余截面积轻微波动,排布图形状较平顺,如钢筋RE1~RE4.平均锈蚀率5%~10%的钢筋剩余截面积波动明显且无规律,说明锈蚀位置及程度沿钢筋纵向分布不均,如钢筋RE5~RE7,三根钢筋的截面积波动差异明显.平均锈蚀率大于30%的钢筋

RE8,其截面积排布图中除小波峰波谷外还有长达290~630 mm的“大凹槽”,对应钢筋的严重锈蚀段,凹槽之外为轻微或中度锈蚀段,不同区段的三维模型见图3,说明实际工程中一根数米长的钢筋由多个不同锈蚀程度的区段组成.

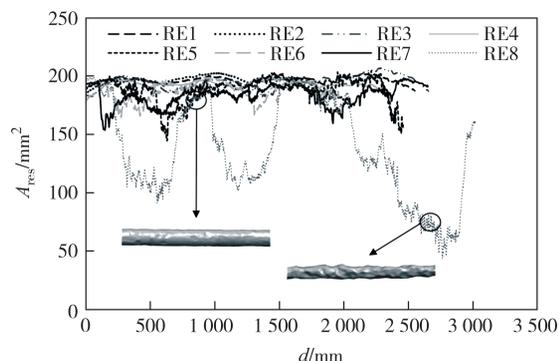


图3 锈蚀钢筋剩余截面积

Fig.3 Residual cross-sectional areas along corroded steel bars

结合钢筋锈蚀形态的观测,发现一根数米长的完整钢筋上存在多个表观锈蚀程度不同的区段,锈蚀位置及锈蚀程度沿钢筋纵向随机分布.例如RE1~RE4由若干个轻微锈蚀和无锈区段组成,RE5~RE7由多个中度锈蚀、轻微锈蚀和无锈区段组成,RE8则由严重锈蚀、中度锈蚀和轻微锈蚀区段组成.根据桥梁现场观测可知,裂缝密集区钢筋的锈蚀较严重,结构病害也是加重钢筋局部锈蚀的重要原因.接缝漏水渗透至板底使混凝土局部出现干湿交替区域,如钢筋RE5,其最大截面积损失率明显大于平均锈蚀率相近的钢筋RE6.施工养护不当、桥梁承载过大或钢筋锈胀使板底混凝土剥落甚至钢筋裸露,进一步加速钢筋锈蚀,如钢筋RE4、RE8.缺陷及病害的发生概率、位置、程度具有不确定性,加之钢筋混凝土材料本身的非均质性,使锈蚀沿钢筋分布不均.

3 锈蚀的纵向不均匀性

3.1 锈蚀程度对纵向锈蚀不均匀性的影响

最大截面损失率反映了钢筋锈蚀最严重处的情况,锈蚀最严重处与平均锈蚀的差异可在一定程度上反映锈蚀不均匀,故采用最大截面损失率表征钢筋锈蚀的纵向不均匀.平均锈蚀率与最大截面损失率的关系如图4所示,因平均锈蚀率大于15%的试件较少,故在后续研究中未考虑钢筋RE8及其对应试件的数据.由图4可知,对于平均锈蚀率不大于

15%的钢筋,平均锈蚀率越大则最大截面损失率越大,最小截面越薄弱;基于RE钢筋实测数据,两者的关系可拟合为正比例函数 $\eta_{\max} = 3.13\eta_v$,即图4中RE拟合线.随平均锈蚀率的增大,拟合曲线与最大截面损失率同平均锈蚀率的等值参考线的差距增大,说明锈蚀不均匀性增大.

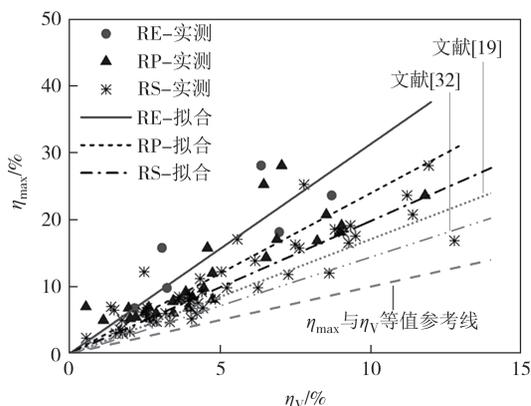


图4 最大截面损失率与平均锈蚀率的关系

Fig.4 Maximum cross-sectional area loss ratio vs. average volume loss ratio

锈蚀钢筋的强度退化与最小截面面积相关,延性退化则由整根钢筋的剩余截面面积决定^[6],因此除锈蚀最严重处之外钢筋全长范围内锈蚀波动也值得关注.方差可衡量一组数据的离散程度,故采用锈蚀钢筋剩余截面面积方差 S^2 全面表征整根钢筋锈蚀的不均匀性.经统计分析,钢筋剩余截面面积方差与平均锈蚀率的关系如图5所示.随平均锈蚀率的增大,钢筋剩余截面面积方差增大,增长速度加快;根据RE钢筋实测数据,两者关系可拟合为二次多项式 $S^2 = 15\,513.70\eta_v^2 + 4.00$,即图5中RE拟合曲线.此外,平均锈蚀率越大,图中数据点越分散.上述现象说明锈蚀程度越大,整根钢筋的锈蚀越不均匀.

文献[32]进行了钢筋混凝土构件干湿循环通电加速锈蚀,所得锈蚀钢筋最大截面损失率与平均锈蚀率关系为 $\eta_{\max} = 1.43\eta_v$.文献[19]通过钢筋混凝土构件半浸泡通电加速锈蚀方法进行人工锈蚀,其锈蚀钢筋最大截面损失率、剩余截面面积方差与平均锈蚀率可分别拟合为线性关系 $\eta_{\max} = 1.64\eta_v$ 及二次多项式 $S^2 = 8\,510.30\eta_v^2 - 638.11\eta_v + 14.71$.与本文数据对比可知,无论是人工加速锈蚀还是实际工程中的锈蚀,随平均锈蚀程度的增大,最大截面损失率及剩余截面面积方差均增大,钢筋锈蚀纵向不均匀性更显著.但来源不同的锈蚀钢筋其锈蚀不均匀性有差异,图4中曲线斜率越大则锈蚀最严重处与平

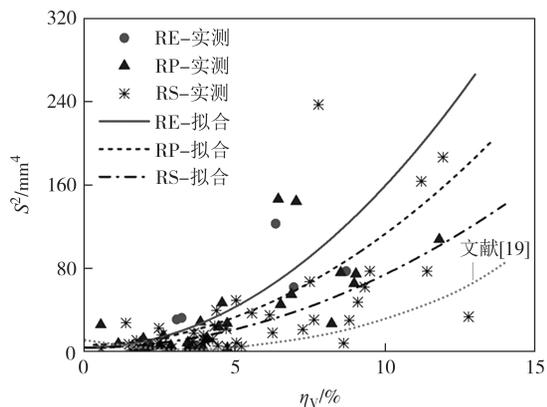


图5 剩余截面面积方差与平均锈蚀率的关系

Fig.5 Variance of residual cross-sectional areas vs. average volume loss ratio

均锈蚀程度差距越大,纵向锈蚀越不均匀,故有锈蚀不均匀性排序为:本文工程自然锈蚀>文献[19]半浸泡通电加速锈蚀>文献[32]干湿循环通电加速锈蚀.这可能是锈蚀方法、钢筋长度不同等原因造成的.

3.2 钢筋长度对纵向锈蚀不均匀性的影响

由于试验条件限制,已有研究中锈蚀钢筋试件的长度多为200~500 mm,而实际工程中钢筋长度一般为3~32 m.长度对钢筋的锈蚀不均匀性及其他性能是否有影响,是将已有试验研究成果应用于实际工程必须确定的问题之一,但既有研究甚少关注该问题.本文从实际工程老化构件中获得长度1.956~2.644 m的钢筋编号为RE,将截断成长约650 mm的钢筋试件编号为RP,另外在3D扫描所得的锈蚀钢筋三维模型中提取长约330 mm的钢筋分段编号为RS,以此研究长度对钢筋纵向锈蚀不均匀性的影响.

三种长度钢筋的纵向锈蚀不均匀参数与平均锈蚀率的关系如图4及图5所示.由图4可知,三种长度钢筋的最大截面损失率均随平均锈蚀率的增大而增大,但RE钢筋、RP试件、RS分段钢筋的拟合正比例系数分别为3.13、2.40、1.98,说明钢筋越长最大截面损失率随平均锈蚀率增长得越快,最大截面损失率与平均锈蚀率的差值越大.由图5可知,三种长度钢筋的剩余截面面积方差随平均锈蚀率变化的规律相同,均可拟合为二次多项式,RP试件、RS分段钢筋的拟合关系式分别为 $S^2 = 10\,641.56\eta_v^2 + 6.60$ 、 $S^2 = 7\,014.76\eta_v^2 + 4.01$.除去锈蚀随机性造成的数据点离散的影响,由平均锈蚀率与剩余截面面积方差的拟合关系曲线可看出:平均锈蚀率相同时,剩余截面面积方差的大小排序为RE钢筋>RP试件>RS分段钢筋,即钢筋越长,剩余截面面积方差越大.综上所述,平均锈蚀率相同的情况下,锈蚀不均匀参数随钢筋长度的增大而

增大,表明钢筋越长,沿纵向的锈蚀越不均匀。

已有研究中采用一根钢筋多个分段内的截面积平均值与最小值的比值 \bar{A}/A_{\min} 来描述钢筋的非均匀锈蚀,经统计分析该比值的概率分布可用Gumbel分布模型描述^[18,27]。本文引用该参数再次论证钢筋长度对锈蚀不均匀性的影响。统计上述三种长度钢筋的截面积平均值与最小值比值的概率分布,部分钢筋对应的Gumbel分布曲线如图6所

示,图6中 $f(\bar{A}/A_{\min})$ 为概率密度,RP2与RS26、RP12与RS22、RP26与RS18的平均锈蚀率分别与钢筋RE1、RE2、RE5相近。对比平均锈蚀程度相近的RE钢筋与RP试件、RS分段钢筋的曲线可知,钢筋越短, \bar{A}/A_{\min} 的概率分布曲线越陡峭,说明钢筋长度对锈蚀的不均匀性有影响。故仅基于短钢筋的非均匀锈蚀研究与实际工程情况有一定差异,需进行修正再应用于实际工程。

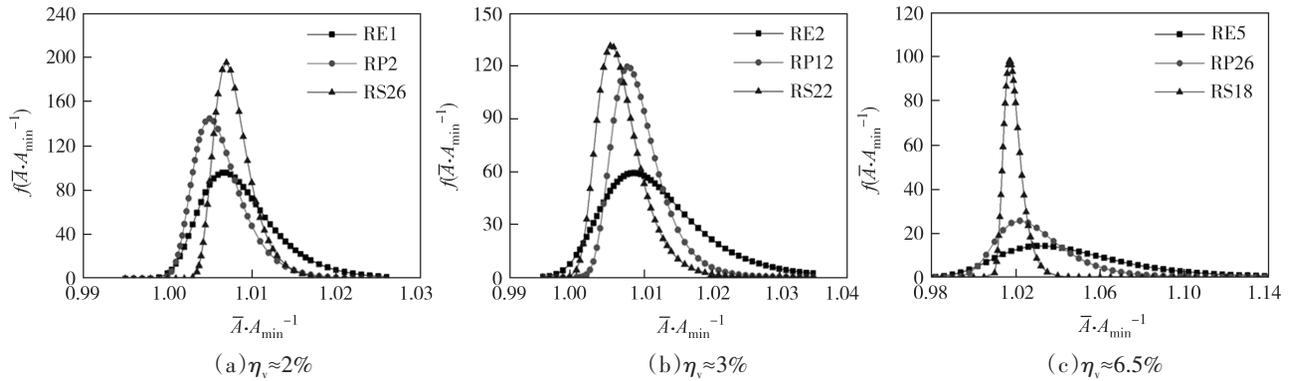


图6 锈蚀钢筋截面积平均值与最小值比值的概率分布曲线

Fig.6 Probability distribution curves of $\bar{A} \cdot A_{\min}^{-1}$

4 纵向随机锈蚀的统计规律

为探索纵向随机锈蚀的统计规律,对锈蚀钢筋全长范围的剩余截面积进行统计分析,8根钢筋的剩余截面积概率分布如图7所示,图中 $f(A_{\text{res}})$ 为截面积的概率密度。由图7可知,平均锈蚀率低于10%的钢筋剩余截面积概率分布近似呈单峰型,其中平均锈

蚀率低于5%的为近似对称分布或左偏分布,如钢筋RE1~RE4;平均锈蚀率5%~10%的为左偏分布,如钢筋RE5~RE7。平均锈蚀率大于30%的严重锈蚀钢筋则为明显的多峰分布,如钢筋RE8。与通电加速锈蚀钢筋相比^[19],锈蚀率相近的情况下本文自然锈蚀钢筋的剩余截面积概率分布存在更多的局部隐藏峰,且负偏度更大,说明自然锈蚀钢筋纵向不均匀性比加速锈蚀钢筋大。

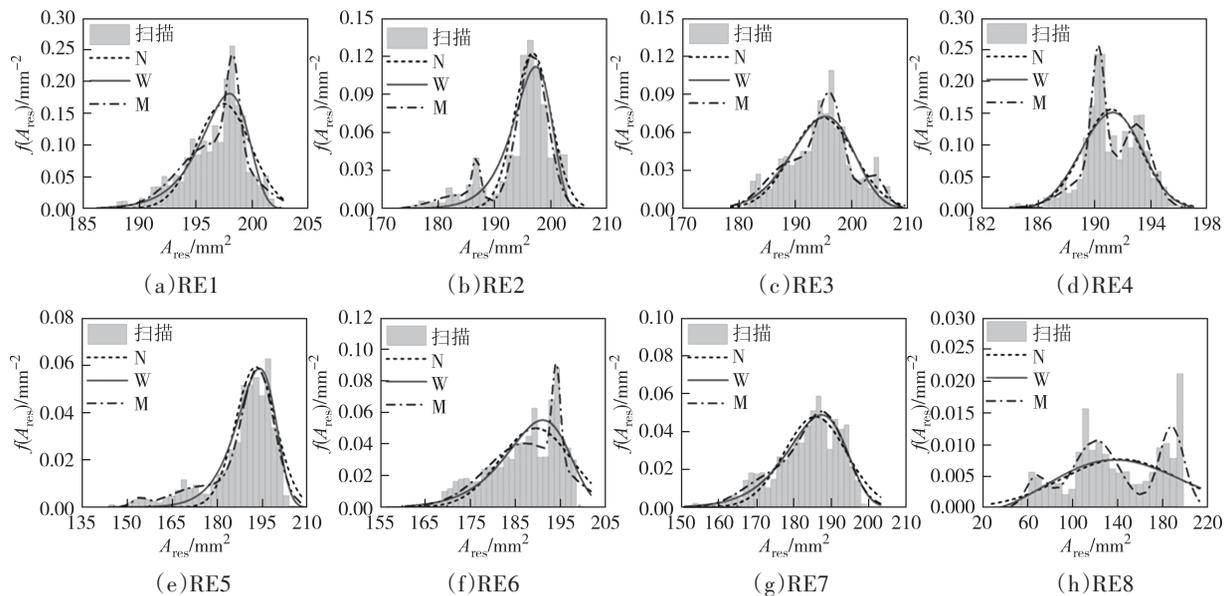


图7 锈蚀钢筋剩余截面积概率分布图

Fig.7 Probability distribution diagram of residual cross-sectional areas of corroded steel bar

为定量描述锈蚀钢筋剩余截面积的概率分布,选择应用广泛的正态分布模型及对偏态分布适应性强的 Weibull 分布模型,对锈蚀钢筋剩余截面积的概率分布进行拟合,正态分布(N)及 Weibull 分布(W)的概率密度函数分别为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_N} \exp\left[-\frac{(x - \mu_N)^2}{2\sigma_N^2}\right] \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x - \theta}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x - \theta}{\lambda}\right)^k\right] \quad (4)$$

式中: x 、 $f(x)$ 分别为随机变量及其概率密度函数;

μ_N 、 σ_N 分别为平均值和标准差; θ 、 k 、 λ 分别为 Weibull 分布的位置参数、形状参数和尺度参数.分布模型参数及衡量拟合优度的可决系数 R^2 如表 2 所示,拟合曲线如图 7 所示.由表 2 可知,除严重锈蚀钢筋 RE8 以外,正态分布模型对其余钢筋的拟合 R^2 为 0.676~0.901, Weibull 分布模型的拟合 R^2 为 0.718~0.925. R^2 越接近于 1 则拟合效果越佳,说明 Weibull 分布模型的拟合优度略优于正态分布.两种分布模型对严重锈蚀钢筋 RE8 的拟合 R^2 均小于 0.4,拟合效果差.

表 2 剩余截面积概率分布参数及拟合优度

Tab.2 Residual cross-sectional areas' probability distribution parameters and goodness of fit

钢筋编号	μ_N	σ_N	θ	k	λ	R^2		
						正态分布	Weibull 分布	多峰正态分布
RE1	197.51	2.26	6.14	13.13	185.00	0.795	0.840	0.946
RE2	196.79	2.71	37.79	124.25	73.20	0.875	0.819	0.928
RE3	194.94	5.47	3.69	19.72	177.00	0.809	0.814	0.915
RE4	193.53	2.60	4.50	11.42	183.00	0.723	0.718	0.952
RE5	192.90	6.01	15.58	103.93	87.69	0.901	0.925	0.947
RE6	189.61	7.50	4.89	32.93	159.00	0.676	0.731	0.879
RE7	185.91	8.14	5.41	41.36	147.00	0.865	0.908	0.908
RE8	140.58	52.66	2.65	139.71	20.00	0.328	0.355	0.627

为解决上述问题,采用多峰正态分布模型(M)对钢筋剩余截面积概率分布进行进一步拟合,其概率密度函数为:

$$f(x) = \sum \frac{C_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (5)$$

式中: C_i 为与第 i 个峰对应的正态分布概率密度函数总面积,即第 i 个峰的总概率, μ_i 、 σ_i 分别为第 i 个峰的平均值和标准差.各钢筋的多峰正态分布模型拟合 R^2 如表 2 所示,拟合分布曲线如图 7 所示.多峰正态分布模型对严重锈蚀钢筋 RE8 的拟合 R^2 为 0.627,明显优于单峰正态分布及 Weibull 分布模型.对于平均锈蚀率低于 10% 的钢筋,多峰正态分布的拟合 R^2 为 0.879~0.952,亦优于上述两种单峰分布模型,可能是由于此类钢筋的剩余截面积概率分布中有隐藏峰或局部较小的峰,多峰分布模型对此有良好的改善效果.

综上所述,平均锈蚀率低于 10% 的钢筋的剩余截面积概率分布近似呈单峰型, Weibull 分布模型的拟合效果略优于单峰正态分布模型,而多峰正态分布模型则能进一步提高拟合优度.对于剩余截面积概率分布明显呈多峰分布的严重锈蚀钢筋,多峰正

态分布模型适用,单峰模型不适用.

5 结论

1) 一般环境结构中的自然锈蚀钢筋具有多种典型锈蚀形态,包括:轻微点状坑蚀、单侧中度条状锈损、多侧中度圆形锈损、单侧严重区域锈损、多侧严重不规则锈损.裸筋人工锈蚀的钢筋锈蚀形态与自然锈蚀存在较大差异,钢筋混凝土试件的人工气候环境加速锈蚀及改进的半浸泡通电加速锈蚀可分别模拟出与自然锈蚀相近的坑蚀及条状锈损、区域锈损.采用锈蚀钢筋剩余截面积直接表征钢筋各处的锈损情况,工程中自然锈蚀钢筋的锈蚀位置及锈蚀程度沿钢筋纵向分布不均,钢筋锈蚀具有纵向随机性.

2) 锈蚀钢筋的最大截面积损失率及剩余截面积方差可度量钢筋锈蚀的纵向不均匀性.无论是工程自然锈蚀还是人工加速锈蚀,锈蚀钢筋最大截面积损失率与平均锈蚀率均呈正比例关系,剩余截面积方差与平均锈蚀率均呈增长的二次多项式关系,表明平均锈蚀率越大则纵向锈蚀越不均匀.

(3) 平均锈蚀率相同时,随钢筋长度的增加,最

大截面积损失率及剩余截面积方差均增大,表明锈蚀不均匀性增大.采用其他学者的锈蚀不均匀表征方法亦证明了钢筋长度对纵向锈蚀不均匀性有明显影响.故建议仅基于短钢筋得出的锈蚀特征研究成果需进行修正再应用于实际工程.

4) 统计分析了钢筋纵向随机锈蚀的概率统计规律:平均锈蚀率低于5%的钢筋剩余截面积概率分布近似呈单峰对称型或左偏型,平均锈蚀率5%~10%的钢筋为单峰左偏型,严重锈蚀钢筋呈多峰型.相较于通电加速锈蚀钢筋,平均锈蚀率相近时自然锈蚀钢筋的剩余截面积概率分布更不规则、负偏度更大.多峰正态分布模型可精确描述上述各类不同分布特征的锈蚀钢筋剩余截面积概率分布,对于本文所取钢筋,该模型的拟合可决系数为0.627~0.952. Weibull分布及单峰正态分布模型主要适用于剩余截面积呈单峰分布的情形,相较于多峰正态分布模型拟合优度稍差,对于本文平均锈蚀率10%以下的钢筋,其拟合可决系数分别为0.676~0.901、0.718~0.925.

参考文献

- [1] VANAMA R K, RAMAKRISHNAN B. Improved degradation relations for the tensile properties of naturally and artificially corroded steel rebars [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118706.
- [2] ZHU W J, FRANÇOIS R, ZHANG C P, et al. Propagation of corrosion-induced cracks of the RC beam exposed to marine environment under sustained load for a period of 26 years [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 103: 66-76.
- [3] 尹世平,董朋杰,胡长顺,等.锈蚀钢筋与TRC约束混凝土黏结滑移本构关系[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(1): 144-153.
YIN S P, DONG P J, HU C S, et al. Bond-slip constitutive relationship between corroded steel bars and TRC-confined concrete [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(1): 144-153. (in Chinese)
- [4] ANGST U M. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete [J]. *Materials and Structures*, 2018, 51(1): 4.
- [5] 郭弘原,顾祥林,周彬彬,等.基于概率密度演化的锈蚀混凝土梁时变可靠性分析[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(1): 67-73.
GUO H Y, GU X L, ZHOU B B, et al. Time-dependent reliability analysis for corroded RC beams based on probability density evolution theory [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(1): 67-73. (in Chinese)
- [6] OU Y C, SUSANTO Y T T, ROH H. Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 103: 93-104.
- [7] 罗小勇,刘晋宏,聂经纶.锈蚀钢筋截面分布特征及轴向拉伸力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(5): 730-736.
LUO X Y, LIU J H, NIE J L. Cross-section distribution characteristics and tensile behavior of corroded reinforcing steel bars [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(5): 730-736. (in Chinese)
- [8] 李亚辉,郑山锁,董立国,等.非均匀锈蚀钢筋拉伸性能试验与模拟[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(9): 991-998.
LI Y H, ZHENG S S, DONG L G, et al. Investigation on tensile properties test and simulation method of non-uniform corroded reinforcement [J]. , 2022, 25(9): 991-998. (in Chinese)
- [9] JIN L, LIU M J, ZHANG R B, et al. Cracking of cover concrete due to non-uniform corrosion of corner rebar: a 3D meso-scale study [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 245: 118449.
- [10] YU Y G, GAO W, CASTEL A, et al. Modelling steel corrosion under concrete non-uniformity and structural defects [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 135: 106109.
- [11] GAO Y H, ZHENG Y Y, ZHANG J Z, et al. Time-dependent corrosion process and non-uniform corrosion of reinforcement in RC flexural members in a tidal environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 79-90.
- [12] JIANG H Y, TIAN Y, JIN N G, et al. Effect of aggregates spatial distribution on three-dimensional transport of chloride ions in reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119694.
- [13] ZHAO Y X, XU X Y, WANG Y Z, et al. Characteristics of pitting corrosion in an existing reinforced concrete beam exposed to marine environment [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117392.
- [14] CHEN J, ZHANG W, GU X. Modeling time-dependent circumferential non-uniform corrosion of steel bars in concrete considering corrosion-induced cracking effects [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109766.
- [15] FU C Q, JIN N G, YE H L, et al. Corrosion characteristics of a 4-year naturally corroded reinforced concrete beam with load-induced transverse cracks [J]. *Corrosion Science*, 2017, 117: 11-23.
- [16] 王波,袁迎曙,陈瑞.氯盐侵蚀钢筋表面的坑蚀特征及坑演变规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(2): 240-245.
WANG B, YUAN Y S, CHEN R. The character and evolution of corrosion pits on steel reinforcing bar surfaces corroded by chloride [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(2): 240-245. (in Chinese)
- [17] 王青,徐港,卫军,等.混凝土中钢筋锈蚀深度比值的概率分布模型研究[J]. *工业建筑*, 2011, 41(5): 39-42, 133.
WANG Q, XU G, WEI J, et al. Study on probability distribution model of the ratio between maximum pit depth and average corrosion penetration depth for reinforcement bars in concrete [J].

- Industrial Construction, 2011, 41(5): 39-42, 133. (in Chinese)
- [18] ZHANG W P, ZHOU B B, GU X L, et al. Probability distribution model for cross-sectional area of corroded reinforcing steel bars [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(5): 822-832.
- [19] 刘晋宏, 罗小勇, 肖焯. 钢筋非均匀锈蚀及剩余截面积分布模型[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 83-88.
- LIU J H, LUO X Y, XIAO Y. Non-uniform corrosion and distribution models of residual cross-sectional areas of rebars [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(11): 83-88. (in Chinese)
- [20] KASHANI M M, CREWE A J, ALEXANDER N A. Use of a 3D optical measurement technique for stochastic corrosion pattern analysis of reinforcing bars subjected to accelerated corrosion [J]. Corrosion Science, 2013, 73: 208-221.
- [21] 张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 327-332.
- ZHANG W P, GU X L, JIN X Y, et al. Study on corrosion mechanism of steel bars in concrete and mechanical performance of corroded steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S1): 327-332. (in Chinese)
- [22] ANGST U M, ELSENER B. The size effect in corrosion greatly influences the predicted life span of concrete infrastructures [J]. Science Advances, 2017, 3(8): e1700751.
- [23] 公路工程混凝土结构耐久性设计规范: JTG/T 3310—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019: 10-11.
- Code for durability design of concrete structures in highway engineering: JTG/T 3310—2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2019: 10-11. (in Chinese)
- [24] 关治, 陆金甫. 数值分析基础 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 288-292.
- GUAN Z, LU J F. Fundamentals of numerical analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2010: 288-292. (in Chinese)
- [25] 孙跃, 胡津. 金属腐蚀与控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 26-29.
- SUN Y, HU J. Metal corrosion and control [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003: 26-29. (in Chinese)
- [26] DONG J F, ZHAO Y X, WANG K, et al. Crack propagation and flexural behaviour of RC beams under simultaneous sustained loading and steel corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 208-219.
- [27] 付传清, 何家豪, 金贤玉, 等. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 123-131.
- FU C Q, HE J H, JIN X Y, et al. Corrosion pattern of rebar in RC beam with loading transverse cracks [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 123-131. (in Chinese)
- [28] 姬永生, 袁迎曙, 耿欧, 等. 氯盐外侵混凝土内钢筋的锈蚀特征及机理分析 [J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 309-315.
- JI Y S, YUAN Y S, GENG O, et al. Characteristics and mechanism of corrosion of re-bar in concrete induced by an environment containing chloride [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(3): 309-315. (in Chinese)
- [29] APOSTOLOPOULOS C A, DEMIS S, PAPADAKIS V G. Chloride-induced corrosion of steel reinforcement—mechanical performance and pit depth analysis [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 139-146.
- [30] WANG X G, SONG X W, ZHANG M P, et al. Experimental comparison of corrosion unevenness and expansive cracking between accelerated corrosion methods used in laboratory research [J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 36-43.
- [31] 徐港, 张瑞, 彭艳周, 等. 保护层胀裂前钢筋通电锈蚀特性影响因素研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 127-132.
- XU G, ZHANG R, PENG Y Z, et al. Study on influence factors of corroded characteristics of reinforcing bars under galvanostatic accelerated corrosion before concrete cover cracking [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(3): 127-132. (in Chinese)
- [32] 孙晓燕, 朱建科, 王海龙, 等. 考虑局部锈蚀特征的钢筋性能退化试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 804-810.
- SUN X Y, ZHU J K, WANG H L, et al. Experimental investigation of performance degradation of corroded rebar considering pitting feature [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 804-810. (in Chinese)