

Corrosion Characteristics and Model Construction of Degradation Law of Mechanical Properties of HRB400E Steel Bars under Stress State

Ding Zeng¹, Hongyu Lu², Man Zhou², Hao Wang², Baohong Hao², Jiejiang Su²

¹Ministry of Transport Road Science Research Institute, Beijing

²Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing

Email: 546233276@qq.com

Received: Aug. 21st, 2019; accepted: Sep. 5th, 2019; published: Sep. 12th, 2019

Abstract

In this study, HRB400E specimens are pre-stressed according to four different stress levels, accelerated corrosion simulation experiment, mechanical property test and microscopic observation by a stress device. The experimental results show that the corrosion degree of reinforcement gradually increases with the increase of stress level of reinforcement. Tensile strength and yield strength of steel bars have different degradation trends; elongation degradation is obvious, and for steel bars with higher stress level after rust, crystalline phase structure is loose and ferrite content increases.

Keywords

Stressed Reinforcement, Electrochemical Detection, XRD Diffraction, Mechanical Behavior, Degradation Mode

HRB400E钢筋在受力状态下的锈蚀特征及力学性能退化规律模型构筑

曾 丁¹, 卢宏宇², 周 满², 王 昊², 郝保红², 苏节江²

¹交通运输部公路科学研究所, 北京

²北京石油化工学院机械工程系, 北京

Email: 546233276@qq.com

收稿日期：2019年8月21日；录用日期：2019年9月5日；发布日期：2019年9月12日

摘要

本文通过加力装置对HRB400E试件按照4种不同应力水平进行预加力、加速模拟锈蚀实验、力学性能测试及微观观测，实验结果表明：随着钢筋应力水平的增加，钢筋的腐蚀程度逐渐增大。钢筋的抗拉、屈服强度有不同的退化趋势，伸长率退化较为明显，而且锈后应力水平较大的钢筋，晶相组织较为松散，铁素体的含量增加。

关键词

受力钢筋，电化学检测，XRD衍射，力学行为，退化模型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋以其良好的力学性能在生活中得到广泛应用。然而目前国内外的学者所做的关于钢筋锈状况[1][2]及力学性能退化模型构筑都是在钢筋不受力的状态下进行，因为受力钢筋的实验难度很大，需要耗费更多的人力和财力，然而桥梁在正常使用中一定是在受力状态下，学者们在非受力条件下研究的“锈蚀钢筋力学性能退化模型”与实际意义有很大差异。

本文研究了在4种不同应力下的钢筋锈蚀情况与力学性能退化情况，在此基础上对锈后钢筋进行XRD衍射和金相实验，揭示了不同应力水平下的钢筋锈蚀机理与力学退化规律。

2. 试验材料与方法

本试验所选用的材料为HRB400E钢筋，选用钢筋锈蚀试件长度为1.2 m，直径 $\Phi 22$ mm。钢筋进行预处理，在两端车螺纹并打孔，螺纹丝扣长为120 mm。加力架采用型号H型钢，总长1040 mm，总宽为130 mm，总高为200 mm。加力架进行防腐处理(煮黑)，其主要作用是对钢筋进行施加应力。

试验钢筋的加力，采用北京海泰斯工程设备股份有限公司的液压螺栓拉伸仪及测力装置，按照33 MPa，67 MPa，100 MPa，150 MPa进行预加力。一段焊接导线并进行密封设置，如图1所示。

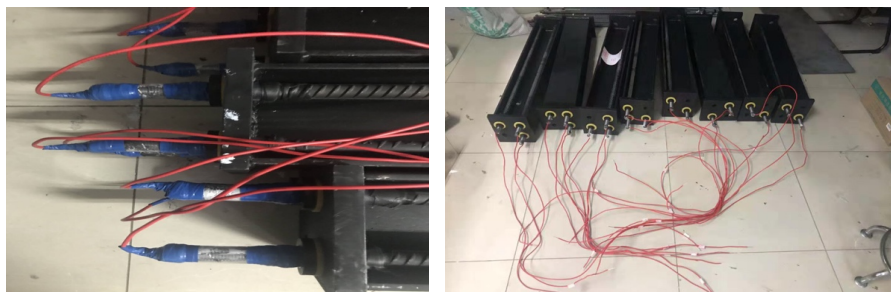


Figure 1. Soldering leads, seal insulation, test connectivity

图1. 焊接引线、密封绝缘、测试联通性

加速模拟实验采用 CS 电化学实验工作站, 腐蚀溶液选用 $\text{pH} = 3$ 的盐酸溶液, 工作电极为 HRB400E 钢筋试件, 饱和甘汞电极为参比电极, 由于试件过大辅助电极选用不锈钢板, 原理图如图 2 所示。

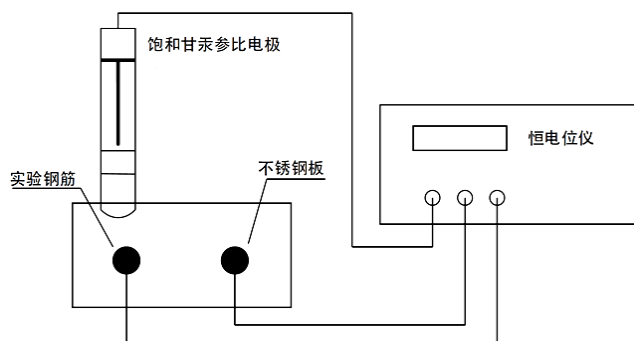


Figure 2. Experimental schematic
图 2. 实验原理图

力学性能试验采用 WDJ-300B 微机控制电子万能试验机。按照依据国标 GB/T 228.1-2010 进行试验切割加工, 试件总长度取 220 mm。将锈蚀后的钢筋制作成力学性能测试试件进行力学性能试验。试验加载以试件的位移速度控制, 依据拉伸试验标准实际位移速度取为 10 mm/min。

3. 试验结果与讨论

3.1. 受力钢筋的腐蚀分析

图 3 是同一腐蚀环境下的不同应力水平钢筋的极化曲线分析, 由图可知随着应力水平的增加, 极化曲线图向下方移动, 动电位扫描拟合出的极化曲线越往右下偏移, 说明腐蚀越严重, 其中未受力钢筋极化曲线处于最上方, 说明同比下腐蚀较为微弱, 加力 33 MPa 和加力 67 MPa 的极化曲线接近重合, 说明两者的腐蚀情况相近, 而加力 100 MPa 和 150 MPa 的钢筋腐蚀较为明显, 整体的极化曲线向下方移动, 可以得到以下结论: 未受力的腐蚀速度最低, 随着应力水平的增加, 腐蚀程度有上升的趋势, 应力最大的腐蚀的越严重, 这与实验前的预期结果基本吻合。

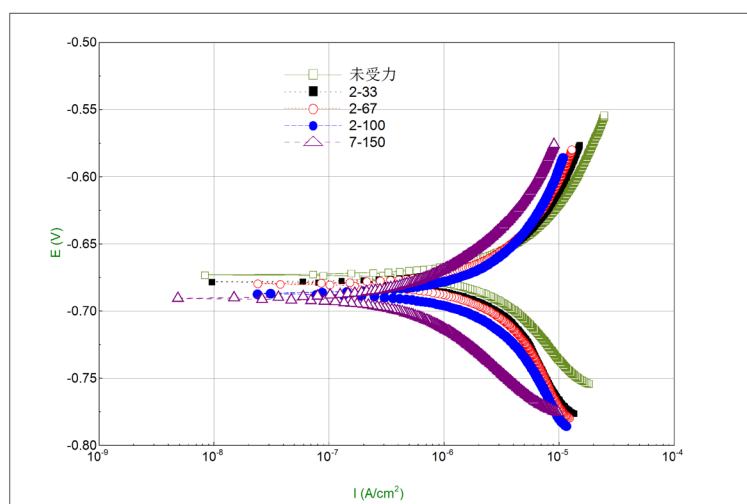


Figure 3. Polarization curves under different stress states
图 3. 不同应力状态下的极化曲线

在腐蚀的过程中, 阳极和阴极反应速率以特定的电流密度在电极表面发生耦合, 阴阳两电极之间电子交换的速率叫做腐蚀电流密度 i_{corr} , 此数值越大表明腐蚀越快。观察下表 1 可知腐蚀电流密度 i_{corr} 在 $9.11 \sim 61.533 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之间的变化趋势呈现出逐步增大的现象, 前后差值为 $52.423 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。对应表 1, 大致可定性判断: 未受力的钢筋腐蚀电流密度为 9.11 mA , 属于高腐蚀状态, 并逐渐加剧, 对比来看加力为 150 MPa 的钢筋腐蚀电流密度为 61.533 mA , 试件处于极高腐蚀状态。

Table 1. Rebar polarization curve parameters

表 1. 钢筋极化曲线参数

加力状态	未受力	33 MPa	67 MPa	100 MPa	150 MPa
E_{corr}/V	-0.67294	-0.67854	-0.68	-0.68395	-0.68462
$i_{corr}/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	0.00911	0.02169	0.024621	0.043032	0.061533
$C_R/(\text{mm}/\text{A})$	0.13645	0.25445	0.28884	0.50482	0.72185

通过腐蚀电流密度可以得到年腐蚀率 C_R [3], 可以更加直观地表示钢筋在盐酸溶液中的腐蚀快慢, 在不同应力水平下的钢筋自腐蚀电位和腐蚀电流密度都不相同, 自腐蚀电位可以反映钢筋锈蚀容易程度, 自腐蚀电位越趋向于正方向说明钢筋的抗腐蚀能力[4]越强, 反之越容易被腐蚀, 观察表 1 可知, 加力 150 MPa 的钢筋自腐蚀电位最低, 说明 150 MPa 的钢筋易受到腐蚀, 相反未受力的钢筋自腐蚀电位比较大, 耐蚀性好。

通过上表 1 可已看出受力钢筋试件的腐蚀电流密度随应力水平的增加逐渐增大。电流密度逐渐增大, 可反映出加力越大钢筋的腐蚀越严重。而年腐蚀速与腐蚀电流密度是成正相关, 未受力钢筋的年腐蚀率为 $0.13645 \text{ mm}/\text{a}$, 加力为 33 MPa 、 67 MPa 、 100 MPa 及 150 MPa 的年腐蚀率分别为 $0.25445 \text{ mm}/\text{a}$ 、 $0.2884 \text{ mm}/\text{a}$ 、 $0.50482 \text{ mm}/\text{a}$ 及 $0.72185 \text{ mm}/\text{a}$, 随着钢筋应力的增大钢筋表面原始微缺陷在逐渐增大[5], 腐蚀溶液更快的渗透进入钢筋内部, 腐蚀产物迅速产生, 因此, 其腐蚀速率随应力的增大而增大。

3.2. 力学性能分析

力学性能试验[6]是用来衡量钢筋是否能够正常使用的最直接的手段, 尤其是建造桥梁所用到的钢筋更应该研究锈蚀后钢筋性能退化的影响, 找到受力钢筋锈蚀后的退化规律。此处力学性能分析, 是指同一腐蚀环境下、同样长的腐蚀时间, 不同预加应力水平的锈蚀钢筋[7]力学性能的变化分析研究。实验数据如表 2 所示。

Table 2. Mechanical properties of corroded steel bars subjected to different pre-stressing in the same corrosive environment

表 2. 同一腐蚀环境不同预加应力锈蚀钢筋的力学性能指标

应力状态	性能指标	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	伸长率%
原始钢筋		475.88	635.3	28.16
未受力		465.88	629.25	26.12
33 MPa		461.6	623.10	25.25
67 MPa		455.36	621.10	23.43
100 MPa		450.86	616.10	22.67
150 MPa		444.84	608.21	20.61

根据实验数据绘制出图 4 所示的应力 - 位移曲线图(位移指试验机上下两夹具开始加力后得位移量)。

锈蚀试验已经验证应力水平越大其钢筋的锈蚀率越大，也就是在相同的环境下相同的锈蚀时间其锈蚀度越大。通过下图 5 观察可以得到以下结论：在相同的腐蚀环境下钢筋锈蚀后的屈服强度随着预加应力的增大而有非常明显的下降，即原始钢筋的屈服强度为 470.86 MPa，未受力钢筋的屈服强度为 453.08 MPa，预加力 33 MPa 的钢筋屈服强度为 448.31 MPa，预加力 67 MPa 的钢筋屈服强度为 432.48 MPa，预加力 100 MPa 的钢筋屈服强度为 450.5 MPa，预加力 150 MPa 的钢筋屈服强度为 430.72 MPa，由此可以看出钢筋锈蚀对力学性能[8]的影响很大，原始钢筋与受 150 MPa 应力的钢筋相比屈服极限强度下降了 40.14 MPa，如此大的差距应该深深的引起我们的重视。

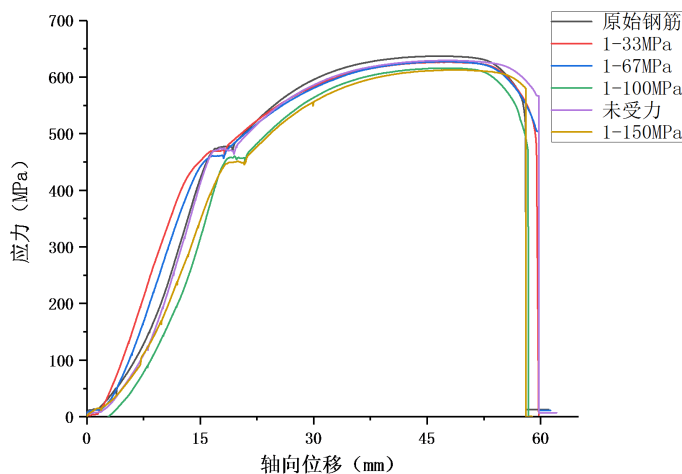


Figure 4. Stress-displacement curve

图 4. 应力 - 位移曲线图

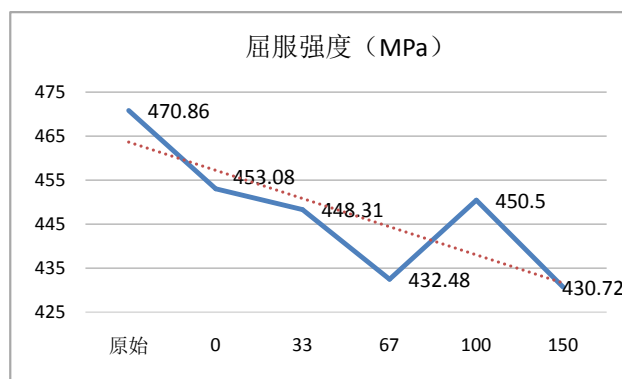


Figure 5. Stress-yield limit line chart

图 5. 应力 - 屈服极限折线图

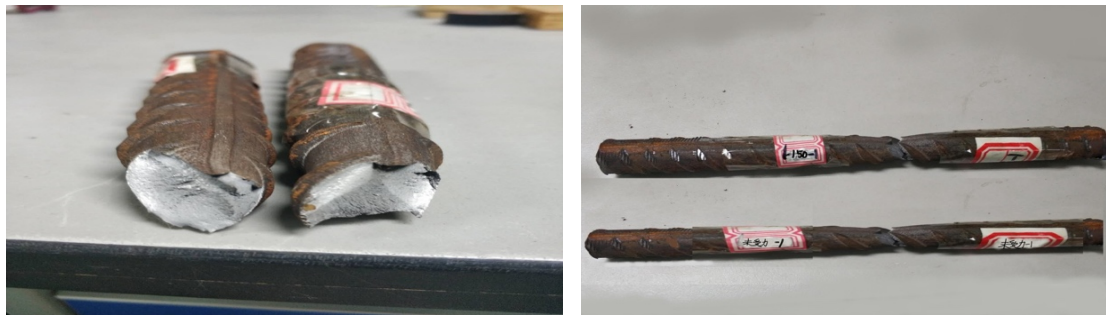
根据伸长率公式 $A = (L_U - L_0) / L_0 \times 100\%$ ，其中 L_U 为断后标距， L_0 为原始标距。从实验数据中选取每组受力钢筋的伸长量进行计算得到下表 3 所示。

Table 3. Stretching after breaking of steel bars with different stress levels

表 3. 不同应力水平钢筋锈蚀后得断后伸长量

钢筋加载类型	原始钢筋	未受力锈蚀钢筋	33 MPa 应力锈蚀钢筋	67 MPa 应力锈蚀钢筋	100 MPa 应力锈蚀钢筋	150 MPa 应力锈蚀钢筋
伸长率(%)	28.16	26.12	25.25	23.43	22.67	20.61

通过对钢筋断后伸长量的比较,可以得出:未锈蚀钢筋的断后伸长率为 28.16% 高于浸泡在腐蚀溶液中的钢筋,而且还有如下规律,随着钢筋锈蚀前预加力增大,其锈蚀度增大、断后伸长率降低。原始钢筋的伸长率比加力最大的 150 MPa 钢筋多了 7.55%, 约为 9.06 mm。观察钢筋的颈缩现象如图 6 同样可以发现,原始钢筋((a)图左边)有很明显的颈缩现象,塑性变形很好,随着预加应力的增加锈蚀严重,颈缩现象变得不明显,塑性变形下降,表现为脆性断裂[9] [10] ((a)图右边加力为 150 MPa 锈后钢筋),整体的对比图如(b)所示。锈蚀严重的钢筋塑性变差很容易发生毫无预警的脆性断裂,带来不可预知的后果。



(a) 截面对比

(b) 整体对比

Figure 6. Steel bar fracture comparison chart
图 6. 钢筋断裂对比图

3.3. 锈后钢筋的 XRD 衍射及金相实验

通过 X 衍射仪器对不同应力水平的钢筋锈蚀后产物进行比较分析,将得到分析数据整理后导入到 origin 绘图软件中,通过整体分析后的局部放大形式,对衍射图谱进行优化,根据拟合出的曲线观测可能物质有 FeO 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 。

所有的能谱图在衍射角为 15° 前后都出现了一个较为明显的峰,预加力为 33 MPa 的钢筋锈蚀产物中,在 30° 衍射角同样出现了一个较为明显的峰,可以在 XRD 分析软件 jade 中分析得到这些峰代表的是什么元素。其中 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 就是俗称的铁锈。

如图 7 所示, (a)为预加力 33 MPa 的钢筋锈后产物分析能谱图,图中绿色线为 Fe_3O_4 ,在后面平稳区域含量较少,分析原因是在切割钢筋的时候产生的高温使切割表面瞬间生成了 Fe_3O_4 。蓝色线代表的是 Fe_2O_3 ,在第一个峰处刚好吻合,也说明了此时的主要物质就是 Fe_2O_3 ,众所周知铁锈的主要成分是 Fe_2O_3 ,除此之外还含有少量褐色线代表 FeO , FeO 是钢筋在生产中与氧气结合产生的。(b)为预加力 67 MPa 的钢筋锈后产物能谱图,图中蓝色线为 Fe_2O_3 ,可以看出图(b)相比于图(a)中蓝色线数量有了明显的增加,即加力为 67 MPa 时铁锈的数量有了明显的增多,腐蚀更为严重。(c)为预加力 100 MPa 的钢筋,蓝色线为 Fe_2O_3 ,每根线几乎都与能谱图的波峰重合,蓝色线的比重再次增加,(d)为预加力 150 MPa 的钢筋,(d)图的蓝色线是最密集的,几乎充满了每个波峰,也就是说(d)图的钢筋腐蚀是最严重的。通过 XRD 衍射的检测,从钢筋锈蚀后的表面附着物微观分析,同样证实了随着加力的增大,钢筋的锈蚀越来越严重。

如图 8 所示:通过对锈蚀后的钢筋进行金相检测,研究钢筋内部组织的变化,(a)为原始钢筋金相图,(c)为预加力 33 MPa 锈蚀后的金相图,(d)为预加力 67 MPa 锈蚀后的金相图,(e)为预加力 100 MPa 锈蚀后的金相图,(f)为预加力 150 MPa 锈蚀后的金相图,通过高倍数金相显微镜观察得到以下结论:晶相中的黑色铁素体明显增多,珠光体越来越分散,晶体的间距随着腐蚀的程度的增大而增大,预加力 150 MPa 的钢筋与原始钢筋相比组织趋于分散,表面也含有少量的蚀坑,当钢筋受到外力作用时,这些缺陷都会导致钢筋力学性能发生变化[11]。

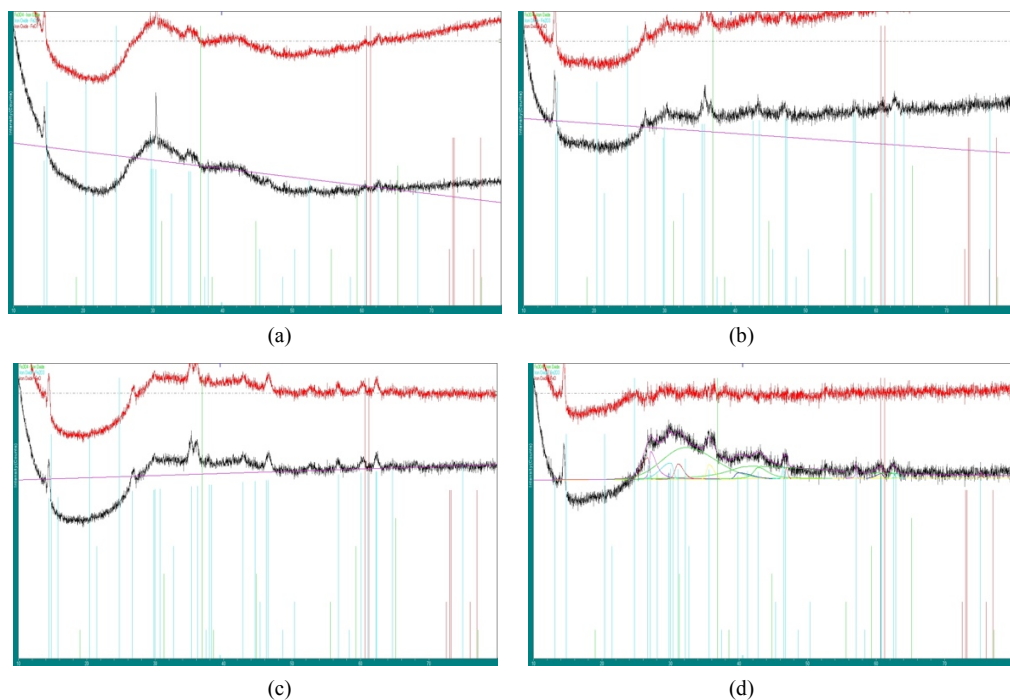


Figure 7. Energy spectrum fitting result

图 7. 能谱图拟合结果

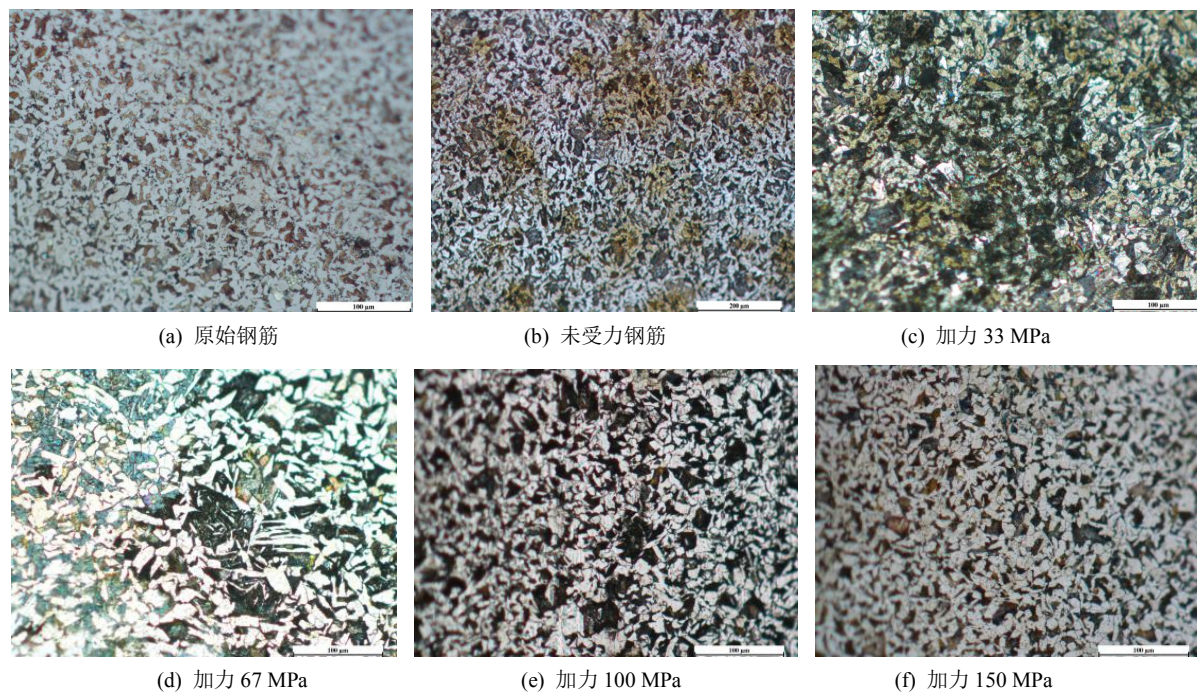


Figure 8. Metallographic image analysis

图 8. 金相组分图

3.4. 力学性能退化模型

经过 30 天的腐蚀后，进行力学性能试验，将实验数据整理如下表 4 所示。

Table 4. Mechanical properties of corroded steel bars subjected to different pre-stressing stresses in the same corrosive environment

表 4. 同一腐蚀环境不同预加应力锈蚀钢筋的力学性能指标

性能指标	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	伸长率%
原始钢筋	475.88	635.3	28.16
未受力	465.88	629.25	26.12
33 MPa	461.6	623.10	25.25
67 MPa	455.36	621.10	23.43
100 MPa	450.86	616.10	22.67
150 MPa	444.84	608.21	20.61

Table 5. Degradation of mechanical index of steel bars subjected to different pre-stress levels in the same corrosive environment

表 5. 同一腐蚀环境下不同预加应力水平钢筋的力学指标退化表

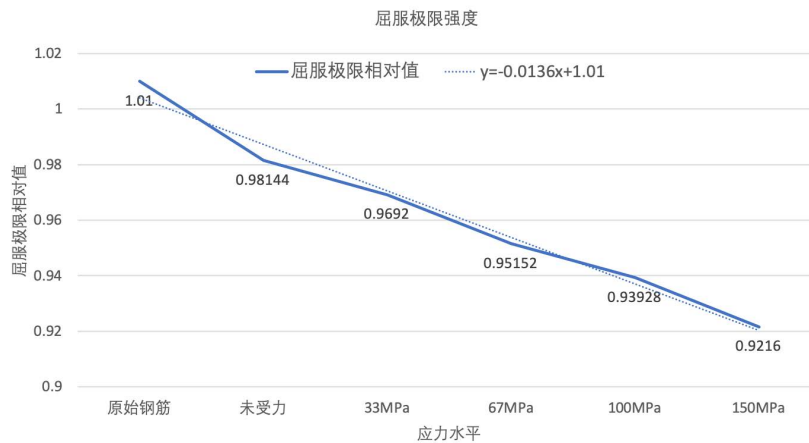
性能指标	屈服强度退化程度%	抗拉强度退化程度%	伸长率退化程度%
原始钢筋	0	0	0
未受力	2.1	1.0	7.2
33 MPa	3.0	1.9	10.3
67 MPa	4.3	2.2	16.8
100 MPa	5.2	3.0	19.5
150 MPa	6.5	4.3	26.8

根据上表 5 的各项力学性能数据绘制出二位平面离散点图，从图上来看基本上呈线性变化规律，因此，利用最小二乘法线性回归的力学性能变化规律斜直线如图 9 所示，得到钢筋腐蚀后的屈服强度，抗拉强度，断后伸长率与预加应力水平的关系式为：

$$f_{yc} = (-0.0136x + 1.01)f_c \tag{1}$$

$$f_{uc} = (-0.0098x + 1.0121)f_u \tag{2}$$

$$\delta_{sc} = (-0.0507x + 1.0427)f_s \tag{3}$$



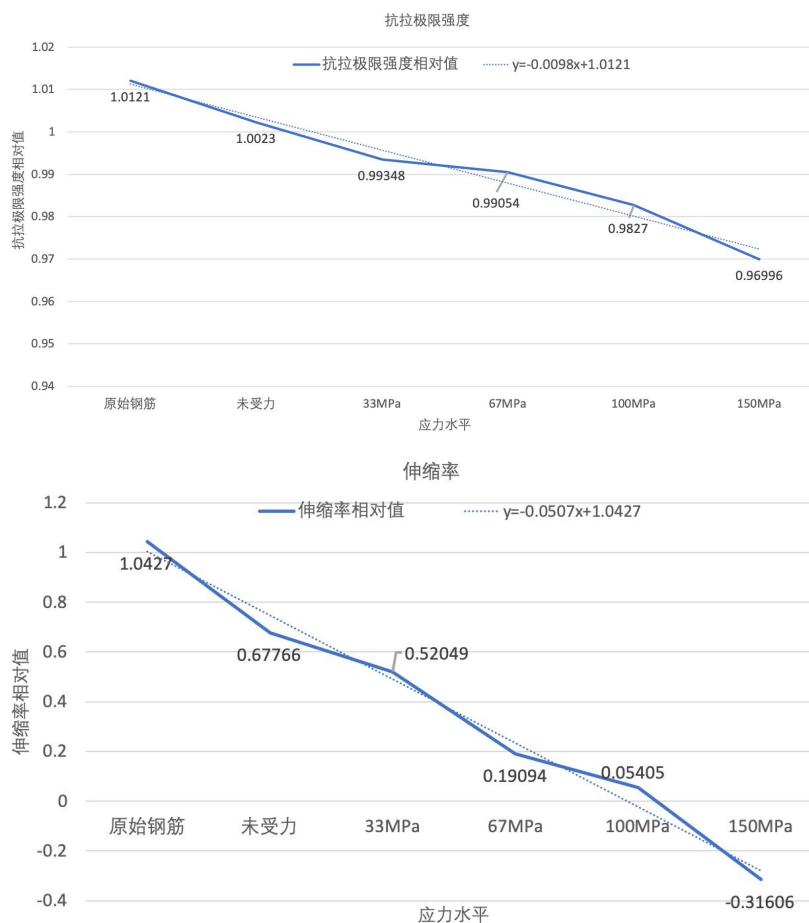


Figure 9. Relationship between mechanical properties and stress levels
图 9. 力学性能与应力水平的关系

由图 9 可知,在同一腐蚀环境下不同应力水平的钢筋力学性能随着应力水平的增大表现出如下特征:

- 1) 随着钢筋应力水平的增加,锈蚀程度有明显的增加,钢筋的屈服强度,抗拉强度呈现出逐渐下降的趋势。
- 2) 断后伸长率呈现显著下降的规律。试件断后伸长率的下降程度远大于试件屈服强度、极限强度的下降程度。

4. 结论

目前桥梁寿命预测的量化模型通常是不受力钢筋的实验结论,而实际桥梁的耐久性预测远比实验室内模拟的环境要复杂得多,会受到各种各样的外界因素影响,受力情况也复杂得多。该实验通过对 HRB400E 钢筋加力后进行加速模拟锈蚀实验,使实验条件更加接近实际桥梁工作条件,对锈蚀试件进行力学性能测试等研究,得到如下的结论:

- 1) 钢筋的加速模拟锈蚀实验表明,预加应力越大钢筋的腐蚀速率越大。从腐蚀时间上来看,腐蚀速率在前期上升随后有小幅的下降后来再次上升,这是腐蚀初期,腐蚀到一定程度大量的腐蚀物阻碍了腐蚀性离子侵入钢筋表层,造成对钢筋腐蚀的阻碍作用;随着时间的增长,腐蚀产物溶解,使得大量腐蚀性离子与钢筋发生化学反应,腐蚀速率再次增大。
- 2) 通过 XRD 衍射检测分析,锈蚀后的产物有 Fe_2O_3 及少量的 FeO 、 Fe_3O_4 ,在相同的腐蚀环境及腐

蚀时长条件下, 预加应力越大钢筋锈蚀后所含有的 Fe_2O_3 越多, 锈蚀越严重。

3) 锈蚀后钢筋的晶相组织同样会发生变化, 受力越大的钢筋铁素体含量越大, 并随着受力增加铁素体含量有显著的增加。最明显的现象是各部分组织会变得松散, 晶格间距增大, 使钢筋局部锈蚀增加, 大大降低了钢筋的力学性能。

4) 锈蚀后钢筋的力学性能测试表明, 预加力越大钢筋锈蚀后力学性能退化越严重, 其中断后伸长率的退化最为严重, 随着预加力的增大逐渐由延性破坏转变为脆性破坏。在均匀锈蚀情况下, 钢筋的力学性能与腐蚀程度呈现一定程度的线性正相关性; 但在不均匀锈蚀情况下则呈现非线性相关性, 即出现了力学性能急速退化的现象。钢筋在局部锈蚀严重的情况下, 将增加附加弯距, 从而导致承载能力的急剧下降, 增加了桥梁瞬时倒塌的危险性。

5) 通过试验研究所得到的应力状态对钢筋锈蚀状态的影响规律及建立的锈蚀钢筋力学性能退化规律模型, 可以为钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁的现实状况研判、养护维修、寿命预测提供科学的依据, 对提高桥梁的耐久性具有现实意义及实用价值。

基金项目

1) 受助于交通运输部公路研究所科技创新专项资金项目, 项目名称: 受力钢筋锈蚀的评价方法、标准及力学性能退化模型; 项目编号: 2018-E0011;

2) 北京高等学校高水平人才交叉培养计划项目: 基于受力钢筋电化学信号的锈蚀度与力学性能理论计算模型的实桥应用及分级评价; 项目编号: 2019100170416。

参考文献

- [1] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 41-47.
- [2] 张奇, 王强, 黄志勇. 浅谈混凝土中钢筋锈蚀的检测方法[J]. 民营科技, 2018, 224(11): 125.
- [3] Antonino, R., Nino, S. and Francesco, T. (2018) Failure Analysis of Corroded RC Beams Subjected to Shear-Flexural Actions. *Engineering Failure Analysis*, **93**, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.06.025>
- [4] 付一帆, 郑渝, 徐晓婧. 钢筋锈蚀分析及混凝土结构检测方法[J]. 居舍, 2018(28): 32+44.
- [5] 耿文超, 张鹏, 李丹, 等. 钢筋锈蚀监测方法在混凝土中的应用及现状[J]. 混凝土, 2018(2): 150-153.
- [6] 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.
- [7] 梁岩, 班亚云, 罗小勇, 等. 不同荷载模式下锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 22-30.
- [8] Stewart, M.G. (2009) Mechanical Behaviour of Pitting Corrosion of Flexural and Shear Reinforcement and Its Effect on Structural Reliability of Corroding RC Beams. *Structural Safety*, **31**, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2007.12.001>
- [9] 郝保红, 曾丁, 曾琪卉, 等. 混凝土钢筋在不同锈蚀状态下的力学性能退化规律[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(6): 750-753.
- [10] 彭建新, 张伟, 阳逸鸣, 等. 腐蚀对高性能钢 Q550E 力学指标影响的试验研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10): 60-66.
- [11] 于吴钲. 受力钢筋锈蚀与力学性能退化规律模型[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2019.