

模拟北方酸雨对 Q235 钢腐蚀力学行为的试验研究

张 童^{1,2}, 刘海卿¹, 吕学涛³

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁科技学院资源与土木工程学院, 辽宁 本溪 117004;

3. 佛山科学技术学院交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225)

[摘 要] 为研究北方酸雨对钢管混凝土构件力学性能的影响规律,亟需研究钢管在酸雨腐蚀条件下不同腐蚀程度力学性能的变化规律。为此,参照大连市历年酸雨统计的化学成分,采用人工配制模拟酸雨溶液进行室内加速腐蚀的方法,对 Q235 钢进行单调拉伸试验。结果表明:酸雨腐蚀后钢材表面易形成腐蚀坑;低腐蚀率($\beta \leq 10\%$)拉伸件的断口主要为正断破坏;高腐蚀率($25\% \geq \beta \geq 15\%$)拉伸件的断口主要为斜断破坏;模拟酸雨腐蚀后钢材的屈服强度、弹性模量、极限强度和伸长率随着腐蚀率的增加而减少,而泊松比随着腐蚀率的增加而增加。基于试验数据,回归出模拟酸雨腐蚀条件下 Q235 钢力学性能指标的简化经验公式,结果可为酸雨区钢管混凝土组合结构的设计及结构安全评估提供理论基础和科学依据。

[关键词] 酸雨腐蚀; Q235 钢; 单调拉伸试验; 力学性能指标

[中图分类号] TG172.5 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2022.0092

[文章编号] 1001-1560(2022)04-0033-07

Experimental Study on the Effect of Simulated Northern Acid Rain on the Corrosion Mechanical Behavior of Q235 Steel

ZHANG Tong^{1,2}, LIU Hai-qing², LV Xue-tao³

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Resource and Civil Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China;

3. School of Transportation and Civil Engineering and Architecture, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: In order to study the influence law of northern acid rain on mechanical properties of concrete-filled steel tubular members, it is necessary to study the change law of mechanical properties of steel tube with different corrosion degree under acid rain corrosion condition. Hence, referring to the chemical composition of acid rain statistics over the years in Dalian City, the method of indoor accelerated corrosion with artificially prepared simulation acid rain solution was used to carry out monotonic tensile test on Q235 steel. Results showed that rust pits were easy to form on the steel surface after acid rain corrosion. The fracture of tensile coupons with low corrosion rate ($\beta \leq 10\%$) was mainly normal fracture failure, while the fracture of tensile coupons with high corrosion rate ($25\% \geq \beta \geq 15\%$) was mainly oblique fracture failure. Meanwhile, the yield strength, elastic modulus, ultimate strength, and elongation percentage of steel after empirical acid rain corrosion decreased with the increase of corrosion rate, while Poisson's ratio increased with the increase of corrosion rate. Based on the test data, the simplified empirical calculation formula of the mechanical properties index of Q235 steel under the condition of simulated acid rain corrosion condition was regressed, which could provide theoretical basis and scientific basis for the design and structural safety assessment of concrete-filled steel tubular composite structure in acid rain area.

Key words: acid rain corrosion; Q235; monotonic tensile test; mechanical property index

[收稿日期] 2021-10-22

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51208246);辽宁省教育厅基金(LJKZ1056)资助

[通信作者] 刘海卿(1965-),博士,教授,研究方向为工程结构与防灾,E-mail: lhq2008@163.com

0 前言

钢管混凝土是指在钢管内填充素混凝土而形成的一种组合结构,因其具有优良的力学性能、经济效益和施工效益,被广泛应用于各类结构物中^[1]。与其他受力结构(钢结构、钢筋混凝土)类似,钢管混凝土柱作为一种主要的受力构件,其长期服役耐久性在设计中也是至关重要的^[2]。当钢管混凝土用于雨水较多的地区时,裸露在外的钢管易遭受到酸雨的侵蚀,严重的表面腐蚀会削弱钢管的壁厚,还会对其力学性能产生重要影响。在不同的设计规范中^[3,4],钢材的力学性能是评估钢管混凝土强度以及对钢管混凝土受力机理分析的关键参数。服役的钢管混凝土结构日益增多,故研究酸雨腐蚀后钢管力学性能变化规律就显得非常重要。

当前,对于腐蚀环境下钢材力学性能的研究,大部分集中于氯离子的腐蚀^[5,6],关于酸雨腐蚀对钢材力学性能影响规律的研究相对较少^[7],可参考的文献十分有限,试验样本不多,因此对受到酸雨腐蚀后钢材力学性能的研究还有待完善。此外大气环境的成分对钢材的腐蚀具有较大的影响,相同的腐蚀时间,不同地区环境对腐蚀钢材的力学性能也存在较大差异,由于腐蚀本身的离散性较大,对具体某地的腐蚀评估只有根据当地的腐蚀数据才能得到较为精确的腐蚀模型^[8]。

本工作以酸雨腐蚀的 Q235 钢为研究对象,对酸雨腐蚀的钢板进行单调拉伸试验,研究酸雨腐蚀对钢材屈服强度、极限强度、伸长率、弹性模量、泊松比等力学性能指标的影响规律,并在此基础上提出不同腐蚀程度情况下 Q235 钢力学性能指标的简化计算经验方法,进而为北方酸雨区钢管混凝土组合结构的设计及结构安全评估提供理论基础和科学依据。

1 试验

1.1 酸雨腐蚀试验

1.1.1 模拟酸雨溶液的配制

文献[9-11]对大连酸雨的成分进行了详细的分析,研究结果表明大连地区酸雨成分中阴离子 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 为主要成分,三者占到总阴离子成分的 96.7%。阳离子的主要成分是 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Na^+ ,三者占到总阳离子成分的 77.9%。而酸雨成分中 SO_4^{2-} 和 H^+ 是导致建筑钢材腐蚀的主要离子。文献[12]统计了 2007~2018 年大连降水的 pH 值,最低为 3.48,年平均为 4.80~5.85,因此本试验中人工模拟酸雨溶液的成分为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 Na_2SO_4 及 NH_4Cl ,其含量分别为 0.143,

0.251, 0.038 g/L。pH 值由 HNO_3 进行调节,设定为 $\text{pH}=4.5$ 。为保证人工酸雨溶液 pH 值的稳定,每隔 12 h 测量溶液的 pH 值,若相对于原值变化了 0.3 以上时则更换溶液^[8]。

1.1.2 拉伸试件的制作

试样全部从 Q235 级钢管上截取。根据规范 GB/T 228.1-2010“金属材料拉伸试验”^[13],设计拉伸试验试件,具体尺寸如图 1 所示,初始厚度为 3 mm。为了提高试验结果的均一性,在加速腐蚀试验之前,首先使用 600 级金刚砂纸对试样的所有表面进行抛光,去掉原始金属表面层,然后用医用棉球蘸取丙酮溶液进行脱脂清洗^[14],将表面擦干后放置在室温内测量质量。

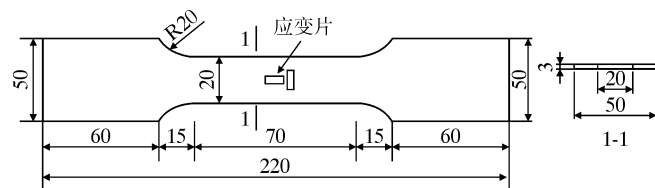


图 1 拉伸试件的尺寸

Fig. 1 Tensile coupons details

1.1.3 试验步骤

在综合考虑试验费用和试验周期的情况下,本次腐蚀试验拟采用室内施加直流电的方式进行加速试验。试验设备由贮水槽、稳流电源、人工酸雨溶液及电源线构成。将配制好的人工酸雨溶液置于试验容器中,试样全部浸入溶液中,每组试验取 3 个平行试样。为避免试样与容器壁接触,特在试件两端宽口下垫上大小相同的木块。试样浸入溶液时,试样必须被溶液完全覆盖且在溶液面下至少 10 mm。稳流电源的正极连接到拉伸试件,负极连接到导电棒,具体连接方法如图 2 所示。

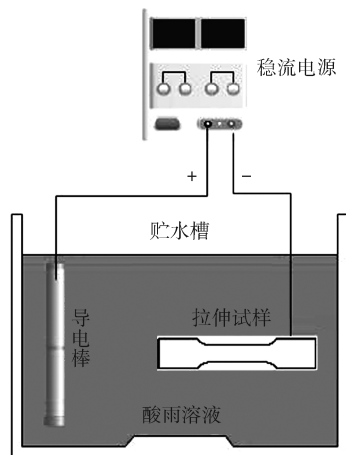


图 2 腐蚀试验装置连接示意

Fig. 2 Connection diagram of corrosion test device

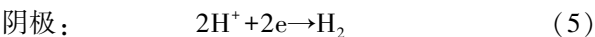
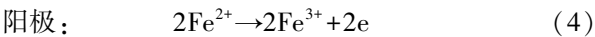
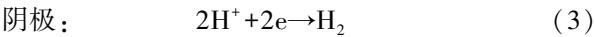
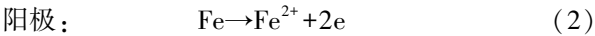
通电时间按照 Faraday 定律理论公式进行控制,具体计算步骤见公式(1):

$$\Delta T = \frac{\Delta m}{KI} \tag{1}$$

式中 Δm —— 金属减少的质量,g
 K —— Q235 钢金属电化学当量, $K = 1.024$ g/(A · h)
 I —— 电流强度,A
 ΔT —— 通电时间,h

参考文献[15]中的经验,本试验中电流密度控制为 2.0×10^{-4} A/cm²。达到预定时间后取出试样,先在流水中用软毛刷进行轻微清洗,去除附着不牢固或酥松的腐蚀产物,若仍存在不能去除的腐蚀产物,则用钢丝刷进行处理。然后用流水反复清洗,以确保完全去除腐蚀产物,以避免试样继续受到腐蚀,同时也保证不损伤金属表面^[16]。

试件通电后,负极连接的导电金属表面立即产生大量气泡,这是酸雨溶液中流离的 H⁺在得到电子后生成的氢气。随着通电时间的增加,溶液逐渐由清澈的白色变成了黄绿色,表面拉伸试件的铁元素在失去电子后形成了流离的 Fe²⁺,电极反应如式(2)~(3),然后黄绿色消失,溶液变成黄褐色,这是溶液中流离的 Fe²⁺继续失去电子,形成了 Fe³⁺,电极反应如式(4)~(5)。



本试验采用测量腐蚀钢材残余质量的方法测定钢材的腐蚀率,如公式(6)所示。其中 β 为腐蚀率,%; Δm 为钢材因腐蚀质量的减少值,g; m_0 为钢管初始质量,g; m_1 为腐蚀后钢管质量,g。

$$\beta = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100\% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \tag{6}$$

使用 Evo18 扫描电子显微镜(SEM)分析腐蚀钢板表面形貌。

1.2 单调力学性能试验

目前测量金属材料的纵横向变形的常用方法有机械法、声学方法、光学方法和电阻法等,而由于电阻法灵敏度高,并且可以在应变仪上直接读出应变数据^[17],因此本试验采用电阻法测量材料的纵横向变形。首先将试样两面中间位置用砂纸打磨,然后用医用棉球蘸少量酒精将打磨处进行脱脂清理,然后分别沿平行和垂直于试样长度方向各贴2个电阻应变片(如图1所

示),型号为 BX120-3AA,灵敏系数为 $2.0 \pm 1\%$ 。再用游标卡尺标定试样拉伸前的尺寸 l_0 。单调拉伸试验采用应变加载控制方式,应变加载速率为 $0.000\ 25\ \text{s}^{-1}$ 。拉伸试件具体试验参数及测试结果如表1所示。

表1 拉伸试件试验参数及测试结果
Table 1 Test parameters and test results of tensile specimens

试件 编号	l / mm	m_0 / kg	m_1 / kg	β / %	E_s / GPa	f_y / MPa	f_u / MPa	μ_s	δ /%
S-0-a	3	125.4	125.4	0	164.1	386.7	429.3	0.275	25.5
S-0-b	3	125.1	125.1	0	160.7	386.8	442.7	0.289	21.8
S-0-c	3	124.9	124.9	0	141.2	368.8	414.7	0.297	25.5
S-5-a	3	125.2	118.6	5.3	150.0	358.4	417.6	0.306	21.8
S-5-b	3	124.3	117.5	5.5	153.7	344.6	395.9	0.240	29.1
S-5-c	3	126.6	119.5	5.6	145.5	359.9	424.5	0.256	20.4
S-10-a	3	125.7	111.8	11.1	144.1	358.0	431.3	0.271	23.6
S-10-b	3	125.4	111.7	10.9	152.3	357.7	431.0	0.295	21.8
S-10-c	3	125.9	111.7	11.3	140.7	360.9	429.6	0.276	23.6
S-15-a	3	124.8	104.5	16.3	140.2	339.5	396.9	0.294	18.2
S-15-b	3	123.8	103.5	16.4	141.2	336.7	403.0	0.313	20.8
S-15-c	3	125.2	104.9	16.2	140.0	335.4	395.4	0.264	18.2
S-20-a	3	123.0	98.5	19.9	136.2	289.3	345.2	0.285	12.7
S-20-b	3	124.7	100.2	19.6	135.5	282.1	337.2	0.297	14.2
S-20-c	3	124.9	99.9	20.0	129.7	290.7	336.6	0.309	12.7
S-25-a	3	124.8	93.6	25.0	134.8	304.3	378.9	0.342	10.7
S-25-b	3	125.9	94.1	25.3	138.7	304.2	363.6	0.338	9.7
S-25-c	3	125.3	94.1	24.9	140.0	307.3	352.9	0.296	8.5

注: l 为初始厚度; β 为腐蚀程度,%; E_s 为弹性模量,GPa; f_y 为屈服强度,MPa; f_u 为抗拉强度,MPa; μ_s 为泊松比; δ 为伸长率,%。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀后表面形貌

不同腐蚀程度钢板试样表面微观腐蚀形貌如图3所示。在0.2 mm标尺状态下可以看出经历酸雨腐蚀后,试样表面均存在凹凸不平的腐蚀痕迹,即腐蚀形式属于坑蚀。但不同腐蚀率下试样表面的蚀坑数量、大小以及分布都出现不同的变化。基本规律:当 $\beta \leq 10\%$ 时,随着腐蚀率的增大,蚀坑数量越多、分布越密集,部分蚀坑相互交汇使得蚀坑表面积增大、深度增加;当 $25\% \geq \beta \geq 15\%$ 时,试样表面产生的蚀坑更趋于明显和密集,形成了蚀坑集落,并且在集落内又生成新的蚀坑,因此表面有较大面积的半球状蚀坑^[18]。

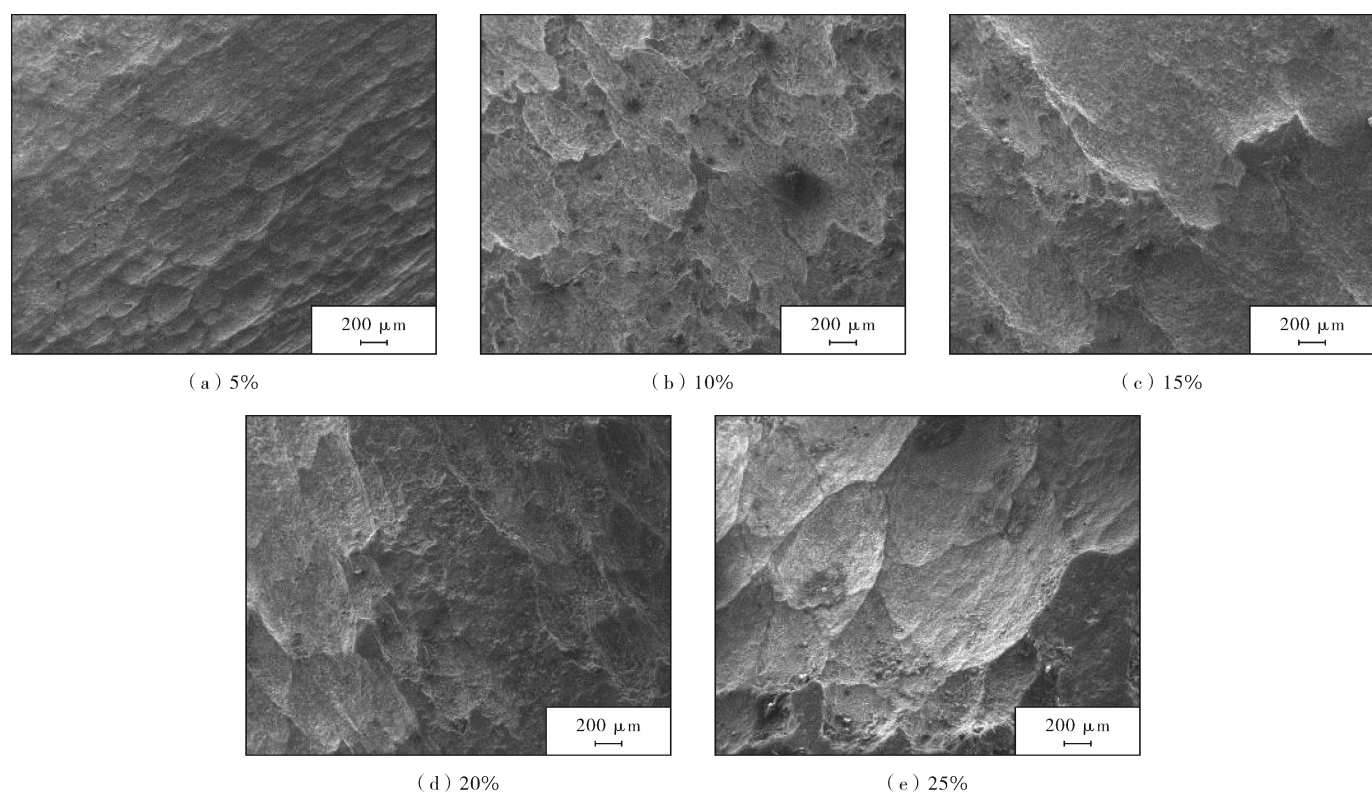


图 3 不同腐蚀程度试样表面形貌对比

Fig. 3 Comparison of surface micro morphology of the tensile specimens with different corrosion rates

2.2 拉伸断裂方式

在本研究腐蚀率范围内,不同腐蚀程度拉伸试件存在 2 种不同的断裂方式:正断(断口垂直于试件轴线

方向)或斜断(断口与试件轴线呈一定角度)。观察各拉伸件断口,都存在正断和斜断 2 种形式,但低腐蚀率($\beta \leq 10\%$)拉伸件的断口主要为正断;高腐蚀率($25\% \geq \beta \geq 15\%$)拉伸件的断口主要为斜断,如图 4 所示。

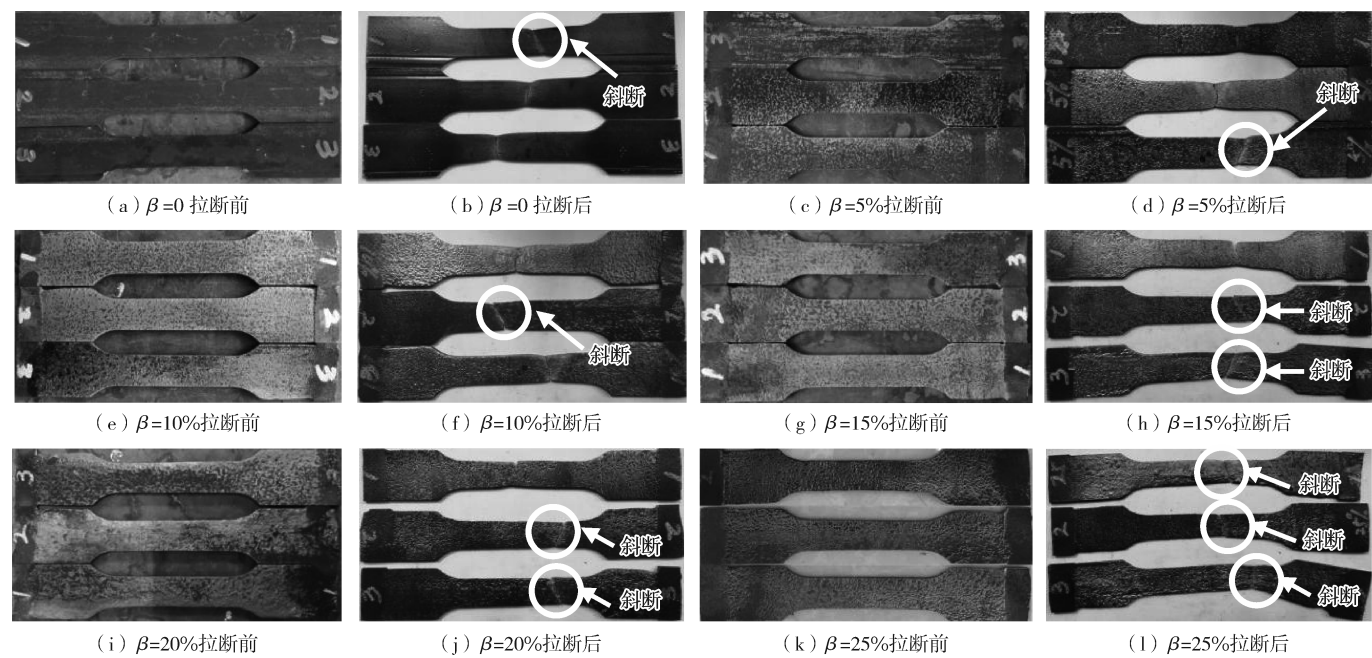


图 4 不同腐蚀程度拉伸试件拉断前后对比

Fig. 4 Comparison of the tensile specimens with different corrosion rates before and after fracture

2.3 拉伸断口形貌

韧窝不同腐蚀程度钢板拉伸断口的宏观对比如图

5 所示。在 2 μm 标尺状态下,可以看出腐蚀钢板拉伸断口特征区域的微观形貌差异较大:当 $\beta = 5\%$ 时,拉伸

断口表面有大量韧窝,且韧窝尺寸较大且深,说明试样塑性较好;当腐蚀率为 $15\% \geq \beta \geq 10\%$ 时,其断口微观形貌中韧窝尺寸较小且浅,表明其塑性下降,但此时试样塑性仍较好;当 $\beta = 20\%$ 时,其断口微观形貌中不但

有很多小韧窝,还有明显解理面,说明试样不但具有塑性,同时还存在脆性,而且是以脆性断裂为主;当 $\beta = 25\%$ 时,其断口微观形貌中韧窝不再存在,只有呈阶梯状的解理面且逐渐增多,说明试样为脆性断裂。

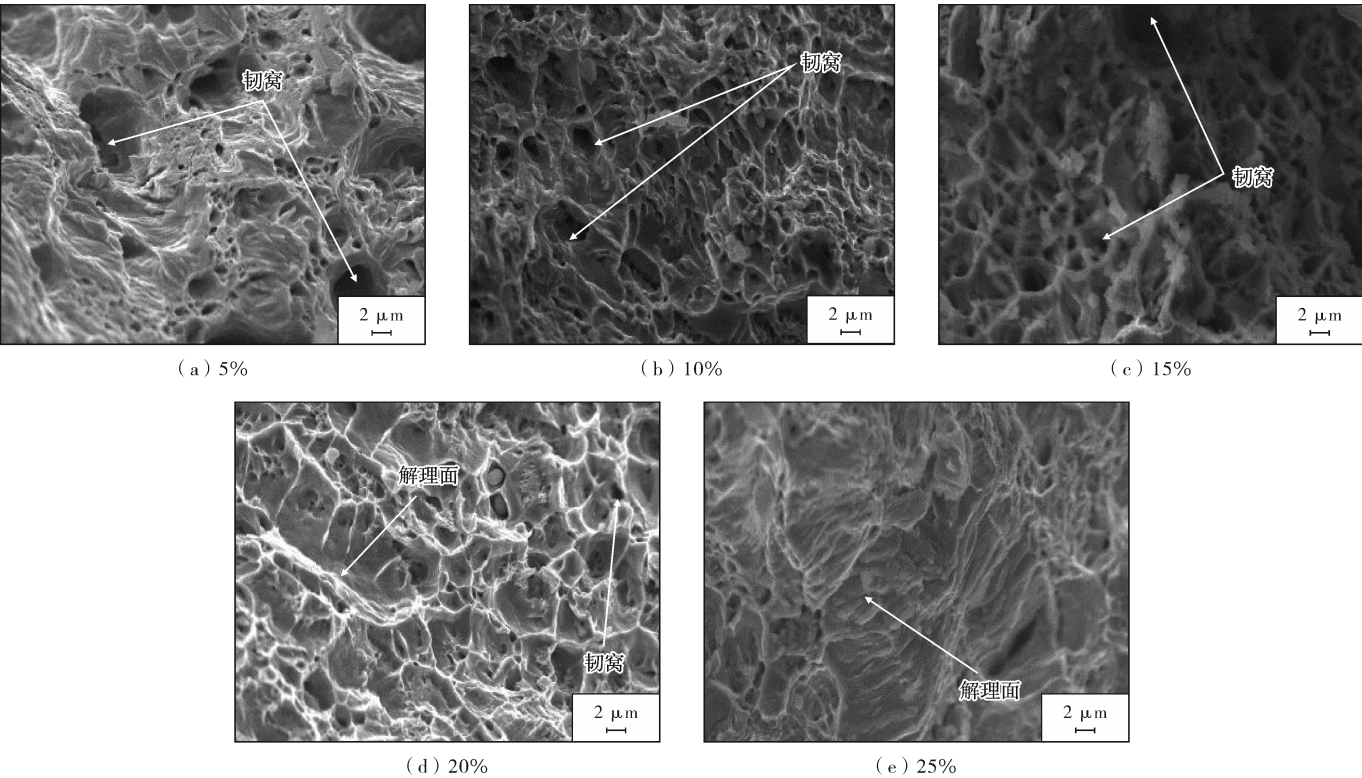


图 5 不同腐蚀程度试样拉伸断口形貌对比
Fig. 5 Comparison of tensile fracture morphology of the specimens with different corrosion rates

2.4 应力-应变曲线

拉伸过程中,由于钢材发生缩颈现象,拉伸件横截面发生变化,应变不再均匀,导致粘贴在试样正中间的应变片出现读数不准确的现象。但是拉伸试验并未终止,直到试件被拉断才停止试验,进而得到了完整的应力-应变曲线如图 6 所示。

从图 6 可以看到,随着钢材腐蚀的增加,钢材强度呈减小的趋势,而且腐蚀率越大,曲线中弹塑性变形阶段的弧度越短,说明由弹性段进入强化段时间用时较短。

2.5 力学性能指标

根据以往研究可知,腐蚀钢材的力学指标主要集中于屈服强度、极限强度、弹性模量以及伸长率。但由钢管混凝土结构的受力机理可知,当承受外部荷载时由于外部钢管泊松比($\mu_s = 0.28 \sim 0.30$)大于核心混凝土的($\mu_c = 0.20$),因此钢管横向变形大于混凝土的,钢管与混凝土之间没有横向约束力,当外部荷载逐渐增大时,混凝土横向变形随之增大,此时钢管对混凝土产生横向约束力,阻止混凝土进一步横向变形,因此钢材泊松比是分析钢管混凝土结构受力机理的一个关键参数。

图 7 给出了腐蚀率与屈服强度、弹性模量、极限强度、泊松比与伸长率的关系。从图 7 可以看出试验数据虽然离散,但整体上钢材屈服强度、弹性模量、极限强度和伸长率都随着腐蚀率的增加而呈下降趋势。这

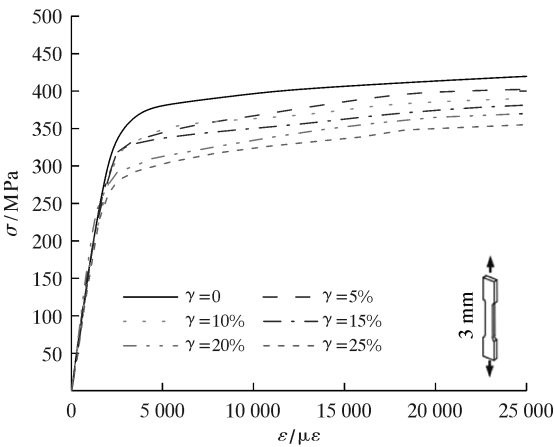


图 6 腐蚀钢材应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of the corroded steel

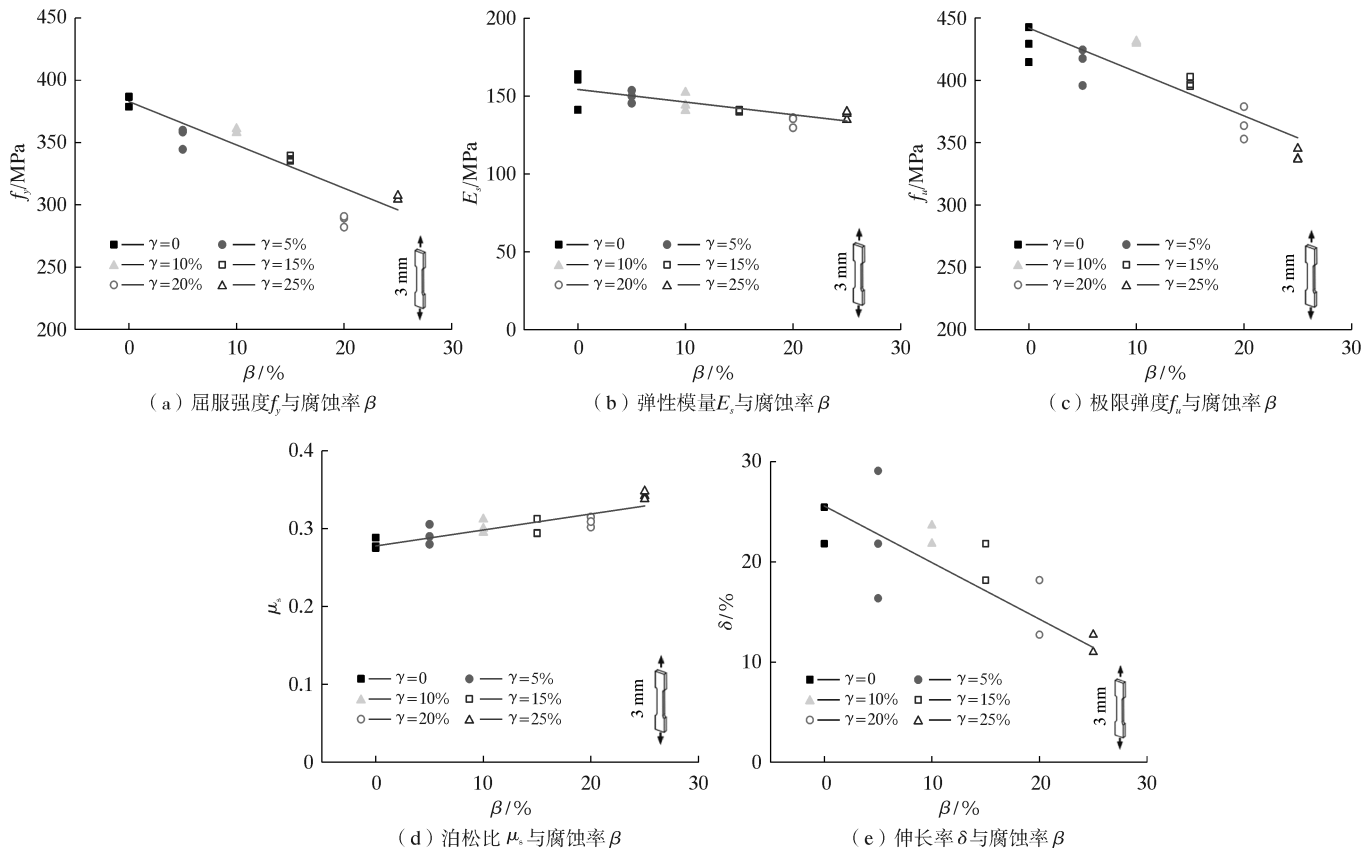


图7 腐蚀钢材屈服强度 f_y 、弹性模量 E_s 、极限强度 f_u 、泊松比 μ_s 、伸长率 δ 与腐蚀率 β 关系

Fig. 7 Relationship between yield strength, elastic modulus, ultimate strength, Poisson ratio, elongation and corrosion rate of the corroded steel

是因为酸雨腐蚀导致钢材表面形成大小不同的蚀坑,蚀坑的存在会导致钢材物理性能的不连续性,且截面尺寸的突变也易于产生应力集中,使得局部应力和局部应变突然增大,造成截面应力分布不均匀和应变速率不同。此外蚀坑也易使钢材从塑性状态转向脆性状态,进而使得蚀坑周围产生微裂纹,并随着轴向外荷载的增加而逐渐发展,最终导致钢材力学性能的退化^[5]。而泊松比随着腐蚀率的增加而呈上升趋势,这可能是因为坑蚀导致试样的横向应变和轴向应变均减少,但轴向应变的减少值大于横向应变的减少值。泊松比与腐蚀率的变化关系也表明当承受外部轴向荷载作用时,随着腐蚀率的增加,钢管对核心混凝土产生的横向约束作用越晚,对构件的安全性不利,应该引起重视。

但整体上钢材的力学性能指标与腐蚀率近似呈线性关系。因此利用最小二乘法,回归出腐蚀钢材屈服强度($f_{\beta y}$)、弹性模量($E_{\beta s}$)、极限强度($f_{\beta u}$)、伸长率($f_{\beta \delta}$)及泊松比($\mu_{\beta s}$)与腐蚀率 β 的定量关系,如下公式(7)~(11)所示。

$$f_{\beta y} = (1 - 0.908\beta)f_y \quad R^2 = 0.8006 \quad (7)$$

$$E_{\beta s} = (1 - 0.525\beta)E_s \quad R^2 = 0.6068 \quad (8)$$

$$f_{\beta u} = (1 - 0.797\beta)f_u \quad R^2 = 0.7528 \quad (9)$$

$$\mu_{\beta s} = (1 - 0.739\beta)\mu_s \quad R^2 = 0.7149 \quad (10)$$

$$f_{\beta \delta} = (1 - 2.209\beta)f_{\delta} \quad R^2 = 0.8318 \quad (11)$$

3 结论

(1)酸雨腐蚀后,钢板表面的腐蚀属于坑蚀;当腐蚀率小于10%时,拉伸件断口主要为正断破坏;当腐蚀率小于25%大于15%时,拉伸件断口主要为斜断破坏。

(2)酸雨腐蚀后钢材力学性能指标值离散程度相对较大,但整体上屈服强度、弹性模量、极限强度和伸长率都随着腐蚀率的增加而呈下降趋势,而泊松比随着腐蚀率的增加而呈上升趋势。

(3)基于单调拉伸试验数据,通过最小二乘法,回归出酸雨腐蚀条件下Q235钢材力学性能指标的简化计算经验公式,试验值与预测值偏差较小,可为酸雨区钢管混凝土组合结构的设计及安全评估提供理论基础和科学依据。

[参考文献]

[1] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践:第3版[M].北

- 京:科学出版社,2018.
- HAN L H. Concrete Filled Steel Tubular Structures—Theory and Practice (Third Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [2] HAN L H, HOU C C, WANG Q L. Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103:23–36.
- [3] GB 50936–2104, 钢管混凝土结构技术规程[S]. GB 50936–2104, Technical code for concrete filled steel tubular structures[S].
- [4] CECS 28:2012, 钢管混凝土结构技术规程[S]. CECS 28:2012, Technical specification for concrete - filled steel tubular structures[S].
- [5] 徐善华,王皓,苏磊,等. 考虑点蚀损伤的锈蚀钢板延性退化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(6):1 257–1 263.
- XU S H, WANG H, SU L, et al. Ductility degradation of corroded steel plates with pitting damage [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(6):1 257–1 263.
- [6] 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 W Z, TONG L W, CHEN Y Y, 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.
- [7] 陈梦成,张凡孟,王超,等. 模拟酸雨腐蚀对低碳钢力学性能的退化规律[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(4):292–295.
- CHEN M C, ZHANG F M, WANG C, et al. Degradation law of mechanical properties for low carbon steel corroded in simulate acid rain [J]. Corrosion and Protection, 2017, 38(4):292–295.
- [8] 薛奇峰. 单调和低周往复荷载作用下一般大气锈蚀钢材本构关系试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- XUE Q F. Experimental Study on Constitutive Relation of Monotonic And Cyclic Loading of Corroded Steel under General Atmospheric[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [9] 张靖茜. 大连市酸雨化学特征及来源研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2016.
- ZHANG J Q. Research on Chemical Characteristics and Source of the Acidic Rain in Dalian[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [10] 郑琳. 大连市酸性降水化学特征及影响来源研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- ZHENG L. The Research on Chemical Characteristics and Influence Sources of the Acidic Precipitation in Dalian[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2013.
- [11] 杨晓艳,王静. 大连市区酸雨特征分析[J]. 环境与发展, 2018, 30(3):187.
- YANG X Y, WANG J. Analysis of acid rain characteristics in Dalian City[J]. Environment and Development, 2018, 30(3):187.
- [12] GE B Z, WANG Z F, GBAGUIDI A E, et al. Source Identification of Acid Rain Arising over Northeast China: Observed Evidence and Model Simulation [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 116:1 366–1 377.
- [13] GB/T 228.1–2010, 金属材料拉伸试验[S]. GB/T 228.1–2010, Metallic materials—Tensile testing[S].
- [14] GB/T 19746–2005/ISO 11845: 1995, 金属和合金的腐蚀盐溶液周浸试验[S]. GB/T 19746–2005/ISO 11845: 1995. Corrosion of metals and alloys—Alternate immersion test in salt solution[S].
- [15] 陈梦成,方苇,黄宏,等. 锈蚀圆钢管再生混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12):138–146.
- CHEN M C, FANG W, HUANG H, et al. Axial compressive behavior of recycled concrete filled corroded circular steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12):138–146.
- [16] GB/T 16545–2015/ISO 8407:2009, 金属和合金的腐蚀腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S]. GB/T 16545–2015/ISO 8407:2009, Corrosion of metals and alloys—Removal of corrosion products from corrosion test specimens[S].
- [17] 单桂芳,杨伟,冯建民,等. 材料泊松比测试方法的研究进展[J]. 材料导报, 2006(3):15–20.
- SHAN G F, YANG W, FENG J M, et al. Advances in Test Methods for Poisson's Ratio of Materials[J]. Materials Review, 2006(3):15–20.
- [18] 宋方远,谢旭,张婷婷. 锈蚀表面形貌及其对钢材超低周疲劳性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020(11):1–11.
- SONG F Y, XIE X, ZHANG T T. Effect of corroded surface morphology on ultra - low cycle fatigue of steel plate [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020(11):1–11.