

# 机械耦合作用下钢筋表面轮廓的形成机理

雷海涛<sup>1,2</sup>

(1.咸阳职业技术学院, 陕西 咸阳 712000; 2.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 钢筋表面轮廓状况对其力学性能存在较大影响。基于表面粗糙度特征技术, 本文对腐蚀钢筋表面锈蚀坑深度的不均匀分布进行了详细分析, 发现腐蚀高度算术平方根Ra可直观描述腐蚀表面的粗糙程度。另外, 在相同腐蚀条件下对腐蚀试验和耦合机械腐蚀试验作用下钢筋表面轮廓数据进行分别采集, 经对比分析发现: 钢筋腐蚀表面粗糙度受机械耦合腐蚀作用显著于单纯氯离子作用, 且该现象与热力学的机械耦合腐蚀机理完全一致。

**关键词:** 锈蚀钢筋; 非均匀腐蚀; 表面粗糙度; 机械耦合

**中图分类号:** TU375

**文献标识码:** A

**文章编号:** 94047-(2017)01-035-03

## 0 引言

钢筋混凝土结构在服役过程中受周围环境以及自身应力条件影响较为严重, 且其已成为影响钢筋混凝土结构安全使用的严重问题。为了促进钢筋混凝土的有效利用, 了解钢筋腐蚀形态是确保结构在使用寿命期限内具有稳定性能的关键因素。

钢筋的腐蚀形态具有不规则和不稳定等特点。由于局部损伤的发展, 钢筋剩余截面将逐渐失去其规则性, 且其表面轮廓沿周长及长度出现较大差异。在描述钢筋表面腐蚀状况, 通常采用腐蚀质量损失率等指标, 而对表面形貌的非均匀分布和局部腐蚀深度较少涉及。但是, 最近研究表明钢筋表面状况对其力学性能存在较大影响<sup>[1-5]</sup>。袁迎曙等<sup>[6-7]</sup>通过研究发现不同腐蚀表面特征的钢筋对钢筋混凝土结构造成不同程度的力学性能恶化。即使在相同质量损失的情况下, 点蚀损伤由于极易引起局部失效, 往往伴随严重危害<sup>[8]</sup>。Jaffer and Hansson<sup>[9]</sup>通过氯离子腐蚀试验, 发现在不同加载荷载条件下, 相同腐蚀龄期内的钢筋混凝土梁裂缝形式不同。Ahn and Reddy<sup>[10]</sup>发现梁在疲劳荷载作用下最大弯矩处的负电位显著高于静载条件。基于表面粗糙度特征技术, 本文旨在探索一种描述钢筋在不同腐蚀环境中表面非均匀化过程的新方法。通过获取不同腐蚀水平钢筋表面轮廓曲线, 并计算相关粗糙度参数, 结

合机械耦合效应机理, 对受腐蚀钢筋不同表面粗糙度的形成机理进行讨论。

## 1 实验方案

### 1.1 实验材料及试件尺寸

材料按照GB/175选用波兰特P-O42-5水泥。细骨料选用河沙。粗骨料为天然白云岩砾石。氯离子溶液模拟腐蚀环境。混凝土的配合比见表1。根据ISO标准 No.6935-1, 钢筋选用热轧型, 直径12mm。钢筋混凝土试件大小为150mm × 150mm × 550mm。各混凝土试件内钢筋分别编号为RS-a、RS-b (内部引入氯离子) 和RSL-a、RSL-b (内部引入氯离子及拉应力耦合)。

表1 混凝土配参数比例

水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	砂 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨料 (kg/m <sup>3</sup> )	氯化钠 (kg/m <sup>3</sup> )
365	192	730	1095	9.6

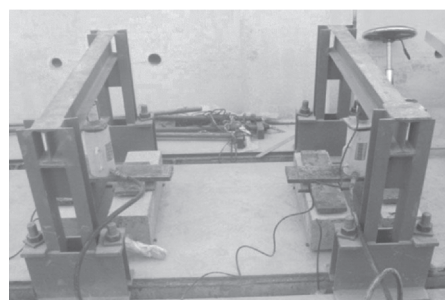


图1 静载试验示意图

收稿日期: 2016-10-10

作者简介: 雷海涛 (1980—), 男, 西安人, 硕士, 副教授, 主要从事土木工程方面的教学和研究工作。

## 1.2 试验方法及试件加工

为得到含腐蚀钢筋的钢筋混凝土试件,需将浇筑并养护完毕后的试件进行腐蚀试验。

试件(RS)标准养护28天后,水中浸泡在12h,然后用烤箱烘干12h( $50 \pm 1^\circ\text{C}$ ),允许烘干过程中钢筋受氯离子作用。

试件(RSL)标准养护28天后,在装置(见图1)中承受荷载作用。静荷载为试件开裂荷载的0.9倍。将装置及试件掩埋于湿砂中12h后取出,试件在氯离子腐蚀和拉应力耦合作用下进行烘干处理12h。

当锈蚀试验完毕后,将试件内钢筋刨除并除去表面腐蚀产物,分别计算其腐蚀质量损失率(S)。

锈蚀钢筋表面粗糙度的测试:选取锈蚀钢筋最粗糙的表面作为测试面,采用单尖头百分尺(精度为0.1毫米),每隔2.5mm以径向 $45^\circ$ 测试八条腐蚀钢筋表面轮廓曲线。 $R_a$ 以表面垂直高度算术平方根反映锈蚀钢筋粗糙度统计参数,其被定义为采样长度内轮廓线与平均线之间垂直偏差的绝对平均值,其数学表达式如式(1)所示<sup>[1]</sup>:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - m| \quad (1)$$

式中, $z$ 是轮廓峰的高度; $m$ 是平均线的高度; $n$ 是测量点的数量。

## 2 结果和讨论

图2给出了不同腐蚀水平钢筋的表面轮廓曲线。腐蚀条件不同,钢筋表面轮廓曲线差异显著。通过对测量表面数据计算,得到不同锈蚀水平下各试件 $R_a$ 的最大值和平均值,如表2所示。从表2可以看出,腐蚀钢筋表面粗糙度随锈蚀损失率的增加而增加。对比RS和RSL发现,当锈蚀损失率大致相同的情况下,试件RS的表面粗糙度明显低于试件RSL。由此可见,耦合机械作用对点蚀坑深度的分布具有显著作用,可显著增加腐蚀表面粗糙度参数。

表2 不同腐蚀条件下锈蚀钢筋的表面粗糙度参数

编号	锈蚀率 (%)	平均锈蚀深度 ( $\mu\text{m}$ )	最大锈蚀深度 ( $\mu\text{m}$ )
RS-a	0.68	40.7	55.5
RSL-a	0.69	60.3	108.3
RS-b	2.44	76.3	128.6
RSL-b	2.26	84.0	249.0

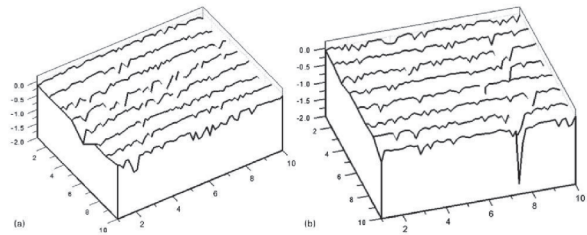


图2 不同腐蚀水平下钢筋表面轮廓曲线示意图

(a 为RS-b; b为RSL-b)

根据金属材料热力学理论,钢铁的化学势 $\mu$ 可表示为:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln \alpha \quad (2)$$

式中, $\mu^0$ 为标准化学势; $R$ 为气体常数, $T$ 为热力学温度; $\alpha$ 为热力学活度。

在氯离子作用下,钢铁的电化势可以表示为:

$$\bar{\mu} = \mu^0 + RT \ln \alpha + nF\phi = \mu + nF\phi \quad (3)$$

式中, $n$ 是金属阳离子的价数; $F$ 是法拉第常数; $\phi$ 是微腐蚀电势。

在机械耦合效应下,腐蚀系统必须考虑应力作用的影响。此时其电化学势系统, $\tilde{\mu}$ ,可以表示为下式:

$$\tilde{\mu} = \mu^0 + RT \ln \alpha + nF\phi + VP = \bar{\mu} + VP \quad (4)$$

式中, $V$ 为金属的摩尔体积; $P$ 为荷载代表值。

基于此,将方程(2)和(4)合并可得:

$$\tilde{\mu} = \mu^0 + RT \ln \tilde{\alpha} \quad (5)$$

式中, $\tilde{\alpha}$ 定义为金属的力学电化学的活性度,可表示为

$$\tilde{\alpha} = \alpha \exp\left(\frac{VP + nF\phi}{RT}\right)$$

在平衡条件下,腐蚀的电化学势系统趋近于零, $\tilde{\mu} \rightarrow 0$ ,则此时由公式(4)可得:

$$\phi_0 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\alpha^0}{\alpha_0} - \frac{VP}{nF} \quad (6)$$

式(6)中, $\phi_0$ 为平衡电势; $\alpha^0$ 为标准热力学平衡活度; $\alpha_0$ 为热力学平衡状态的活度。

上文可知,阳离子系统的平衡电位随钢筋承担荷载的增加而减小,如式(7)所示:

$$\Delta\phi_0 = -\frac{V\Delta P}{nF} \quad (7)$$

在机械耦合作用下, 由于腐蚀系统的平衡状态被破坏, 钢筋正负极分化逐渐发生, 这将导致金属阳离子的电化学活度增加。另外, 当钢筋处于电解质环境中, 其几乎不受荷载影响, 此时其机械电化学活度等于热力学活度, 如方程(8)和(9)所示:

$$\frac{\alpha}{\alpha_s} = \alpha \exp\left(\frac{V\Delta P + anF\Delta\phi}{RT}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_s} = \frac{\alpha}{\alpha_s} = \alpha_s \exp\left(-\frac{\beta nF\Delta\phi}{RT}\right) \quad (9)$$

式中,  $\alpha_s$ 为电解质溶液离子的热力学活度;  $\alpha$ 和 $\beta$ 为电化学反应的转移系数,  $\alpha + \beta = 1$ 。

结果表明, 耦合机械耦合作用会导致金属腐蚀的电化学活度, 并提供支持腐蚀过程的能量。另外, 由于点蚀损伤处的应力集中作用和局部高应力对点蚀坑发展的促进作用, 点蚀损伤表面的腐蚀损伤分布非均匀性和粗糙化程度显著。

### 3 结论

拉应力对腐蚀过程中钢筋表面轮廓的不均匀性具有显著影响。腐蚀钢筋表面粗糙度受耦合机械耦合作用明显高于单纯氯离子化学作用。同时, 基于热力学理论观点, 耦合机械作用可显著增加腐蚀过程中金属阳离子的活度, 并为腐蚀过程提供能量, 进而导致点蚀损伤处在应力集中作用下腐蚀速率加剧。

### 参考文献

- [1]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.
- [2]徐港,王青.锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究进展[J].混凝土,2006,5:13-16.
- [3]金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(4):371-380.
- [4]刘会颖,张家生,孟飞,等.主筋锈蚀对钢筋混凝土梁承载特性的影响①[J].铁道科学与工程学报,2014,11(4).
- [5]Yingshu W Q Y. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 12: 010.
- [6]Yingshu Y, Xinsen Z, Yongsheng J. A comparative study on structural behavior of deteriorated reinforced concrete beam under two different environments[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 3: 005.
- [7]叶超,杜楠,赵晴,等.不锈钢点蚀行为及研究方法的进展[J].腐蚀与防护,2014,35(3):271-276.
- [8]易伟建,孙晓东.锈蚀钢筋疲劳后静力力学性能试验研究[J].工业建筑,2007,37(9):101-103.
- [9]S.J.Jaffer and C. M. Hansson. Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions[J]. Cem. Concr. Res., 2009, 39, (2): 116-125.
- [10]W. Ahn and D. V. Reddy. Galvanostatic testing for the durability of marine concrete under fatigue loading [J]. Cem. Concr. Res., 2001, 31, (3): 343-349.
- [11]Gadelmawla E. S.,Koura M. M., Maksoud T. M. A., et al. Roughness parameters[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123( 1): 133-145

[责任编辑、校对: 王军利]

## On Thermodynamic formation mechanism of corroded morphology of reinforcing bars

LEI Hai-tao<sup>1,2</sup>

(1.Xianyang Vocational & Technical College, Xianyang Shaanxi 712046;

2. Civil Engineering School, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an Shaanxi 710055)

**Abstract:** The surface morphology of reinforcing bar has an great influence on the mechanical property. In this study, based on the surface roughness characterization technology, the non-uniform distribution of corrosion depth on corroded reinforcing bars surface is analyzed in a detailed manner. It is found that the arithmetical mean deviation, Ra, can straightway represents the non-uniform distribution of the corroded surface morphology of reinforcing bar. Moreover, the bar surface profile data of corroded surface attacked by corrosion test and coupled chemo-mechanical effect is collected. The result is shown that the roughness corresponding to coupled chemo-mechanical effect is more than that of chloride attack under the similar corrosion mass loss ratio through comparisons and analyses; this is agreed with the mechanism of mechanical coupling based on thermodynamics.

**Key words:** corroded reinforcing bar, non-uniform corrosion, surface roughness, mechanical coupling.