

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.014

# 混凝土内钢筋锈胀力发展及钢筋锈蚀速率的时变性

姬永生<sup>1,2</sup>, 袁迎曙<sup>2</sup>, 李富民<sup>2</sup>, 鲁彩凤<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008;

2. 中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 为了研究混凝土内钢筋的锈蚀过程及其内在机理, 通过对不同锈蚀阶段钢筋与混凝土界面的细观观测, 描述了锈蚀层的形成与发展过程, 给出了钢筋锈胀力的分布形态, 揭示了混凝土锈胀开裂过程和钢筋锈蚀速率的时变过程. 结果表明: 钢筋锈蚀产物的膨胀性以及钢筋-混凝土界面区的多孔性, 为铁锈物向界面区孔隙内的扩散提供了条件, 随着锈蚀的进行, 原有的界面区逐渐演变为混凝土与铁锈物混合的锈蚀层. 锈蚀层的进一步发展, 不仅会导致钢筋表面界面区逐渐密实, 阻碍混凝土保护层中氧气和水分向锈蚀界面的输送, 使混凝土内钢筋锈蚀速率下降, 而且会使锈胀物在钢筋表面产生对混凝土的膨胀力, 最后导致混凝土开裂.

**关键词:** 混凝土 界面区 钢筋锈胀力 锈蚀速率 时变性

**中图分类号:** TU375

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1980(2009)04-0430-07

混凝土中的钢筋锈蚀是导致混凝土结构过早失效的主要原因之一<sup>[1-3]</sup>. 钢筋锈蚀会导致钢筋面积减小、钢筋与混凝土界面黏结性能退化, 钢筋锈蚀所产生的铁锈产物具有体积膨胀特性, 会导致保护层混凝土内拉应力增大, 造成混凝土顺筋锈胀开裂<sup>[4-8]</sup>. 混凝土中钢筋的锈蚀过程是钢筋锈蚀层逐渐形成、发展和密实的过程, 一方面钢筋锈蚀层形成过程和分布特征决定了混凝土内锈胀应力发展变化规律, 另一方面钢筋锈蚀层的发展和密实过程又会影响混凝土内钢筋锈蚀速率的变化<sup>[9-11]</sup>. 因此, 研究混凝土内钢筋锈蚀层的形成与发展过程、钢筋锈胀力的分布形态, 揭示混凝土锈胀开裂的过程和钢筋锈蚀速率的时变过程, 对准确预计混凝土内锈胀应力发展和建立混凝土内钢筋锈蚀速率模型具有十分重要的意义.

笔者以外部氯盐侵入混凝土引起的钢筋锈蚀试件为对象, 通过对不同锈蚀阶段钢筋与混凝土界面的细观观测, 描述了锈蚀层的形成与发展过程, 分析了钢筋表面界面区逐渐密实的机理, 提出了钢筋锈胀力的分布形态, 并通过人工气候环境加速试验, 研究了温湿度不变条件下混凝土中钢筋锈蚀速率随锈蚀时间的变化规律, 通过锈蚀层形成与发展过程的细观观测, 揭示了混凝土锈胀开裂的过程和钢筋锈蚀速率的时变过程.

## 1 试验方案设计

### 1.1 试件制作

截取直径 16 mm 的 HPB235(光圆)普通钢筋段和直径 12 mm 的不锈钢筋段, 长度均为 220 mm. 普通钢筋为钢筋锈蚀速率测定的工作电极, 不锈钢筋充当辅助电极. 除锈并在两端焊接导线, 然后将两端约 30 mm 长的部分用环氧树脂密封.

将焊接导线的钢筋段浇筑在 200 mm × 150 mm × 120 mm 的混凝土试件(图 1)中. 混凝土强度等级为 C20, 配合比为  $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{砂子}):m(\text{石子})=1:0.60:2.3:4.5$ . 混凝土保护层厚度为 15 mm.

试件共分 3 组. 其中 A 组试样(A1, A2, A3)用于混凝土内钢筋锈蚀速率经时变化研究, B 组试样(B0, B1, B2, B3, B4, B5)用于混凝土内钢筋锈蚀层构造与发展的细观构造研

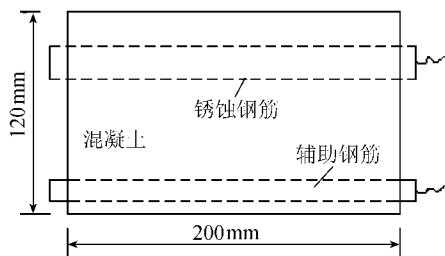


图 1 试件

Fig. 1 Specimens

收稿日期: 2008-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(50538070, 50878207) 中国矿业大学校基金(OB061045)

作者简介: 姬永生(1970—), 男, 江苏邳州人, 副教授, 博士, 主要从事混凝土耐久性研究.

究,C 组试样(C1,C2,C3,C4,C5)用于钢筋锈蚀层分布的显微观测研究.

1.2 试验方法

试件标准养护 28 d 后,将 B0 试件从养护室取出,按 1.3 节的方法制作试样并进行未锈蚀钢筋与混凝土界面过渡区的细观结构观测.同时将其其他试件放入  $m(\text{NaCl})$  为 10% 的溶液浸泡,混凝土的钢筋为活化状态时,将试件从溶液中取出并移入人工气候室.利用气候自动监测和控制系统来控制人工气候室内的温度和湿度,使温度保持在  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  状态下,相对湿度保持在  $(90 \pm 5)\%$  状态下.试件进入人工气候室 14 d 后,试件内部的温湿度已与外界环境温湿度基本达到一致,这时开始对 A 组试件中钢筋的锈蚀速率进行定期测试.本试验的锈蚀速率测试采用线性极化法.同时将 B 组和 C 组试件定期从人工气候室取出(按编号顺序每 30 d 各取出 1 个),按 1.3 节的方法制作试样,并分别进行钢筋锈蚀层发展的细观构造研究和钢筋锈蚀层分布研究.

1.3 观测分析试样的制备

根据仪器设备的使用要求,将 B 组和 C 组试件切割成直径 3 ~ 4 cm、高 1.5 cm 左右的小块.将新鲜、完整的钢筋与混凝土的界面作为试验观测的对象(图 2),利用扫描电子显微镜及电子探针技术,分析 B 组试件钢筋与混凝土界面的细观结构和化学元素分布.界面区细观结构的观测采用 S250-MK3 扫描电子显微镜,并结合电子探针附件(AN10000 能谱仪)测定钢筋与混凝土界面区的元素分布.

1.4 钢筋锈蚀产物的制备

在制作观测分析试样的同时,将被切割过的 B 组试件破型,用锉刀刮取钢筋表面的锈蚀产物.为避免锈蚀物在空气中氧化,将其收集于密封的塑料袋,并迅速送往中国矿业大学测试中心进行 X 射线衍射分析,测定不同锈蚀程度的锈层中锈蚀产物的物相组成和质量分数.取样和测试在 6 h 内完成.



图 2 试样照片

Fig. 2 Photograph of a specimen

2 钢筋锈蚀层发展的细观构造

2.1 未锈蚀钢筋与混凝土之间的界面区(ITZ)

图 3 为 B0 试样中钢筋-混凝土界面过渡区的 SEM 图,显示了未锈钢筋-混凝土间的界面构造.从混凝土硬化原理可知,混凝土在粗骨料、钢筋界面会形成较薄弱的过渡区(又称界面层).该界面层的特点是:混凝土硬化时水灰比较大,硬化后形成孔隙率较大的薄弱的过渡区.该区域通常称为钢筋与混凝土的界面过渡区.不密实的界面过渡区为钢筋锈蚀产物的膨胀提供了空间.

2.2 钢筋锈蚀产物的体积膨胀性

图 4 为 B4 试件中钢筋锈蚀物 X-射线衍射定性分析图谱.从图 4 可以看出,钢筋锈蚀层由赤铁矿  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、磁赤铁矿  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、磁铁矿  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、针铁矿  $\alpha\text{-FeOOH}$ 、纤铁矿  $\gamma\text{-FeOOH}$ 、四方纤铁矿  $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\text{FeO}$  等相组成.锈蚀产物中不同锈蚀成分的体积膨胀倍数如图 5 所示.

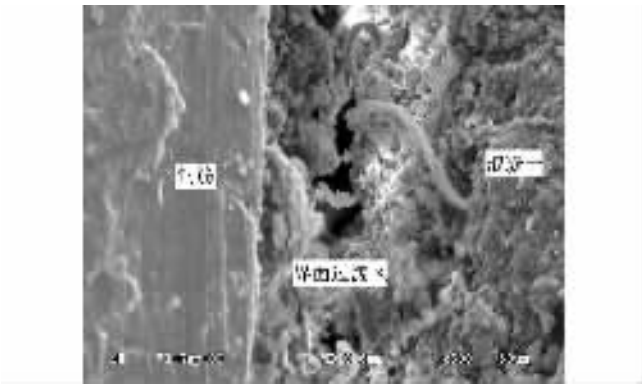


图 3 未锈钢筋与混凝土间的界面区

Fig. 3 Interfacial transition zone between steel bars and concrete

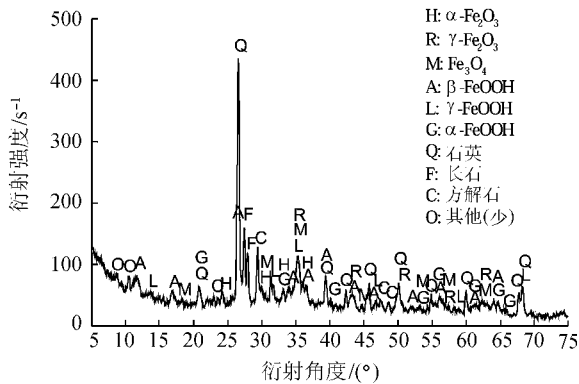


图 4 钢筋锈蚀物 X-射线衍射定性分析图谱

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of corrosion products

从图 5 可以看出,钢筋锈蚀产物中各成分的体积均大于其反应物  $\text{Fe}$  的体积,且锈蚀产物中不同成分的体积膨胀倍数不同,其中  $\text{FeO}$  的体积膨胀倍数最小,  $\beta\text{-FeOOH}$  的体积膨胀倍数最大. X-射线衍射定量分析结果表

明,B4试件中的钢筋锈蚀产物 $\text{FeO}$ , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , $\alpha\text{-FeOOH}$ , $\beta\text{-FeOOH}$ , $\gamma\text{-FeOOH}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的质量分数分别为 2.30%,3.45%,37.93%,5.6%,12.64%,4.74%,29.89%。因此,钢筋锈蚀产物的体积膨胀系数  $n$  可表示为各相的质量分数乘以各相膨胀倍数的总和。经计算, $n=2.36$ 。

2.3 钢筋锈蚀层元素的质量分数

图 6(a)为 B3 试样中钢筋与混凝土界面区的元素测试微区布置。图中测点 1,2,3,4,5,6 分别位于钢筋基体、紧靠钢筋表面的锈层内边缘、锈层中部、紧靠混凝土的锈层外边缘、紧靠锈层的混凝土边缘和距锈层外边缘约 100  $\mu\text{m}$  处的混凝土基体处。

由于钢筋锈蚀物具有膨胀性,锈蚀初期的锈蚀产物在钢筋-混凝土界面区的孔隙中充分生长、填充并逐渐密实,逐渐形成了混凝土与铁锈物的混合锈层。由图 6(b)可知:由钢筋表面至远离钢筋的混凝土,Fe 质量分数逐步减小,Ca 质量分数逐步增大。在距离钢筋表面较近的微区 2,Fe 质量分数在 80%~90%之间,Ca 质量分数不到 10%。而在距钢筋表面较远的微区 4,Fe 质量分数减小,约为 45%,而 Ca 质量分数增大。

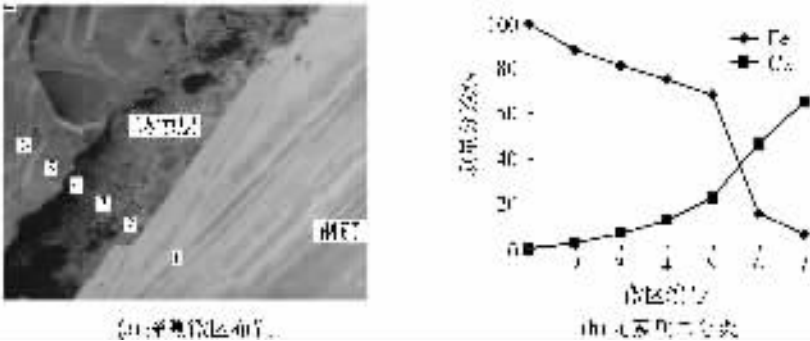


图 6 锈蚀试样探测微区布置和元素质量分数

Fig. 6 Layout of detection micro regions and EPM results for corrosion layer

2.4 钢筋锈蚀层的发展

混凝土中钢筋锈蚀层的形成和发展过程可以通过钢筋锈蚀层的微观结构变化来解释。图 7 是 B1~B4 试

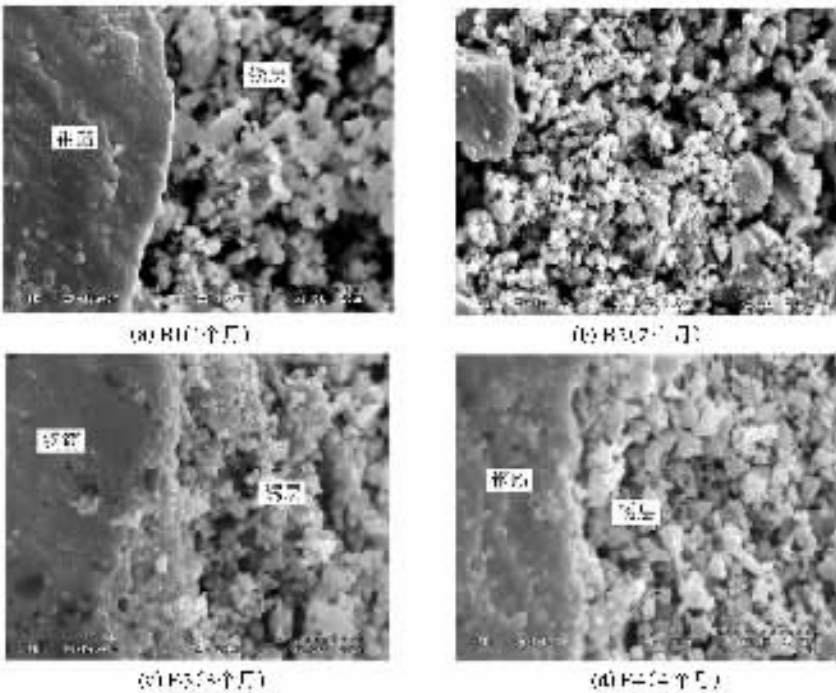


图 7 试件横断面钢筋锈蚀层的 SEM 图

Fig. 7 SEM photographs of corrosion layer of specimens

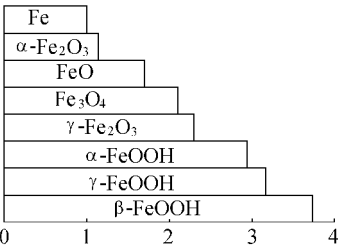


图 5 钢筋锈蚀产物的体积膨胀倍数<sup>[12]</sup>

Fig. 5 Volumetric expansion multiple of corrosion products<sup>[12]</sup>

件内钢筋锈蚀层微观结构变化的 SEM 图.从图 7 可以看出,在钢筋锈蚀初期,锈蚀过程中生成的锈蚀产物不断扩充于钢筋周围的混凝土孔隙中,并在钢筋表面积聚,形成锈蚀层.随着锈蚀时间的增加,锈蚀产物不断增多,锈蚀层逐渐增厚和密实,锈蚀层在周围混凝土的约束下逐渐呈压密的网状结构(图 7(d)),钢筋与混凝土界面区逐渐被钢筋锈蚀物填充.由于铁锈蚀后的体积膨胀,在界面区的锈蚀物具有一定的膨胀力,铁锈物的扩散、填充会向混凝土深处发展,随着锈蚀程度的增加,原钢筋-混凝土的疏松界面区逐渐变成了密实的混凝土与铁锈的混合层(简称锈蚀层).

3 锈胀力分布形态

3.1 显微观测方法

采用数字式视频显微测量系统(KH-3000V/KH-3000VD HI-SCOPE Advanced)对 C 组锈蚀试样横断面的钢筋表面进行锈蚀层分布的显微观测,利用显微观测的颜色和表观形态判断锈蚀层的位置和分布范围,利用显微系统的测量功能对靠近钢筋表面的铁锈积聚部分进行量测标注.

3.2 锈胀开裂前的钢筋锈蚀层分布

锈胀开裂前的 C3 试件中钢筋锈蚀层分布如图 8 所示.从图 8 可以看出:钢筋锈蚀主要集中在靠近混凝土保护层一侧的半个圆周面,距离保护层越近的钢筋表面,锈蚀越严重,距离保护层越远,锈蚀越轻微.在背向混凝土保护层一侧的半个圆周面上,钢筋基本上未发生锈蚀.

为了更清晰地表示钢筋整个表面的锈蚀层分布情况,将观测到的各测区锈蚀层平均厚度值放大一定倍数后标识到代表钢筋的圆上,并用曲线连接,得到一个锈蚀层厚度分布曲线,如图 8(c)实线所示.

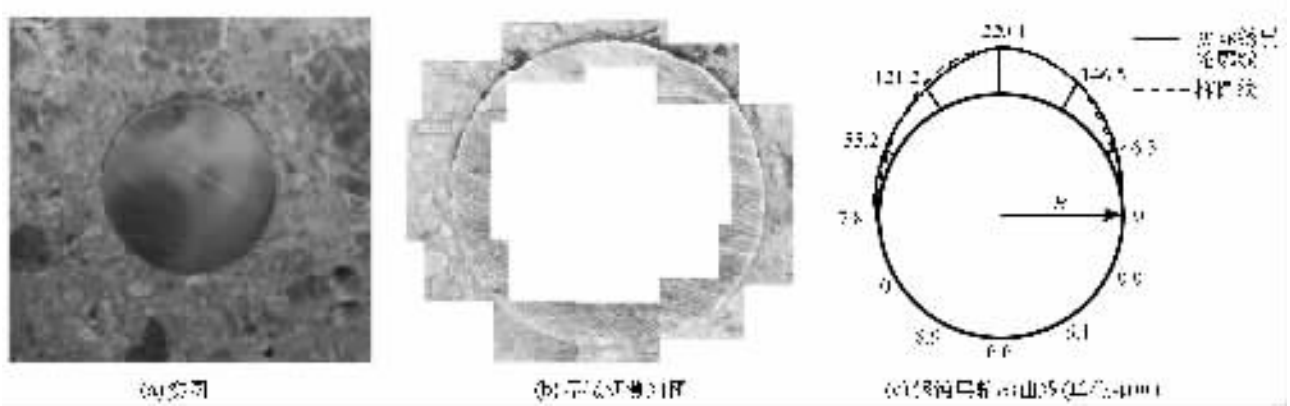


图 8 钢筋表面锈蚀特征观测结果

Fig. 8 Observed corrosion on surface of steel bars in concrete

锈蚀层厚度分布的理论曲线用半椭圆形曲线表示,如图 8(c)虚线所示.其中:钢筋圆心为椭圆圆心,钢筋半径为椭圆短轴半径,钢筋半径加上锈蚀层厚度的最大值为椭圆长轴半径.由图 8(c)可知,半椭圆模型曲线与实际锈蚀层轮廓曲线吻合较好.

3.3 锈胀开裂前混凝土中钢筋的锈胀力分布

随着钢筋锈蚀程度的提高和锈蚀层的发展,锈蚀物将无法继续渗透到混凝土界面区内,而会在钢筋表面形成对混凝土的膨胀力,这种膨胀力就称为钢筋锈胀力.如果把混凝土看成匀质弹性材料,并忽略钢筋的径向变形(因为钢筋的弹性模量比混凝土大 7 倍左右),则可以认为,在锈胀压力  $q$  的作用下,混凝土内部位移是由于锈蚀物质的厚度对混凝土产生的压力引起的.沿钢筋径向分布的锈胀压力  $q$  与混凝土的径向位移成正比,而混凝土的径向位移等于  $n/(n+1)$  倍钢筋锈蚀层厚度( $n$  为锈蚀产物的体积膨胀系数),钢筋锈胀力的分布规律与钢筋锈蚀层厚度分布规律一致.混凝土中钢筋的锈胀力沿钢筋外边缘也呈椭圆形分布,开裂前钢筋、锈蚀物质层、周围混凝土与钢筋锈胀力的关系如图 9 所示.

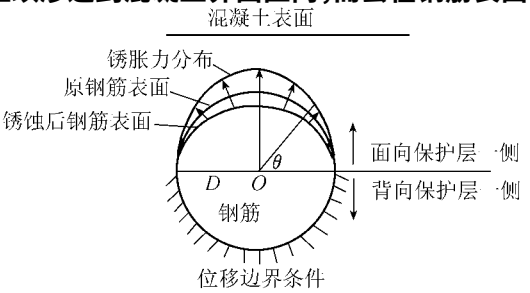


图 9 混凝土中钢筋锈胀力分布

Fig. 9 Distribution of expansive force of corrosion of steel bars in concrete

4 锈胀开裂裂缝

4.1 锈胀初期内部的锈胀裂缝

随着钢筋锈蚀程度的提高和锈蚀层的进一步发展,混凝土内的拉应力将超过其抗拉强度,混凝土保护层因受拉而开裂. B5 试件中锈胀顺筋裂缝及其扩展的 SEM 图如图 10 所示. 从图 10 可以看出,锈胀开裂后,混凝土对钢筋的握裹力得到充分释放. 由于散粒状的钢筋锈蚀层不具有胶凝能力,致使纵筋裂缝附近区域的锈层发生沿钢筋周边的裂缝扩展,从而使混凝土和钢筋间产生明显的间隙. 该间隙为氧气和水分的传输提供了新的通道,使锈蚀反应速度大大加快.

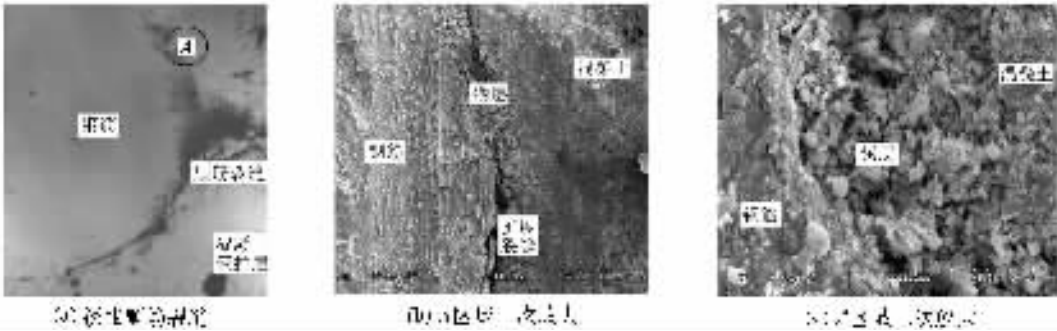


图 10 锈胀顺筋裂缝及其扩展的 SEM 图(B5(5 个月))  
Fig. 10 SEM photographs of extension of cracks along steel bars

4.2 锈胀开裂裂缝

图 11 为 C5 试件的视频显微观测图. 从图 11 可以看出,随着锈蚀程度的提高,锈蚀产物不断往裂缝中充填,同时积聚在钢筋表面,锈蚀产物在裂缝中的填充又一次达到密实状态,钢筋的锈胀力再一次产生. 但由于顺筋开裂后锈胀力已无法达到开裂前的握裹力度,所以在一定范围内(裂缝宽度  $w \leq 0.2\text{ mm}$ ),裂缝宽度的大小不仅取决于锈胀力,而且和锈蚀量有关,锈蚀量越大,裂缝宽度越大.

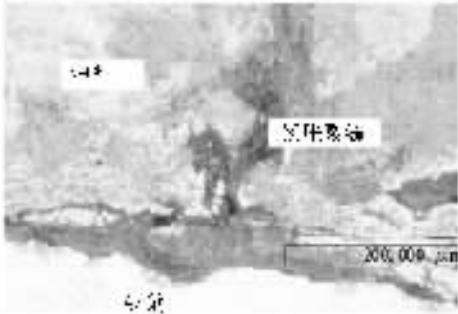


图 11 钢筋表面混凝土开裂  
Fig. 11 Cracking on surface of concrete of steel bars

5 钢筋锈蚀速率的时变性

5.1 钢筋锈蚀速率的变化过程

A 组试件中钢筋锈蚀电流强度(锈蚀速率)随锈蚀龄期的变化如图 12 所示. 从图 12 可以看出,混凝土中钢筋的锈蚀电流强度随着锈蚀龄期的延长而下降,且开始锈蚀电流强度下降速率较快,随后下降速率逐渐减小,100 d 左右基本趋于稳定. 随着锈蚀过程的发展,试件 A1, A2 和 A3 分别在锈蚀龄期 141 d, 156 d 和 132 d 时混凝土保护层发生锈胀开裂. 胀裂之后钢筋的锈蚀电流强度

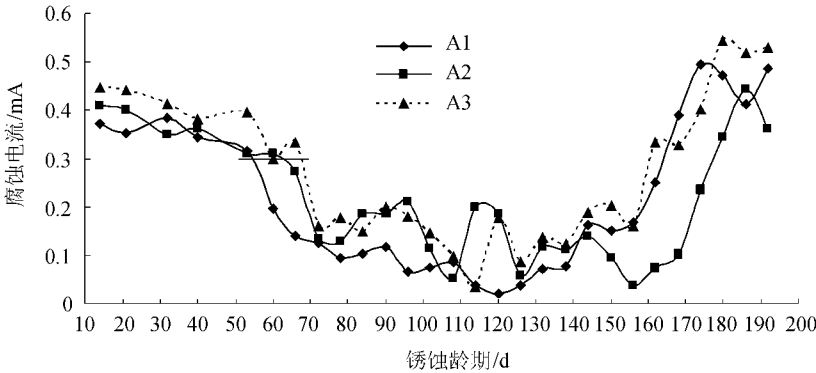


图 12 部分钢筋锈蚀电流强度的时变过程

Fig. 12 Time-dependent change of strength of corrosion current of corroded steel bars in specimens

没有明显变化,但随着锈蚀龄期的延长,钢筋锈蚀电流强度逐渐增大,达到甚至超过开裂前锈蚀过程的最大锈蚀电流强度,一段时间后逐渐趋于稳定。

从上述钢筋锈蚀速率的变化过程可以看出,钢筋锈蚀速率的变化过程可分为 3 个阶段:(a) 锈蚀初期的下降阶段;(b) 平稳发展阶段;(c) 混凝土锈胀开裂后的再上升阶段。

## 5.2 钢筋锈蚀速率的时变机理

### 5.2.1 锈蚀初期的下降阶段

随着钢筋锈蚀的发生和发展,原有的疏松、孔隙率高的钢筋与混凝土界面层逐渐形成了致密的混凝土与铁锈混合层。密实的锈蚀层不仅会阻碍氧气向阴极表面的扩散,而且会阻碍锈蚀反应物质和锈蚀产物的传输,从而会抑制混凝土中锈蚀钢筋的阳极反应过程,导致钢筋锈蚀速率下降。

### 5.2.2 平稳发展阶段

锈蚀速率下降到一定程度时,锈蚀反应的速率与离子的传输速率、锈蚀反应的耗氧速率与外部环境的供氧速率将达到平衡状态,锈蚀反应即平稳发展。在混凝土锈胀开裂前,如果其他环境因素条件不变,此阶段钢筋的锈蚀速率基本保持在一个水平上。

### 5.2.3 混凝土锈胀开裂后的再上升阶段

由于钢筋锈蚀的膨胀作用,混凝土保护层的拉应力不断增大,增大到一定程度时混凝土就会开裂。锈胀开裂导致紧密的锈蚀层应力得到释放,将为氧气和水分的传输提供新的通道。锈胀开裂后供氧速率大于耗氧速率,锈蚀反应加快。随着锈胀裂缝宽度的增大,钢筋锈蚀速率会出现一个不断增大的过程。

## 6 结 论

a. 钢筋锈蚀产物的膨胀性以及钢筋-混凝土界面区的多孔性,为铁锈物向界面区孔隙的扩散提供了条件,原有的界面区将逐渐演变为混凝土与铁锈物混合的锈蚀层,钢筋锈蚀产物填满界面区的间隙后将逐渐对周围的混凝土产生锈胀力。

b. 锈蚀层厚度分布与钢筋锈蚀程度以及钢筋锈胀力的分布密切相关。混凝土保护层锈胀开裂前,锈蚀主要发生在面向混凝土保护层一侧,背向保护层一侧的钢筋基本无锈蚀,锈蚀层厚度分布模型可用半椭圆形曲线表示。将此阶段钢筋表面锈蚀量分布模型与铁锈物的力学性能相结合,就可确定相应的钢筋锈胀力分布。混凝土保护层锈胀开裂后,铁锈物膨胀应力的释放和沿钢筋周边的裂缝扩展,使得一定范围内的裂缝宽度( $w \leq 0.2 \text{ mm}$ )并不取决于锈胀力,而取决于锈蚀量的大小,锈蚀量越大,裂缝宽度越大。

c. 如果气候环境条件不变,则混凝土内钢筋锈蚀速率的时变过程可分为 3 个阶段:(a) 锈蚀初期的下降阶段;(b) 平稳发展阶段;(c) 混凝土锈胀开裂后的再上升阶段。钢筋表面锈蚀层(混凝土与铁锈物混合层)的形成与发展过程是钢筋锈蚀速率发生变化的主要原因。

## 参考文献:

- [1] LIU You-ping, WEYERS R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 675-681.
- [2] 金伟良, 赵羽习. 钢筋混凝土构件的均匀钢筋锈胀力的机理研究[J]. 水利学报, 2001 (7): 57-62.
- [3] MOLINA F J, ALONSO C, ANDRADE C. Cover cracking as a function of rebar corrosion: part 2 numerical model[J]. Materials and Structures, 1993, 26(9): 532-548.
- [4] DAGHER H J, KULENDRAN S. Finite element modeling of corrosion damage in concrete structures[J]. ACI Structural Journal, 1995, 89(6): 1179-1190.
- [5] ANDRADE C, ALONSO C, MOLINA F J. Cover cracking as a function of rebar corrosion: part 1 experimental test[J]. Materials and Structures, 1993, 26(8): 453-464.
- [6] ALONSO C, ANDRADE C, RODRIGURZ J, et al. Factors controlling cracking of concrete affected reinforcement corrosion[J]. Materials and Structures, 1998, 31(7): 435-441.
- [7] CABERA J G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion[J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18(1): 47-59.
- [8] WILLIAMSON S J, CLARK L A. Pressure required to cause cover cracking of concrete due to reinforcement corrosion[J]. Magazine of Concrete Research, 2000, 52(6): 455-467.
- [9] LIU T, WEYERS R W. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures[J]. Cement and Concrete

Research,1998,28(3):356-379.

- [10] YUAN Ying-shu,LI Guo,JIANG De-wen. Corrosion rate of rebar in concrete[C]//YUAN Ying-shu. Advance in concrete and structure: proceedings of the International Conference (ICACS):[S.1.]:RILEM,2003:366-373.
- [11] 耿欧,袁迎曙,李富民,等. 混凝土中变形与光圆钢筋锈蚀速率的试验研究[J]. 中国矿业大学学报:自然科学版,2006,35(4):488-491.
- [12] 姬永生. 自然与人工气候环境下钢筋混凝土退化过程的相关性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2007.

## Corrosion-induced expansive force and time-dependent change characteristics of corrosion rate of steel bars in concrete

JI Yong-sheng<sup>1,2</sup>, YUAN Ying-shu<sup>2</sup>, LI Fu-min<sup>2</sup>, LU Cai-feng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,  
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China ;

2. School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** In order to study the expansion and mechanism of corrosion of steel bars in concrete, micro-structural observations of the interfacial transition zone (ITZ) between steel bars and concrete at different corrosion stages were used to depict the generation and development of the corrosion layers. The distribution of the expansive force of corrosion of the steel bars was determined. The time-dependent change characteristics of the corrosion expansion-induced cracking process of the concrete and the corrosion rate of steel bars were obtained. The test results show that the swellability of the corrosion products of the steel bars and the porosity of the ITZ between the steel bars and the concrete enhance the diffusion of Fe oxides into the pores in the ITZ. With corrosion, the original interfacial region gradually becomes the corrosion layer of the concrete mixed with the Fe oxides. Further development of the corrosion layer leads to the gradual compaction of the interfacial regions on the surface of the steel bars so as to prevent the transport of air and oxygen in the concrete armored layer to the corroded ITZ, resulting in the decrease of the corrosion rate of the steel bars in the concrete. Furthermore, the corrosion products enhance the expansive force on the surface of the steel bars against the concrete, resulting in cracking of the concrete.

**Key words:** concrete ; interface ; expansive force of steel bars ; corrosion rate ; time-dependent change characteristic