

文章编号:1000-582X(2011)10-103-06

混凝土内钢筋锈蚀速率时变的全过程模式

蒋建华,袁迎曙,彭 涛

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:讨论恒定气候环境下,混凝土内钢筋锈蚀速率的变化。在恒定气候环境和氯盐侵蚀条件下,对混凝土中钢筋的锈蚀电流密度进行测量。测量结果表明,在钢筋锈蚀过程中,锈蚀速率(锈蚀电流密度)具有时变特性,并且其时变过程可以划分为 6 个阶段。试验结果也显示了混凝土强度及混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率变化的影响。基于不同锈蚀水平下钢筋与混凝土交界面过渡区(ITZ)的微观结构,开展了试验结果的机理分析,发现锈蚀层的发展和锈胀开裂是影响锈蚀过程的主要因素。最后,建立了钢筋锈蚀速率时变的全过程模式。

关键词:混凝土;钢筋;锈蚀速率;氯盐侵蚀

中图分类号:TU503

文献标志码:A

Time-variation full process mode of steel bar corrosion in concrete

JIANG Jian-hua, YUAN Ying-shu, PENG Tao

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology,
Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: This paper discusses the corrosion rate variation of reinforcing steels in concrete in constant climate environment. The corrosion current density of steel bar in concrete under a constant climate environmental condition and chloride attack. The results indicate that the corrosion rate (corrosion current density) of the steel bars is time-dependent during a corrosion process, and the time-dependent process can be divided into six phases in the full lifetime. The results also show that the effects of the concrete strength and the electrical resistivity of the concrete on the variation of the corrosion rate. This study conducts the mechanism analyses about the test results based on the microstructure of the interfacial transition zone (ITZ) between the steel bars and the concrete at different corrosion levels. The growth of the corrosion layer and the corrosion cracking are the main factors influencing the corrosion process. The time-variation mode of the corrosion rate of steel bars in full process is developed.

Key words: concrete; steel bar; corrosion rate; chloride attack

钢筋锈蚀是混凝土结构耐久性问题的主要因素。但由于自然环境下混凝土内钢筋的锈蚀是一个漫长的过程,要建立钢筋的锈蚀速率模型比较困难。因此,目前关于混凝土内钢筋锈蚀的研究主要集中在人工气候加速环境下。恒定的人工气候环境条

件,为及时研究钢筋锈蚀速率的发展过程提供了一个有效途径。

现有的研究提出了大量关于混凝土中钢筋锈蚀的预计模型。其中最重要的是很多研究者已经意识到钢筋锈蚀速率的时变特性。文献[1-4]揭示了钢

收稿日期:2011-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50538070,50878207)

作者简介:蒋建华(1982-),男,中国矿业大学博士研究生,主要从事混凝土结构耐久性的研究,

(E-mail) jhjiang1982@126.com。

筋锈蚀过程中, 锈蚀速率随锈蚀时间下降的特性。文献[5]给出了钢筋锈蚀电流随暴露时间变化的测试结果, 表明锈蚀电流随暴露时间而增大。文献[6]指出混凝土中钢筋的锈蚀速率是一个时间变量。此外, 文献[7]也提出了混凝土内钢筋锈蚀的时变模型。然而, 混凝土中钢筋的全寿命锈蚀过程及其锈蚀速率的时变机理还值得深入研究。

笔者在人工气候环境条件下, 对试件中钢筋的锈蚀电流密度变化进行了全过程持续检测。试件设计时考虑 3 种不同的混凝土水灰比和氯盐含量, 从而研究不同混凝土强度和混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率的影响。讨论了不同时变阶段钢筋锈蚀速率的发展机理。最后, 提出混凝土中钢筋锈蚀速率时变的全过程发展模式, 为建立考虑时变过程的钢筋锈蚀速率计算模型奠定基础。

1 试验方案

1.1 试件设计

试件采用 3 种不同等级的混凝土, 其配合比见表 1 所示。混凝土材料中, 水泥采用 P. O 32.5 普通硅酸盐水泥, 其组成包括熟料 80%、湿排灰 10%、石灰石 5%、石膏 5%; 砂为本地产河砂(中砂), 细度模数为 2.7; 石子为本地产碎石, 其主要成分为石灰岩和粗面岩, 粒径 5~15 mm, 级配良好; 水为普通自来水。

表 1 混凝土配合比 (kg/m³)

混凝土等级	水泥	水	砂	石子
C20	342.37	212.27	712.12	1 133.24
C25	378.55	211.99	635.96	1 173.50
C30	441.99	212.15	579.01	1 166.85

为了模拟氯离子侵蚀导致钢筋锈蚀, 在混凝土中掺加一定量的氯盐(NaCl); 同时, 为了比较不同混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率的影响, 将氯盐掺量设定为 4%、6% 和 8%(占水泥质量百分数) 3 种, 通过混凝土内自由氯离子含量的测定, 并按文献[8]中的计算模型, 得到电阻率分别为 34.29、28.53、22.78 $\Omega \cdot m$ 。

试件尺寸为 120 mm×100 mm×460 mm, 试件内布置 1 根直径为 16 mm 的 HRB335 级钢筋, 保护层厚度取为 20 mm; 同时设置 1 根不锈钢筋, 作为锈蚀速率测量时的辅助电极。试件制作如图 1 所示。

试验共制作了 5 组试件, 分别用编号 CR1、CR2

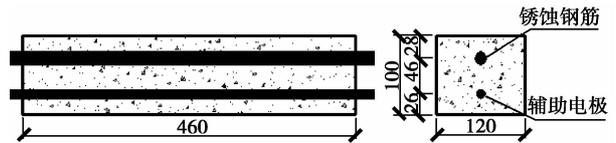


图 1 试件制作示意(单位: mm)

和 CR3 代表 3 种不同等级混凝土; 试件编号中, A、B 和 C 又代表 3 种不同的混凝土电阻率; 每组制作 3 块试件。具体的试件分组和编号情况见表 2 所示。

表 2 试件设计参数

试件编号	混凝土等级	混凝土电阻率 $\rho_{con} / (\Omega \cdot m)$	试件数量
CR1-A-1/2/3	C20	34.29	3
CR2-A-1/2/3	C25	34.29	3
CR2-B-1/2/3	C25	28.53	3
CR2-C-1/2/3	C25	22.78	3
CR3-A-1/2/3	C30	34.29	3

1.2 试验过程与方法

试件制作时, 首先截取钢筋试样, 用打磨机除去钢筋表面的污垢和氧化皮, 再用丙酮将钢筋擦拭干净, 并用电子天平称量钢筋重量; 然后支模板, 安放钢筋, 钢筋的混凝土保护层位于浇筑方向的下方, 同批完成混凝土浇筑, 试件浇筑 24 h 后脱模。由于试件内钢筋两端直接暴露于空气中, 在人工气候环境加速锈蚀试验之前, 对试件端部的钢筋采用环氧树脂密封保护。测量装置如图 2 所示。

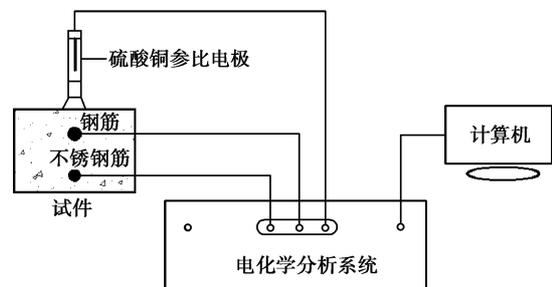


图 2 锈蚀速率测试装置

钢筋混凝土试件的加速锈蚀过程在中国矿业大学结构实验室的人工气候室内进行, 人工气候的环境温度为 30 ± 2 $^{\circ}C$, 湿度为 $85 \pm 5\%$, 在试验过程中, 气候环境保持相对恒定。将所有试件同时放入

人工气候室内,放置 1 周后进行钢筋锈蚀速率的定期测量,根据金属腐蚀学理论,文中采用金属腐蚀速度的电流指标,即用钢筋的锈蚀电流密度来表征钢筋的锈蚀速率。

2 钢筋锈蚀速率时变规律

2.1 锈蚀速率时变过程

对混凝土试件中钢筋的锈蚀速率进行了持续测量,直至钢筋混凝土保护层表面开裂到一定宽度。钢筋的锈蚀速率用锈蚀电流密度来表征,其部分测量结果如图 3 和图 4 所示。

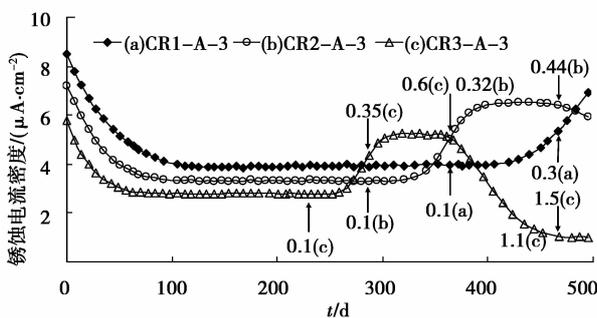


图 3 不同等级混凝土中钢筋锈蚀电流密度时变曲线

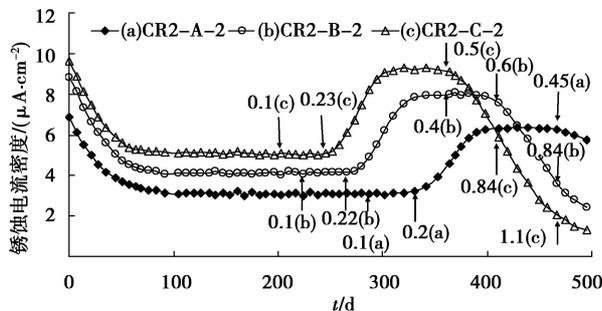


图 4 不同电阻率混凝土中钢筋锈蚀电流密度时变曲线

从图 3 和图 4 中可以看出,恒定气候环境和氯盐侵蚀条件下,混凝土中钢筋的锈蚀速率具有如下特征:1)在整个锈蚀过程中,钢筋的锈蚀速率并非恒定不变,而是随着锈蚀时间发生波动,即具有时变性。2)5 组试件的测量结果表明,在不同条件下,钢筋锈蚀速率的时变过程比较相似,锈蚀电流密度曲线的演变规律基本一致。3)钢筋锈蚀速率的时变过程可以划分为 6 个阶段,依次为上升阶段 TP-1、下降阶段 TP-2、平稳阶段 TP-3、上升阶段 TP-4、平稳阶段 TP-5 以及下降阶段 TP-6;由于试验采取混凝土内掺盐加速钢筋锈蚀,因此没有测量到钢筋锈蚀诱发期的锈蚀速率上升阶段 TP-1,讨论的时

变过程不包括 TP-1。4)混凝土强度等级和混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率的时变规律影响明显。

2.2 混凝土强度对锈蚀速率时变过程的影响

图 3 中显示了不同强度等级混凝土中钢筋锈蚀速率的时变规律,也显示了混凝土保护层开裂(裂缝宽度 0.1 mm)时间以及不同锈胀裂缝宽度对应的时间。比较试件 CR1-A-3(C20)和 CR3-A-3(C30),发现在对应试件 CR3-A-3 的锈蚀阶段 TP-2 和 TP-3 中,CR1-A-3 的锈蚀电流密度值(锈蚀速率)大于 CR3-A-3 的值,然而,试件 CR3-A-3 的混凝土保护层开裂时间却明显早于试件 CR1-A-3。经过时变阶段 TP-3 之后,试件 CR3-A-3 的钢筋锈蚀电流密度(锈蚀速率)逐渐上升并超过试件 CR1-A-3。但就整个锈蚀过程而言,试件 CR1-A-3 的平均锈蚀电流密度大于试件 CR3-A-3。

为了更直观的反映混凝土强度等级对钢筋锈蚀过程的影响,分别以 TP-2 阶段的锈蚀下降速率(斜率 k_2)、TP-3 阶段的时间跨度 t_3 、TP-4 阶段的锈蚀上升速率(斜率 k_4)、TP-5 阶段的时间跨度 t_5 、TP-6 阶段的锈蚀下降速率(斜率 k_6),以及混凝土保护层的开裂时间 t_{cr} 作为时变过程特征量,图 5 显示了混凝土强度对上述特征量的影响。

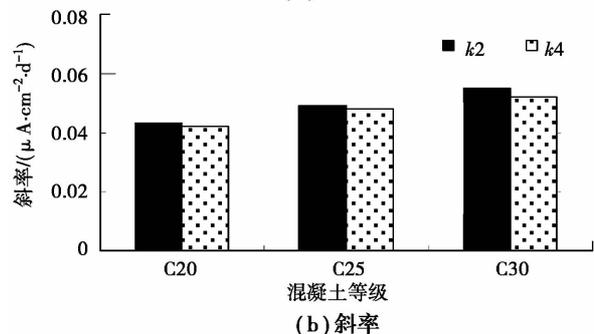
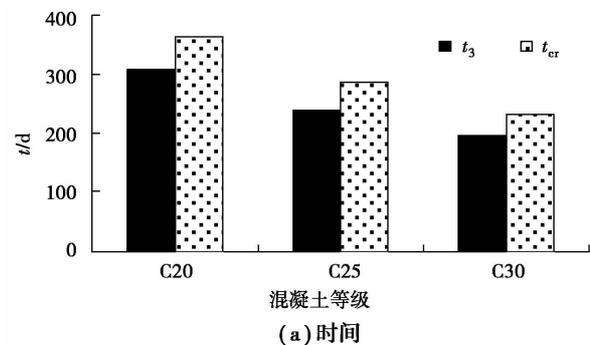


图 5 混凝土强度对时变过程特征量的影响

从图 5 中可以看出,混凝土强度对钢筋锈蚀速率的时变过程和锈胀开裂具有显著影响。不同的水灰比(W/C)是此影响的主要因素。试件 CR1-A-3 的水灰比较大,故导致混凝土与钢筋的界面过渡

区(ITZ)更为疏松。其详细的讨论将在随后的机理分析中进行。

2.3 混凝土电阻率对锈蚀速率时变过程的影响

图4显示了相同气候环境下不同电阻率的混凝土内钢筋锈蚀速率时变规律。显而易见,混凝土电阻率对钢筋的锈蚀速率具有重要影响。但混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率所经历的时变阶段无明显影响。在阶段TP-2、TP-3、TP-4和TP-5内,混凝土电阻率越小,钢筋的锈蚀电流密度越大。当钢筋的锈蚀速率进入阶段TP-6后,混凝土电阻率小的试件内钢筋锈蚀速率下降更快,因此其锈蚀电流密度反而更小(见图4)。图6显示了混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率时变过程特征量的影响。

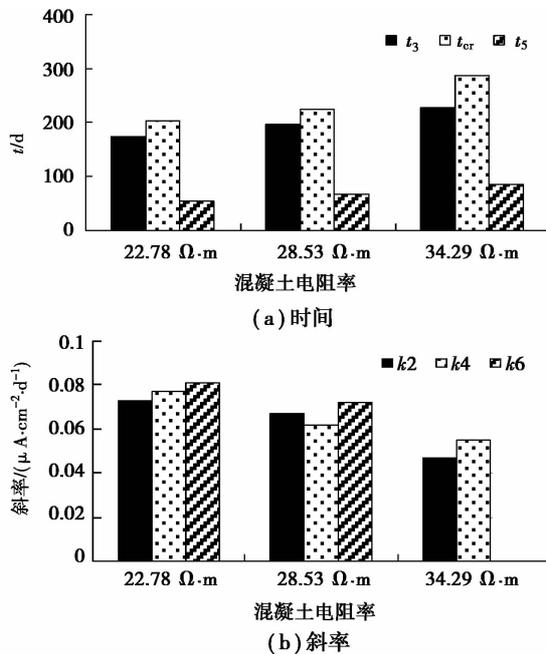


图6 混凝土电阻率对时变过程特征量的影响

总体来讲,混凝土电阻率越小,钢筋锈蚀引起的混凝土保护层锈胀开裂时间越早,锈胀裂缝宽度发展较快。这主要是由于氯盐含量导致混凝土电阻率的减小,降低了钢筋锈蚀阴、阳极之间的电阻,强化了离子通路,从而加速了钢筋的电化学锈蚀过程。

3 锈蚀速率时变过程的机理分析

3.1 锈蚀层概念

钢筋混凝土构件中,由于浇筑混凝土时,钢筋对混凝土的阻挡作用,往往在相对于混凝土浇筑方向的钢筋下方,未锈蚀钢筋与混凝土交界面产生一个疏松多孔的区域,即过渡区(ITZ)。这一过渡区为钢筋锈蚀产物的扩散提供了空间。文献[9]指出,由于锈蚀产物的膨胀,锈蚀产物向交界面过渡区渗透,

多孔的过渡区逐渐变化为密实的锈蚀产物层,简称锈蚀层,如图7所示。

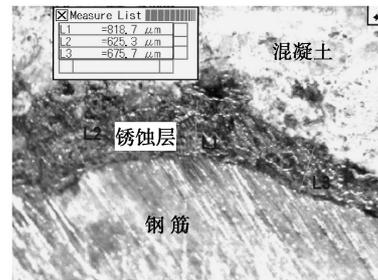


图7 锈蚀层厚度测量

3.2 锈蚀层的发展

为了探讨锈蚀层对混凝土内钢筋锈蚀速率的影响,在监测钢筋锈蚀速率的同时,定期取样观测钢筋与混凝土界面区的锈蚀层发展情况。试验中采用的观测仪器是KH-3000V/KH-3000VDHI-SCOPE Advanced 数字式视频显微测量系统,它可与计算机相连,直接采集数字图片,图片为彩色显示,从而更直观地辨别观测对象,同时该显微系统具备测量功能,可以对观测对象进行量测和标注(见图7)。

根据文献[10]的研究以及文中的测试结果,由于钢筋靠近混凝土保护层一侧过渡区的存在,充足的氧气和水分加速了钢筋的微电池锈蚀,故而造成混凝土内钢筋的锈蚀产物主要分布在钢筋表面靠近混凝土保护层一侧。因此,文中所讨论的锈蚀层发展也主要集中在该区域。图8和图9显示了不同锈蚀阶段钢筋锈蚀层的部分观测结果。

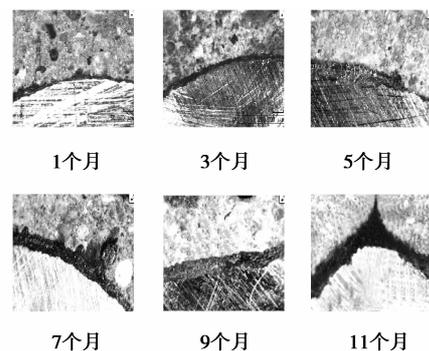


图8 不同锈蚀阶段锈蚀层的发展
(CR2-B-2, $\times 50$)

基于混凝土中钢筋锈蚀层的发展,钢筋锈蚀速率时变过程的机理表述如下^[11]

1)阶段TP-2:随着多孔性过渡区逐渐转变为密实的锈蚀层,混凝土内空气的传输通道被堵塞,钢筋表面氧气和湿气的供给速率下降,钢筋锈蚀的阳极反应受到抑制,从而表现为锈蚀电流密度下降。

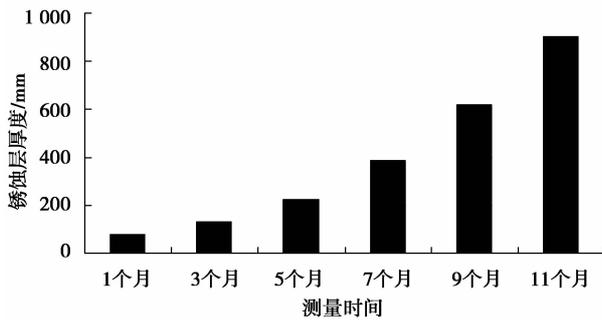


图 9 锈蚀层厚度的发展 (CR2-B-2)

2) 阶段 TP-3: 当钢筋锈蚀电流密度下降至某一水平时, 钢筋表面氧气和湿气的消耗速率与供给速率将达到平衡, 锈蚀速率趋于稳定。

3) 阶段 TP-4: 随着锈蚀产物的不断增加, 锈胀应力不断增大, 导致混凝土保护层开裂。裂缝从混凝土与钢筋的界面开始, 然后贯穿于整个保护层厚度。锈胀裂缝为氧气和湿气传输提供了新的通道, 锈蚀区域氧气和湿气的供给速率大于消耗速率。因此, 钢筋锈蚀速率开始上升, 但在保护层开裂初期, 上升较慢。

4) 阶段 TP-5: 锈蚀产物逐渐向锈胀裂缝内填充, 氧气和湿气的传输通道再次被堵塞。在经历了上升阶段 TP-4 之后, 钢筋锈蚀速率在一定时间段内停止增长而保持稳定。此时, 混凝土中氧气和湿气的传输与阶段 TP-3 中的相似。

5) 阶段 TP-6: 钢筋在 TP-5 阶段中以较高的速率进一步锈蚀, 锈胀裂缝内部和过渡区变得更加密实, 氧气和湿气向钢筋表面的传输变得困难, 同时钢筋阳极反应生成的 Fe^{2+} 向周围扩散受阻, 从而抑制了钢筋的锈蚀, 锈蚀速率出现大幅度下降。

3.3 混凝土强度对锈蚀层发展的影响

混凝土水灰比(W/C)是影响钢筋与混凝土界面过渡区孔隙率的主要因素, 低水灰比将会使混凝土和过渡区(ITZ)更为密实。图 10(a)和(b)分别显示了试件 CR1-A-3、CR2-A-3 和 CR3-A-3 在锈蚀 3 个月和 5 个月时, 钢筋锈蚀层的比较。从图中可以看出, 试件 CR1-A-3 中钢筋的锈蚀层厚度明显大于试件 CR3-A-3, 这表明试件 CR1-A-3 的过渡区孔隙率更大。故试件 CR1-A-3 在锈蚀初期, 填充过渡区所需的铁锈量比试件 CR3-A-3 更多。钢筋锈蚀初期, 锈蚀产物填充过渡区(ITZ)的过程称为“自由膨胀阶段”^[12]。因此, 试件 CR3-A-3 中锈蚀产物膨胀力的发展要快于试件 CR1-A-3, 在相同的气候环境条件下, 则试件 CR3-A-3 的混凝土保护层锈胀开裂更早。

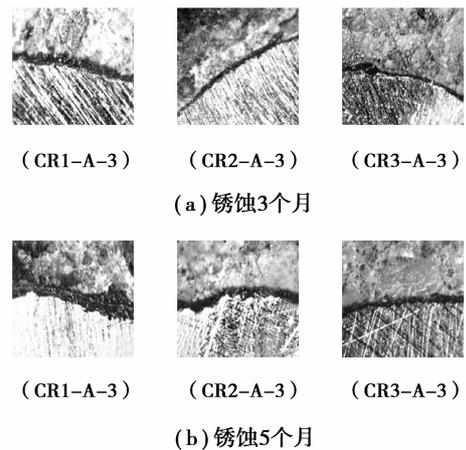


图 10 试件 CR1-A-3、CR2-A-3 和 CR3-A-3 锈蚀层的比较

3.4 混凝土电阻率对锈蚀层发展的影响

图 11(a)和(b)显示了混凝土强度等级相同的条件下, 3 种不同电阻率试件中钢筋锈蚀层生长情况; 由于混凝土电阻率不同(对应不同含盐量)而引起钢筋锈蚀速率不同, 由图可知, 在相同锈蚀时段情况下, 混凝土电阻率越小, 钢筋锈蚀速率越大, 锈蚀层厚度越大。分析其原因, 当混凝土电阻率较小时, 降低了钢筋锈蚀电池的外路电阻, 即钢筋锈蚀阴、阳极之间的混凝土电阻。根据钢筋锈蚀电化学原理, 钢筋锈蚀阳极反应生成的 Fe^{2+} 向外扩散, 与阴极反应生成的 OH^{-} 结合生成锈蚀产物。混凝土电阻率决定了 Fe^{2+} 与 OH^{-} 扩散的速率, 电阻率越小, 阳极反应生成的 Fe^{2+} 能够迅速向外扩散, 从而加速了阳极反应的进行和锈蚀产物的生成。

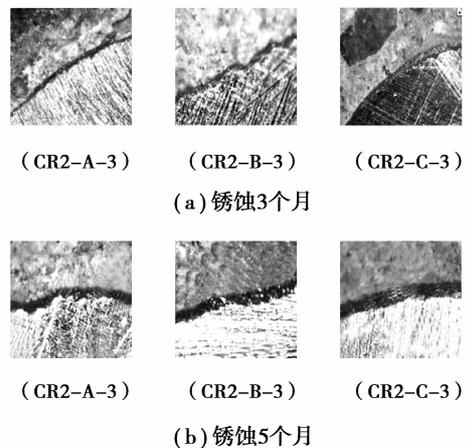


图 11 试件 CR2-A-3、CR2-B-3 和 CR2-C-3 锈蚀层的比较

4 钢筋锈蚀速率时变的全过程模式

基于上述试验研究和分析, 以锈胀裂缝达到一

定宽度为钢筋混凝土寿命终止的标准,在混凝土内钢筋锈蚀全过程中,建立了锈蚀速率(锈蚀电流密度)的时变发展模式,如图12所示。

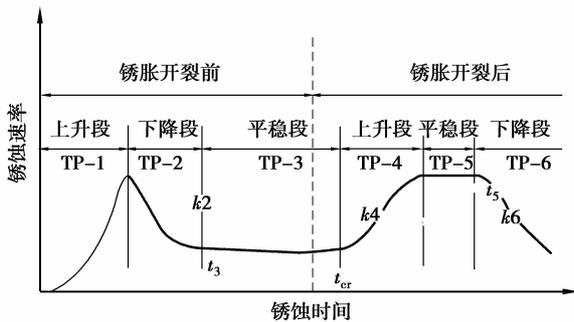


图12 锈蚀速率时变过程模式

该模式将其过程划分为6个阶段。在各个发展阶段内,按照锈蚀速率的演变规律,提出用特征量 k_2 、 t_3 、 k_4 、 t_5 、 k_6 及 t_{cr} 来表征混凝土强度和电阻率对锈蚀速率时变过程的影响,即上述特征量均是混凝土水灰比(W/C)和电阻率(ρ_{con})的函数。由于缺乏钢筋锈蚀诱发期的试验数据,以虚线形式给出了阶段TP-1的模式。

在提出全过程发展模式基础上,将进一步开展试验研究,积累试验数据,以确定定量的计算模型。

5 结论

1) 恒定气候环境下,混凝土内钢筋锈蚀速率时变的全过程可以划分为6个阶段,依次为锈蚀前期的上升段、下降段、平稳段;锈胀开裂后的上升段、平稳段、下降段。

2) 混凝土强度对钢筋锈蚀速率时变过程和锈胀开裂具有显著影响。在内掺盐情况下,混凝土强度越高,混凝土保护层锈胀开裂时间越早。这主要是由于混凝土水灰比越小,钢筋与混凝土交界面过渡区更加密实,钢筋锈胀力发展更快。

3) 混凝土电阻率对钢筋锈蚀速率时变过程具有较大影响。混凝土电阻率越小,混凝土保护层锈胀开裂时间越早,锈胀裂缝宽度发展越快。其机理是混凝土电阻率的减小,降低了钢筋锈蚀阴、阳极之间的混凝土电阻,从而加速了钢筋锈蚀电池的进行。在工程实践中,由于混凝土含水率和氯离子含量均会对混凝土的电阻率产生影响,因此研究电阻率对钢筋锈蚀速率的影响具有重要意义。

4) 提出了混凝土内钢筋锈蚀全过程中的锈蚀速率时变模式,为建立定量的计算模型打下基础。

参考文献:

[1] 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.

[2] SCHIESSL P, RAUPACH M. Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete [J]. ACI Materials Journal, 1997, 94(1):56-62.

[3] 蒋建华,袁迎曙,李富民,等. 混凝土中不同等级钢筋锈蚀行为的比较研究[J]. 建筑材料学报,2009,12(5): 21-25.

JIANG JIAN-HUA, YUAN YING-SHU, LI FU-MIN, et al. Comparative study on corrosion behavior of steel bars of different grades in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(5):21-25.

[4] YALCYN H, ERGUN M. The prediction of corrosion rates of reinforcing steel in concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(10): 1593-1599.

[5] BAWEJA D, ROPER H, SIRIVIVATNANON V. Chloride-induced steel corrosion in concrete: part 1 corrosion rates, corrosion activity, and attack areas [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(3): 207-217.

[6] VU K, STEWART M G, MULLARD J. Corrosion-induced cracking: experimental data and predictive models [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 719-726.

[7] MECHERS R E, LI C Q. Phenomenological modeling of reinforcement corrosion in marine environment [J]. ACI Material Journal, 2006, 103(1): 25-32.

[8] 耿欧. 混凝土构件中钢筋锈蚀速率预计模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学建筑工程学院,2008.

[9] YUAN Y S, JI Y S, JIANG J H. Effect of corrosion layer of steel bar in concrete on time-variant corrosion rate [J]. Materials and Structures, 2009, 42(10): 1443-1450.

[10] YUAN Y S, JI Y S. Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2461-2466.

[11] 姬永生,袁迎曙. 恒定气候混凝土内钢筋锈蚀速率的时变特征与机理[J]. 中国矿业大学学报. 2007,36(2): 153-158.

JI YONG-SHENG, YUAN YING-SHU. Change characteristic and mechanism of rebar corrosion rate with time in concrete under constant climate [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(2):153-158.

[12] LIU Y P, WEYERS R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6):675-681.

(编辑 陈移峰)