

钢筋混凝土中钢筋锈蚀机制与防治措施分析

闻 建

(江汉大学 机电与建筑工程学院,湖北 武汉 430056)

摘 要:从混凝土内钢筋锈蚀的电化学基本原理出发,系统阐述了因钢筋锈蚀而引起混凝土劣化的机制,分析了钢筋锈蚀后对钢筋混凝土构件的影响,依据影响钢筋锈蚀的主要因素分析,提出了锈蚀的防治措施。

关键词:混凝土;钢筋锈蚀;耐久性;机制;防治措施

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-0143(2012)06-0042-03

0 引言

钢筋混凝土耐久性的丧失,除了冻融、裂缝、海水腐蚀、冲刷磨损、碱-骨料反应等一般混凝土损坏形式之外,主要是钢筋在混凝土中的锈蚀破坏。钢筋的锈蚀破坏导致混凝土的损伤表现为膨胀、开裂以及最终保护层剥落等形式。除保护层丧失外,由于钢筋和混凝土失去黏结力,以及钢筋横截面损失引起的钢筋混凝土结构损伤,以致有时到了结构的破坏已经不可避免。因此,钢筋锈蚀已经成为影响混凝土耐久性的主要因素,特别在氯盐环境中,钢筋锈蚀是首要因素。

1 钢筋锈蚀机制

混凝土结构中的钢筋腐蚀可分为自然电化学腐蚀和杂散电流腐蚀,对于预应力混凝土结构,还可能发生应力腐蚀和氢脆腐蚀。一般混凝土结构中发生的通常为自然电化学腐蚀^[1]。

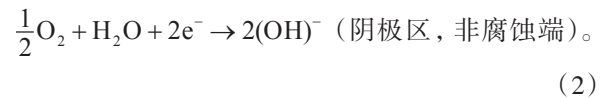
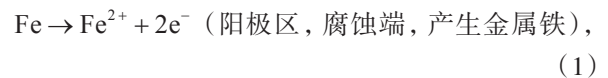
自然电化学腐蚀其发生的根本原因是源于腐蚀电池的形成,腐蚀电池可能以两种形式产生:

1) 混凝土中的两种不同金属(如钢筋和铝导管),或钢材的表面特性有明显差异时,可形成组分电池。

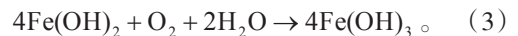
2) 由于在钢筋附件溶解离子的浓度差,如碱和氯化物,从而形成浓差电池。

腐蚀电池的结果是两种金属中的一种(或一种金属时金属的某些部分)成为阴极,另一种(或

其他部分)成为阳极。腐蚀电池的基本化学反应如下所述:



进一步, Fe^{2+} 和 $2(\text{OH})^-$ 结合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 由于 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 不稳定, 将进一步生成氢氧化铁, 即



氢氧化铁进一步氧化生成铁锈($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。金属铁转变为铁锈时, 体积增大, 其增量因氧化状态不同, 一般要增加 2~4 倍, 最多可增大 6 倍。这种体积增大可引起混凝土膨胀和开裂, 一旦造成钢筋外露, 会进一步加速钢筋的恶性锈蚀, 直至构件丧失承载能力。对于应力高、直径细的高强钢丝, 则常因钢丝表面局部缺陷或锈坑处形成应力集中而发生脆断。

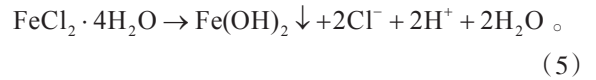
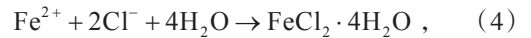
一般来讲, 混凝土孔隙液具有很高的碱性(pH 值为 12.5~13.5), 钢筋在这种介质中, 表面受到一层非常致密的钝化膜($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性薄膜, 厚度为 200~1 000 nm)保护, 只有当钝化膜的保护作用消失后, 钢筋才有可能锈蚀。

当混凝土孔隙液中不存在氯离子, 只要孔隙液的 pH 值保持在 11.5 以上, 钝化膜就处于稳定状态, 但在某些情况(如混凝土有很高的渗透性, 孔隙液中的碱和大部分氢氧化钙或者被碳化、或

者被溶解),空气中的二氧化碳和混凝土孔隙中的氢氧化钙进行中和反应,生成碳酸钙,临近钢筋的混凝土 pH 值会下降到 11.5 以下,钝化膜变得不稳定而被破坏,失去对钢筋的保护作用。

当混凝土孔隙液中存在氯离子,即使孔隙液的 pH 值保持在 11.5 以上,在钢筋表面氯离子含量增加到某一临界值时,也具有局部破坏钝化膜的能力。氯离子含量的临界值为 $n(\text{Cl}^-):n(\text{OH}^-)$ 物质的量比,当其大于 6 时,难溶解的氢氧化铁可转变成易溶的氯化铁,形成铁与氯化物的复合物,即绿锈 ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$),致使钝化膜局部破坏。在此破坏过程中,氯离子虽然不构成腐蚀产

物,在腐蚀过程中也不消耗,但是作为腐蚀的中间产物促进了腐蚀的发生,对钢筋的腐蚀起到了催化和搬运的作用。氯离子的催化反应可用式(4)、(5)表示:



2 钢筋锈蚀后对钢筋混凝土构件的影响

视钢筋锈度不同,钢筋锈蚀后对钢筋混凝土构件的影响如表 1^[2]所示。

表 1 钢筋锈蚀对钢筋混凝土构件的影响

破坏形式	钢筋锈度		
	I 度	II 度	III 度和破坏期
钢筋减重(截面损失)	0%~1%	1%~5%	5%~20%,甚至达 40%
混凝土裂缝	无	开始出现层裂	顺筋裂缝,混凝土保护层脱落,钢筋与混凝土脱离
铁锈扩散	有锈斑	铁锈开始在混凝土中扩散	铁锈沿混凝土裂缝扩散,并向混凝土表面渗出
握裹力	变形钢筋	无变化	减重少时无变化,减重多时将严重降低
	光圆钢筋	提高 1.34 倍	提高 1.66 倍
钢筋屈服点	变形钢筋	无明显变化	无明显变化
	光圆钢筋	基本无变化	基本无变化
钢筋抗拉强度	基本无变化	略减少、可忽略	降低,或作试验判断

3 影响钢筋锈蚀的主要因素

3.1 碳化深度的影响

混凝土碳化会导致混凝土碱度降低,破坏钢筋钝化膜,使钢筋易于腐蚀。中国建筑科学研究院混凝土研究所曾用快速碳化试验法对 200 组不同水泥用量、不同水灰比的普通混凝土及轻集料混凝土进行试验,测得钢筋锈蚀失重率(A)与混凝土碳化深度(D)的函数关系,经回归分析得到公式(6)^[3]:

$$A = 0.00369D^{1.34}, \quad (6)$$

式中,A 为混凝土保护层厚度为 20 mm 时钢筋锈蚀失重率(%);D 为混凝土快速碳化试验时,龄期为 28 d 的混凝土碳化深度(mm)。

3.2 Cl⁻ 含量的影响

有研究表明,混凝土内氯离子含量越高,则钢筋锈蚀电位越高,且钢筋的锈蚀速率也越大。文献[4]的作者建立了氯离子浓度与混凝土内钢筋平均锈蚀速率 I_{mean} 的关系式:

$$\lg I_{\text{mean}} = -1.07 + 0.76 \times \lg(\text{总Cl}^- \text{含量占水泥质量百分比}), \quad (7)$$

$$\lg I_{\text{mean}} = -0.74 + 0.64 \times$$

$$\lg(\text{自由Cl}^- \text{含量占水泥质量百分比}), \quad (8)$$

$$\lg I_{\text{mean}} = -1.04 + 0.57 \times \lg(n(\text{Cl}^-):n(\text{OH}^-)). \quad (9)$$

3.3 水灰比和保护层厚度的影响

通常,水灰比大,则混凝土的孔隙率大,密实程度差,水分、腐蚀性介质(CO_2 、 O_2 、 Cl^-)容易侵入到混凝土内部,使得混凝土内钢筋的锈蚀速率提高。

中国建筑科学研究院提出的不同保护层厚度下钢筋失重率的换算系数如表 2^[5]所示。

表 2 不同保护层厚度下钢筋失重率的换算系数

保护层厚度/mm	10	20	30	40
换算系数	1.2	1.0	0.8	0.6

3.4 裂缝的影响

混凝土保护层开裂为氧气、水、氯化物提供了方便的通道,较小的裂纹就能形成一个加速腐蚀和开裂的条件。如果混凝土的渗透性很低,垂直于钢筋的横向裂缝通常不会引起钢筋的持续腐蚀,这是因为暴露于裂缝的那部分钢筋承担了阳

极的作用。如果平行于钢筋的方向形成纵向裂缝,则腐蚀会继续持续下去,因为沿裂缝很多位置失去了惰性,并且整个裂缝长度上氧气和水分很容易侵入。

3.5 应力状态与应力水平的影响

研究表明,应力钢筋在电化学反应方面比无应力钢筋更活跃,这是因为应力腐蚀和常规腐蚀不同,它会在金属局部区域加速腐蚀,从而引起结构局部加速破坏,给结构带来突发性的灾难性影响。

4 钢筋锈蚀的防治措施

钢筋锈蚀的防治是一个系统问题,应该在设计、施工、检测等主要工作环节中,有针对性地采取措施加以控制,以确保钢筋混凝土结构安全,使用时间达到或超过设计使用年限。从前述分析可知,提高钢筋防治钢筋锈蚀的关键,是防止或延缓腐蚀介质(二氧化碳、氯离子、水和氧)通过混凝土保护层向钢筋表面渗透和扩散。

4.1 防止钢筋混凝土构件表面过早碳化

中国建筑科学研究院提出的混凝土在二氧化碳体积分数为20%,标准养护为28 d时快速碳化的多系数方程^[3]为

$$D = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \eta_6 K \sqrt{t}, \quad (10)$$

式中, D 为混凝土碳化深度(mm); η_1 为水泥用量影响系数,对普通混凝土(轻集料混凝土): $\eta_1 = 253C^{-0.954}$ ($\eta_1 = 582C^{-1.107}$), C 为每立方米混凝土的水泥用量(kg); η_2 为水灰比(W/C)影响系数,对普通混凝土(轻集料混凝土): $\eta_2 = 4.15(W/C) - 1.03$ ($\eta_2 = 0.017 + 2.06(W/C)$); η_3 为粉煤灰取代量影响系数,对普通混凝土(轻集料混凝土): $\eta_3 = 0.968 + 0.32F$ ($\eta_3 = 1.006 + 0.17F$), F 为粉煤灰等量取代水泥的质量分数(%),如10%,以10代入; η_4 为水泥品种影响系数; η_5 为集料品种影响系数; η_6 为养护方法影响系数; K 为碳化速度系数,对普通混凝土取2.32,对轻集料混凝土取4.18; t 为标准养护天数,取28。

由公式(10)可知,增加水泥用量、降低水灰比、控制粉煤灰最大取代量、选用不含混合材的硅酸盐水泥或少含混合材的普通硅酸盐水泥、控制骨料粒径和级配、良好的养护方式等可以提高混凝土的抗碳化性能。

4.2 控制最大氯化物允许用量

混凝土组成部分中不可避免含有少量氯离子(非常有限,一般不至于导致钢筋锈蚀),氯离子其他的外部来源如去冰盐、或者结构暴露在海水及浪溅区内。因此,须控制氯离子的允许含量,文献[6]的耐久性规定以及美国ACI318建筑法规中均规定了最大氯离子含量限值。

4.3 其他经济有效的措施

其他经济有效的措施,如适当增大混凝土保护层厚度;采取掺加减水剂以减小水灰比、加添优质掺合料、振捣密实和良好的养护等措施,以提高混凝土的密实性。在腐蚀环境较为恶劣的条件下,设计中应尽量避免采用形状复杂、尺寸单薄的构件等。此外,在严重腐蚀环境下,采取在混凝土中掺加缓蚀剂,如可采用聚合物水泥乳胶砂浆等涂料密封混凝土表面,以及采用喷敷树脂的防锈钢筋等措施。

5 结语

钢筋锈蚀对钢筋混凝土结构以及预应力钢筋混凝土结构的耐久性影响极大,其现象表现为钢筋的有效面积减小、钢筋应力集中、疏松铁锈层对钢筋与混凝土界面的润滑作用、钢筋横肋锈损、锈蚀产物体积膨胀等。因此,需要根据钢筋锈蚀的基本原理以及各种因素的影响规律,科学地采取措施来保护钢筋,达到保证结构安全、延长结构使用寿命的目的。

参考文献:

- [1] 张誉,蒋利学. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [2] 孟文清. 建筑工程质量通病分析与防治[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.
- [3] 龚洛书,苏曼青,王洪琳. 混凝土多系数碳化方程及其应用[J]. 混凝土,1985(6):10-15.
- [4] Elsener B, Hug A, Buirchler D. Evaluation of localized corrosion rate on steel in concrete by galvanostatic pulse technique [C]//Page C L, Bamforth P S, Figg J W. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Cambridge:SCI,1996:264-272.
- [5] 李惠强. 建筑结构诊断鉴定与加固修复[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [6] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局. GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.