

# 裂缝对预应力混凝土结构耐久性的影响

张德峰 吕志涛

**摘要** 本文分析了预应力混凝土结构裂缝状态下力筋腐蚀的机理,阐述了裂缝及其宽度与力筋腐蚀间的关系,并提出了一般环境条件下预应力筋腐蚀的经时模型,可供耐久性设计参考。

**关键词** 裂缝 预应力筋 腐蚀机理 耐久性

## 一.前言

在引起预应力混凝土结构耐久性失效的诸多因素中,预应力钢筋腐蚀排在首位,其次是冻融及化学侵蚀等。裂缝是否对预应力筋腐蚀产生影响,目前还存在不同观点,因此,弄清预应力混凝土结构裂缝状态下力筋腐蚀的机理及裂缝与力筋腐蚀之间的关系成为预应力混凝土结构裂缝控制乃至耐久性研究的关键。

本文分析了一般环境条件( $\text{CO}_2$ 、 $\text{Cl}^-$ 侵蚀)下力筋腐蚀的机理,揭示了裂缝开展与力筋腐蚀间的关系,并提出了预应力筋在一般环境条件下腐蚀的经时模型。

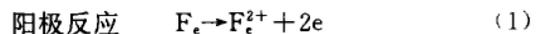
## 二.裂缝状态下预应力筋腐蚀的机理

与钢筋混凝土结构一样,由于初始混凝土的高碱性,预应力混凝土结构力筋表面形成一层致密的钝化膜,使其处于钝化状态。但随着环境介质的侵入,钝化膜逐渐遭到破坏,从而导致腐蚀的发生。在一般环境条件下,预应力筋的腐蚀通常由两种作用引起:一种是碳化作用,即中性化作用。它降低了混凝土孔隙液中的碱度,当碳化深度到达力筋表面时将破坏力筋的钝化膜,在足够的氧气及水分条件下导致腐蚀的发生;另一种是氯离子的侵蚀。当侵入到力筋表面的氯离子浓度达到临界值时,即使混凝土的碱度很高,也能破坏力筋的钝化保护膜,在足够的氧气及水分条件下引起腐蚀的发生。氯离子临界浓度与预应力筋周围混凝土的碱度有关,碱度 $[\text{OH}^-]$ 愈高,氯离子临界浓

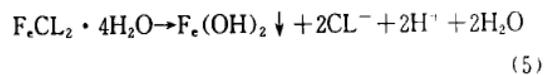
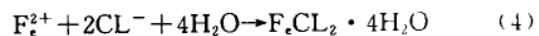
度值亦愈大,通常临界值以 $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ 来表示。

综上所述,诱发力筋腐蚀有三个基本要素,即:1)力筋表面钝化膜的破坏,2)充足氧的供应,3)适宜的湿度( $\text{RH}=60\sim 85\%$ )。三个要素缺一不可,第一要素为诱发条件,而腐蚀速度则取决于氧气及水分的供应。大量工程实践已经证明:干燥环境中的力筋不易腐蚀,潮湿或干湿交替环境下腐蚀发展较快;而长期处于海水下的结构,虽然力筋表面氯离子浓度很大,由于缺氧也未发生腐蚀现象。

碳化作用通常诱发力筋近似的均匀腐蚀。图1为裂缝状态下碳化作用诱发的力筋电化学腐蚀过程示意图。碳化作用首先破坏裂缝处力筋的钝化膜,使裂缝处的力筋处于活化状态,且为阳极,裂缝间钝化区则为阴极。反应方程式如下:



通常氯离子侵蚀诱发力筋的局部腐蚀。图2为裂缝状态下氯离子侵蚀作用诱发的力筋电化学腐蚀过程示意图。裂缝处力筋表面的氯离子浓度首先达到临界值,使该处的力筋活化。反应方程式如下:



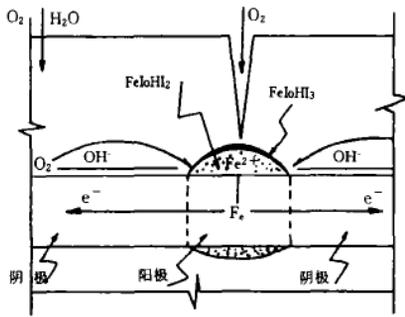


图1. 碳化诱发的力筋腐蚀电化学过程示意图

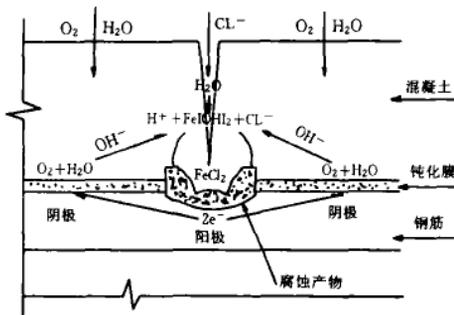


图2. 氯离子侵蚀诱发的力筋腐蚀电化学过程示意图

### 三、裂缝对预应力筋腐蚀的影响

目前,有关混凝土结构裂缝是否对力筋腐蚀产生影响的问题,仍存在两种不同的观点。一种观点<sup>[1]</sup>认为裂缝的产生增加了腐蚀介质、水分和氧气的渗入,加快了腐蚀的发生、促进了腐蚀的发展,人们的直觉认识及一些实验室试验支持这种观点。另一种观点<sup>[2]</sup>认为裂缝对力筋腐蚀并不产生重要影响,因为开裂仅会加速腐蚀的产生,腐蚀速度将取决于阴、阳极间的电阻及阴极处的供氧程度,而氧气的供给是通过未开裂处混凝土的保护层渗入的,腐蚀速度也取决于力筋保护层的质量和渗透性,因此裂缝并不控制力筋腐蚀的速度,它的作用仅是启始腐蚀进程并使该处的力筋活化,一些试验及工程实例证实了这一观点。

事实上,无论对预应力混凝土结构或钢筋混凝土结构来说,裂缝及其宽度对力筋腐蚀都有影响,宽度不同,其影响程度也不同。首先,裂缝加快了腐蚀的发生,即腐蚀开始时间提前。而且在早期,裂缝宽度对力筋腐蚀影响较大,因为力筋去钝

化的时间取决于裂缝的宽度,然而腐蚀一旦开始,其影响程度大大降低。这时,腐蚀速度取决于未开裂处混凝土保护层的质量和渗透性,混凝土保护层的质量越好、渗透性越小,氧气及水分的供给量也越少,腐蚀速度越慢,随着碳化进程的深入,毛细孔将逐渐被堵塞,使混凝土上渗透性逐步降低,腐蚀速度也随之下降。当力筋腐蚀速度小到一定程度时,即在设计寿命期内不影响其各项力学指标时,就称之为不腐蚀或处于钝化状态。实际上,腐蚀一直在进行着,只不过有时腐蚀速率很小而已。通常以  $I_{corr}$  表示腐蚀速度,当  $I_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$  ( $1.1 \mu m/年$ ) 时,力筋腐蚀速度已小到可忽略不计,称之为不腐蚀或处于钝化状态;当  $0.1 \leq I_{corr} < 0.5 \mu A/cm^2$  时,称力筋处于低腐蚀状态;当  $0.5 \leq I_{corr} < 1.0 \mu A/cm^2$  时,称力筋处于中腐蚀状态;当  $I_{corr} \geq 1.0 \mu A/cm^2$  时,称力筋处于高腐蚀状态。

裂缝对力筋腐蚀的影响,还应该考虑力筋对腐蚀的敏感程度。非预应力混凝土结构中,由于力筋应力较低,可以允许有较大的腐蚀量。例如在钢筋混凝土结构寿命期内,若钢筋腐蚀总量小于5%,因其各项力学指标均符合规范要求,则认为是可以接受的<sup>[3]</sup>。而同样腐蚀量对于力筋长期处于高应力状态的预应力混凝土结构来说,则是不能接受的,即非预应力混凝土结构与预应力混凝土结构对临界腐蚀量的接受标准不同。因此在相同的使用期内,其腐蚀速率接受标准也应有所不同。图3表示德国亚琛工业大学模拟力筋在除冰盐作用下腐蚀与试验时间、裂缝宽度、混凝土保护层厚度和水灰比的关系图<sup>[4]</sup>。从图中可以看出,时间、裂缝宽度、混凝土保护层厚度和水灰比对力筋腐蚀都有影响,且当保护层厚度达到一定值后,水灰比及裂缝宽度的影响大为减小,而裂缝宽度控制到一定值时,腐蚀量可以忽略不计。试验时还发现,保护层厚度35mm、水灰比0.5、裂缝宽度0.1mm混凝土中的力筋,在整个试验期间基本未腐蚀。因此在预应力混凝土结构设计时,针对不同的侵蚀环境采用相应的裂缝控制宽度、保护层厚度及水灰比,对提高其耐久性至关重要。此外,荷载或其它作用引起的微裂缝将增大混凝土的渗透性,促进碳化及氯离子侵入的进程,提高氧的供给量,从而加速力筋腐蚀的速度。有关试验及一些工程实例已证实了上述观点<sup>[5]</sup>。

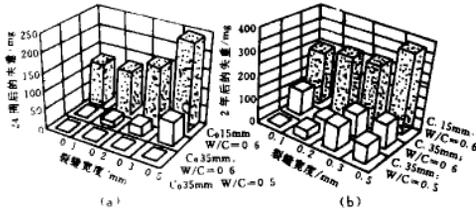


图3. 力筋腐蚀量与试验时间、裂缝宽度、保护层厚度、水灰比的关系

四. 力筋腐蚀的经时模型

针对预应力结构失效的特点<sup>[6]</sup>,用图4表示预应力结构力筋腐蚀过程的经时模型,图中虚线表示混凝土未开裂情况下力筋的腐蚀过程。其过程可分为三个阶段:1)孕育阶段 $t_0$ ——混凝土浇筑完毕至力筋开始腐蚀;2)发展阶段 $t_1$ ——力筋开始腐蚀至达到临界腐蚀值;3)破坏阶段 $t_2$ ——临界腐蚀值至预应力筋发生破坏。图中实线表示开裂情况下力筋的腐蚀过程,并假设裂缝宽度较小,腐蚀启始后速度很小以至可以忽略不计。有关试验已证实只要合理地选择裂缝控制宽度、混凝土强度等级、保护层厚度及水灰比,并加强养护确保混凝土的质量,上述模型能够较好的符合实际情况。此外,荷载或其它作用引起预应力结构微裂缝的发展,增大了混凝土的渗透性,促使开裂的与未开裂情况下的预应力筋达到临界腐蚀值(即发生应力腐蚀时)的时间接近,且由于 $t_0 \gg t_1 \gg t_2$ 设计时可以不区开裂与未开裂情况,统一用 $t_1 = t_0$ 作为预应力结构寿命设计值。

五. 结语

1. 本文分析了一般环境条件( $CO_2$ 、 $CL^-$ 侵蚀)下,预应力筋在裂缝状态下的腐蚀机理,提出了预应力筋腐蚀发生的条件及影响因素;

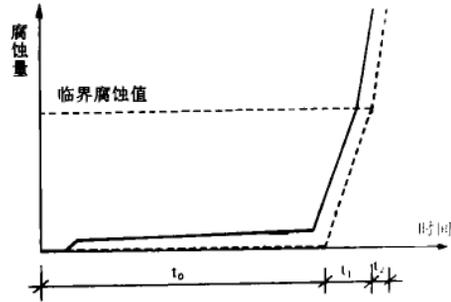


图4. 预应力筋腐蚀过程经时模型

2. 裂缝及裂缝宽度对力筋腐蚀都有影响,且裂缝宽度不同,其影响程度也不同。在早期,裂缝宽度对力筋腐蚀影响较大,随后,腐蚀速度主要取决于未开裂处混凝土的质量及渗透性;

3. 由于长期处于高应力状态,预应力筋腐蚀受裂缝宽度的影响比较敏感,因此,在同样侵蚀环境下,预应力混凝土结构裂缝控制比普通混凝土结构严格得多;

4. 荷载及其它作用引起的混凝土微裂缝将增大混凝土的渗透性,促进碳化及氯离子侵入的进程,提高氧的供给量,加速力筋的腐蚀速度;

5. 力筋腐蚀过程经时模型的确立,为预应力混凝土结构耐久性极限状态的确定及耐久性设计方法的研究奠定了基础。

参考文献:

[1]ACI Fall Convention. Debate: crack width, Cover and corrosion. Concrete International, 1985.  
 [2]Beeby A W., Corrosion of reinforcing steel in concrete and its relation to cracking. The Structural Engineer, 1978, 56A, No. 3, PP77-81.  
 [3]蕙云玲,林志伸,李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析,工业建筑,1997(6)  
 [4]Raupach M., Chloride-induced macrocell corrosion of steel in concrete, theoretical background and practical consequences. Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, 1996, PP. 329-338