

# 浅析混凝土中钢筋腐蚀的防护与修复

孙玉立<sup>1</sup> 杨莉<sup>2</sup>

1. 天长市水电建筑安装工程公司 安徽 天长 239300

2. 皖江工学院土木工程学院 安徽 马鞍山 243000

**摘要:** 钢筋腐蚀是影响混凝土耐久性的最主要的原因,对结构的抗力、可靠性、使用寿命都有很大的影响。针对混凝土中钢筋腐蚀现象,我们了解到碳化和氯化物侵蚀是钢筋腐蚀的主要影响因素。阐述了钢筋的腐蚀过程和机理,以及钢筋腐蚀的检测技术和方法。文章还分析了影响钢筋腐蚀的主要因素并提出了相应的修复技术和防腐措施。

**关键词:** 钢筋腐蚀;碳化;氯化物侵蚀

前言:钢筋混凝土结构于1850年前后出现,由于钢筋混凝土具有耐久性高、整体性好、抗压强度高优点,被广泛用于土建、桥梁、港口以及特种结构等工程领域<sup>[1]</sup>。同时,钢筋混凝土又具有自重大、抗裂性差、钢筋锈蚀等缺点,往往造成建筑结构安全等危害。现阶段,我国的基础设施工程仍以钢筋混凝土结构为主体,钢筋腐蚀是混凝土结构较为严重的病害之一。下面将对钢筋腐蚀的机理、影响因素进行分析,并提出了钢筋防腐的几点措施<sup>[2]</sup>。

## 1 钢筋表面钝化膜的形成

放在潮湿空气或水中的钢筋,过不了几天其表面就会生锈,发生腐蚀,这是大家都知道的生活常识。但是,在多孔、含水的混凝土中,即使经年已久的钢筋,在其表面却也看不到通常的铁锈。换言之,钢筋在混凝土中不像在空气和水中那样容易生锈,发生腐蚀。所以在弄清混凝土中钢筋为什么和怎样发生腐蚀之前,先要明白混凝土中钢筋不易发生腐蚀的原因。大量实验检测结果表明,混凝土的微孔内含有可溶性的钙、钠、钾等碱金属和碱土金属的氧化物,这些氧化物与微孔中的水起化学反应生成碱性很强的氢氧化物,从而为其中的钢筋造成一个高碱性的环境条件(PH=12~13)。在这样的环境条件下,钢筋表面生成一层致密的、分子和离子难以穿过的“钝化膜”。如果这层膜能完全覆盖钢筋表面,并能长期保持完好,那么钢筋的腐蚀就能被阻止。简而言之,是钢筋表面的钝化使钢筋不易发生腐蚀<sup>[3]</sup>。

## 2 钢筋腐蚀的过程和机理

混凝土中钢筋的腐蚀破坏过程可分为三个阶段:阶段Ⅰ,从结构建成到钢筋表面钝化膜破坏;阶段Ⅱ,钢

筋开始锈蚀,直到混凝土保护层出现顺筋开裂;阶段Ⅲ,钢筋加速锈蚀直到构件丧失承载能力。

混凝土在一种或多种外界作用下,材料的耐久性能会发生衰退,从而逐渐失去了对其内部钢筋的保护作用。当钢筋外面的混凝土中性化或出现裂纹等情况,钢筋失去了碱性混凝土的保护,钝化膜破坏并开始锈蚀。钝化膜破坏主要有两方面的因素:(1)混凝土中性化。当混凝土保护层受到碳化或火灾时,与水泥水化过程中产生的氢氧化钙和硅酸三钙、硅酸二钙发生化学反应,形成碳酸钙和氧化钙,混凝土失去强碱性而变成中性。(2)氯离子的侵蚀作用。当侵入到混凝土中的氯离子达到一定浓度时,在不均匀的混凝土中能够破坏钢筋表面的钝化膜,使钢筋发生局部锈蚀。这种局部破坏后钢筋的铁基面露出来,在水和氧气作用下铁表面与尚完好的钝化膜之间形成电位差,钝化膜为阴极,铁表面为阳极,两极之间因电子迁移二发生氧化还原反应。钢筋表面的钝化膜破坏后,在有氧气和水存在的条件下,就发生铁电离的阳极反应和溶解态氧还原的阴极反应,相互以等速度前进<sup>[5]</sup>。

阳极反应:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} - 2\text{e}^-$

阴极反应:  $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- + 1/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{OH}^-$

钢筋腐蚀过程是阳极反应的组合,在钢筋表面析出氢氧化亚铁,被溶解氧化后生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,并进一步生成铁锈 $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ,一部分氧化不完全生成黑锈 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,在钢筋表面形成锈层。铁锈体积膨胀后,对周围混凝土产生压力,并使混凝土产生顺筋裂缝,使混凝土保护层脱落,而裂缝和保护层的剥落又进一步导致更严重的腐蚀。

## 3 钢筋腐蚀的主要因素

混凝土中钢筋腐蚀的影响因素有:混凝土碳化、氯离子侵入、混凝土的密实度、混凝土保护层厚度等。其中混凝土保护层的碳化和氯离子侵入是造成钢筋腐蚀的

**通讯作者:** 孙玉立 1987.03 汉 男 安徽天长 天长市水电建筑安装工程公司 技术工程师 中级工程师 本科 239300 研究方向:水利水电工程

主要原因<sup>[4]</sup>。

3.1 氯化物的影响。氯化物是钢筋锈蚀的最重要原因，氯离子能加速钢筋锈蚀。混凝土中氯离子的来源主要有两个方面：一方面是在混凝土生产过程中带入的。包括：1) 有意加入的氯化物速凝剂、早强剂及抗冻剂，如氯化钙、氯化钠、氯化铁和氢氯酸等；2) 用海水进行混凝土搅拌混料时进入的海盐（NaCl、KCl等）；3) 以未经清洗或未充分清洗的海捞砂礓作骨料，随砂礓带入的海盐（NaCl、KCl等）；因此，混凝土质量、内部孔结构、混凝土保护层是否开裂以及混凝土保护层的厚度等都决定了氯离子渗入混凝土结构内的扩散规律。

3.2 混凝土碳化。混凝土的碳化是引起钢筋锈蚀的原因之一，也是影响混凝土耐久性的因素之一。正常状态下，混凝土空隙液呈强碱性，钢筋表面的混凝土形成钝化膜，对钢筋有保护作用。当大气中的二氧化碳向混凝土内部渗透，并与混凝土中Ca(OH)<sub>2</sub>反应，生成CaCO<sub>3</sub>，使pH值降低。当碳化层发展到钢筋表面，使钢筋表面的高碱环境（pH为12.5-13.5）的pH值下降。当pH值下降到11.5以下时，钝化膜开始不稳定。当pH值下降到9时，钢筋的钝化膜就遭到破坏，钢筋开始腐蚀。混凝土结构的碳化是一个缓慢的过程。其速率取决于二氧化碳穿透混凝土的渗透速率。渗透速率很大程度上取决于混凝土的空隙率和渗透性。调查资料表明：密实度好的混凝土碳化深度仅局限在表面；而密实度差的混凝土，则碳化深度就大。

3.3 水和氧气的影响。混凝土空隙液中水和氧气的存在是钢筋锈蚀的必要条件。水对钢

筋腐蚀速率有着极为关键的影响。一般认为，混凝土孔隙水含量较多时，会导致腐蚀速度加快。但孔隙水含量过多时，极限腐蚀电流密度的降低会导致腐蚀速率降低。另外孔隙水含量对钢筋的锈胀效应有重要影响：钢筋表面的水膜必须接触氧气才能发生电化学腐蚀，如果氧气没有扩散到钢筋表面即使钝化膜受到破坏，也不会发生钢筋锈蚀。水中溶解的氧气越多，钢筋的锈蚀速度越快，但当氧浓度超过一定限度后，钢筋表面也会因生成氧化铁薄膜而呈钝化状态其锈蚀速度减慢。

3.4 混凝土裂缝。混凝土裂缝的产生是多种因素综合作用的结果。但主要是由于荷载、温度、干缩、地基变形、钢筋锈蚀、地基冻胀、碱骨料反应、混凝土质量差等原因引起的构件的裂缝会降低混凝土对钢筋的保护作用，加速钢筋锈蚀。

3.5 保护层厚度和混凝土质量。在较干燥条件下，由于保护层厚度对混凝土孔隙水含量没有明显控制，因此对腐蚀速率也有明显影响。但在极湿条件下，保护层厚度会影响氧扩散阻力。厚度越大，氧扩散阻力也越大，

从而导致腐蚀速率降低。另外，混凝土质量及保护层厚度与氯离子的扩散也密切相关。

## 4 钢筋腐蚀的检测

### 4.1 检测方法

用于结构中钢筋腐蚀的检测方法，按对结构物的损伤状况可分为破损检测和无损检测两大类，按检测技术可分为物理和电化学两大类<sup>[6]</sup>。

4.1.1 破损检测。破损检测也是物理检测方法的一种，一般是在钢筋锈蚀比较严重的情况下进行，如结构物中的混凝土或抹灰层由于钢筋锈胀力而导致了明显的空鼓、开裂甚至脱落等现象，为了进一步定量确定钢筋锈蚀的情况，就需要对结构进行破损检测。该法是利用外力将结构物中已部分破坏的混凝土凿开，直至露出钢筋表面，通过肉眼（视觉法）来观察钢筋的锈蚀情况，必要时还可通过截取部分锈蚀最严重的钢筋，通过截面积损失率或重量损失率来计算钢筋的锈蚀率。破损检测是目前工程中应用较普遍的一种检测结构物中钢筋锈蚀的手段，也是修复钢筋锈蚀结构的一种方法。但该方法也存在一定的局限性，就是会对结构物造成较大的损伤，且由于是“点”的检测，故检测范围和数量及其代表性均受到限制。

4.1.2 无损检测。为了不使结构物产生过大的损伤，人们在工程实践中逐渐研究开发出无损检测，该法通常又分为物理检测和电化学检测两大类，前者包括电阻棒法、涡流与磁通减量（涡流探测）法、声发射探测法、射线法、红外热像法等，后者则包括自然电位法、交流阻抗谱法、线性极化法（或极化电阻法）、恒电量法、混凝土电阻法、电流阶跃法等。

### 4.2 结构中腐蚀钢筋的修复技术

混凝土中的钢筋在水泥水化产物形成的碱性环境下表面生成致密的“钝化膜”，隔绝了与氧气和水的接触，因而得到保护。导致混凝土结构中钢筋锈蚀的诱因主要有两大类：一类是空气中的CO<sub>2</sub>侵入后与混凝土中的碱发生中和反应（即混凝土碳化），使得钢筋周围的碱性环境变弱，钢筋钝化膜被破坏，从而导致钢筋锈蚀；另一类是氯离子引起的钢筋腐蚀，其来源是施工过程中由原材料混入以及环境中氯盐通过硬化混凝土由表及里逐渐渗入等。由于引起钢筋腐蚀的原因是多样性的，因而腐蚀钢筋的修复工作是一项复杂的综合性技术。目前国内外对腐蚀钢筋的修复方法可分为物理法和电化学法（电化学氯化物萃取技术和再碱化技术）两大类。

#### 4.2.1 物理法（打补丁）

物理修复法是指凿除发生钢筋腐蚀并导致混凝土膨胀开裂或剥落的混凝土，直至露出钢筋表面，先对已腐

蚀的钢筋进行表面除锈处理,再用新的致密混凝土或砂浆进行修补抹平。如混凝土结构破坏是由氯化物诱发的钢筋腐蚀而造成,且挖补后不打算对其实施阴极保护技术,这种情况下就需要将分层开裂区域附近的混凝土全部铲除,使被腐蚀的钢筋完全暴露出来。一般做法是将混凝土铲除至钢筋后背面约25mm深处,但要保证将氯化物含量超过门槛值的钢筋周围混凝土彻底清除。同时,还要将钢筋表面清理、打磨至接近金属本色,除去表面上的所有铁锈、蚀坑及氯化物。对铲除混凝土后的凹坑要进行修整,使其边缘方正平直,并对新生面进行彻底清理,去除粉尘、碎屑,用清水喷湿或涂以粘结剂,做好填补新拌和料的准备。如混凝土结构破坏是由混凝土碳化诱发钢筋腐蚀而造成,则一般要求将碳化混凝土铲除至露出腐蚀钢筋,对腐蚀状态严重的混凝土结构,也要求将混凝土铲除至钢筋后背方的一定深度,所挖坑的边缘要求方正平直。根据实际情况的需要,可以在除锈处理后的钢筋表面再涂抹防锈剂、防锈漆或树脂类涂料等,采用的新拌和料可以是普通混凝土或砂浆,也可以是水泥基聚合物砂浆或混凝土,还可以选用树脂混凝土或砂浆,需要时还可在新拌混凝土或砂浆中加入阻锈剂等。在比较恶劣的环境中,还可在硬化后的新填补混凝土表面涂渗透密封性涂料(氯化物为诱因)或抗碳化涂料(碳化为诱因)。补丁修补技术主要适用于结构中钢筋发生局部锈蚀的情况下,同时要求修复材料的收缩率应较小,对新填的混凝土或砂浆应进行良好的养护,以尽量减少新填补区域开裂的危险。

#### 4.2.2 电化学氯化物萃取技术

用电化学法将Cl<sup>-</sup>从钢筋表面驱除,使其向辅助阳极移动,该法被称为电化学除盐,或电化学氯化物取技术。它是将混凝土中的钢筋作为阴极,在混凝土表面敷置电解液保持层并内设金属网作为临时阳极,在金属网和钢筋之间施加电场,在外加电场的作用下,混凝土中钢筋附近的Cl<sup>-</sup>等阴离子向阳极流动进入电解液中,电解液及混凝土中的阳离子向混凝土中钢筋部位聚集,Cl<sup>-</sup>的排除和钢筋附近孔溶液pH值提高,有利于钢筋钝化膜的重建及维持。该技术目前一般采用活化钛板网或镀铂钛作为阳极,但也曾经有采用铜网和低碳钢网作为阳极的。由于铜及其盐类进入混凝土后会加速钢筋腐蚀而被淘汰,低碳钢由于容易发生局部腐蚀且会在混凝土表面留下锈斑,因此目前也很少用其作为临时阳极。电解液一般采用氢氧化钙、氢氧化锂水溶液,两者在脱盐效果方面没有明显区别,但研究表明使用氢氧化锂电解液可减少产生碱骨料反应的可能性,但价格较高,氢氧化钙则价格较低,因此电解液的选择要根据工程的具体情况

(有无碱骨料反应的可能等)来决定。该技术的优点是处理时间短,可在4~6周内完成,但也有一定的缺点。有研究表明,电化学氯化物萃取技术会对钢筋-混凝土界面产生一定的影响,在微观上表现为孔隙率的变化、Ca/Si增大等,还可能会存在碱骨料反应、降低钢筋与混凝土之间的结合力及在钢筋表面产生析氢反应等副作用。

#### 4.2.3 再碱化技术

再碱化技术主要用于对由碳化引发钢筋腐蚀的建筑物结构的修复与保护,再碱化处理就是根据阴极保护技术的原理,使钢筋表面发生阴极反应,使钢筋周围混凝土碱度得到恢复的电化学防护方法,可看作是碳化型电化学氯化物萃取技术。再碱化处理系统采用的阳极类型与氯化物萃取技术相似,为带有涂层的钛网或低碳钢网。由于处理时间较短,低碳钢丝网不完全被损耗,且价格较低,因而被较多采用。再碱化处理所采用的电解液一般为碳酸钠水溶液(浓度0.5~1.0mol/L)。其发生反应式为: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaHCO}_3$ 上式表明这种处理阻止了碳酸反应的发生,可抵御CO<sub>2</sub>的进一步入侵,使处理后的混凝土不再出现碳化现象。但也有学者认为,由电解液带入的钠离子会促进混凝土中碱-骨料反应的发生,所以对于碱-骨料反应敏感的钢筋混凝土结构,有时有必要采用自来水作为电解液。最近有人提出采用含有锂离子水溶液作为电解液的设想,但由于再碱化处理开始时混凝土的碱度一般较低,发生碱-骨料反应的倾向性不大,因而是否有必要采用这种昂贵的电解液尚需进一步的研究。还有研究表明,再碱化处理后钢筋周围混凝土中孔数增多但孔的尺寸减小。

### 5 防腐措施

防止钢筋腐蚀的根本途径是减慢二氧化碳、氧、水等腐蚀因子通过混凝土保护层向钢筋表面渗透扩散的速度,以及防止氯离子在钢筋表面的积聚。措施主要有基本措施和补充措施<sup>[7]</sup>。

#### 5.1 基本措施

##### 5.1.1 控制原材料中氯化物的含量

除按照施工质量的要求选择合适的原材料外,严格控制材料的氯化物含量和避免氯化物的污染是混凝土中氯离子不超标的前提条件。混凝土的原材料主要有水泥、水、砂、石子和外加剂等,因特殊需要在生产过程引入氯化物的水泥要严格控制氯含量。并对其使用范围有所限制。饮用水、天然的洁净淡水及河砂一般含氯盐量很少,可直接用于拌制混凝土;钢筋混凝土工程不允许使用海水;对海砂应检验其氯盐含量。符合标准规定的才能使用;混凝土中掺用的外加剂要符合有关标准。对于预应力混凝土结构,我国规定严禁使用含氯化物的外加剂。

### 5.1.2 提高混凝土对钢筋的防护性能

正常情况下，正确设计和施工的优质钢筋混凝土结构具有长期抵制环境介质侵蚀的功能。因此，最大限度提高混凝土本身的低渗透性和保持对钢筋的防护性能。是预防混凝土中钢筋腐蚀的措施中最有效和经济的根本方法。提高混凝土对钢筋防护性能的主要方法有：在设计、施工中考虑和采取护筋措施；适当增加混凝土保护层的厚度；改善混凝土结构，如选择优质原材料、引入外加剂，合理施工；使用新型混凝土等。

## 5.2 补充措施

### 5.2.1 采用耐腐蚀钢筋

目前镀锌钢筋、包铜钢筋已很少使用，耐蚀钢筋得到一定发展，特别是环氧涂层钢筋被确认为钢筋防腐的有效措施之一。环氧粉末的独特性能与静电喷涂工艺技术的发展。能保证涂层与基体钢筋的良好粘结。抗拉、抗弯和短半径180°弯曲仍不出现裂缝的性能。这都是其他涂层难以达到的。环氧树脂粉末涂层还具有极强的耐化学侵蚀的性能，并且涂层具有不渗透性，因此能阻止腐蚀介质如水、氧、氯气等化学成分与钢筋接触。有效地保护了钢筋。使其抗氧腐蚀寿命至少延长50年，环氧树脂粉末涂层还能长期经受混凝土的高碱性环境而不破坏。然而，在工程使用中也发现了它的不足。环氧涂层钢筋的主要问题集中在钢筋表面涂层的完整性上。试验与实践表明：如果涂层不完整，有孔洞、龟裂等质量缺陷，在腐蚀环境下，钢筋就会被腐蚀，而且在涂层不完整的缺陷处。钢筋发生局部腐蚀的速度比无涂层的钢筋还要快。因此环氧涂层钢筋的关键问题是在生产和使用过程中如何消除涂层质量缺陷。

### 5.2.2 混凝土中掺加阻锈剂

钢筋阻锈剂通过影响钢筋和电介质之间的电化学反应。通过提高氯离子促使钢筋腐蚀的临界浓度来稳定钢筋表面的氧化物保护膜可以有效地阻止钢筋腐蚀发生，从而延长钢筋混凝土的使用寿命。因为阻锈剂的作用可以自发地在钢筋表面上形成。只要有致钝环境，即使钝化膜破坏也可以自行再生，自动维持，这不仅优于任何人为涂层而且经济、简便。但由于其有效用量较大，作为辅助措施较为适宜。最好的办法是将电解质的pH值提高到12左右，使钢筋表面有一层稳定的钝化膜使阳极反应难以进行，从而阻止钢筋的腐蚀。阻锈剂能优先参与并阻止钢筋这两种或任何一种界面反应，并能长期保证其稳定状态。从而有效地阻止了钢筋的锈蚀。

### 5.2.3 阴极保护

阴极保护是保护钢筋的有效措施之一，钢筋的氯离子腐蚀实质上是电化学腐蚀。因此可以采用外加电流或牺牲

阳极的阴极保护法，给钢筋提供较高的负电压，使钢筋的电位处于负极，钢筋的电位降低到阳极开路电压之下，从而有效地保证了钢筋混凝土内的钢筋。另外，在电场的作用下，带负电的氯离子可向阳极（混凝土表面）迁移，等于从钢筋表面除掉氯离子。这对于钢筋的保护十分有利。

### 5.2.4 对混凝土进行表面处理

混凝土表面处理主要为混凝土的脱水处理、镶面板和表面涂覆，以防止水、氯化物、二氧化碳等侵蚀介质渗入混凝土中，延缓钢筋锈蚀。脱水处理是在混凝土刚浇捣成型后，用真空脱水模板对混凝土表层进行真空脱水，排走混凝土中多余的水分和空气，使混凝土表层更为密实，提高抗氯化物等介质的渗透。在混凝土表面涂覆涂料作为抵制侵蚀性介质渗入混凝土的第一道防线是一种经济、简便和有效的方法。表面涂覆一般可分为浸入型和隔离型，前者通过将涂料吸入到混凝土表层。降低混凝土的吸水性；后者则在混凝土表面成膜，形成隔离层。由于涂料的耐久性不佳，因此其对钢筋混凝土结构往往只能提供暂时性的保护。混凝土表面处理主要为混凝土的脱水处理、镶面板和表面涂覆。

## 6 结语

一直以来，不少现役钢筋混凝土结构在未达到服役期满就受到腐蚀损伤，尤其在潮湿多雨的地方。钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀是电化学反应，主要影响以混凝土的碳化和氯化物影响为主。为提高混凝土中钢筋的耐腐蚀性，需要采取一系列相关措施来防止钢筋的腐蚀并且相关防护措施同时来保护好混凝土中的钢筋，以提高混凝土结构的耐久性，减小经济损失。

## 参考文献

- [1]樊云昌，曹兴国，陈怀荣.混凝土中钢筋腐蚀的防护与修复[J],中国铁道出版社，2001（12）：3-5.
- [2]杨建森，何党庆.钢筋混凝土中钢筋腐蚀的化学机理和防腐措施[J]，宁夏大学学报（自然科学报），2001,22（3）：288.
- [3]朱训恒. 钢筋锈蚀与混凝土结构的耐久性 [J],中国石油大学胜利学院学报，2007(3): 12-14.
- [4]李群波，刘敏同永璋. 钢筋混凝土中钢筋锈蚀与防护研究概况[J],全面腐蚀控制. 2010(11): 3—6.
- [5]李富民，袁迎曙，姬永生，等. 混凝土中钢筋的腐蚀动力学行为[J],中国矿业大学学报. 2008(4): 565—567.
- [6]张今阳，罗居刚，邵洪生，等. 钢筋混凝土的腐蚀行为和钢筋腐蚀监测技术[J],人民黄河. 2011(4): 112—116.
- [7]王原梅.钢筋混凝土结构的腐蚀与防护[J],江苏建材，2010（1）：29-30.