

氯盐环境下混凝土内钢绞线的锈蚀特性试验研究

李富民 袁迎曙

(中国矿业大学建筑工程学院 江苏徐州 221008)

摘要: 预应力钢筋的锈蚀特性是研究预应力混凝土结构耐久性失效及防治的基础,为此,分别采用内掺盐和外加盐两种方式在自然气候条件下作了如下三组混凝土内钢筋锈蚀的对比试验:钢绞线与热轧带肋钢筋、钢绞线与热轧光圆钢筋、钢绞线中心钢丝与热轧光圆钢筋。通过对锈蚀过程中锈蚀电流密度的测试以及试验完毕后的破形观察与称重对比和分析,得到如下结果:钢筋外表面锈蚀程度在面向保护层侧明显重于背向保护层侧;钢绞线及其中心钢丝外表面锈蚀相对最不均匀,具有严重的局部锈蚀——坑蚀形态,带肋钢筋次之,光圆钢筋相对最均匀、全面;钢绞线内表面发生类似于空气中的相对全面、均匀的锈蚀;钢绞线的平均外表面锈蚀率小于热轧带肋钢筋的与热轧光圆钢筋的,但严重的局部锈蚀对其受拉性能极其不利。另外,还对上述锈蚀特性进行了电化学机理分析。

关键词: 氯盐环境 混凝土 钢绞线 锈蚀 坑蚀

预应力混凝土结构中混凝土强度高、密实性好、裂缝小,因而一般认为其耐久性是比较好的。但事实上,近几十年来却出现了一系列预应力混凝土结构耐久性失效事故,其中预应力钢筋锈蚀引起的破坏占绝大多数,从而造成了严重后果^[1-3],这已引起了世界各国学者和工程界的关注。目前,我国学者已在如下几个方面开展了有关研究:侵蚀介质在预应力混凝土中的侵蚀特性及侵蚀模型^[4-5];预应力钢丝及热处理钢筋的应力腐蚀敏感性^[6];预应力钢筋的锈蚀防护措施^[7-8]等;国外学者也对预应力钢筋的应力腐蚀特性^[9-12]以及锈蚀后预应力钢筋的力学性能作了有关研究^[13-14]。这些成果都成为预应力混凝土结构耐久性研究与应用的有益基础。但是,预应力钢筋(尤其是预应力钢绞线)在实际工作环境下的应力腐蚀敏感性和普通锈蚀特性以及锈蚀后的力学性能退化等方面还需进行广泛而深入的研究。

本文将以氯盐侵蚀环境为背景,通过混凝土内钢绞线与热轧带肋钢筋、热轧光圆钢筋锈蚀情况的对比试验,研究混凝土内钢绞线的锈蚀形态,并对其锈蚀机理进行分析;同时,对相关的锈蚀速率和锈胀开裂进行对比研究。希望本文的

工作能为深入研究预应力混凝土结构耐久性问题提供基础研究资料。

1 试验研究

1.1 试验方案

为探讨混凝土中钢绞线的锈蚀特性,本研究制作三组试件进行对比试验,分别为 $\phi^s 15.2(1 \times 7)$ 1860级钢绞线与HRB335 $\phi 16$ 级热轧带肋钢筋对比组(记A组)、 $\phi^s 15.2(1 \times 7)$ 1860级钢绞线与HPB235级 $\phi 16$ 热轧光圆钢筋对比组(记B组)以及从 $\phi^s 15.2(1 \times 7)$ 1860级钢绞线中取出的中心钢丝与HPB235级 $\phi 6$ 热轧光圆钢筋对比组(记C组)。所有钢筋均未施加应力。

每组制作两个试件,分别用于内掺盐(掺水泥重量5%的工业盐)和盐水浸泡(浓度10%)两种侵蚀方法。试件设计详见图1;试件及其内钢筋编号详见表1。所有钢筋在试件制作前均打磨掉表面浮锈并作了称重。

试件混凝土强度等级按C30设计,配比为:水:水泥:砂子:石子 = 0.44 : 1 : 1.35 : 2.36,其中水泥采用徐州淮海水泥厂生产的巨龙牌R325普通硅酸盐水泥,砂子取徐州本地产细河砂,石子取徐州本地产碎石,粒径10mm到20mm,水取徐州自来水厂供应的普通自来水。最后测得的平均立方体强度为36MPa。

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖二等奖(原载《铁道科学与工程学报》2008.No.5)

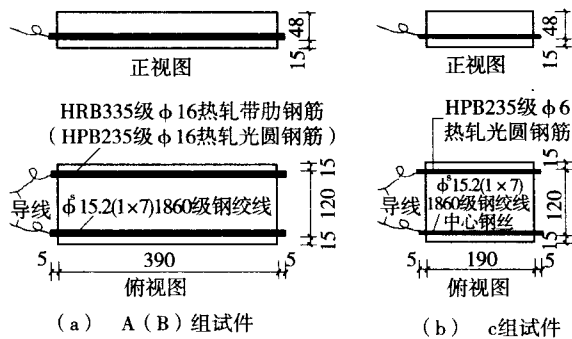


图1 试件设计

表1 试件及其内钢筋编号

试件组别	试件编号	侵蚀方式	试件内钢筋类型	试件内钢筋编号
A	A ₁	内掺盐	F ^s 15.2(1×7)1860级钢绞线	A ₁₁
			HRB335级F16热轧带肋钢筋	A ₁₂
	A ₂	外浸盐	F ^s 15.2(1×7)1860级钢绞线	A ₂₁
			HPB235级F16热轧带肋钢筋	A ₂₂
B	B ₁	内掺盐	F ^s 15.2(1×7)1860级钢绞线	B ₁₁
			HRB335级F16热轧光圆钢筋	B ₁₂
	B ₂	外浸盐	F ^s 15.2(1×7)1860级钢绞线	B ₂₁
			HRB335级F16热轧光圆钢筋	B ₂₂
C	C ₁	内掺盐	F ^s 15.2(1×7)1860级钢绞线中心钢丝	C ₁₁
			HPB235级F6热轧光圆钢筋	C ₁₂
	C ₂	外浸盐	F ^s 15.2(1×7)1860级钢绞线中心钢丝	C ₂₁
			HPB235级F6热轧光圆钢筋	C ₂₂

试件制作好以后，内掺盐试件先放入标养室养护33天，然后拿出放至自然环境中进行锈蚀，其间在养护9天后开始测试每根钢筋的锈蚀电流密度和锈蚀电位；盐水浸泡试件先在自然环境中洒水养护3天后再放入10%的盐水中浸泡，浸泡30天后拿出放至自然环境中进行锈蚀，并开始测试每根钢筋的锈蚀电流密度和锈蚀电位。

试验持续9个月，其间在开始两个月每5天测试一次锈蚀电流密度和锈蚀电位，之后由于锈蚀比较缓慢而且相对稳定，因而测试次数减少，改为每2周测试一次；测试仪器采用Corrosion Rate Meter (GECOR 8)；同时观察了锈胀开裂情况。试验完毕后进行了破形观察和除锈称重。

1.2 试验结果

试验分别对锈蚀电流密度、锈蚀形态、锈蚀失重及锈胀开裂等方面进行了测试或观察，下面分别予以阐述。需要交待的是，内掺盐试块和外

浸盐试块在锈蚀形态上未表现出明显差别；同组的两类试块中对应钢筋在锈蚀电流密度和锈蚀失重方面的对比关系也是一致的。因此，下面的阐述将不再涉及两类试块之间的对比关系，而仅以两类试块中同类钢筋的平均参数进行不同类钢筋之间的对比。

1.2.1 锈蚀电流密度

试件浇筑好的第二个月以后，进入了内掺盐试件和盐水浸泡试件同期测试锈蚀电流密度和锈蚀电位的阶段，其中所有4根钢绞线和2根HRB335级F16热轧带肋钢筋以及2根HPB235级F16热轧光圆钢筋各自的平均锈蚀电流密度的对比见图2。之后由于所有钢筋锈蚀比较缓慢而且相对稳定，因而测试次数减少，其结果由于时间跨度较大而未示于图中，但其总体规律与图示情况相同。

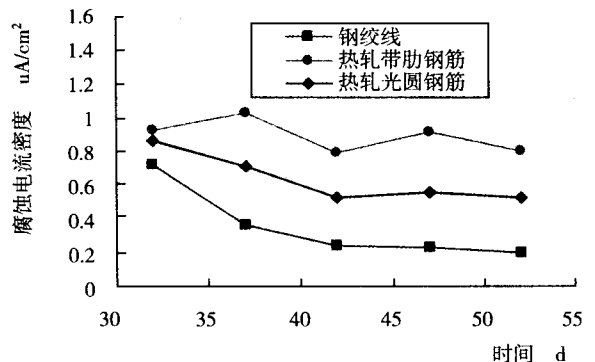


图2 钢绞线及其对钢筋的平均锈蚀电流密度对比

1.2.2 锈蚀形态

图3示意了钢绞线的截面构造。下文除非特别指明，凡提到钢绞线的锈蚀均指外表面锈蚀。

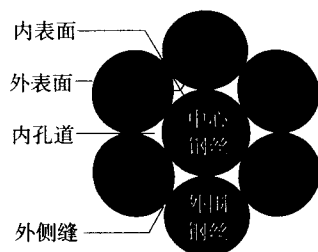


图3 钢绞线的横断面

将混凝土破形后，通过对暴露钢筋的直接观察和除锈后的再观察，发现本试验中各钢筋的锈蚀形态具有以下几个规律：

(1) 从钢筋的横截面来看：锈蚀面均分布

在面向混凝土保护层一侧，而背向保护层一侧基本上未产生锈蚀。详见图4。

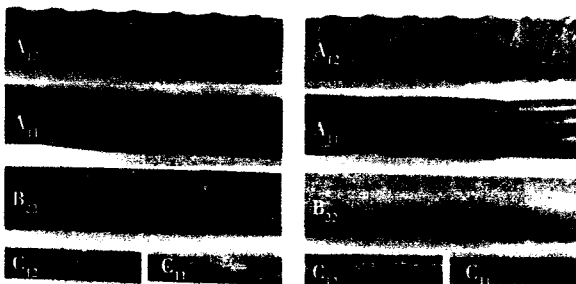
(2) 从面向混凝土保护层一侧的锈蚀沿钢筋纵向的分布来看，各钢筋的锈蚀均匀程度不同：热轧光圆钢筋相对最均匀，热轧带肋钢筋次之，钢绞线及其中心钢丝最不均匀，坑蚀现象严重。

从破形未除锈时的观察来看，热轧带肋钢筋和热轧光圆钢筋的面向保护层侧表面几乎全面锈蚀，整个被红锈覆盖，而钢绞线的面向保护层侧表面仅呈现出斑状锈蚀形态，锈蚀斑上主要为红锈，有些还带有绿锈和黑锈，其余地方锈蚀非常轻微（见图5）；钢绞线中心钢丝的面向保护层侧表面也呈现出斑状锈蚀形态，但没有钢绞线那么明显，锈蚀斑上主要为红锈。

从破形除锈后各钢筋面向保护层侧的观察来看，钢绞线及其中心钢丝表现了明显的坑蚀形态，大而深的蚀坑较多；热轧带肋钢筋也有坑蚀形态，但蚀坑大而浅，而且较少；热轧光圆钢筋坑蚀最不明显，表现为相对均匀的锈蚀形态。详见图6。

(3) 各钢绞线内表面全面锈蚀比较严重，而且表现为相对均匀锈蚀。

将外表面除锈的钢绞线劈散以后观察，发现所有钢绞线内部均全面锈蚀，而且锈蚀比较严重，锈蚀产物为红锈，参见图7；除掉红锈后观察，发现其锈蚀形态表现为相对均匀锈蚀。



(a) 面向保护层侧 (b) 背向保护层侧
图4 面向保护层侧与背向保护层侧钢筋锈蚀程度对比



图5 斑状锈蚀



图6 各种钢筋的典型锈蚀形态

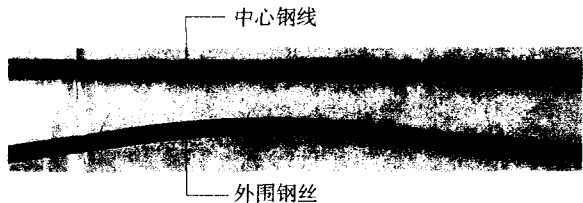


图7 钢绞线内表面全面锈蚀

1.2.3 锈蚀失重及锈胀开裂

为对比各类钢筋平均锈蚀程度的大小，通过锈蚀前后称重的方式，获得了失重率（因锈蚀而损失的重量与锈蚀前重量的比值，反映平均截面损失率）和单位表面失重量（因锈蚀而损失的重量与表面积之比，反映表面平均锈蚀速率）两类参数；同时，记录了破形时各钢筋锈胀裂缝的宽度。详见表2。

由表2可以看出，在外表面锈蚀失重率和单位外表面失重量两个方面，钢绞线和对应光圆钢筋以及带肋钢筋具有相同的对比关系：钢绞线的最小，光圆钢筋的次之，带肋钢筋的最大；钢绞线中心钢丝和对应光圆钢筋也具有相同的对比关系：钢绞线中心钢丝的小，光圆钢筋的大。这说明钢绞线及其中心钢丝因外表面锈蚀引起的平均截面损失率和平均锈蚀速率均小于对比钢筋的。

2 分析与讨论

2.1 基于钢筋化学成分和晶体结构的锈蚀倾向对比分析

试验用钢筋的化学成分详见表3。根据文献[15]，这些成分中，极少量的C ($\leq 0.05\%$) 与几乎全部的Si和Mn以固溶物的形式溶解于 α -Fe中，形成铁素体；其余的C与Fe形成 Fe_3C 的化合物—渗碳体，在含碳量不高（低于0.8%）的情况下，渗碳体常和部分铁素体以一定的比例（约1:10）机械混合成为珠光体；P、S等则以非金属夹

表2 锈蚀失重及锈胀开裂

钢筋类别 钢筋编号	Fs15.2(1×7)钢绞线				F16带肋钢筋		F16光圆钢筋		F5中心钢丝		F6光圆钢筋	
	A ₁₁	A ₂₁	B ₁₁	B ₂₁	A ₁₂	A ₂₂	B ₁₂	B ₂₂	C ₁₁	C ₂₁	C ₁₂	C ₂₂
外表面锈蚀失重率(%)	0.61	1.05	0.92	0.70	1.44	1.36	0.67	1.24	1.52	1.54	1.70	1.98
	平均0.82				平均1.40		平均0.96		平均1.53		平均1.84	
单位外表面失重量(g/m ²)	108	183	163	124	361	339	204	378	155	155	318	371
	平均145				平均350		平均291		平均155		平均345	
锈胀裂缝宽度(mm)	0	0.3	0	0	1.2	0.7	0	0.9	0	0	0	0

注：(1) 钢绞线和带肋钢筋的表面积根据几何关系分别按各自公称直径算得面积的1.314倍和1.16倍取用；

(2) 钢绞线外表面锈蚀量 Dm_e 按如下方法计算：称量锈前质量 m_0 、外表面除锈后质量 m_1 及内外表面全除锈后质量 m_2 ，($m_1 - m_2$)为内部锈蚀产物(成分为 $Fe_2O_3 \cdot H_2O$)的质量，其中非铁物质占37.1%的质量， m_1 中包含这部分质量，应予扣除，于是： $Dm_e = m_0 - [m_1 - (m_1 - m_2) \times 0.371]$ 。

表3 试验钢筋的化学成分

钢筋类别	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
1860级钢绞线	0.70 ~ 0.85	0.12 ~ 0.32	0.30 ~ 0.90	≤0.025	≤0.025
HPB235级热轧光圆钢筋	0.12 ~ 0.22	≤0.30	0.30 ~ 0.80	≤0.045	≤0.050
HRB335级热轧带肋钢筋	0.17 ~ 0.25	0.40 ~ 0.80	1.30 ~ 1.70	≤0.045	≤0.045

杂的形态分布于其中。

这些铁素体相、渗碳体相以及非金属夹杂相具有完全不同的化学成分和晶体学结构，为钢筋表面发生电化学锈蚀提供了条件：电位较低的铁素体相作为阳极，而分布于铁素体相中的电位较高的渗碳体相和非金属夹杂相作为阴极，二者共同形成许多个锈蚀微电池，微电池的数量取决于渗碳体相和非金属夹杂相的数量。

由于钢绞线中的渗碳体含量较高，因此，若锈蚀的其他条件都充分，则钢绞线具有更多的微电池阴极，因而更容易发生微电池锈蚀——相对均匀锈蚀，而且平均锈蚀速率也应该大于其他对比钢筋的，但是，在同混凝土接触的表面何以出现相反的结果呢？其原因需从各类钢筋表面不同的微观和宏观几何形态对其电化学环境产生的不同影响来分析。

2.2 钢筋表面的微观几何形态对其电化学锈蚀特性的影响

从微观来讲，混凝土中存在着很多微孔隙，其内有碱性的微孔液以及氧气，它们能使与其接触的钢筋表面迅速反应生成一层致密的、厚约 $(2 \sim 10) \times 10^{-9}m$ 的钝化膜(成分主要为 $Fe_3O_4 - gFe_3O_3$)^[16]，从而大大降低了钢筋表面继续溶解的速率，起到了保护作用。

另一方面，钝化膜的表面并不平整，存在着微缺陷^[17]。因而，微孔液中的活性阴离子 Cl^- 就会穿透钝化膜的微缺陷而在其与铁基体的界面上争夺钝化膜中的阳离子而使钝化膜溶解，从而又使其失去了保护作用，新鲜的铁基体暴露出来而成为局部锈蚀的蚀核。蚀核形成以后，蚀核处成为溶解阳极，蚀核外尚未被溶解的钝化区成为阴极，二者共同构成锈蚀电池。在这种锈蚀电池体系中，阳极溶解过程将使蚀核不断长大而成为蚀孔、蚀坑，有些相距很近的蚀孔还会连成一片，形成蚀片乃至大面积的全面锈蚀，同时，尚未被溶解的钝化区受到了阴极保护^[18]。



(a) 钢绞线中的钢丝

(b) 热轧带肋及热轧光圆钢筋

图9 Cl^- 侵入下混凝土中钢筋表面蚀核的形成

对钢绞线和其对比钢筋而言，一方面，由于钢绞线较热轧带肋钢筋和热轧光圆钢筋更易发生微电池锈蚀，所以在锈蚀初期也更易形成相对良好的钝化膜；另一方面，由于钢绞线中的钢丝是由高碳优质碳素结构钢盘条经冷拉、中间再结晶退火、冷轧而成^[19]，其表面相对平整、均匀，因而其钝化膜也相对更加均匀一些，而热轧带肋钢

筋和热轧光圆钢筋分别是由低碳低合金结构钢和普通低碳碳素钢热轧而成^[19]，它们的表面相对比较粗糙，因而其钝化膜也相对不均匀一些。如图8所示。这样，对热轧带肋钢筋和热轧光圆钢筋而言，Cl⁻穿透其钝化膜而引起钝化膜溶解的部位就更多，继而可以生成大量的蚀核，使阴阳极面积比相对更均衡一些，其结果是这些大量的蚀核因受到阴极氧扩散的控制而不会快速长大，总体上表现出相对全面的、均匀的锈蚀；而对钢绞线而言，Cl⁻穿透其钢丝钝化膜而引起钝化膜溶解的部位则少一些，因此，生成的蚀核也少一些，出现大阴极、小阳极的可能性就大一些，蚀核长大成蚀孔、蚀片以及蚀坑的几率也就大一些，总体上表现出相对局部的、不均匀的锈蚀。

2.3 钢筋的宏观几何形态对其锈蚀特性的影响

由于钢绞线和带肋钢筋的外表面存在着宏观的凹凸不平，这使得在浇注混凝土时容易在其表面附近形成亚微观的乃至宏观的气泡等缺陷，从而使锈蚀介质容易积聚在此处而引起局部的剧烈锈蚀^[20]。这也是钢绞线（包括带肋钢筋）外表面发生相对局部的、不均匀锈蚀的一部分原因。

钢绞线外表面发生相对局部的、不均匀锈蚀的同时，其内表面却发生了相对全面的、均匀的锈蚀，这需从钢绞线的宏观几何组成入手来分析。钢绞线（图3）是由6根外围钢丝紧密缠绕在1根中心钢丝周围而形成，这样便产生了6条彼此之间以及与外侧缝之间均封闭的内孔道，氧气和水可以自由进出这6条内孔道，于是在钢绞线内表面产生类似于空气中的相对全面的、均匀的锈蚀；而进入内孔道的氧气和水却不能透过侧缝到达外表面，因此，外表面仍然处于混凝土孔隙液的锈蚀介质中。为防止钢绞线内表面锈蚀，宜将其两端封闭处理。

2.4 钢筋的锈蚀率及锈蚀危险性分析

钢绞线外表面发生了最为严重的局部锈蚀，使得大面积的外表面受到了阴极保护，从而使其外表面平均锈蚀率低于热轧带肋钢筋和热轧光圆钢筋；另一方面，热轧带肋钢筋具有比热轧光圆钢筋更大的相对表面积，因而其锈蚀率也大于热

轧光圆钢筋的。

钢绞线外表面严重的局部锈蚀对其抗拉承载力产生了严重的削弱，这对正常工作状态下处于高应力状态的钢绞线而言会造成极其严重的后果；对于热轧带肋钢筋和热轧光圆钢筋，其局部锈蚀相对轻微，主要表现为相对全面的、均匀的锈蚀，这对其抗拉承载力的影响较小，而对其粘结性能却有较大的影响。

3 结论

（1）面向保护层一侧的钢筋表面能得到充分的氧气和水而首先锈蚀，背向保护层一侧的钢筋表面则受到阴极保护作用而不易锈蚀。

（2）各类钢筋的表面锈蚀形态和均匀程度不同：钢绞线及其中心钢丝的锈蚀均匀性最差，具有严重的局部锈蚀——坑蚀形态；热轧带肋钢筋的次之；热轧光圆钢筋的相对最均匀、全面。其主要原因是：（a）钢绞线钢丝表面最易形成钝化膜，而且形成的钝化膜最平整、完备，这使氯离子穿透钝化膜而建立蚀核的几率较小，于是，较少的蚀核充分发生闭塞电池锈蚀，继而迅速长大为蚀孔、蚀坑，而未被穿透的大面积钝化膜区则因受到阴极保护而未锈蚀；（b）钢绞线和热轧带肋钢筋的表面存在着宏观的凹凸不平，这使得在浇注混凝土时容易在其表面附近形成亚微观的乃至宏观的气泡等缺陷，从而使锈蚀介质容易积聚在此处而引起局部的剧烈锈蚀。

（3）7股钢绞线内部有6条彼此之间以及与外侧缝之间均封闭的内孔道，氧气和水可以从端头自由进出，因而在钢绞线内表面会产生类似于空气中的相对全面的、均匀的锈蚀。为防止钢绞线内表面锈蚀，宜将其两端封闭处理。

（4）从化学成分和晶体结构上来看，钢绞线的含碳量最大，渗碳体相最多，微电池锈蚀的阴极也最多，因而锈蚀倾向最为显著；但由于钢绞线的局部锈蚀最为严重，因而其平均表面锈蚀率却小于热轧带肋钢筋的和热轧光圆钢筋的。

（5）钢绞线表面严重的局部锈蚀将使其抗拉承载力受到严重削弱，这对正常工作状态下处于高应力状态的钢绞线而言会造成极其严重的后果。

参考文献

- [1] Schupack M. A survey of the durability performance of post-tensioning tendons[J]. *ACI Journal*, 1978, 75(10): 501-510
- [2] Schupack M, Suarez M G. Some recent corrosion embrittlement failures of prestressing systems in the United States[J]. *PCI Journal*, 1982, 27(2): 38-55
- [3] Walter Podolny Jr. Corrosion of prestressing steels and its mitigation [J]. *PCI Journal*, 1992(5): 34-55
- [4] 涂永明, 吕志涛. 应力状态下混凝土结构的盐雾侵蚀试验研究[J]. *工业建筑*, 2004, 34(5): 1-3
TU Y M, LV Z T. The experimental research on prestressed concrete structure under salt fog corrosion environment[J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(5): 1-3
- [5] 涂永明, 吕志涛. 预应力混凝土试件碳化试验及碳化深度预测模型研究[J]. *工业建筑*, 2006, 36(1): 47-50
TU Y M, LV Z T. Research on experiment of prestressed concrete structures in carbonation environment and the prediction mode of carbonation depth[J]. *Industrial Construction*, 2006, 36(5): 47-50
- [6] 杨宗放, 方先和. 现代预应力混凝土施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
YANG Z F, FANG X H. Construction of Modern Prestressed Concrete[M]. Beijing: China Construction Industrial Publisher, 1993
- [7] 蔡跃, 黄鼎业, 熊学玉. 影响预应力混凝土结构耐久性的因素和对策[J]. *建筑技术*, 2003, 34(5): 353-354
CAI Y, HUANG D Y, XIONG X Y. Factors affecting durability of prestress concrete and solution[J]. *Architecture Technology*, 2003, 34(5): 353-354
- [8] 刘立军, 王树义, 朱龙. 预应力钢材的腐蚀与防护[J]. *金属制品*, 2004, 30(2): 7-10
LIU L J, WANG S Y, ZHU L. Corrosion and defence of PC steel products[J]. *Steel Wire Products*, 2004, 30(2): 7-10
- [9] Toribio J. Hydrogen embrittlement of prestressing steels: the concept of effective stress in design[J]. *Materials & Design*, 1997, 18: 81-85
- [10] Toribio J. Role of crack-tip residual stresses in stress corrosion behaviour of prestressing steel[J]. *Construction and Building Materials*, 1998, 12: 283-287
- [11] Schroeder R M, Müller I L. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement susceptibility of an eutectoid steel employed in prestressed concrete[J]. *Corrosion Science*, 2003, 45: 1969-1983
- [12] Proverbio E, Longo P. Failure mechanisms of high strength steels in bicarbonate solutions under anodic polarization[J]. *Corrosion Science*, 2003, 45: 2017-2030
- [13] Vehovar L, Kuhar V, Vehovar A. hydrogen-assisted stress-corrosion of prestressing wires in a motoway viaduct[J]. *Engineering Failure Analysis*, 1998, 5(1): 21-27
- [14] Valiente A. Stress corrosion failure of large diameter pressure pipelines of prestressed concrete[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2001, 8: 245-261
- [15] 王福川, 官来贵. 建筑工程材料[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992
WANG F C, GUAN L G. Material of civil engineering[M]. Beijing: Scientific and Technical Literature Publisher, 1992
- [16] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998
HONG D H. Corrosion and protection of steel bars in concrete [M]. Beijing: China Railway Publisher, 1998
- [17] 汪鹰. 缓蚀剂对钢筋腐蚀的抑制及其机理的研究[D]. 南京: 南京化工大学, 1997
WANG Y. Research on restrainability of steel bar's corrosion with inhibitor and the mechanism[D]. Nanjing: Nanjing University of Chemical Engineering, 1997
- [18] 孙跃, 胡津. 金属腐蚀与控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
SUN Y, HU J. Metal Corrosion and the Control[M]. Haerbin: Harbin Institute of technology Publisher, 2003
- [19] 樊云昌, 曹兴国, 陈怀荣. 混凝土中钢筋腐蚀的防护与修复[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001
FAN Y C, CAO X G, CHEN H R. Corrosion protection and repair of steel bars in concrete[M]. Beijing: China Railway Publisher, 2001
- [20] 耿欧, 袁迎曙, 李富民等. 混凝土中变形与光圆钢筋腐蚀速率试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2006, 35(4): 488-491
GENG O, YUAN Y S, LI F M, et al. Experimental study on corrosion rates of deformed and plain bars in concrete[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 35(4): 488-491

(上接第34页)

参考文献

- [1] Fuller R B. Tensile-integrity structures: U.S., 3063521[P]. 1962-11-13
- [2] Nishimura Y. Static and dynamic analyses of tensegrity structures [D]. San Diego: University of California, 2000
- [3] Sultan C. Modeling, design, and control of tensegrity structures with applications[D]. West Lafayette: Purdue University, 1999
- [4] Pugh A. An Introduction to Tensegrity[M]. Berkeley: University of California Press, 1976
- [5] Pellegrino S, Calladine C R. Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1986, 22 (4): 409-428
- [6] Pellegrino S. Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1993, 30 (21): 3025-3035
- [7] Geiger D H, Stenfaniuk A, Chen D. The design and construction of two cable domes for the Korean Olympics[C]/Proc. IASS-ASCE, Osaka: [s.n.], 1986, 2: 265-272
- [8] Levy M P. The Georgia dome and beyond achieving light weight-long span structures[C]/Proc. IASS-ASCE, Atlanta: [s.n.], 1994: 560-562
- [9] Yuan Xingfei, Dong Shilin. Nonlinear analysis and optimum design of cable domes[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24 (7): 965-977
- [10] 袁行飞, 董石麟. 索穹顶结构的新形式及其初始预应力确定[J]. *工程力学*, 2005, 22 (2): 22-26 (Yuan Xingfei, Dong Shilin. New forms and initial prestress calculation of cable domes[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22 (2): 22-26 (in Chinese))