

模型锚杆腐蚀耦合效应试验研究

曾宪明¹ 李长松² 赵健¹ 冀文政¹ 肖玲¹ 梁仕发¹ 汪剑辉¹

(1. 总参工程兵科研三所 洛阳 471023 2. 焦煤集团朱村矿 焦作 454191)

摘要: 锚杆腐蚀耦合效应问题研究是锚杆耐久性研究的难点问题之一。本文概述了早期埋设在工程现场的尚在研究锚杆腐蚀耦合效应的一批缩尺锚杆的腐蚀环境、试验方法、试验结果和结论,可供读者参考。

关键词: 模型锚杆 腐蚀 耦合效应 试验研究

1. 引言

锚固类结构是指锚杆、锚索、土钉、复合土钉和加筋土这一类岩土工程加固、支护结构。

国外应用这类技术较早,因而对这些方法的耐久性问题的观测和认识也较早^[1-5]。锚杆是锚固类结构中应用历史最长的。在上世纪60年代末、70年代初,法国、瑞士、捷克、澳大利亚先后颁布了地层锚杆的技术规范、锚索技术条例;80年代末、90年代初又制定了土钉技术指南。这些技术标准充分考虑了锚杆锚索和土钉在腐蚀环境中的防护问题,对其设计和施工作了严格规定。1975年挪威岩石爆破技术研究所(Norwegian Institute of Rock Blasting Techniques)的R. Schach 等出版了《岩石锚杆实用手册》(Rock Bolting—a Practical Hand book) (1979年再版)。上世纪90年代,德国出版了包括土锚和岩锚在内的系列丛书,如1982年由Hanna, T. H. 编撰的《Foundation in Tension Ground Anchors》,和B. Stillborg编撰的《Professional Users Handbook for Rock Bolting》,对基础工程中的拉锚(索)和岩石锚杆的全方位防腐提出了明确要求。1974~1981年,美国ASTM委员会(American Society for Testing and Materials)出版了一套八本专门论述地上地下各种腐蚀对金属材料作用效应的丛书,其中包括自然环境腐蚀、应力腐蚀和防蚀措施等,具有较大影响。美国M. J. Turer对永久性防腐土钉墙进行了系统的试验研究,提出了一种高强、耐腐、经济的聚脂织带材料

聚脂织带材料替代钢筋土钉,效果甚好。但对这种土钉材料的使用寿命未提出任何数据,仍以“永久性”贯之。德国的R. Eligshausen和H. Spieth对插入式螺纹钢筋的连接结构性能进行了研究,指出这种钢筋如果孔眼不净、粘结不牢固,其使用寿命可由100年减至75年。其推算依据和细节均未给出。我国对混凝土结构耐久性研究已做了较多工作^[6-10],但对锚固类结构的耐久性和使用寿命问题的研究所做工作不多。1985.7~1987.7,雷志梁等以“砂浆锚杆的腐蚀与防护研究”为题,开展了锚杆使用寿命问题初步研究,得出了一些有益结果,但现场取样尚不广泛,室内试验欠系统深入。张勇等于1999年根据自身长期从事预应力锚索锚制、设计和施工的经验,并借鉴国外技术标准,编制了中华人民共和国国家军用标准《岩土工程预应力锚索设计与施工技术规范》(GJB3635-99),其中专辟一章,对预应力锚索的“腐蚀与防腐”提出了要求。不过所提要求带有定性性,尚缺乏足够的理论基础和试验依据,仍然无法对锚索的设计寿命、残余寿命进行预测,所提防护措施要求多建立在工程经验基础之上。1996~1997年,周世峰等开展了“地下工程水泥砂浆在腐蚀环境下的耐久性试验研究”,所进行的是单因素室内腐蚀试验^[11-12]。我国对锚固类结构的安全性及耐久性问题的研究尚在起步阶段,锚固类结构的耐久性问题非常突出,其腐蚀环境与不同的土建结构工程有较大差异,不可等同视之,某些研究方法和成果可以借鉴,

但不能（也不可能）替代之^[13]。

综上所述，国外对锚固类结构的安全性及耐久性问题已经做了许多工作，国内所做工作相对较少。但无论国内和国外，关于特长周期条件下锚固类结构耐耦合因素腐蚀的现场试验成果均未见发表。

1986年5月，总参工程兵科研三所于河南省焦作市朱村矿的腐蚀环境中埋设了一批施加不同等级预应力的试验锚杆和缩尺锚杆。试验周期分别为1a、5a、和10a。对1a期的缩尺锚杆进行试验后，由于经费原因，对5a和10a期的一直未进行试验。直至2003年7月在国家自然科学基金资助下，才将这批缩尺锚杆挖掘出来，并进行了较全面的测试。本文概述了这批缩尺锚杆的主要试验结果和结论。

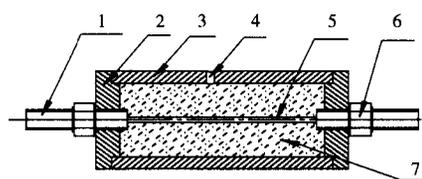
2. 试验方案

缩尺锚杆试件材料为Q235A钢，车制后直径为3mm。为了给试件施加预应力，另采用相同钢材制作一个直径为40mm，长度为60mm的钢筒，钢筒体中部钻有一个灌浆用小孔。将试件穿过钢筒，套上螺母，采用加力搬手对缩尺锚杆试件施加预应力（钢筒同时承受预压力）。接着通过钢筒体上小孔对试件进行注浆。所注砂浆水灰比为0.55，灰砂比为1:2.5，水泥标号为原325R，见图1a。

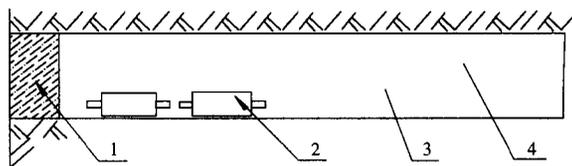
将加工组装完毕的试件（共59件）运至试验现场，置于钻孔内并用水泥砂浆对孔口进行封堵（图1b）。17a后对该批缩尺锚杆进行挖掘，并对以下条件及参数进行测试：①缩尺锚杆及钢筒体的腐蚀环境；②缩尺锚杆的腐蚀状

况；③缩尺锚杆及钢筒体的强度损失率；④各种因素对缩尺锚杆及钢筒体使用寿命的影响程度。

缩尺锚杆试件模拟的是锚杆抗化学腐蚀和应力腐蚀耦合效应的一种理想工况（施工质量良好），钢筒体模拟的则是锚杆抗化学腐蚀和应力腐蚀耦合效应的不良工况（注浆不饱满导致孔内锚杆钢筋局部或大部裸露），同时钢筒体相对于锚杆试件又可起到反力架的作用。



1-拉紧接头；2-端盖；3-套筒；4-注浆孔；5-缩尺锚杆；6-锁紧螺母；7-水泥浆
a缩尺锚杆与钢筒体试件



1-混凝土；2-试件；3-孔；4-岩石

b试件在现场的安装

图1 试件的制作与安装

预应力缩尺砂浆锚杆试件编号见表1。

由于历史原因，当时没有预备进行与相应钢筒体和缩尺锚杆试件作对比的试件。为了进行比较，笔者不得已选用相同型号的钢材制作试件（即标注“使用年限为零”者）进行了对比试验。由于试件不是取自同一母材，因此对比试验结果仅供参考。即使不作比较，试验本身的意义读者仍可揣摸。

表1 预应力缩尺砂浆锚杆试件编号

砂浆种类	钢筋保护层类型	1a期预应力/kg				17a期预应力/kg							
		80		150		80		150		80		150	
普通砂浆	无	12	13	43		35	40	44	45	36	37	46	47
普通砂浆	氯磺化聚乙烯涂料	5	8	1	2	19	34	3	9	30	39	4	17
普通砂浆	丙烯酸水泥浆涂料	28	29	6	7	14	21	10	11	29	33	20	26
掺外加剂砂浆	无	25	31	15	16	41	50	18	22	32	49	23	24
丙烯酸砂浆	无	53	60	38	62	52	57	59	61	51	55	54	56

3. 测试结果

3.1 缩尺锚杆腐蚀环境测试

缩尺锚杆的腐蚀环境主要指温度、湿度和地下水中各种腐蚀物含量。测试结果为:

- (1) 温度: 19.5℃;
- (2) 湿度: 93%~95%;
- (3) 地下水腐蚀物含量测试结果见表2和表3。

表2 朱村煤矿地下水腐蚀物含量

化学成分	含量
总酸度	0.318
游离二氧化碳 (CO ₂)	140 mg/L
侵蚀性二氧化碳 (CO ₂)	0.00 mg/L
溶解氧 (O ₂)	0.30 mg/L
酸碱度PH	7.44

表3 朱村煤矿地下水腐蚀物含量

离子类别	离子含量	
	毫克/升	毫克当量/升
Ca ²⁺	88.18	4.40
Mg ²⁺	38.04	3.13
Cl ⁻	24.3	0.685
SO ₄ ²⁻	5.28	0.110
CO ₃ ²⁻	0.00	0.00

3.2 钢管体试件腐蚀状况测试

(1) 钢管体试件坑蚀深度

朱村矿钢管体试件坑蚀深度测试结果见表4。相应于表4的坑蚀深度柱状图见图2。

(2) 朱村煤矿孔内裸露圆形钢管体的失重、失重率、平均腐蚀速率和宏观描述

朱村煤矿锚孔内裸露钢管体试件腐蚀状况测试结果见表5。试件失重、失重率和平均腐蚀速率变化曲线见图3。

表4 朱村煤矿钢管体试件坑蚀深度

序号	试件编号	各次坑蚀深度实测结果 /mm				
		1	2	3	4	5
1	3	1.26	0.50	0.36	0.44	
2	4	0.63	0.37	0.52		
3	9	0.39	0.12	0.16		
4	10	2.30	2.69	1.38		
5	11	0.95	0.98	1.45	1.00	
6	17	1.73	3.56	2.50		
7	18	0.93	0.62	0.56	0.25	
8	20	0.44	0.35	0.25	0.20	
9	21	3.90	3.10	2.15	3.40	
10	22	0.70	1.50	0.76		
11	23	0.55	0.46	0.38	0.32	0.50
12	24	0.22	0.32	0.36		
13	26	1.12	1.55	2.04		
14	29	1.44	1.37	3.03	2.44	1.35
15	32	3.50	3.15	2.75	1.45	
16	33	1.90	2.00	1.42	1.14	0.70
17	34	1.92	1.06			
18	35	2.78	2.22	1.81	1.60	1.22
19	36	1.07	0.31	0.45	0.57	
20	37	3.45	3.04	3.24	1.85	2.90
21	39	1.36	1.50	2.41	1.74	
22	40	0.90	0.56	1.30		
23	44	1.37	2.70	0.68	0.90	1.34
24	46	2.70	1.31	4.00	2.32	2.2
25	47	1.05	1.63	1.16	1.00	0.62
26	49	0.85	0.45	0.21		
27	50	0.43	0.93	1.13	0.98	
28	51	0.80	1.61	1.15	0.52	0.72
29	52	0.65	0.25	0.15		
30	54	0.25	1.10	1.05	0.75	
31	55	1.03	1.79	0.96	0.91	0.66
32	61	1.62	2.37	1.08	1.43	

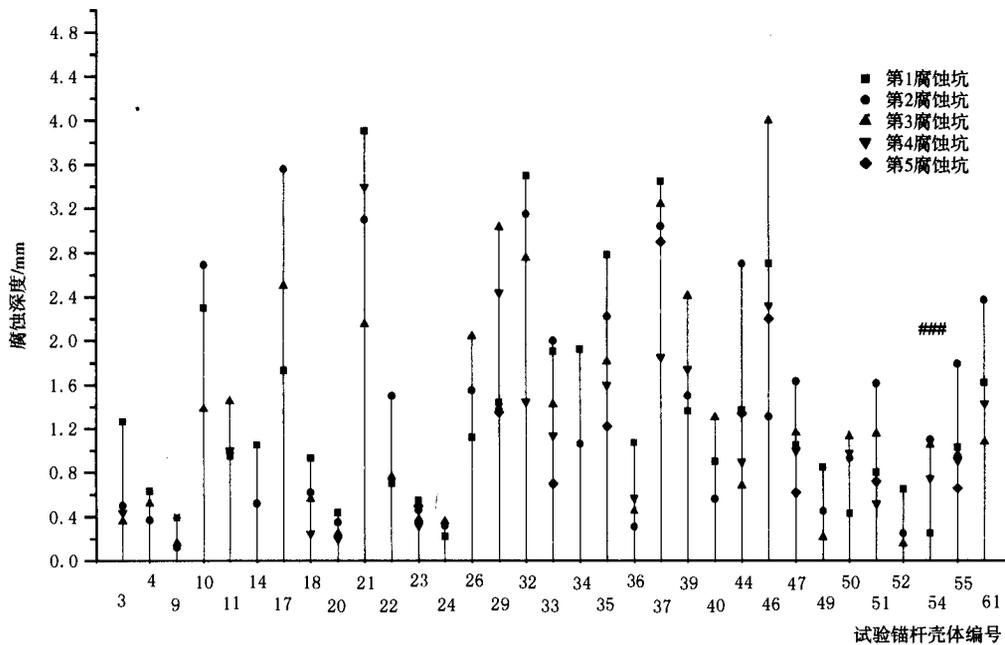


图2 朱村矿孔内裸露圆形钢管体坑蚀深度柱状图

表5 朱村煤矿锚孔内裸露钢管体试件测试结果

序号	试件编号	失重/g	失重率/%	平均腐蚀速率/mm/a	锈蚀状况或面积	
					外壁	内壁
1	3	16.99	0.080	0.072	严重锈蚀	80%
2	4	3.36	0.016	0.014	严重锈蚀	30%
3	9	17.39	0.082	0.074	连续锈迹	40%
4	10	11.32	0.054	0.048	一处坑蚀	80%
5	11	18.15	0.086	0.077	两处坑蚀	20%
6	14	4.15	0.019	0.017	两处坑蚀	80%
7	17	12.63	0.059	0.053	带状点蚀	70%
8	18	3.32	0.016	0.014	带状点蚀	60%
9	20	12.73	0.060	0.054	多处锈蚀	90%
10	21	15.46	0.073	0.065	严重坑蚀	80%
11	22	17.34	0.082	0.073	锈蚀均匀	60%
12	23	8.8	0.042	0.037	锈蚀严重	40%
13	24	1.16	0.005	0.004	锈蚀轻微	10%
14	26	10.55	0.050	0.045	两处坑蚀	10%
15	29	20	0.095	0.085	严重坑蚀	98%
16	32	15.85	0.075	0.067	严重锈蚀	
17	33	7.14	0.034	0.030	一处坑蚀	10%
18	34	3.72	0.018	0.016	三处坑蚀	40%
19	35	25.83	0.122	0.110	多处坑蚀	80%
20	36	2.54	0.012	0.011	一侧锈蚀	70%
21	37	20.57	0.097	0.087	严重坑蚀	60%
22	39	8.57	0.041	0.036	一侧坑蚀	10%
23	40	1.66	0.008	0.007	少许点蚀	50%
24	41	8.21	0.039	0.035	均匀锈蚀	5%
25	44	10.4	0.049	0.044	一侧坑蚀	90%
26	46	19.04	0.090	0.081	两处坑蚀	60%
27	47	6.18	0.029	0.026	带状点蚀	60%
28	49	11.67	0.055	0.049	少许点蚀	80%
29	50	12.69	0.060	0.054	锈蚀轻微	60%
30	51	10.85	0.051	0.046	一侧坑蚀	40%
31	52	7.83	0.037	0.033	轻微锈蚀	10%
32	54	7.92	0.038	0.033	一侧坑蚀	40%
33	55	11.3	0.054	0.041	多处锈迹	20%
34	61	9.94	0.047	0.042	三处坑蚀	80%

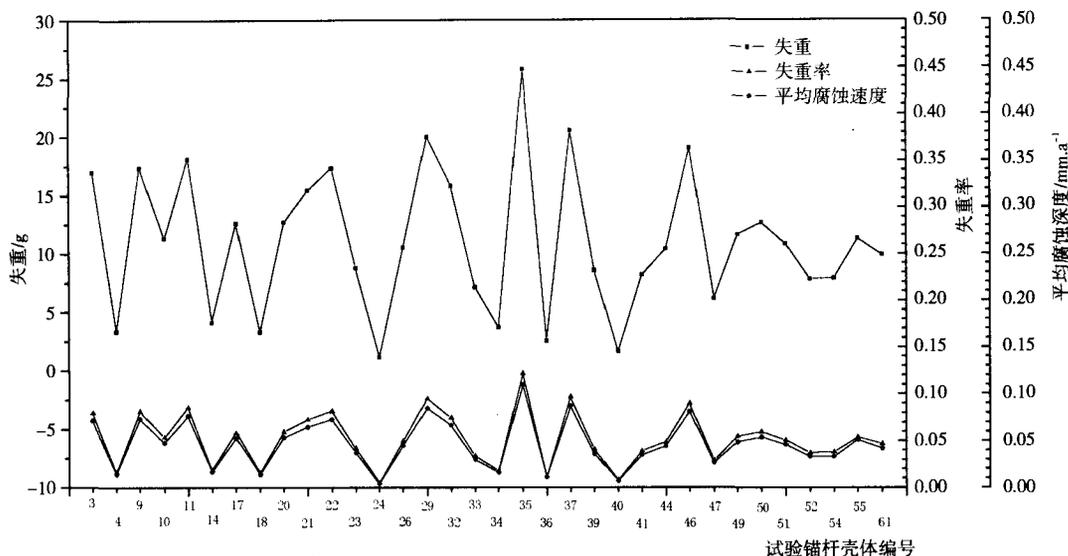


图3 朱村矿孔内裸露圆形钢筒的失重、失重率和平均腐蚀速率变化曲线

3.3 缩尺锚杆的宏观结果与强度损失率

(1) 缩尺锚杆宏观结果

将现场的缩尺锚杆，卸去紧固螺母，释放掉预应力，剖开砂浆及钢筋保护层后发现：杆体表面无锈迹，同使用年限为零的钢筋相比，只是无光泽。据此判定，该批缩尺锚杆，基本

上不存在失重问题。

(2) 缩尺锚杆的强度损失率

朱村煤矿施加不同预应力缩尺锚杆拉伸试验结果分别见表6、7、8（55*和54*不参与均值，L为缩尺锚杆长度）。

表6 朱村煤矿缩尺锚杆拉伸试验结果（预加力为80kg的试件）

缩尺锚杆编号	使用年限/a	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	累积位移/mm	破坏状况	砂浆种类	钢筋保护层
37	17	1.73	2.78	8.95	0.73l处断裂*	普通砂浆	无
30	17	1.80	2.83	8.70	端部处断裂	普通砂浆	氯磺化聚乙烯涂料
33	17	1.90	2.77	10.08	0.98l处断裂*	普通砂浆	丙烯酸水泥浆涂料
49	17	2.52	2.98	7.35	端部处断裂	掺外加剂砂浆	无
55*	17	2.93	3.07	2.68			
均值	17	1.988	2.840	8.770			

*l为缩尺锚杆长度。下同。

表7 朱村煤矿缩尺锚杆拉伸试验结果（预加力为150kg的试件）

缩尺锚杆编号	使用年限/a	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	累积位移/mm	破坏状况	砂浆种类	钢筋保护层
47	17	1.66	2.63	7.35	0.95l处断裂*	普通砂浆	无
17	17	2.26	2.83	6.99	0.8l处断裂*	普通砂浆	氯磺化聚乙烯涂料
26	17	2.56	3.00	6.79	端部处断裂	普通砂浆	丙烯酸水泥浆涂料
23	17	1.67	2.55	6.82	0.7l处断裂*	掺外加剂砂浆	无
54*	17	3.03	3.19	4.90	0.93l处断裂*	丙烯酸砂浆	无
均值	17	2.038	2.753	6.988			

表8 朱村煤矿缩尺锚杆拉伸试验结果（无预加力、无腐蚀、使用年限为零的试件）

缩尺锚杆编号	使用年限/a	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	累积位移/mm	破坏状况	砂浆种类	钢筋保护层
试件1	0	3.24	3.74	6.4	0.93l处断裂*	无	无
试件2	0	2.94	3.53	5.47	0.93 l处断裂*	无	无
试件3	0	2.94	3.63	6.36	0.93 l处断裂*	无	无
均值	0	3.040	3.633	6.077			

(3) 锚孔内裸露圆形钢筒体的强度损失率
朱村煤矿锚孔内裸露圆形钢筒体强度损失率的对比试验结果见图4。

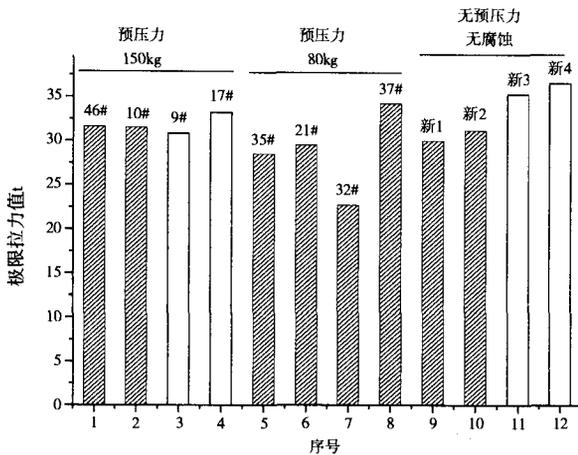


图4 裸露圆形钢筒体强度损失率的对比试验结果

相应于表6、表7和表8的缩尺锚杆破坏荷载和位移柱状图见图5和图6。

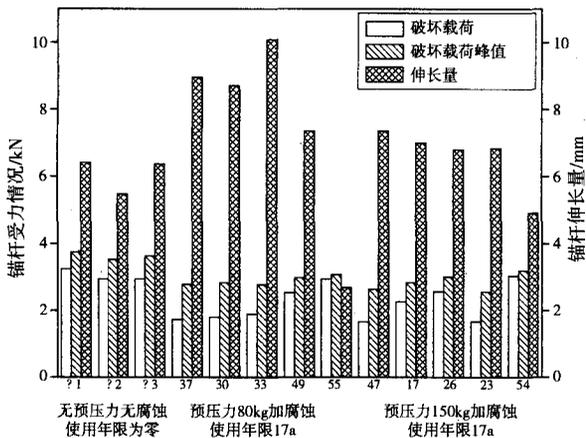


图5 朱村煤矿缩尺锚杆破坏荷载和位移柱状图

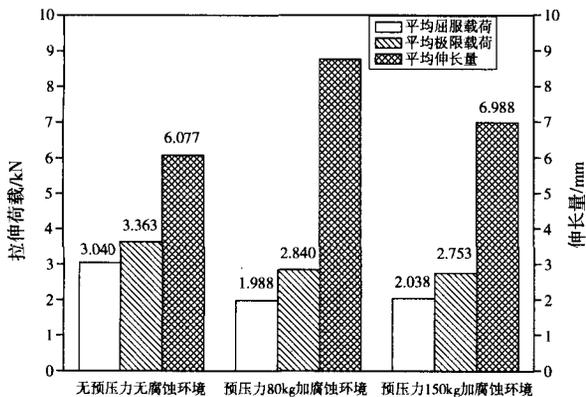


图6 朱村煤矿缩尺锚杆平均破坏荷载和平均位移柱状图

4. 几点分析

4.1 环境因素的影响

(1) 地层的腐蚀等级一般分为4级，即很

强、强、中等和弱。据表3知，朱村煤矿地下水PH值为7.44，介于腐蚀等级为中等的PH值6.5~8.5之间，可初步认为其腐蚀等级为中等。但朱村煤矿地下水中CO₂含量高达14.0mg/L，比属于很强腐蚀等级的5mg/L高出约2倍；而朱村煤矿地下水中SO₄+Cl为29.58mg/L，该值又处于弱腐蚀等级<100mg/L的范围之内。根据地层及地下水的实测值至少有两项涵盖相应的腐蚀等级时，即可将该地层划分为该腐蚀等级的一般原则，可以确定朱村煤矿现场地层的腐蚀等级为中等。

(2) 温度是腐蚀的催化因素。温度愈高，腐蚀速率愈大。通常腐蚀速率与温度之间呈指数关系。在本项试验中，埋设现场温度变化很小，常年保持恒定。因此，对锚杆腐蚀速率影响不大。

(3) 湿度对腐蚀的影响很大。空气中水分对金属溶解的离子化过程及介质的离子化都是必要条件。水分除了参与腐蚀的基本过程之外，对于涉及介质腐蚀的其他因素几乎都有影响。但是介质含水量很高时，氧的扩散渗透受到阻碍，腐蚀减轻，含水量增加，介质电阻率减小，氧浓差电池的作用也增加，在湿度为70~90%时出现最大值。当介质湿度再增加并接近饱和时，氧浓差作用减小。现场湿度接近饱和，其对锚杆的腐蚀速率会有所降低。

(4) 对现场地下水取样化验结果进行综合分析可知：PH值显示为中性，总酸度值偏高，氯离子含量在阴离子含量中最高。通常土壤中含盐量约为80~1500ppm，在土壤中的阳离子一般是钾、钠、镁和钙离子，阴离子是碳酸根、氯和硫酸根离子。其含盐量越大，电导率就越高，从而提高了对介质的腐蚀性。因此，氯离子对锚杆腐蚀具有显著作用。

4.2 锚孔内裸露钢筒体腐蚀状况分析

分析图2和表3知：

(1) 锚孔内裸露钢筒体是为给缩尺锚杆施加预应力而设计制作的，因而其腐蚀状况代表了施工质量不佳、局部无砂浆包裹这种工况的工程锚杆的腐蚀。因此研究它的腐蚀同样是十

分重要的。

(2) 单根钢筒体的坑蚀不均匀, 所有钢筒体的坑蚀状况也不相同, 坑蚀深度在0.15~4.0mm之间。但是, 只有最大坑蚀深度才能作为控制性指标参数。据此推知, 经过17年腐蚀, 一根 $\phi 40$ 的钢筒体, 业已损失了10%的直径和19%的截面积。

(3) 虽然每根钢筒体的坑蚀深度和分布形态各不相同, 但仍有比较一致的分布规律, 即所有坑蚀现象均比较集中地发生在钢筒体与孔壁接触部位及其附近, 其中部分钢筒体甚至因锈蚀与孔壁发生了粘接。对该现象的一种可能解释是接触部位比较潮湿, 且含腐蚀性物质, 更易于使金属发生腐蚀。

(4) 编号为1、2、5、6、7、8、12、13、15、16、25、27、28、31、38、43、53、60、62的19根钢筒体在一年龄期时检测发现: 钢筒体完好, 没有坑蚀现象发生。这表明, 坑蚀现象有一个渐进的过程, 任何单位时间内发生的坑蚀深度并不相等。因此, 不宜采用平均速率的概念推断结构及构件的使用寿命。

(5) 在钢筒体上的注浆用小孔周围, 由于渗漏水出现, 腐蚀更加严重。坑蚀现象在所有测试的钢筒体上都存在, 情况十分普遍, 以致于存在无法进行全部测量的大面积点蚀的情况。

4.3 钢筒体的失重、失重率和平均腐蚀速率

分析表4和图3, 可得出以下几点认识:

(1) 失重是指单根钢筒体因腐蚀所失去的重的绝对值。即使是同一现场, 腐蚀环境和条件大体相同, 钢筒体的失重也是极不均匀的。失重在5g以下者为7根, 占总根数的20.6%; 失重在15g以上者为9根, 占总根数的26.5%; 其余18根失重均在5~15g之间, 占总根数的52.9%。失重的概率分布曲线大体为正态分布, 即在同一现场, 钢筒体腐蚀较严重和较轻微的均较少, 介于二者之间的居多。这是更为具体的腐蚀环境差异造成的。

(2) 失重率是指单根钢筒体所失去重量同

该根钢筒体原重量之比。因此, 失重不均匀, 失重率也不均匀, 而且其概率分布曲线大体为正态分布, 即失重率最高者1根为0.122%, 最低者1根为0.005%, 余者均散布其间。失重率最高者是最低者的24.4倍, 由此可见同一现场环境下的腐蚀差异之大。

(3) 平均腐蚀速率的计算公式如下:

$$V = \frac{365 (W_1 - W_2)}{2 \pi R (l + R) T \rho} \quad (1)$$

式中: V 为钢筋(钢绞线)腐蚀速率/mm/a; W_1 , W_2 分别为钢筋(钢绞线)腐蚀前后的重量/g; π 为圆周率/3.1415926; R 为钢筋(钢绞线)试件的半径/mm; l 为钢筋(钢绞线)试件的长度/mm; T 为钢筋(钢绞线)试件的腐蚀时间/d; ρ 为钢筋(钢绞线)试件的比重/g/mm³。

式(1)是以失重的概念推导建立起来的, 只是另增加了一个时间因子, 因而其实测曲线也具有与失重率规律一致的分布形态。平均腐蚀速率是在均匀腐蚀的假定基础上建立的, 而实际腐蚀状态是极不均匀的, 因此其计算结果是偏于危险的。就单根钢筒体而言, 失重率也是一个平均值的概念, 这是二者曲线分布形态一致且差异甚小的主要原因。分析认为, 最具有实际意义的是实测到的最大坑蚀深度及其与对应试件的腐蚀速率。

4.4 钢筒体强度损失率

分析图4知:

(1) 12根钢筒体断裂拉力峰值大小不一, 较为分散。但观察其破坏形态, 发现其中有8个试件的断裂发生在两端的螺纹连接处或焊缝处, 表明螺纹使试件在该部位强度降低, 或焊缝强度不足导致数据有一定程度失真。

(2) 编号为9#和17#的钢筒体, 以及用作对比试验的使用年限为零的3#和4#钢筒体, 其断裂发生在杆体中间部位, 两端焊缝强度足够, 试验数据具有较高的置信度。

(3) 经必要误差修正后知, 现场钢筒体的强度损失率为7.55~13.26%。以偏于安全考虑,

17a期的强度损失率的标准值宜为14%。

4.5 现场缩尺锚杆的破坏荷载与位移

分析表5~表7和图5~图6可以看出:

(1) 在各种类型的砂浆保护层中, 只有丙烯酸砂浆防护效果最佳, 它使缩尺锚杆具有最大的屈服荷载及其极限荷载, 并具有最小的位移量。其他种类砂浆锚杆的均相差无几, 且均无锈迹。这表明, 钢筋表面有无涂料并不重要, 而且还可将除丙烯酸砂浆锚杆之外的缩尺试件取均值进行分析。

(2) 由图4和图5可知, 无预应力且无腐蚀环境、使用年限为零的缩尺锚杆, 其平均屈服荷载和极限强度, 分别比有预应力加腐蚀环境、使用年限为17a的高52.9~49.2%和18.4%~22.2%, 而平均伸长量又比后者分别低30.7%和13.0%。这一结果表明: 后者破坏起始点和峰值点均显著提前, 而位移量明显增大。显然, 这种差异不是锈蚀引起的。

(3) 两种类型的预应力缩尺锚杆的腐蚀环境可认为相同, 且均无明显锈蚀, 二者的差异当与应力腐蚀有关。施加较小预应力(80kg)的缩尺锚杆, 其平均屈服荷载比施加较大预应力(150kg)的低2.3%; 而前者的极限荷载值比后者高3.2%。一般认为, 当拉应力的大小达到材料屈服强度的70%~90%时, 即可使材料产生应力腐蚀断裂。由于所设计拉应力的大小仅为相应试件屈服强度的39.4%和72.1%(平均值), 因而应力腐蚀的差异性很难区分出来。综合考虑, 施加较小预应力的缩尺锚杆, 其平均伸长量反而比施加较大预应力的高这一试验结果, 可将上述差异视为误差。

(4) 缩尺锚杆的应力腐蚀效应(强度降低)是存在的, 但不是很明显。而使用年限为17a的缩尺锚杆的极限荷载却比使用年限为零的缩尺锚杆低18.4%~22.2%。是何原因使两类缩尺锚杆之间产生如此大的差异? 锈蚀和应力腐蚀均说明不了。一种可能的解释是材料老化所致; 另外也可能由于冶炼工艺的进步而存在材

质上的差异。但无论如何, 这一事实不得不起人们高度重视。

(5) 缩尺锚杆的试验条件模拟了锚杆抗化学腐蚀和应力腐蚀耦合效应的理想工况, 施工中砂浆握裹层的厚度和对中情况十分良好, 经过17a后发现它们的外观、重量几乎没有变化, 也没有锈蚀现象, 在拉伸试验中发现其抗拉极限荷载明显降低。而在实际工作条件下锚杆不可能达到理想工况, 其砂浆握裹层厚度和对中情况是不容乐观的, 而试验条件下的钢筒体正好模拟了实际条件中的锚杆使用情况, 经过17a钢筒体有不同程度的锈蚀状况, 坑蚀深度甚至穿透筒壁, 通过测试它们的强度损失率约14%, 直径约损失10%, 截面积约损失19%。因而施工质量对锚杆耐久性的影响是显见的。

5. 结语

5.1 关于腐蚀等级和腐蚀环境

(1) 朱村煤矿现场环境腐蚀等级为中等。

(2) 试件处于接近恒温的条件, 因而温度对锚杆的腐蚀效应不明显。置于钻孔中且孔口被砂浆堵塞的试件, 可看作是处于密闭潮湿条件, 因而对锚杆的腐蚀具有重要影响。地下水中 Cl^- 离子含量对锚杆腐蚀具有更重要影响。

5.2 关于钢筒体(不良工况)的腐蚀

(1) 单根钢筒体坑蚀深度深浅不一。所有钢筒体坑蚀分布状态各不相同。描述钢筒体腐蚀状况, 采用平均腐蚀速率的概念和方法偏于危险, 宜使用与最大坑蚀深度相对应的腐蚀速率进行描述。

(2) 钢筒体的失重、失重率和平均腐蚀速率分布曲线均为正态分布。钢筒体的失重率极不均匀, 其最高者是最低者的24.4倍。

(3) 在中等腐蚀环境中, 钢筒体17a强度损失率约为14%, 直径损失约为10%, 截面积损失约为19%。这意味着, 以材料强度的标准值设计的、安全系数大于1.14的工程锚杆, 此时已处于破坏状态。

(下转第40页)

会在墩座顶与预制墩身底面间存有细微缝隙，将造成隐患。若墩壁内设有 ϕ^{125} 精扎螺纹钢筋，其下端埋于承台内，墩顶张拉压浆后，不但可消除缝隙的存在又可提高墩身的抗弯刚度。

⑤现代砼斜拉桥中，索梁锚固方式均是用一根钢索管理在砼梁的半高处或梁底。拉索从管中下穿后，锚于管端的锚垫板上，由于各种原因，管内积水和处于潮湿状的桥例屡见不鲜，久而久之，索锚结合处将会严重腐蚀。目前生产厂家可生产正常使用50年的拉索会因此大打折扣。因此，笔者建议，设计砼斜拉桥时，设法通过某种埋置式钢结构，将拉索下锚点和一些钢桥一样引至桥面以上。这不但消除了下端的隐患，又方便了拉索的安装和日后的更换。

⑥随着我国的经济迅速发展，规划中的跨海大桥相继在兴建，首座大桥—长达32Km的东

海大桥已于去年建成通车，36Km的杭州湾大桥也在紧张建设中。

跨海大桥长达数十公里，在有航道桥的情况下，非通航孔的总长也约占全桥长的90%以上，为减少海上作业，提高质量和加快进度，国内外桥梁工程师都认同，其上部结构采用预制吊装为最佳选择。据悉国外最大预制梁长已达190m，重8200t，安装梁的浮吊高度超过百米。我国的上述两座大桥中预制梁长为60m和70m（滩涂区为50m），最大吊重2300t。笔者拙见，我国今后的跨海大桥可以从几方面着手：a 将梁的砼标号提高到C60以上；b用液压千斤顶提梁安装；c改悬臂吊机为垂直提升架（以提高吊船起重能力和减轻设备自重）的运架一体船施工，将梁跨提高到90~100m，这一方案可能更为经济合理，仅供参考。

（上接第20页）

5.3 关于缩尺锚杆（良好工况）的腐蚀

（1）在各种类型的砂浆保护层中，丙烯酸砂浆防护效果最优，应优先选用；除此之外，试验条件下，只要有足够的砂浆保护层厚度，锚杆表面是否另加防护涂层其效果并不明显。

（2）由于综合因素影响，使用年限为17a的缩尺锚杆试件的破坏起始点和峰值点均显著提前，同使用年限为零的缩尺锚杆试件相比，前者的平均屈服载荷和极限荷载分别要低52.9%~49.2%和18.4~22.2%。这须引起人们高度重视。

参考文献

- [1] Rokhlin, S.L., Kim, J.Y., Nagy, H., et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life[J]. Engineering Fracture Mechanics 1999, 62 (4): 425-44
- [2] Harlow, D.G., Wei, R., Probability modeling for the growth of corrosion pits[A]. In: Chang C. I., Sun C.T., ed. Structural integrity in aging aircrafts[C]. ASME, 1995, 185-194
- [3] Bamforth P. Predicting the Risk of Reinforcement Corrosion in Marine Structures, Corrosion Prevention & Control, Aug, 1996
- [4] S.L. Amey, et al, Predicting the Service Life of Concrete Marine

Structures: An Envirpmental Methodology, ACI Sturctural Journal, March-April 1998

[5] Service-life Prediction, State-of-the-art report, ACI 365. R-00, Reported by ACI Committee 365, April 2000

[6] 刘西拉. 结构工程耐久性的基础研究[A]. 见: 陈肇元, 钱家茹, 谷书娥编. 工程科技论坛: 土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京: 清华大学出版社, 2001, 200-206.

[7] 王媛俐, 姚燕主编. 重点工程混凝土耐久性的研究与工程应用[C]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001, 1.1.

[8] 张弥. 我国铁路隧道结构安全性和耐久性分析[A]. 见: 陈肇元, 钱家茹, 谷书娥编. 工程科技论坛: 土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京: 清华大学出版社, 2001, 1-4.

[9] 姚燕. 混凝土材料的耐久性——重大工程混凝土安全性的研究进展[A]. 见: 陈肇元, 钱家茹, 谷书娥编. 工程科技论坛: 土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京: 清华大学出版社, 2001, 266-273.

[10] 陈肇元. 混凝土结构的耐久性与使用寿命[A]. 见: 陈肇元, 钱家茹, 谷书娥编. 工程科技论坛: 土建结构工程安全性与耐久性[C]. 北京: 清华大学出版, 2001, 17-24.

[11] 曾宪明, 雷志梁, 张文巾等. 关于锚杆“定时炸弹”问题的讨论—答郭映忠教授[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (1): 143-147.

[12] 周世峰, 董遂成, 严东晋. 地下工程水泥砂浆在腐蚀环境下的耐久性试验研究[J]. 防护工程, 1998, 6 (1): 43-48.

[13] 曾宪明, 陈肇元, 王靖涛等. 锚固类结构安全性和耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (13): 2235-2242.