

# 地下巷道支护锚杆腐蚀状况调查及力学性能测试

肖 玲<sup>1</sup>, 李世民<sup>1, 2</sup>, 曾宪明<sup>1</sup>, 林大路<sup>1</sup>

(1. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023; 2. 西安交通大学 工程力学系, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 调查了河南焦作煤矿地下巷道腐蚀环境和现场 10 a 期管缝式锚杆腐蚀状况, 对地下水腐蚀性含量、锚杆宏观质量损失和局部坑蚀情况实施了测量, 并对锚杆杆体极限承载力和塑性性能进行测试。结果显示: 未加任何保护措施的管缝式锚杆腐蚀较为严重, 调查样本中的大多数锚杆寿命接近终结; 锚杆外表面腐蚀状况以坑蚀为主, 而内表面则以近似均匀腐蚀为主; 锚杆表面的坑蚀数目、面积和深度等数据均遵循一定的散布规律, 且坑蚀口部面积与深度间有内在关联; 锚杆表面的坑蚀和穿孔对锚杆杆体力学性能有严重损害, 而且锚杆延伸率损失率远大于极限承载力损失率, 亦即腐蚀对锚杆塑性的损害程度远大于对其承载力的损害程度, 这使得锚杆在发生破坏前难以监测到明显的变形, 极易造成突发性事故。

**关键词:** 采矿工程; 管缝式锚杆; 腐蚀状况; 力学性能; 测试

**中图分类号:** TD 353

**文献标识码** A

**文章编号** 1000 - 6915(2008)增 2 - 3791 - 07

## CORROSION INVESTIGATION AND MECHANICAL BEHAVIOR TEST ON SUPPORT OF BOLTS IN underground drift

XIAO Ling<sup>1</sup>, LI Shimin<sup>1, 2</sup>, ZENG Xianming<sup>1</sup>, LIN Dalu<sup>1</sup>

(1. *The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, Luoyang, Henan 471023, China;*

*2. Department of Engineering Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shannxi 710055, China)*

**Abstract:** The corrosion environment of an underground drift of one coal mine and the corrosion status of in-situ split-set bolts, which are embedded in the drift for 10 years, have been investigated. The content of the corrosive mass in the underground water, the general mass loss and the local pit corrosion situation of the bolts are tested. The tensile test is carried out to analyze the peak bearing capacity and the plastic behavior. The obtained results are as follows: the corrosion of the split-set bolts without any protection is very serious, and most of the investigated specimens are nearly out of service. The outer corrosion of the bolts is mainly pit corrosion, and the inner corrosion is nearly uniform corrosion. The pit corrosion amount, area, and depth, etc. all follow certain scatter law; moreover, there is an inherent connection between the pitting area and the pitting depth. The pitting corrosion and punches on the bolt surface have great impairment on the mechanical behaviors of bolts. The loss ratio of the elongation percentage of the bolts is much greater than that of the peak bearing capacity, which shows that the impairment of the corrosion on the plasticity of the bolts is more server than that on the bearing capacity of the bolts. Therefore, the deformation of the bolt before its failure is difficulty to be monitored, and emergent hazards will easily happen.

**Key words:** mining engineering; split-set bolts; corrosion status; mechanical behavior; test

**收稿日期:** 2007 - 04 - 08; **修回日期:** 2007 - 09 - 06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50279054)

**作者简介:** 肖 玲(1975 -), 男, 硕士, 1999 年毕业于中北大学机械电子工程系机电专业, 现任工程师, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: xiaoling1234@eyou.com

## 1 引言

锚固类结构以其高度的可靠性和优越的经济性，在土木工程、矿业工程和岩土工程加固和支护中获得了广泛应用，尤其是在近些年的国家重大工程建设中发挥了重要作用。由于锚固类结构所处环境的复杂性、工作条件的严酷性以及依赖其进行加固和支护工程的重要性，使得人们对其耐久性和使用寿命问题日益关注，迫切需要加深认识<sup>[1-6]</sup>。例如，在许多永久性坑道、水电站边坡和水库大坝等工程项目中，都对锚固类结构的使用寿命有着特殊要求，在经历若干年的服役期后，其腐蚀情况和剩余寿命尤其值得关注。特别是我国有一些重大工程是建国初期设计建成的，目前其安全状况如何，亟待进行评估。关于锚固类结构耐久性和使用寿命问题的研究，一是采用理论和试验研究<sup>[7-13]</sup>，二是进行现场调查<sup>[14-18]</sup>，二者互为补充，不可或缺。理论和试验研究可从机制上获得本质认识，但自身局限性使其尚无法完全模拟现场真实情况，进行实际工程调查仍是不可替代的必要手段。

本文介绍了对河南焦作某煤矿地下主巷道腐蚀环境的调查情况，对巷道侧壁支护的管缝式锚杆进行了开挖回收，并就锚杆的腐蚀状况和力学性能开展了测试分析，结果可为锚杆寿命预测与评估提供一定的参考依据。

## 2 腐蚀环境调查及锚杆性能参数

### 2.1 腐蚀环境调查

调查现场位于河南焦作某煤矿地下主巷道，断面形状为直壁半圆拱形，巷道侧壁及拱顶为砂岩夹杂煤层，底板为砂页岩，采用喷锚网支护结构，加固锚杆为20世纪90年代较为常见的管缝式锚杆。该巷道于1995年完成支护并投入使用，由于管缝式锚杆的特殊结构，经常有地下水沿锚杆内壁渗漏流出，使得挡圈和托盘腐蚀较为严重，但锚杆本身腐蚀情况难以直接观察，因此，选择侧壁表面腐蚀较重的一段巷道作为重点调查对象进行分析。

经实地测量，该段巷道内长年温度较为稳定，约为19.5℃，空气的相对湿度为93%~95%，将巷道内侧壁的渗漏水取样化验，其pH值为7.44，各项物理化学性能指标见表1。

表1 地下水样化验结果

Table 1 Test results of groundwater samples

成分	含量/(mg·L <sup>-1</sup> )
游离态二氧化碳	14.00
侵蚀性二氧化碳	0.00
水中溶解氧浓度	0.30
Ca <sup>2+</sup>	88.18
Mg <sup>2+</sup>	38.04
Cl <sup>-</sup>	24.30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5.28
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	317.90

### 2.2 锚杆性能参数

巷道侧壁支护锚杆为采用冷轧薄钢板卷制而成的管缝式锚杆，使用时将其打入到直径略小的锚孔中，通过径向挤压力、轴向摩擦力和锚杆端头挡圈及托盘压力对围岩进行加固。经查阅相关技术文件，该煤矿巷道原始锚杆设计力学与几何参数，如表2、3所示。

表2 锚杆物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of bolts

材料	管壁厚度 /mm	单位质量 /(kg·m <sup>-1</sup> )	极限承载力 /kN	初锚力 /kN	托盘承载 力/kN
Q235	3.0	2.79	130.0	52.0	65.0
	2.5	2.33	108.3	52.0	65.0

表3 锚杆与锚孔几何参数

Table 3 Shape parameters of bolts and hole mm

锚孔直径	锚孔深度	锚杆外径	锚杆长度	管缝宽度
42	1 500	43	1 600	14

## 3 锚杆宏观腐蚀状况

### 3.1 锚杆表面宏观腐蚀状况描述

自1995年完成支护至2005年开挖，本批锚杆服役期为10a。根据宏观腐蚀程度不同，可将回收的10根锚杆划分为3个等级：轻度、中度和重度腐蚀。

检查发现：2<sup>#</sup>锚杆整体锈蚀比较均匀，局部无肉眼可见坑蚀，内、外表面均较为平整，属轻度腐蚀，如图1(a)所示；1<sup>#</sup>，6<sup>#</sup>，8<sup>#</sup>和9<sup>#</sup>锚杆整体有不同程度锈蚀，且局部有大量坑蚀，但坑蚀并未贯穿

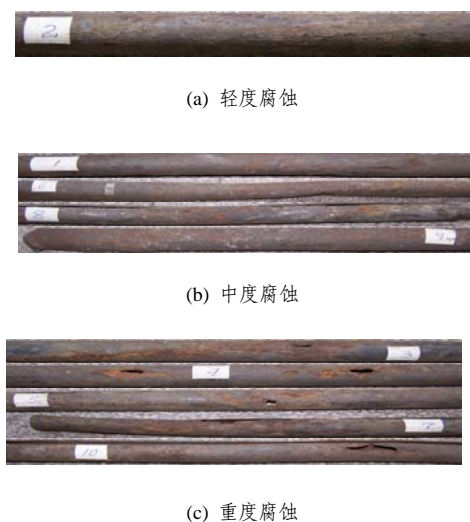


图 1 锚杆表面腐蚀形态

Fig.1 Corrosion status of bolts surface

管壁, 属中度腐蚀, 如图 1(b)所示; 3<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup> 和 10<sup>#</sup> 锚杆表面整体锈蚀严重, 局部有数目不等坑蚀, 其中部分坑蚀已发生穿孔, 属重度腐蚀, 如图 1(c)所示。

宏观检查还发现锚杆外表面与内表面在腐蚀形态和程度上都有显著区别。首先锚杆上几乎所有坑蚀和穿孔均起源于锚杆外表面, 而后向材料内部发展, 直至锈穿管壁, 内壁上极少有明显坑蚀; 对刚挖出的锚杆检查, 锚杆的外表面腐蚀物的堆积较少, 而内表面则有较厚的腐蚀物堆积层, 其中还夹杂着一些黑色的煤层碎屑, 通过用力敲打管壁或用硬物刮擦均可使其脱落。据此可以判断, 锚杆的外表面腐蚀属于典型坑蚀类型, 而内表面则属于近似均匀腐蚀。其原因是: 外表面直接与地层腐蚀介质接触, 腐蚀介质在外表面的分布极不均匀, 容易造成局部坑蚀发生; 而内表面经常有渗出的地下水流过, 腐蚀介质溶解于水中, 从而使得内表面上腐蚀介质分布相对较为均匀, 易形成近似均匀腐蚀。

### 3.2 锚杆宏观质量损失

本文采用失重法来考察锚杆整体腐蚀程度, 锚杆质量损失及平均腐蚀速度见表 4。

从表 4 可知, 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup>~10<sup>#</sup>锚杆失重率为 20.8%~25.9%, 平均腐蚀速度为 0.031 2~0.037 7 mm/a, 占样本数 80%; 腐蚀最轻 2<sup>#</sup> 锚杆失重率仅为 14.5%, 平均腐蚀速度约为 0.021 8 mm/a, 占样本数 10%; 腐蚀最重 6<sup>#</sup> 锚杆失重率高达 32.4%, 平均腐蚀速度高达 0.040 5 mm/a, 占样本数 10%。

表 4 锚杆宏观腐蚀结果

Table 4 General corrosion results of bolts

编号	长度/mm	管壁厚度/mm	质量损失/g	失重率/%	腐蚀速度 (mm·a <sup>-1</sup> )
1	750	3.0	518	24.7	0.037 1
2	700	3.0	283	14.5	0.021 8
3	810	3.0	560	24.8	0.037 2
4	760	3.0	510	24.1	0.036 2
5	650	3.0	434	23.9	0.035 9
6	940	2.5	710	32.4	0.040 5
7	440	2.5	265	25.9	0.032 4
8	690	3.0	400	20.8	0.031 2
9	620	3.0	435	25.1	0.037 7
10	860	3.0	574	23.9	0.035 9

## 4 锚杆局部腐蚀状况

### 4.1 局部腐蚀数据

本文中局部腐蚀均是指坑蚀, 即腐蚀点口部直径大于深度的局部腐蚀, 单个坑蚀或穿孔的开口形状为近似圆形或椭圆形, 个别大型坑蚀呈近似长椭圆形, 坑蚀剖面为近似开口半圆形, 如图 2 所示。

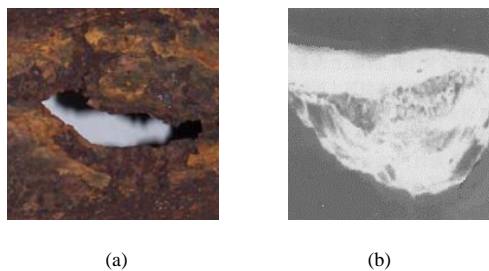


图 2 锚杆表面腐蚀穿孔和坑蚀剖面

Fig.2 Punch of bolts and cross section of pitting corrosion

坑蚀程度采用近似坑口面积×坑蚀深度表示。如圆形坑蚀用半径×半径×坑蚀深度表示, 椭圆形或长椭圆形坑蚀用长轴×短轴×坑蚀深度表示, 发生穿孔的坑蚀不标深度, 代之以穿孔面积(表中括号内数据), 如表 5, 6 所示。

### 4.2 坑蚀面积规律

将每根锚杆的坑蚀口部面积总和与锚杆各自外表面面积相比, 可以确定坑蚀发生范围的严重程度, 结果如图 3 所示。

表5 中度腐蚀锚杆坑蚀统计数据

Table 5 Pit corrosion statistic of medium corrosion bolts

抗蚀 序号	坑蚀程度			
	1#	6#	8#	9#
1	25×25×1.50	11×9×0.92	30×15×1.94	8×3.5×0.84
2	8.5×6×0.80	6×5×0.74	55×30×2.30	5.5×4×0.90
3	7×6×0.84	13×6×1.54	35×20×1.90	13×4×0.80
4	11×9×1.46	9×7×1.56	55×13×2.56	9×5×1.40
5	18×10×0.96	7×6×1.32	15×12×1.00	8×4×0.50
6	45×18×1.30	9×8×1.20	70×45×1.40	7×5×0.66
7	15×11×1.44	8×6×1.10	60×24×1.44	9×6×1.58
8	24×14×1.26	8×7×1.24	115×16×1.10	16×11×0.96
9	9×6×1.16	11×7×0.64	150×27×1.50	12×9×0.80
10	8×6×0.70	10×5×0.82	-	10×6×1.00
11	4×4×1.00	11×6×1.22	-	14×6×0.48
12	16×9×1.46	20×13×1.44	-	11×6×0.28
13	12×6×0.60	9×5×1.40	-	7.5×4×0.80
14	11×7×1.26	36×25×1.26	-	14×7×0.98
15	16×7×2.30	240×17×1.30	-	15×7×0.90
16	10×6×0.96	11×6×1.04	-	10×8×0.58
17	14×10×0.90	13×8×1.20	-	11×5×0.30
18	-	7×7×0.90	-	18×6×0.88
19	-	13×8×1.10	-	17×11×0.70
20	-	-	-	11×9×0.96
21	-	-	-	21×9×0.86
22	-	-	-	31×10×1.16
23	-	-	-	14×8×1.20
24	-	-	-	6×3.5×0.60
25	-	-	-	9×6×0.60

注：上述变量单位均为 mm。

表6 重度腐蚀锚杆坑蚀统计数据

Table 6 Pit corrosion statistic of severe corrosion bolts

抗蚀 序号	坑蚀程度				
	3#	4#	5#	7#	10#
1	45×10×0.8	10×20×2.9	26×8×1.14	150×29×2.36	15×12×1.98
2	100×22×1.70	28×9×1.30	25×19×2.12	160×50(10×8)	45×20(37×12)
3	100×56(14×9)	50×20×1.80	70×20(12×7)	-	23×18(4×2)
4	170×24×1.50	50×20(16×4)	70×25×2.24	-	28×18(9×3)
5	-	13×10×1.98	5×5×1.10	-	16×12×1.78
6	-	26×17×2.24	8×8×1.50	-	7×7×0.70
7	-	28×18(17×8)	10×6×1.60	-	13×6×0.60
8	-	-	4×4×1.20	-	55×10(30×6)
9	-	-	19×18×1.44	-	30×22(23×13)

注：上述变量单位均为 mm。

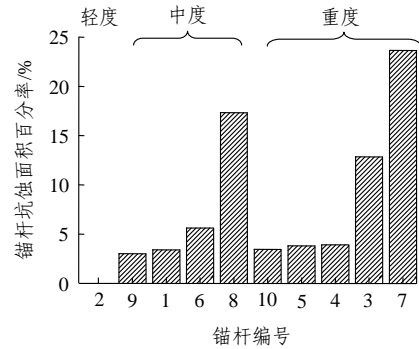


图3 坑蚀面积百分比分类统计

Fig.3 Class statistic of pit corrosion area percentage

根据图3可知，10根锚杆中，2#锚杆未发生明显坑蚀；1#，4#~6#，9#和10#锚杆表面坑蚀面积占总表面积比率为3%~5%；3#，8#锚杆表面坑蚀面积百分比为12%~17%；7#锚杆坑蚀面积百分比为25%。上述数据表明宏观腐蚀程度越趋向严重，表面坑蚀面积越有增大的趋势。

### 4.3 坑蚀深度规律

图4显示，中等深度坑蚀数量最多，深度较大和深度较小的坑蚀数量都较少，这是符合腐蚀客观规律的。

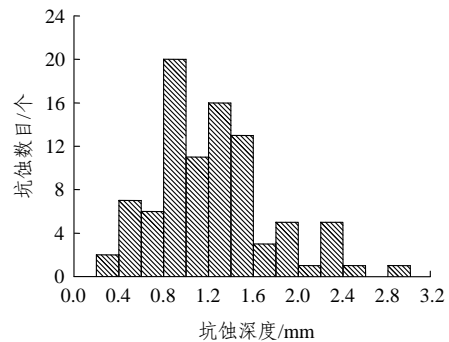


图4 坑蚀深度分布图

Fig.4 Bar chart about pit depth

实际上，决定腐蚀锚杆力学性能的是最大坑蚀深度和腐蚀穿孔。就本批样本而言，深度超过2.0 mm的坑蚀比例为7.9%，穿孔比例为9.9%，二者之和也仅为17.8%，所占比例并不大，但对锚杆力学性能有极大损害，因此必须引起关注。

### 4.4 坑蚀口部面积与深度关系规律

由表5, 6可知，在中度腐蚀锚杆表面，坑蚀数目相对较多，单个坑蚀表面积相对较小，坑蚀深度较浅；在重度腐蚀锚杆表面，坑蚀数目相对较少，而单个坑蚀或穿孔开口表面积却较大，坑蚀深度较

深, 有的甚至出现穿孔。坑蚀深度与其开口面积关系如图 5 所示。

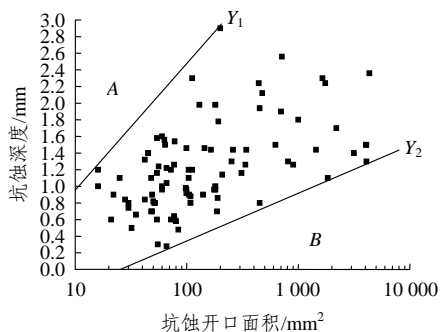


图 5 坑蚀开口面积与深度关系

Fig.5 Relationship between area and depth of pit corrosion

图 5 说明, 自然环境中长期腐蚀形成的坑蚀, 其深度与开口面积之间存在一定匹配关系。这是由于实际腐蚀过程中初始坑蚀诱发源点一旦形成, 腐蚀就会不断发展, 在坑蚀深度加大同时, 口部面积也在扩大, 且二者扩展速度之间有内在关联, 绝大多数坑蚀往往是开口面积大时深度也较大。随着腐蚀的进行, 就有可能几个较小的坑蚀互相连通, 造成坑蚀数目减小的现象。

### 5 腐蚀锚杆力学性能测试

#### 5.1 测试结果

7# 锚杆长度太短且一端锈蚀严重, 无法进行力学测试。为了多获得有效数据, 将其余 9 根锚杆从无明显坑蚀处截为长度相近的 2 段, 分别进行抗拉试验, 结果如图 6, 7 所示。

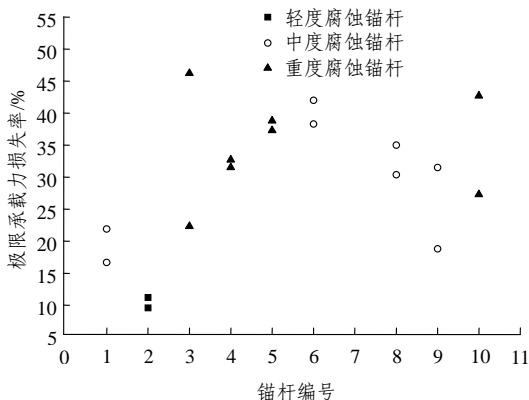


图 6 锚杆极限承载力损失率

Fig.6 Loss ratio of bolts' peak bearing capacity

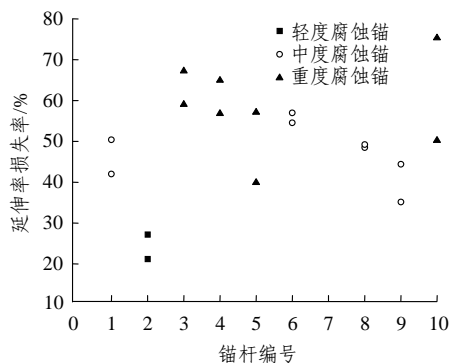


图 7 锚杆延伸率损失率

Fig.7 Loss ratios of bolts specific elongation

图 6, 7 显示, 轻度腐蚀的 2# 锚杆承载力损失率为 9.6%~11.2%, 延伸率损失率为 21.2%~27.2%, 均明显小于其他锚杆, 说明受腐蚀危害程度较小; 中度腐蚀的 1#, 6#, 8#, 9# 锚杆, 承载力损失率为 16.7%~42.0%, 延伸率损失率为 35.2%~57.0%, 散布范围很大, 说明坑蚀数目、表面积与深度不同对锚杆杆体力学性能影响较大, 除 6# 锚杆数据与重度腐蚀锚杆数据接近, 其余中度腐蚀锚杆数据均明显小于重度腐蚀锚杆数据; 重度腐蚀的 3#~5#, 10# 锚杆, 杆体承载力损失率为 22.3%~46.2%, 延伸率损失率为 39.9%~75.3%, 造成数据散布原因与穿孔面积大小及穿孔在锚杆表面具体分布位置有关, 其整体综合腐蚀效果较中度腐蚀明显要严重一些。

#### 5.2 腐蚀锚杆极限承载力与塑性关系分析

锚杆杆体极限承载力损失率与延伸率损失率关系见图 8。图 8 显示, 腐蚀对锚杆杆体承载力与延伸率都产生了严重影响, 二者在腐蚀之后均有大幅

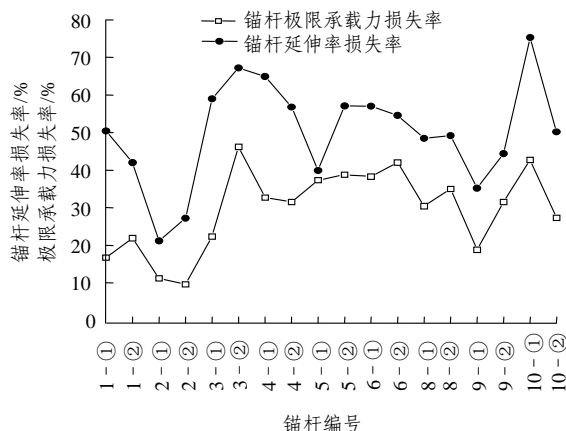


图 8 锚杆极限承载力损失率与延伸率损失率关系

Fig.8 Relationship of loss ratio between bolts' peak bearing capacity and specific elongation

下降,并且二者随腐蚀程度变化的趋势基本一致。

需要指出的是,进行测试的9根锚杆共计18组数据中,杆体延伸率损失率无一例外地大于极限承载力损失率,二者相差幅度为2.6%~33.7%。即使轻度腐蚀的2<sup>#</sup>锚杆杆体承载力损失率仅为9.6%~11.2%,其延伸率损失率仍高达21.2%~27.2%。试验说明,腐蚀对锚杆杆体塑性的损害程度远远大于对其强度的损害程度,锚杆杆体从开始发生塑性变形到断裂之前经历的变形很小,难于有效观察和及时发现,这在实际工程中极易突然发生事故,造成严重灾难。

造成这种现象的原因为:由低碳钢或低碳合金钢制成的锚杆在受到轴向拉力时,其塑性变形要经历两个阶段,先是均匀变形阶段,而后是局部变形阶段。对于表面没有损伤的锚杆而言,这两个阶段都存在,而且大部分的伸长变形发生在均匀变形阶段,即截面等量缩小,锚杆均匀伸长;当均匀变形结束后,材料很快进入到局部变形阶段,形成缩颈,由于截面急剧缩小形成应力集中而很快断裂,材料变形结束。对于表面存在坑蚀或穿孔的锚杆而言,受力时会在该处直接造成应力集中,因而经历的均匀变形过程很短暂,甚至无此阶段,当载荷超过严重腐蚀截面的最大承载力时,锚杆断裂失效。因此,腐蚀是对锚杆材料力学性能的伤害,而与锚杆具体形式无关,亦即其他类型锚杆经受腐蚀之后,其延伸率的损失率也应大于极限承载力的损失率。

从断口位置看,6根试件(3-②,4-①,4-②,5-①,10-①,10-②)在腐蚀穿孔处断开,占样本33.3%;8根试件(1-①,1-②,3-①,5-②,6-①,6-②,8-①,8-②)在严重坑蚀处断开,占样本44.4%;其余4根试件(2-①,2-②,9-①,9-②)在断裂处未见明显坑蚀等缺陷,占样本22.3%。可见,锚杆杆体表面严重坑蚀或腐蚀穿孔的位置即为整个试件强度最薄弱之处,超载时极易在该处断裂;如杆体表面无明显坑蚀,试件则在截面最小处断裂。

## 6 结 论

(1) 调查数据显示,即使同类型锚杆在同一地层中腐蚀状况亦有较大差别,数据散布范围较大,显示出锚杆腐蚀问题的复杂性。此系锚杆材料本身

不均匀性、环境复杂性和施工工艺水平差异等原因所致。由于局部腐蚀现象存在高度离散性和随机性,宜采用统计学方法研究其本质规律。因此,锚杆耐久性和使用寿命评估必须进行大量实际工程调查,建立工程数据库,调查样本数越大,越能全面真实反应情况,显示其本质规律,而各类理论预测模型唯有经过实际工程数据检验,才具有可靠性和实用性。目前公开资料显示,国内在这方面的研究工作尚不全面深入,应当引起重视并切实予以加强。

(2) 本文调查的现场管缝式锚杆内外表面腐蚀状况有所不同,外表面以坑蚀为主,内表面以近似均匀腐蚀为主,此系锚杆内、外表面上腐蚀介质分布的极大不均匀性所致。尽管本文调查样本数量较少,但结果仍然显示锚杆外表面的坑蚀数目、面积以及深度都呈现一定的散布规律,且坑蚀深度与其口部面积之间有内在关联。

(3) 在调查样本中,有7根锚杆的极限承载力损失率达30%~50%,延伸率损失率高达40%~75%;1根锚杆极限承载力损失率大于20%,延伸率损失率大于50%;1根极限承载力损失率大于10%,延伸率损失率大于27%;另有1根锚杆一端腐蚀严重,管壁仅剩余很薄一层,彻底丧失使用功能。数据显示,由于管缝式锚杆无防腐措施而直接接触腐蚀介质,导致腐蚀极其严重,经过10a服役期,绝大部分锚杆寿命已经基本终结,需要重新更换。

(4) 坑蚀和穿孔对锚杆的极限承载力和塑性都造成了严重的损害,成为锚杆寿命终结最致命的原因。同时,坑蚀和穿孔对杆体塑性损害程度要远大于对其极限承载力损害程度,这使得锚杆通过塑性变形来调整载荷的能力受到严重削弱,一旦实际载荷超过锚杆的极限承载力,锚杆就会突然断裂,由于锚杆在断裂前经历的变形短暂,难于及时观察和监测,极易造成突发的灾难性事故。由于这种坑蚀和穿孔是对锚杆材料本身承载能力的损害,与锚杆具体的结构形式无关,因此该结论对诸如钢筋锚杆等其它类型锚杆也具有适用性。

## 参考文献(References):

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

- Xianming, CHEN Zhaoyuan, WANG Jingtao, et al. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 235 - 2 242.(in Chinese)
- [2] 曾宪明, 雷志梁, 张文中, 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.(ZENG Xianming, LEI Zhiliang, ZHANG Wenjin, et al. Discussion on “time bomb” question for bolt—an answer to Professor GUO Yingzhong[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 143 - 147.(in Chinese))
- [3] 董遂成, 周世峰, 严东晋. 已建人防工程耐久性评估与分析[R]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 1996.(DONG Suicheng, ZHOU Shifeng, YAN Dongjin. The evaluation and analysis of the durability of constructed civil defence engineer[R]. Luoyang: The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, 1996.(in Chinese))
- [4] 任继礼. 三峡永久船闸结构锚杆耐久性设计[J]. 人民长江, 2002, 33(1): 13 - 14.(REN Jili. Durability design of anchor rods at TGP's permanent ship-lock[J]. Yangtze River, 2002, 33(1): 13 - 14.(in Chinese))
- [5] 李永和. 地下钢筋混凝土与锚喷结构碳化断裂损伤及其耐久性研究[博士学位论文][D]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 260.(LI Yonghe. Carbonation fracture damage and durability of underground reinforced concrete and shot concrete bolt structure[Ph. D. Thesis][D]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 260.(in Chinese))
- [6] 洪乃丰. 水环境腐蚀与混凝土的耐久性[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(4): 174 - 177.(HONG Naifeng. Corrosion in water environments and durability of concrete[J]. Corrosion and Protection, 2006, 27(4): 174 - 177.(in Chinese))
- [7] SMITH J L, VIRMANI Y P. Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction[R]. Virginia: Research, Development and Technology Turner-Fair bank High way Research Center, 2000.
- [8] NÜRNBERGER U. Corrosion induced failures of prestressed steel[J]. Otto-Graf-Journal, 2002, 13(1): 9 - 25.
- [9] HAN-SEUNG L, TADATSUGU K, TAKAFUMI N, et al. An experimental study on the retrofitting effects of reinforced concrete columns damaged by rebar corrosion strengthened with carbon fiber sheets[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(4): 563 - 570.
- [10] 杜荣归, 刘 玉, 林昌健. 氯离子对钢筋腐蚀机制的影响及其研究进展[J]. 材料保护, 2006, 39(6): 45 - 50.(DU Ronggui, LIU Yu, LIN Changjian. Effect of chlorine ions on the corrosion behavior of reinforcing steel in concrete[J]. Materials Protection, 2006, 39(6): 45 - 50.(in Chinese))
- [11] 赵 健, 冀文政, 肖 玲, 等. 锚杆耐久性现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 377 - 1 385.(ZHAO Jian, JI Wenzheng, XIAO Ling, et al. In-situ experimental study on anchor durability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 377 - 1 385.(in Chinese))
- [12] 肖 玲, 赵 强, 曾宪明, 等. 锚杆腐蚀程度与载荷相关性试验研究[J]. 防护工程, 2007, 29(1): 15 - 19.(XIAO Ling, ZHAO Qiang, ZENG Xianming, et al. Experimental study on correlativity of anchor bar corrosion level and loading[J]. Protective Engineering, 2007, 29(1): 15 - 19.(in Chinese))
- [13] 肖 玲, 李长松, 曾宪明, 等. 承载锚杆与非承载锚杆腐蚀力学性能对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 720 - 726.(XIAO Ling, LI Changsong, ZENG Xianming, et al. Comparison test study on mechanical performance of loaded bolt and unloaded bolt against corrosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 720 - 726.(in Chinese))
- [14] 雷志梁, 张文中, 冀文政, 等. 锚杆孔渗漏水防治及锚杆防锈[R]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 1984.(LEI Zhiliang, ZHANG Wenjin, JI Wenzheng, et al. Research on the methods of preventing-water in bolt hole and anti-corrosion of bolt[R]. Luoyang: The Third Research Institute of Engineering Cops, General Staff of PLA, 1984.(in Chinese))
- [15] BEITELMAN T E. Tensile test results of post tensioning cables from the midbay bridge[R]. Florida: Florida Department of Transportation Structures Research Center, 2000.
- [16] 黄跃平, 胥 明, 姜益军, 等. 拉索局部腐蚀检测与评估分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(2): 132 - 135.(HUANG Yueping, XU Ming, JIANG Yijun, et al. Examination of localized corrosion and lifetime evaluation for steel cable[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(2): 132 - 135.(in Chinese))
- [17] KAUFMAN E, CONNER R. Evaluation of the anchor bolt components—Kinzua viaduct bridge collapse[R]. Pennsylvania: ATLSS Engineering Research Center, Lehigh University, 2006.
- [18] 赵 健, 冀文政, 张文中, 等. 现场早期砂浆锚杆腐蚀现状的取样研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1 157 - 1 162.(ZHAO Jian, JI Wenzheng, ZHANG Wenjin, et al. Sampling investigation of on situation early anchor corrosion in-situ[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1 157 - 1 162.(in Chinese))