酸性环境下渗锌锚杆腐蚀特征及力学性能劣化研究*

李帅乾[1],郭忠平[1],温卓越[1],谢中辉[2],侯正涛[2]

(1.山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛市 266590;
2.陕西正通煤业有限责任公司, 陕西 咸阳市 713699)

摘要:为探究渗锌锚杆的耐酸蚀性能,开展了酸性环境下渗锌锚杆的腐蚀特征及力学性能劣化研究。首先,以普通锚杆、渗锌锚杆为试验对象开展了锚杆浸泡腐蚀试验,构建了渗锌锚杆腐蚀动力学模型,研究了渗锌锚杆力学性能劣化规律及腐蚀失效机理;其次,应用Abaqus软件模拟分析了锚杆腐蚀劣化对巷道围岩稳定性的影响;最后,通过工程应用检验了渗锌锚杆的耐酸蚀性能。结果表明:同等腐蚀条件下,渗锌锚杆的耐酸蚀性能显著优于普通锚杆,渗锌锚杆支护巷道的围岩稳定性显著高于普通锚杆支护巷道;酸性环境下,普通锚杆呈加速腐蚀特征,渗锌锚杆呈匀速腐蚀特征;腐蚀100 d后,普通锚杆的屈服强度、抗拉强度、延伸率分别下降了6.50%、6.37%、15.85%,拉伸断裂形态由韧性断裂向韧性-脆性混合断裂转变,渗锌锚杆的屈服强度、抗拉强度、延伸率分别下降了2.85%、1.45%、7.97%,拉伸断裂形态仍为韧性断裂;腐蚀发生后,普通锚杆支护巷道顶板、两帮的位移量分别增长了50.07%、52.50%,应力分别增长了36.85%、27.41%,渗锌锚杆支护巷道顶板、两帮的位移量分别增长了21.07%、22.06%,应力分别增长了16.37%、20.54%。工程应用结果表明,采用渗锌锚杆进行巷道支护可有效延长锚固支护寿命、保障巷道支护安全。

关键词:渗锌锚杆;腐蚀速率;力学性能;失效机理;数值模拟

中图分类号:TD353^{+}.6 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)03-0164-13

Study on the Corrosion Characteristics and Mechanical Properties Degradation of Zinc-Infiltrated Anchor Bolt in Acidic Environment

LI Shuaiqian[1], *GUO Zhongping*[1], *WEN Zhuoyue*[1], *XIE Zhonghui*[2], *HOU Zhengtao*[2]

(1.College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2.Shaanxi Zhengtong Coal Industry Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi 713699, China)

Abstract: To explore the acid corrosion resistance of zinc-infiltrated anchor bolt, the corrosion characteristics and mechanical properties of zinc-infiltrated anchor bolt in acidic environment were studied. Firstly, the immersion corrosion tests on ordinary anchor bolts and zinc-infiltrated anchor bolts were carried out, the corrosion kinetic model of zinc-infiltrated anchor bolt was constructed, and the deterioration law of mechanical properties and corrosion failure mechanism of zinc-infiltrated anchor bolt were analyzed. Secondly, the influence of anchor bolt corrosion degradation on the stability of roadway surrounding rocks was analyzed by Abaqus numerical simulation. Finally, the acid corrosion resistance of the zinc-infiltrated anchor bolt was tested by engineering application. The results show that under the same corrosion conditions, the acid corrosion resistance of zinc-infiltrated anchor bolt is significantly better than that of ordinary anchor bolt, and the stability of roadway surrounding rocks supported by zinc-infiltrated anchor bolt is significantly higher than that of ordinary anchor bolt supporting roadway. In the acidic environment, the ordinary anchor bolt is characterized by accelerated corrosion, and the zinc-infiltrated anchor bolt is characterized by uniform corrosion. After corrosion for 100 days, the yield strength, tensile strength and elongation rate of ordinary anchor bolt decrease by 6.50%, 6.37% and 15.85% respectively, and the tensile fracture form changes from ductile fracture to ductile-brittle mixed fracture. The yield strength, tensile strength and elongation rate of the zinc-infiltrated anchor

* **收稿日期**:2024-04-17
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52374129)
作者简介:李帅乾(2000—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail:2664525875@qq.com
通信作者:郭忠平(1962—),男,山东临朐人,博士,教授,主要从事采煤方法与工艺方面的研究。E-mail:gzp57046@126.com

bolt are decreased by 2.85%, 1.45% and 7.97% respectively, and the tensile fracture form is still ductile fracture. After the occurrence of corrosion, the displacement of the roof and two sides of the roadway supported by ordinary anchor bolts is increased by 50.07% and 52.50% respectively, and the stress is increased by 36.85% and 27.41% respectively. The displacement of roof and two sides of roadway supported by zinc-infiltration anchor bolts is increased by 21.07% and 22.06% respectively, and the stress is increased by 16.37% and 20.54% respectively. The results of engineering application show that the use of zinc-infiltration anchor bolt for roadway support can effectively prolong the life of anchorage support and ensure the safety of roadway support.

Key words: Zinc-infiltrated anchor bolt, Corrosion rate, Mechanical property, Failure mechanism, Numerical simulation

0 引言

锚杆是锚固支护系统的关键部位之一[1]。然而，复杂地质条件下矿井中 pH、侵蚀介质等环境因素易造成锚杆腐蚀[2]。锚杆腐蚀是导致锚固支护系统过早失效的重要原因。锚固结构过早失效易诱发围岩失稳、巷道变形等矿井事故，严重威胁矿山企业的生命财产安全[3]。因此，开展锚杆腐蚀及防护研究至关重要。

国内外学者针对锚杆腐蚀开展了大量研究。潘继良等[4]进行了深部岩层锚固结构腐蚀研究，指出地下工程锚固环境具有干湿交替、密闭潮湿、永久浸泡等复杂性。YIN 等[5]通过现场调研地下支护结构腐蚀状况，明确了 pH、Cl^-、溶解氧等为矿井环境主要腐蚀因素。WANG 等[6]开展了室内模拟腐蚀试验，探讨了锚杆在多属性环境协同作用下的腐蚀机理和断裂机制。黎慧珊等[7]建立了预应力锚杆健康状况评价体系，实现了对锚杆腐蚀耐久性的宏微观综合评价。

在锚杆腐蚀研究取得进展的同时，研究人员开始着力改善锚杆耐腐蚀性能。表面改性是实现金属防腐耐锈的首要途径，粉末渗锌工艺作为金属表面改性的代表性技术，通过在锚杆表面构建致密均匀的锌铁合金渗层进而改善锚杆耐蚀能力[8]。为深入了解渗锌锚杆耐腐蚀性能，顾天真等[9]开展模拟海洋环境下 Zn-Al-Mg 镀层钢材腐蚀试验，证实渗锌钢材具有优于普通钢材、冷镀锌钢材和富锌涂层钢材的防腐性能。GAO 等[10]通过分析大气环境下渗锌锚杆电偶腐蚀行为，指出渗锌层和锚杆基体的电偶腐蚀电流密度显著低于理论值。DEWI 等[11]进行氯化物腐蚀环境下渗锌碳钢腐蚀特征研究，探究了富氯环境中渗锌碳钢腐蚀裂纹的萌生机制。黎敏等[12]采用电化学方法对典型大气环境中 Zn-Al 渗层防腐性能进行分析，发现锌铝共渗钢材腐蚀电位明显高于普通钢材。

上述研究对了解锚杆腐蚀及防腐技术具有重要意义。实际工程中，锚杆被打入围岩后将面临矿井水的威胁，大部分矿井水具有富酸性，普通螺纹钢锚杆在这种环境中极易腐蚀[13]。为进一步探究渗锌锚杆的耐酸蚀性能，本文以普通锚杆、渗锌锚杆为试验对象开展锚杆浸泡腐蚀试验，分析酸性环境下锚杆腐蚀特征、失效机理及力学性能劣化规律，探讨锚杆腐蚀劣化对巷道围岩稳定性的影响，以期为锚杆腐蚀及防护研究拓宽思路，为矿山企业防腐锚杆的选用提供参考。

1 锚杆浸泡腐蚀试验

1.1 试验材料制备

试验所用锚杆为普通锚杆、渗锌锚杆两种，共 20 根。普通锚杆选用无纵肋等强螺纹钢锚杆；渗锌锚杆为经过真空粉末渗锌加工而成的普通锚杆。锚杆试样尺寸见表 1，锚杆材料组分及力学指标见表 2。

表 1 锚杆试样尺寸

Table 1 Size of anchor bolt sample

长度/mm	直径/mm	外径/mm	内径/mm	螺距/mm
400	20	22	18	10

表 2 锚杆材料组分和力学指标

Table 2 Material composition and basic mechanical index of anchor bolts

类别	材料组分					力学指标		
	C/%	Si/%	Mn/%	Zn/%	Ceq/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
普通锚杆	0.20～0.23	0.35～0.55	1.20～1.50	—	1.00～1.20	419.63	549.69	19.94
渗锌锚杆	0.18～0.21	0.33～0.56	1.15～1.30	0.16～0.20	≤0.50	420.76	550.13	20.07

1.2 浸泡腐蚀试验

本试验采用蒸馏水稀释浓盐酸配置试验溶液,将配置完成的试验溶液置于有机玻璃箱中以构建试验所需酸性环境池,在酸性环境池内两端分别放置一个 PVC 架作为锚杆试样支架。试验中,采用高精度 pH 计测定试验溶液 pH,通过增减蒸馏水及浓盐酸维持溶液 pH 稳定。锚杆试样浸泡过程及环境池参数如图 1 所示。

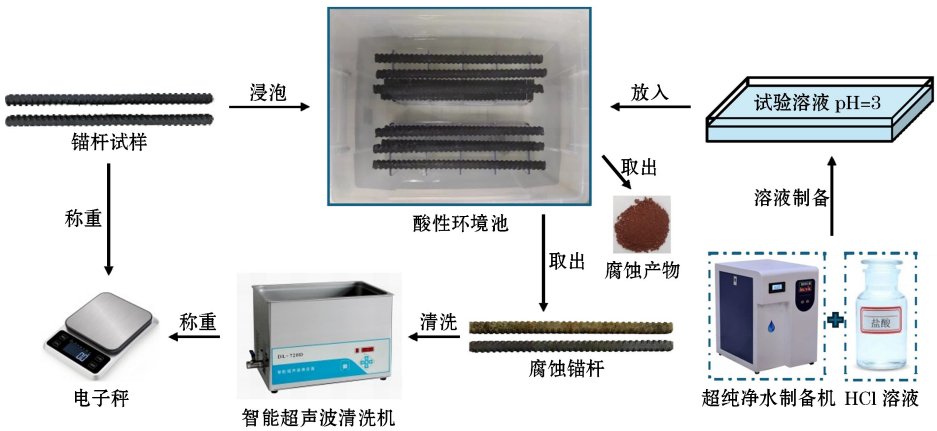


图 1 锚杆试样浸泡过程及环境池参数

Fig.1 Soaking process and environmental pool parameters of anchor bolt sample

试验总时长为 100 d,共设置 5 个试验阶段,每 20 d 为一个测试期。在试验进行 20,40,60,80,100 d 时,从酸性环境池中分别取出 1 根普通锚杆和 1 根渗锌锚杆试样,将其放入超声波清洗机中进行除锈,清洗溶液为质量分数 10% 的乙酸铵溶液(CH_3COONH_4),温度为 25 ℃,清洗时长为 10 min。随后将除锈完成的锚杆试样冲洗干净,放入烘干箱中干燥 24 h,采用电子秤对干燥后的锚杆试样进行称重,精度为 0.01 g。称重完成后对锚杆试样进行力学性能测试。试验结束后,收集酸性环境池中锚杆试样腐蚀产物并进行成分分析。

1.3 试验测试及表征方法

采用液压万能试验机对不同试验阶段的普通锚杆、渗锌锚杆试样进行拉伸测试,记录各试样屈服载荷、最大载荷及伸长量,分别通过式(1)、式(2)、式(3)计算各试样的屈服强度、抗拉强度及延伸率。锚杆试样拉伸测试选用圆试样夹具,位移加载速率为 10 mm/min。

锚杆的屈服强度计算公式如下:

$$R_{eL}=\frac{F_{eL}}{A} \tag{1}$$

式中:R_{eL} 为屈服强度,Pa;F_{eL} 为屈服载荷,N;A 为锚杆试样截面积,m^2。

锚杆的抗拉强度计算公式如下:

$$R_m=\frac{F_m}{A} \tag{2}$$

式中:R_m 为抗拉强度,Pa;F_m 为最大载荷,N。

锚杆的延伸率计算公式如下:

$$\alpha=\frac{L_u-L_0}{L_0}\times 100\% \tag{3}$$

式中:α 为锚杆延伸率,%;L_0 为锚杆试样测试段长度,m;L_u 为锚杆试样测试段拉伸断裂后长度,m。

最后采用 X-射线粉末衍射仪对普通锚杆、渗锌锚杆试样腐蚀产物进行物相分析。

2 试验结果及分析

2.1 腐蚀动力学分析

采用失重法计算普通锚杆、渗锌锚杆浸泡腐蚀 20,40,60,80,100 d 后的失重数据,见表 3。由表 3 可知,酸性环境下两种锚杆的腐蚀失重数据差距很大。腐蚀 100 d 后,普通锚杆质量损失达 51.60 g,平均腐蚀深度达 234.24 μm;渗锌锚杆质量损失达 5.25 g,平均腐蚀深度达 25.81 μm,分别为普通锚杆失重数据的 10.17%、11.02%。通过式(4)计算锚杆平均腐蚀速率可知,腐蚀全过程中普通锚杆的平均腐蚀速率均高于渗锌锚杆,普通锚杆、渗锌锚杆的最大平均腐蚀速率分别为 854.98,108.80 μm/a,至腐蚀 100 d 时,普通锚杆平均腐蚀速率达 854.98 μm/a,渗锌锚杆平均腐蚀速率达 94.22 μm/a,仅为普通锚杆的 11.02%。

锚杆平均腐蚀速率计算公式如下:

$$V_1=365\ 000\frac{m_1-m_2}{S\rho t} \tag{4}$$

式中：V_1 为锚杆平均腐蚀速率，μm/a；m_1 为腐蚀前锚杆质量，g；m_2 为腐蚀后锚杆质量，g；S 为锚杆表面积，m^2；ρ 为锚杆材料密度，kg/m^3；t 为腐蚀时间，d。

此外，锚杆平均腐蚀深度与腐蚀时间的关系可用式(5)表示。

$$D=Ct^n \tag{5}$$

式中：D 为锚杆平均腐蚀深度，μm；C 为腐蚀深度常数；n 为腐蚀时间常数，$n>1$ 表示加速腐蚀过程，$n<1$表示减速腐蚀过程，$n=1$ 表示线性腐蚀过程。

锚杆瞬时腐蚀速率的计算公式如下：

$$V_2=\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t}=365\times nCt^{n-1} \tag{6}$$

式中，V_2 为锚杆瞬时腐蚀速率，μm/a。

表 3　锚杆腐蚀失重数据

Table 3　Corrosion weight loss data of anchor bolts

时间/d	质量损失/g		平均腐蚀深度/μm		平均腐蚀速率/(μm·a^{-1})	
	普通锚杆	渗锌锚杆	普通锚杆	渗锌锚杆	普通锚杆	渗锌锚杆
20	6.29	1.00	28.55	4.92	521.11	89.73
40	16.06	2.43	72.92	11.92	665.37	108.80
60	28.32	3.22	128.55	15.82	781.98	96.21
80	39.98	4.38	181.47	21.51	827.95	98.14
100	51.60	5.25	234.24	25.81	854.98	94.22

图 2 为锚杆腐蚀动力学曲线。由图 2(a)可知，随着腐蚀时间的增加，普通锚杆的平均腐蚀深度及平均腐蚀速率均不断增大，由式(5)对普通锚杆的平均腐蚀深度随腐蚀时间的变化规律进行曲线拟合，相关系数 $R_1^2=0.998\ 05$，这表明酸性环境下基于平均腐蚀深度构建的普通锚杆腐蚀动力学曲线可很好地拟合幂函数模型。

由图 2(b)可知，渗锌锚杆的平均腐蚀深度随腐蚀时间的增加持续增大，应用式(5)对其进行曲线拟合，相关系数 $R_2^2=0.993\ 22$，这表明渗锌锚杆腐蚀动力学曲线亦可很好地拟合幂函数模型。而随腐蚀时间的增加，渗锌锚杆平均腐蚀速率在试验 20～40 d 不断增大，在试验 40 d 后逐渐下降并趋于稳定。这表明试验前期渗锌锚杆表面防护层及游离锌快速腐蚀消耗，致使锚杆快速失重。随着腐蚀时间的增加，渗锌锚杆表面锌铁合金发挥防腐功能，锚杆腐蚀遭受抑制。

由图 2(c)可知，普通锚杆瞬时腐蚀速率随腐蚀时间的增加持续增大，呈抛物线形变化，这表明酸性环境下普通锚杆表现出加速腐蚀特征；渗锌锚杆瞬时腐蚀速率随腐蚀时间的变化较小，这表明酸性环境下渗锌锚杆表现出近似匀速的腐蚀特征，两种锚杆瞬时腐蚀速率变化规律与图 2(a)、图 2(b)拟合曲线中 n 值的分析结果一致。此外，普通锚杆与渗锌锚杆间的瞬时腐蚀速率差距随腐蚀时间的增加不断增大，这表明酸性矿井环境中渗锌锚杆的防腐效果随服役时长的增加愈加明显。

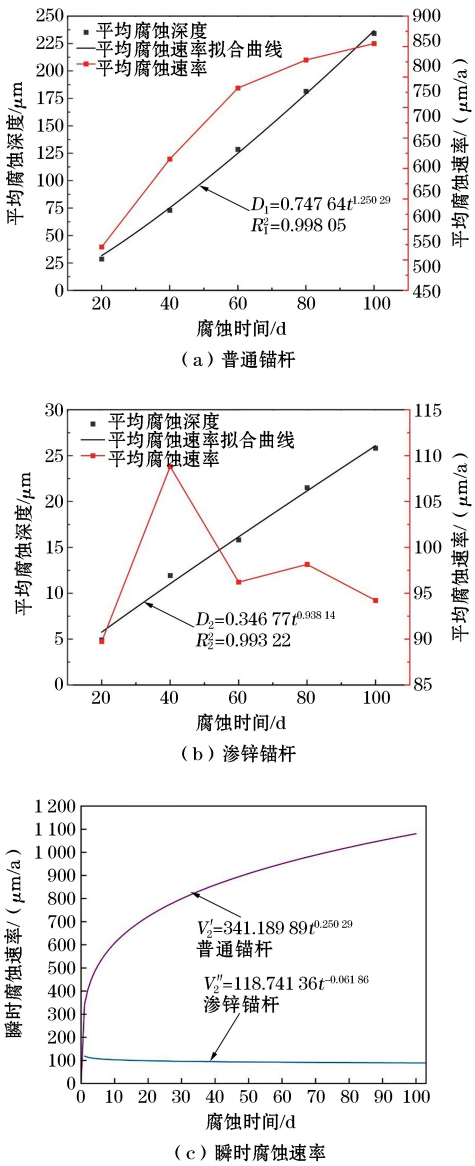


图 2　锚杆腐蚀动力学曲线

Fig.2　Corrosion kinetics curves of anchor bolts

2.2　拉伸断口分析

断口分析是研究锚杆材料结构性能的重要内容。酸性环境下浸泡腐蚀 20，40，60，80，100 d 的普通锚杆和渗锌锚杆经极限载荷破坏后，其断口状态如图 3 所示。

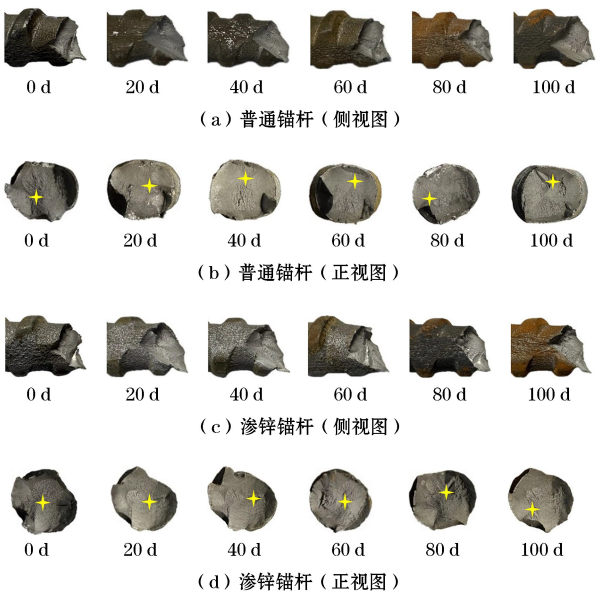


图 3 锚杆拉伸断口侧视图及正视图

Fig.3 Side view and front view of ahchor bolts tensile fracture

由图 3 中断口侧视图可知,各腐蚀阶段的普通锚杆、渗锌锚杆断裂时均存在颈缩现象,断口均呈杯椎状。随着腐蚀时间的增加,两种锚杆试样的颈缩现象均愈加明显,断口逐渐由杯椎状向劈裂状转变。其中,普通锚杆断口形态转变较大,渗锌锚杆断口形态转变较小。这表明受腐蚀影响,两种锚杆的断裂韧性均有所降低,且普通锚杆的断裂韧性劣化更为明显。从图 3 中断口正视图可以清晰地看出,两种锚杆断口均可分为断裂源区、放射区、剪切断裂区 3 个区域。断裂源区(黄色星号处,颜色标识见电子版)是锚杆拉伸过程中裂纹孕育的中心,呈粗糙纤维状。放射区是裂纹由缓慢扩展向快速不稳定扩展转化的区域,其与断裂源区相接,呈放射线状。剪切断裂区是平面应力状态下锚杆材料发生切断型断裂的区域,可在断口形成与拉伸应力成 45°的光滑剪切面。图 3 所示断口断裂源区并未与锚杆试样中心重合,且断面存在波纹花样,这表面锚杆拉伸断裂过程中存在颈缩现象,当颈缩发生时,锚杆内部金属晶粒滑移致使其横截面应力分布不均匀,并形成应变集中,从而导致断口中央偏离锚杆试样中心,进而发生穿晶断裂,在断面形成波纹花样。随着腐蚀时间的增加,普通锚杆断口断裂源区均逐步偏离锚杆试件中心,放射区逐渐扩大,剪切断裂区持续缩小,断面波纹花样逐渐明显。这表明腐蚀导致普通锚杆韧性降低、颈缩增大,锚杆拉伸断裂逐步由韧性断裂向韧性-脆性混合断裂转变。渗锌锚杆断口 3 个区域形态变化并不明显,证明渗锌锚杆具有优于普通锚杆的耐酸蚀性能。

2.3 力学性能分析

采用万能试验机对浸泡腐蚀 20,40,60,80,100 d 后的普通锚杆、渗锌锚杆进行拉伸试验,获得的锚杆载荷-位移曲线及力学性能变化规律分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知,普通锚杆、渗锌锚杆载荷-位移曲线整体趋势均符合钢筋拉伸曲线变化规律,可分为弹性变形阶段、塑性变形阶段、塑性强化阶段和颈缩破坏阶段。随着腐蚀时间的增加,两种锚杆弹性变形阶段和塑性强化阶段逐渐削弱,塑性变形阶段和颈缩破坏阶段略有提前,这意味着两种锚杆抗变形能力随腐蚀时间的增加均逐渐减弱。这一性能劣化亦体现在锚杆屈服载荷和最大载荷上。腐蚀 100 d 时,普通锚杆的屈服载荷达 123.26 MPa,最大载荷达 161.70 MPa,分别降低了 6.50%和 6.36%;渗锌锚杆的屈服载荷达 128.41 MPa,最大载荷达 170.31 MPa,分别降低了 2.86%和 1.46%。

屈服强度可反映锚杆材料抵抗塑性变形的最大承载能力,抗拉强度可反映金属锚杆静拉伸条件下的最大断裂抗力,延伸率可反映金属材料的塑性性能,此三者是评估锚杆力学性能最常用的指标参数。由图 5(a)可知,两种锚杆的屈服强度均随腐蚀时间的增加逐渐降低,普通锚杆的下降趋势大于渗锌锚杆。试验 100 d 后,普通锚杆、渗锌锚杆的屈服强度分别达 392.36 MPa、408.75 MPa,分别下降了 6.50%、2.85%。由图 5(b)可知,普通锚杆的抗拉强度随腐蚀时间的增加持续减小,试验 100 d 后,其抗拉强度达 514.70 MPa,下降了 6.37%;渗锌锚杆的抗拉强度在试验 0~20 d 内快速降低,随后趋于平缓,这是由于渗锌锚杆表面防护膜及游离锌在试验前期快速溶解消耗,而后期锚杆表面保护性腐蚀产物出现并大量附着使锚杆材料腐蚀进展得以减缓,试验 100 d 时,渗锌锚杆的抗拉强度达 542.13 MPa,下降了 1.45%。由图 5(c)可知,随着腐蚀时间的增加,两种锚杆的延伸率均不断减小,且在试验过程中两种锚杆的延伸率始终表现为渗锌锚杆大于普通锚杆。试验 100 d 后,普通锚杆、渗锌锚杆的延伸率分别为 16.78%、18.47%,分别下降了 15.85%、7.97%。此外,两种锚杆的延伸率衰减速率在试验 0~60 d 内

均较缓，试验 60 d 后均快速增大，这表明试验后期锚杆腐蚀形态逐步向局部腐蚀转变，随着腐蚀坑的发育，金属锚杆断裂倾向迅速增大，延展性快速降低。

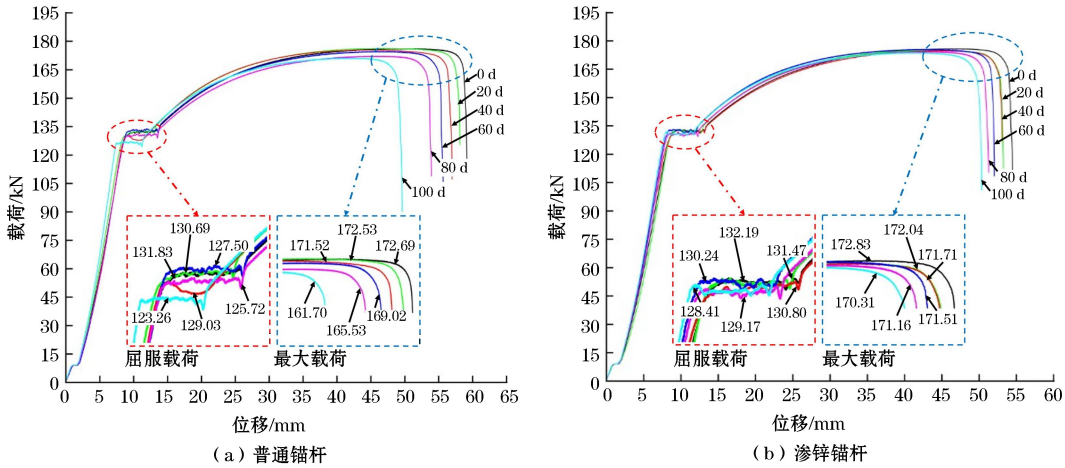


图 4　锚杆载荷-位移曲线

Fig.4　Load-displacement curves of anchor bolts

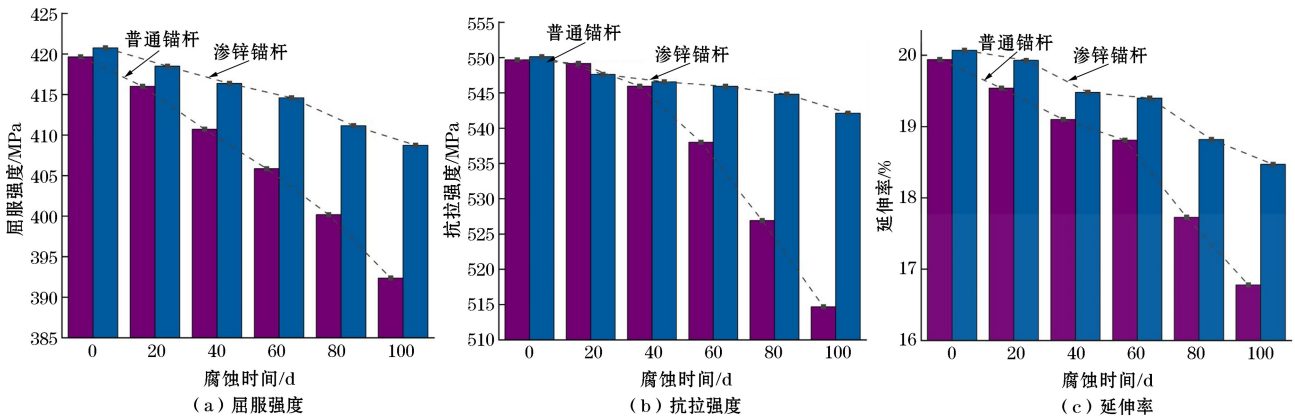


图 5　锚杆力学的参数变化规律

Fig.5　Variation law of mechanical parameters of anchor bolts

3　锚杆腐蚀机理研究

3.1　腐蚀产物分析

腐蚀产物分析是研究特定环境下金属材料腐蚀类型及腐蚀机理的重要手段。对经酸性溶液浸泡腐蚀后的普通锚杆、渗锌锚杆试样表面腐蚀产物进行物相分析，其 XRD 图谱如图 6 所示。

由图 6(a)可知，普通锚杆的腐蚀产物主要为 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$ 和 FeOOH。此三者均为沉淀型腐蚀产物，其附着于锚杆表面，可在一定程度上减缓锚杆的腐蚀速率[14]。且 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、FeOOH 均为碱性物质，这说明随着锚杆发生腐蚀，H^+ 被大量消耗，环境池酸性明显降低。此外，$Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、FeOOH 的生成均需要 O_2 的参与，此三者在腐蚀产物中的存在表明腐蚀溶液中的溶解氧参与了锚杆腐蚀过程中的氧化反应。由图 6(b)可知，渗锌锚杆的腐蚀产物主要为 ZnO、$Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$、$ZnCl_2 \cdot nH_2O$、$Fe(OH)_2$ 和 $Fe(OH)_3$。其中，$ZnCl_2 \cdot nH_2O$ 为可溶物，不参与腐蚀产物膜的构建，对锚杆的保护作用较为有限。ZnO、$Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$、$Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$ 均为难溶物，其在锚杆表面的沉淀附着可构建成腐蚀产物膜，对锚杆具有较好的保护作用[15]。此外，渗锌锚杆的腐蚀产物中存在 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$ 是由于渗锌防腐层主要由 $FeZn_4$ 组成[16]。随着腐蚀过程中渗锌层 Zn 元素的溶解消耗，部分 Fe 元素逐渐发展为电化学腐蚀阳极，在溶解氧的氧化作用下，生成腐蚀产物 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$。

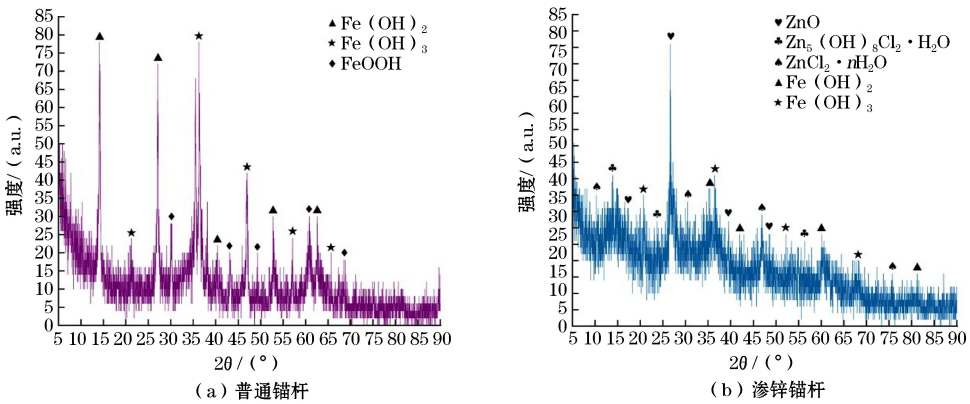


图 6 锚杆腐蚀产物 XRD 图谱

Fig.6 XRD pattern of anchor bolt corrosion products

3.2 普通锚杆腐蚀机理

普通锚杆表层存在由 Fe_2O_3、FeOOH 组成的钝化膜,钝化膜包裹锚杆基体,锚杆基体主要成分为 Fe[17]。酸性环境下普通锚杆腐蚀过程可由溶膜-破坏机制描述,如图 7 所示。

试验前期,锚杆处于穿膜腐蚀阶段,锚杆表层钝化膜发生化学反应溶解。反应方程式见式(7)、式(8)。

$$Fe_2O_3+6H^+\rightarrow 2Fe^{3+}+3H_2O \quad (7)$$

$$FeOOH+3H^+\rightarrow Fe^{3+}+2H_2O \quad (8)$$

随着钝化膜溶解破坏,酸性溶液沿钝化膜薄弱处渗透至锚杆基体,锚杆进入破坏腐蚀阶段。锚杆基体受腐蚀介质影响形成释放电子的阳极区和接受电子的阴极区,阳极区发生铁的活性溶解,阴极区发生析氢反应,以致锚杆基体金属电化学腐蚀破坏[18]。电化学反应方程式见式(9)、式(10)。

$$Fe-2e^-/3e^-\rightarrow Fe^{2+}/Fe^{3+} \quad (9)$$

$$2H^++2e^-\rightarrow H_2 \quad (10)$$

在锚杆破坏腐蚀过程中,由于腐蚀介质中存在溶解氧,Fe 可被氧化生成难溶性腐蚀产物 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、FeOOH,由于 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、FeOOH 在锚杆表面聚集形成的腐蚀产物膜具有致密性,可对腐蚀介质起到屏障作用,在一定程度上减缓了锚杆腐蚀进程[19]。铁氧化反应方程式见式(11)、式(12)。

$$2Fe+O_2+2H_2O\rightarrow 2Fe(OH)_2 \quad (11)$$

$$4Fe(OH)_2+O_2\rightarrow 2Fe(OH)_3+2FeOOH \quad (12)$$

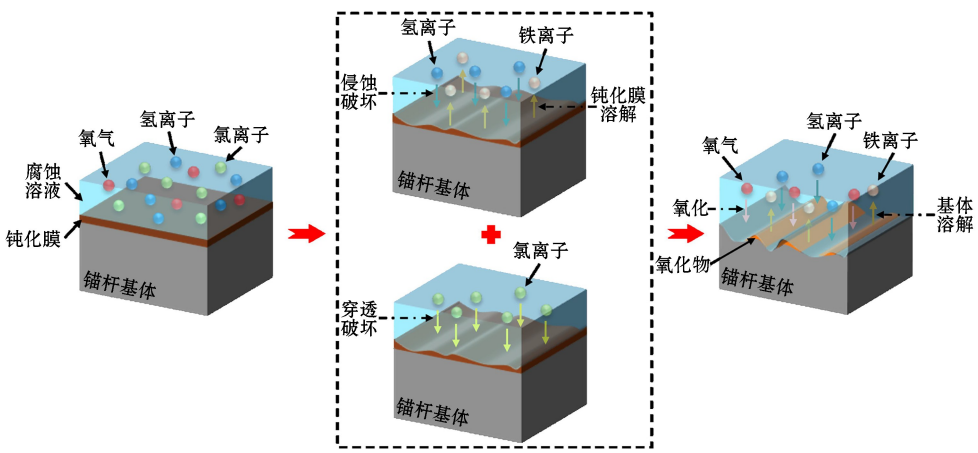


图 7 普通锚杆腐蚀机理

Fig.7 Corrosion mechanism of ordinary anchor bolt

此外,钝化膜受酸性腐蚀介质持续性“破坏-穿透”作用,其完整性和致密性遭受损害,易形成钝化膜局部缺陷[20]。腐蚀介质经钝化膜缺陷处渗透至锚杆基体,从而在诱发锚杆基体电化学腐蚀的同时于钝化膜缺陷处聚集大量 Fe^{3+}、Fe^{2+}。这些金属离子经水解反应可增大缺陷处溶液酸度,导致腐蚀加剧,促进锚杆基体表面形成小型点蚀坑。小型点蚀坑内金属离子的持续水解及腐蚀介质的迁移富集致使蚀坑内溶液导电性提高,导致蚀坑内金属处于电位较负的活性状态,从而形成蚀坑内金属为正极、蚀

坑外金属为负极的腐蚀原电池,加速锚杆基体腐蚀破坏[21]。

3.3 渗锌锚杆腐蚀机理

渗锌锚杆防腐层为完全的锌铁合金层($FeZn_4$),其表层散落有少量游离锌及游离锌氧化形成的防护膜(ZnO、$ZnCO_3$ 和 $Zn(OH)_2$)[22]。渗锌锚杆防腐层破坏及腐蚀产物形成过程可表述为溶膜-转变机制,如图 8 所示。

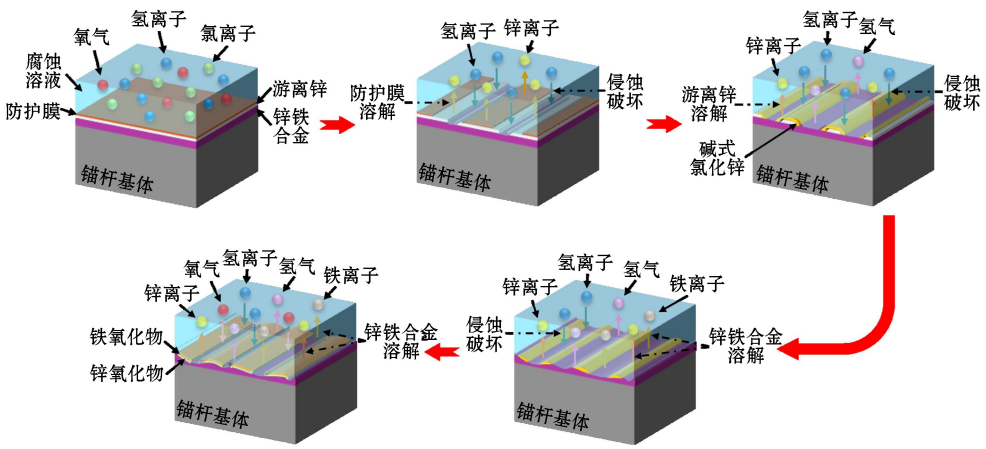


图 8 渗锌锚杆腐蚀机理

Fig.8 Corrosion mechanism of zinc-infiltrated anchor bolt

酸性环境下,渗锌锚杆表层防护膜受 H^+ 作用发生化学反应溶解,反应方程式见式(13)。

$$ZnO+ZnCO_3+Zn(OH)_2+6H^+ \rightarrow 3Zn^{2+}+4H_2O+CO_2 \quad (13)$$

由于渗锌锚杆表层游离锌含量较少且分布零散,在酸性环境中这层游离锌会被快速溶解消耗,无法与溶解氧反应生成氧化产物[23]。因此,渗锌锚杆表面防护膜不具有自愈性。

随着防护膜及游离锌的溶解消耗,酸性溶液沿防护膜缺陷处渗透至锌铁合金层。由于酸性环境中 Zn 的腐蚀电位与 Fe 相比更负,锌铁合金内部可形成若干个 Zn 为负极、Fe 为正极的 Zn-Fe 微电偶对,使之发生电偶腐蚀,反应方程式见式(10)、式(14)。当腐蚀介质中富含 Cl^- 时,一部分 Zn^{2+} 与 Cl^-、H_2O 结合生成可溶性水合物 $ZnCl_2 \cdot nH_2O$,一部分 Zn^{2+} 水解生成 $Zn(OH)_2$。$Zn(OH)_2$ 在酸性环境中的化学性质并不稳定,会进一步与 $ZnCl_2 \cdot nH_2O$ 结合形成电化学惰性腐蚀产物 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$[24],反应方程式见式(15)。由于渗锌所形成锌铁合金层主要成分为 $FeZn_4$,Zn-Fe 微电偶对存在大阳极-小阴极的面积比,使得此 Zn-Fe 微电偶对阳极腐蚀电流密度较小,锌铁合金层($FeZn_4$)电化学腐蚀速率较慢。此外,锌铁合金层具有致密性,不易被 Cl^- 穿透破坏,且随着 Zn 的腐蚀溶解,部分 Fe 逐渐转变成为腐蚀原电池负极,受腐蚀介质中 H^+ 氧化作用溶解形成 Fe^{3+}、Fe^{2+},从而使得渗锌锚杆表面锌铁合金层腐蚀均匀,不易诱导点蚀形核发展[25]。

$$Zn-2e^- \rightarrow Zn^{2+} \quad (14)$$

$$4Zn(OH)_2+ZnCl_2+H_2O \rightarrow Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O \quad (15)$$

酸性环境下渗锌锚杆腐蚀产物膜的生成亦与溶解氧密切相关。电偶腐蚀过程中,受溶解氧氧化作用,部分 Zn 被氧化生成附着于渗锌锚杆表面的保护性腐蚀产物 ZnO,反应方程式见式(16)。随着 Fe 逐渐发展成为电化学腐蚀阳极,溶解氧的氧化主体逐渐转变为 Fe,$Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$ 开始生成并在渗锌锚杆表面聚集。因此,渗锌锚杆腐蚀产物膜由内层锌氧化膜和表层铁氧化膜共同构成。双层结构的腐蚀产物膜对腐蚀介质具有良好的屏障作用,可减缓锌铁合金层电化学腐蚀速率。

$$2Zn+O_2 \rightarrow 2ZnO \quad (16)$$

4 腐蚀前后锚杆支护效果分析

4.1 数值模型建立

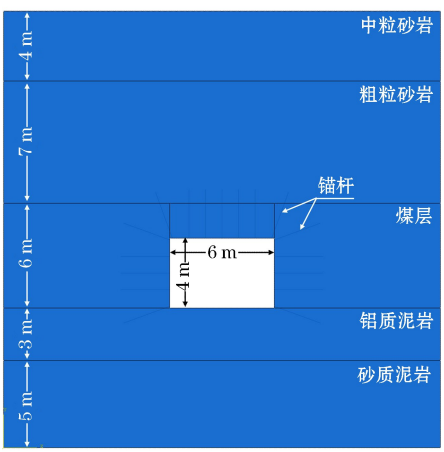
高家堡煤矿位于我国西北部彬长矿区,其 3407 工作面运输顺槽巷道支护锚杆受酸性矿井环境影响,出现严重的腐蚀失效现象,导致巷道围岩变形破坏严重。高家堡煤矿 3407 运输巷围岩参数见表 4。

表 4 巷道围岩参数

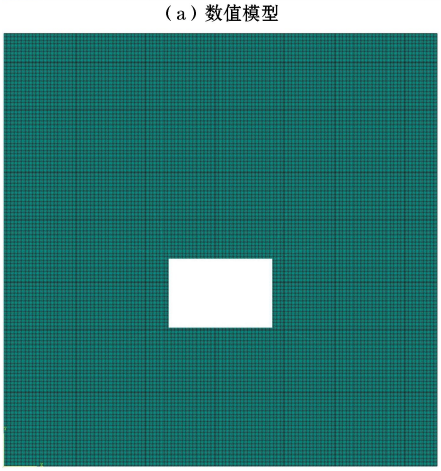
Table 4 Parameters of roadway surrounding rock

岩层	岩性	厚度/m	密度/(kg/m³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
老顶	中粒砂岩	4	2 580	5.99	0.20	4.00	37
直接顶	粗粒砂岩	7	2 560	7.07	0.22	5.00	34
煤层	煤	6	1 400	0.99	0.31	1.00	28
直接底	铝质泥岩	3	2 545	8.11	0.27	1.20	30
老底	砂质泥岩	5	2 520	7.88	0.23	1.18	35

以高家堡煤矿 3407 运输巷为工程背景,应用 Abaqus 数值模拟软件建立矩形巷道数值模型,模型尺寸为 25 m×25 m,巷道断面尺寸为 6 m×4 m;分别应用普通锚杆、渗锌锚杆对模型进行巷道围岩支护,两种锚杆长度均为 2 800 mm,锚杆间排距为 950 mm×1 100 mm;模型分析过程中,对模型左右边界进行水平位移约束,对模型下边界进行完全固定约束,应用上文试验数据控制普通锚杆、渗锌锚杆腐蚀前后的力学参数,采用静力学分析探计锚杆腐蚀前后巷道围岩稳定性情况。数值模型及网格划分如图 9 所示。



(a) 数值模型



(b) 网格划分

图 9 数值模型及网格划分

Fig.9 Numerical model and grid division

4.2 围岩位移分析

普通锚杆、渗锌锚杆腐蚀前后巷道围岩垂直位移分布云图如图 10 所示。普通锚杆、渗锌锚杆腐蚀前后巷道围岩位移场分布规律相近,但巷道顶板位移量存在差异。锚杆服役前期未遭受腐蚀,巷道顶板位移量较小。随着服役时长的增加,受环境腐蚀影响,锚杆的力学性能不断劣化,巷道顶板处位移量有所增大。由图 10(a)和图 10(b)可知,应用普通锚杆进行支护的巷道,锚杆腐蚀前其顶板位移量为 206.3 mm,腐蚀后其顶板位移量为 309.6 mm。由图 10(c)和图 10(d)可知,应用渗锌锚杆进行支护的巷道,锚杆腐蚀前其顶板位移量为 196.0 mm,腐蚀后其顶板位移量为 237.3 mm。

图 11 为普通锚杆、渗锌锚杆腐蚀前后巷道围岩水平位移分布云图。由图 11 可知,随着腐蚀的发生,两种锚杆力学性能均有所下降,导致巷道两帮位移量有所增大。由图 11(a)和图 11(b)可知,普通锚杆支护巷道在锚杆腐蚀前其左帮、右帮位移量均为 21.81 mm,两帮总位移量为 43.62 mm;锚杆发生腐蚀后其左帮、右帮位移量均为 33.26 mm,两帮总位移量为 66.52 mm。由图 11(c)和图 11(d)可知,渗锌锚杆支护巷道在锚杆腐蚀前其左帮、右帮位移量均为 20.72 mm,两帮总位移量为 41.44 mm;锚杆发生腐蚀后其左帮、右帮位移量均为 25.29 mm,两帮总位移量为 50.58 mm。

4.3 围岩应力分析

普通锚杆、渗锌锚杆腐蚀前后巷道围岩垂直应力分布云图如图 12 所示。由图 12 可知,巷道两帮分布有较高压应力,顶底板分布有较高拉应力,且随着锚杆腐蚀劣化,巷道两帮压应力及顶底板拉应力均有所增加。由图 12(a)和图 12(b)可知,随着锚杆发生腐蚀,普通锚杆支护巷道两帮压应力由 39.25 MPa 增加至 50.01 MPa,顶底板拉应力由 0.13 MPa 增加至0.18 MPa。由图 12(c)和图 12(d)可知,随着锚杆发生腐蚀,渗锌锚杆支护巷道两帮压应力由 37.29 MPa 增加至 44.95 MPa,顶底板拉应力由 0.13 MPa 增加至 0.15 MPa。

通过对腐蚀前后普通锚杆支护巷道、渗锌锚杆支护巷道围岩位移场、应力场分布情况进行分析,发现普通锚杆和渗锌锚杆的腐蚀劣化均会导致巷道围岩出现位移增加和应力集中现象,降低巷道围岩稳定性。然而,相同腐蚀条件下,普通锚杆支护巷道围岩稳定性下降程度显著高于渗锌锚杆支护巷道。应

用普通锚杆进行支护的巷道在锚杆腐蚀后,其顶板位移量、两帮位移量、两帮压应力、顶底板拉应力分别增长了 50.07%、52.50%、27.41%、36.85%;应用渗锌锚杆进行支护的巷道在锚杆腐蚀后,其顶板位移量、两帮位移量、两帮压应力、顶底板拉应力分别增长了 21.07%、22.06%、20.54%、16.37%。这表明相同腐蚀条件下渗锌锚杆支护具有优于普通锚杆支护的围岩控制效果。

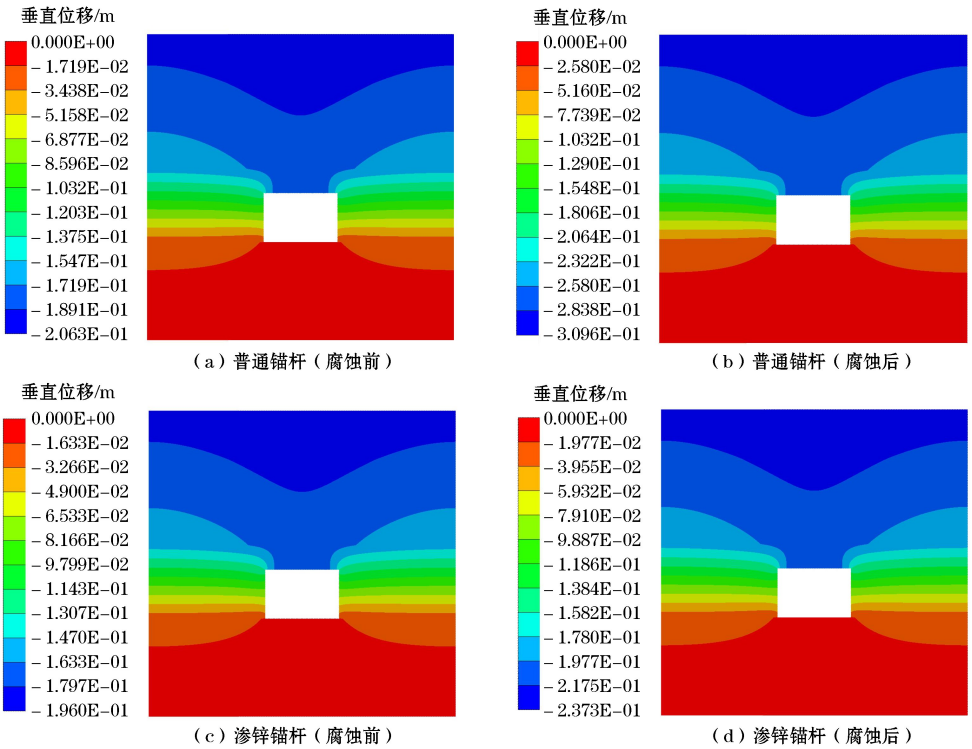


图 10 巷道围岩垂直位移分布云图

Fig.10 Vertical displacement distribution cloud maps of roadway surrounding rock

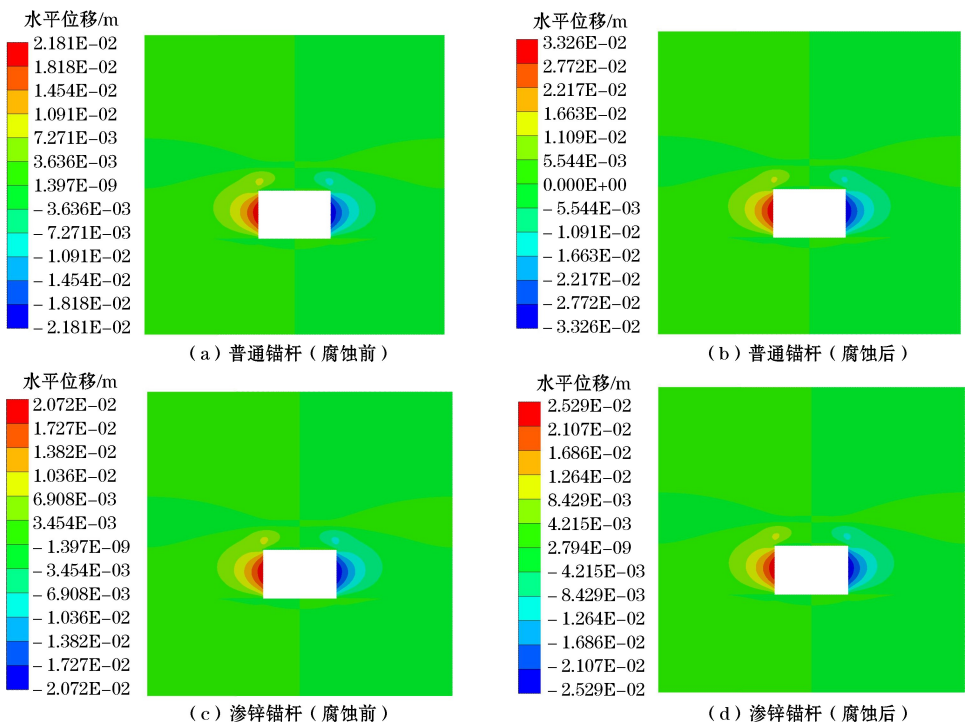
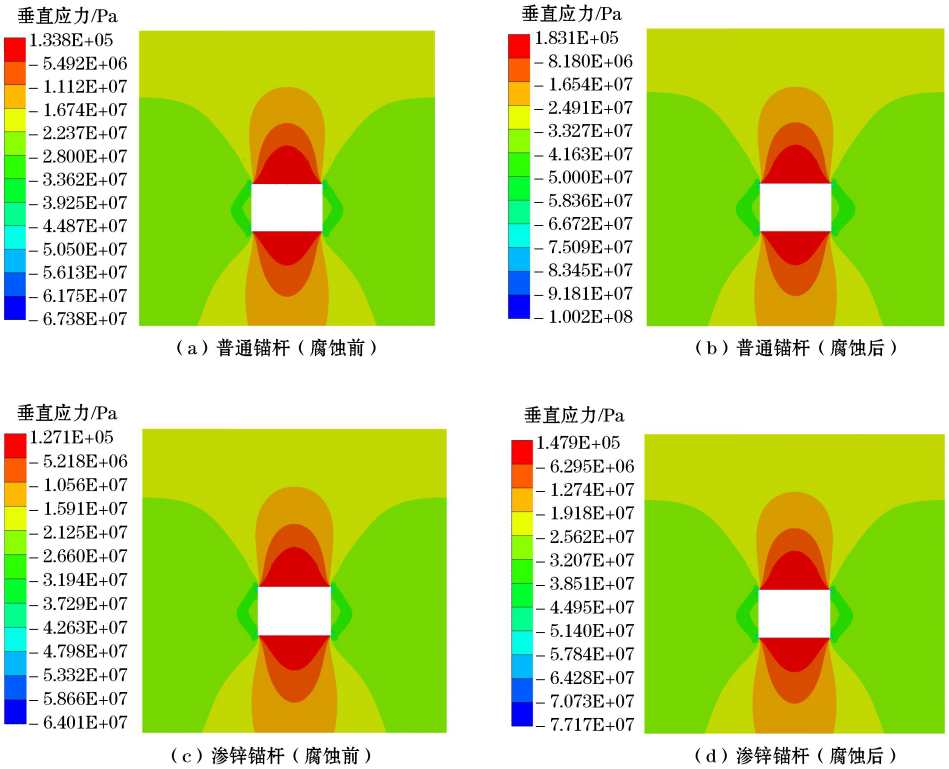


图 11 巷道围岩水平位移分布云图

Fig.11 Horizontal displacement distribution cloud maps of roadway surrounding rock



（a）普通锚杆（腐蚀前） （b）普通锚杆（腐蚀后）

（c）渗锌锚杆（腐蚀前） （d）渗锌锚杆（腐蚀后）

图 12 巷道围岩垂直应力分布云图

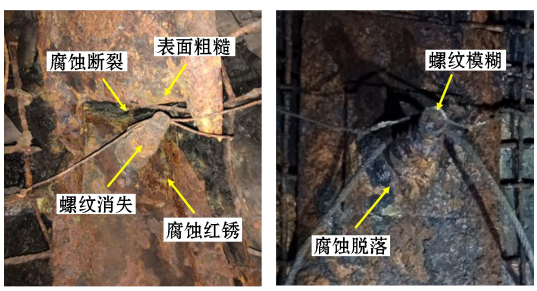
Fig.12 Vertical stress distribution cloud maps of roadway surrounding rock

5 工程应用

应用渗锌锚杆对高家堡煤矿 3407 运输顺槽进行防腐支护，巷道顶板每排布置 7 根锚杆，两帮每排布置 5 根锚杆，锚杆规格为 Φ20 mm×2 800 mm，间排距为 950 mm×1 100 mm。此外，巷内变更支护时留存部分布设不久的普通锚杆用于对比研究。变更支护 100 d 后，对比巷内普通锚杆和渗锌锚杆的腐蚀情况，如图 13 所示。

由图 13 可知，变更支护 100 d 后，普通锚杆出现较为严重的腐蚀现象，外露于巷道中的锚头部分表面粗糙，出现大量不规则腐蚀坑，锚杆与钢带连接处腐蚀断裂，锚头细螺纹腐蚀消失并产生大量腐蚀产物，致使螺母与细螺纹融为一体。渗锌锚杆腐蚀较轻，部分区域出现防腐层腐蚀脱落现象，但整体锌铁合金渗层仍较为完整，锚杆与钢带连接处层次清晰且无断裂倾向，锚头细螺纹略有模糊，螺母与锚杆连接紧密。这表明在实际酸性矿井环境中渗锌锚杆耐腐蚀性能明显优于普通锚杆。

综上所述，酸性矿井环境下应用渗锌锚杆进行巷道支护可有效延长锚固支护寿命，维护巷道围岩稳定性，保障巷道支护安全。



（a）普通锚杆 （b）渗锌锚杆

图 13 锚杆腐蚀现场

Fig.13 Site of anchor bolt corrosion

6 结论

本文通过锚杆浸泡腐蚀试验及数值模拟，探究了酸性环境下普通锚杆和渗锌锚杆的腐蚀特征、性能劣化及腐蚀机理，得出以下主要结论。

（1）渗锌锚杆耐酸蚀性能显著优于普通锚杆。腐蚀全过程中，普通锚杆的腐蚀速率始终明显高于渗锌锚杆；随着腐蚀时长的增加，普通锚杆呈加速腐蚀趋势，渗锌锚杆呈匀速腐蚀趋势，两种锚杆腐蚀速率变化规律均遵循幂函数模型。

（2）受酸性环境腐蚀影响，普通锚杆抗变形能

力、抗断裂能力、塑性性能劣化明显,拉伸断裂形态由韧性断裂向韧性-脆性混合断裂转变;渗锌锚杆力学性能下降较小,拉伸断裂形态仍具有明显的韧性断裂特征。腐蚀发生后,普通锚杆支护巷道围岩稳定性下降程度显著高于渗锌锚杆支护巷道。

(3)酸性环境下,普通锚杆腐蚀可描述为溶膜-破坏机制,钝化膜化学腐蚀溶解,锚杆基体电化学腐蚀破坏,并生成腐蚀产物 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$、FeOOH;渗锌锚杆腐蚀可描述为溶膜-转变机制,防护膜及游离锌化学腐蚀溶解,渗锌层电偶腐蚀中 Zn、Fe 依次充当阳极,促使渗锌层均匀腐蚀,并生成腐蚀产物 $ZnCl_2 \cdot nH_2O$、ZnO、$Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$、$Fe(OH)_2$ 和 $Fe(OH)_3$。

参考文献(References):

[1] 吴赛赛,朱昊天,张雯,等.矿山多属性环境协同作用对锚杆腐蚀的影响[J].金属矿山,2020(5):132-136.
WU Saisai, ZHU Haotian, ZHANG Wen, et al. Synergic influence of mine multi-attribute environments on rock bolts corrosion[J].Metal Mine,2020(5):132-136.

[2] 王玉杰,尹韬,孙兴松,等.丰满老坝加固预应力锚索服役近30年后性能评价研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):62-69.
WANG Yujie, YIN Tao, SUN Xingsong, et al. Performance evaluation of prestressed anchors embedded in old Fengman dam after nearly 30 years service [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(1):62-69.

[3] 李阿康,岳中文,王鹏,等.考虑锚-岩界面相对滑移的圆形巷道全长锚固锚杆力学性能研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(1):123-133.
LI Akang, YUE Zhongwen, WANG Peng, et al. Study on the mechanical properties of fully grouted bolts in circular tunnels considering the relative slip of the bolt-rock interface [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2024,41(1):123-133.

[4] 潘继良,李鹏,席迅,等.地下工程锚固结构腐蚀耐久性研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(9):1-13.
PAN Jiliang, LI Peng, XI Xun, et al. Research progress on corrosion durability of anchorage structures in underground engineering[J].Journal of Harbin Institute of Technology, 2019,51(9):1-13.

[5] YIN T, SUN X S, WANG Y J, et al. Corrosion investigation of rock anchors served over 10 years in underground powerhouse of a hydropower station [J]. Advances in Materials Science and Engineering,2022:4905010.

[6] WANG Q, WANG F N, REN A W, et al. Corrosion behavior and failure mechanism of prestressed rock bolts (cables) in the underground coal mine[J].Advances in Civil Engineering,2021(7):6686865.

[7] 黎慧珊,王玉杰,孙兴松,等.无黏结预应力锚索运行健康状况分析与评价[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):2913-2924.
LI Huishan, WANG Yujie, SUN Xingsong, et al. Analysis and assessment of health status of unbonded prestressed anchors [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(Suppl.1):2913-2924.

[8] 邵蓉,黎敏,刘永壮,等.锌铝镁镀层不同表面处理体系成分分析及耐蚀性研究[J].表面技术,2023,52(9):253-264.
SHAO Rong, LI Min, LIU Yongzhuang, et al. Composition analysis and corrosion resistance of different surface treatment systems for Zn-Al-Mg coating [J]. Surface Technology,2023,52(9):253-264.

[9] 顾天真,刘雨薇,彭灿,等.热浸镀 Zn-Al-Mg 镀层在模拟湿热海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J].表面技术,2024,53(2):110-119.
GU Tianzhen, LIU Yuwei, PENG Can, et al. Corrosion behavior of hot-dip Zn-Al-Mg coating exposed to a simulated hot and humid marine atmosphere[J].Surface Technology, 2024,53(2):110-119.

[10] GAO Y, KAINUMA S, YANG M Y, et al. Galvanic corrosion behavior of hot-dip Al and 55 Al-Zn coatings applied tosteel bolted joints in atmospheric environments[J]. Construction and Building Materials,2023,401:211-223.

[11] DEWI M, SANCHAROEN P, KLOMJIT P, et al. Effects of zinc alloy layer on corrosion and service life of galvanized reinforcing steels in chloride-contaminated concrete [J]. Journal of Building Engineering,2023,68:106153.

[12] 黎敏,董妮妮,商婷,等.锌铝镁镀层和纯锌镀层在典型大气环境中初期腐蚀行为研究[J].表面技术,2024,53(2):120-129+139.
LI Min, DONG Nini, SHANG Ting, et al. Study on initial corrosion behavior of Zn-Al-Mg coating and pure zinc coating in typical atmospheric environment[J].Surface Technology, 2024,53(2):120-129+139.

[13] 梁艳玲,霍润科,宋战平,等.面容比对酸蚀砂岩溶解特性与力学性能的影响[J].煤炭学报,2023,48(4):1527-1537.
LIANG Yanling, HUO Runke, SONG Zhanping, et al. Influence of area-to-volume ratios on dissolution characteristics and mechanical properties of acid-corroded sandstone[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(4):1527-1537.

[14] 明静,施锦杰,孙伟.混凝土中低合金钢筋腐蚀产物的微结构分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):347-353.
MING Jing, SHI Jinjie, SUN Wei. Microstructural analysis of the corrosion products of low-alloy reinforcing steel in concrete [J].Journal of Building Materials,2020,23(2):347-353.

[15] CI W J, CHEN X H, DAI X, et al. Achieving ultra-high corrosion-resistant Mg-Zn-Sc alloys by forming Sc-assisted protective corrosion product film [J]. Journal of Materials Sciencee & Technology,2024,181:138-151.

[16] DANIEL E F, WANG C G, LI C, et al. Evolution of corrosion degradation in galvanised steel bolts exposed to a tropical marine environment [J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,27:5177-5190.

[17] 董必钦,刘文杰,彭铭,等.碳钢表面生长不同阳离子层状双金属氢氧化物膜及耐碱耐蚀性能[J].硅酸盐学报,2024,52(2):513-521.
DONG Biqin, LIU Wenjie, PENG Ming, et al. Growth of different cationic layered double hydroxides films on carbon steel surfaces and alkali and corrosion resistances[J].Journal of the Chinese Ceramic Society,2024,52(2):513-521.

[18] 魏洁,魏英华,李京,等.带损伤环氧涂层钢筋在 Cl^- 和碳化耦合作用下的腐蚀行为[J].金属学报,2020,56(6):885-897.
WEI Jie, WEI Yinghua, LI Jing, et al. Corrosion behavior of damaged epoxy coated steel bars under the coupling effect of chloride ion and carbonization [J]. Acta Metallurgica Sinica,2020,56(6):885-897.

[19] 刘雨薇,顾天真,王振尧,等.Q235 和 Q450NQR1 在中国南沙海洋大气环境中暴晒 34 个月后的腐蚀行为[J].金属学报,2022,58(12):1623-1632.
LIU Yuwei, GU Tianzhen, WANG Zhenyao, et al. Corrosion behavior of Q235 and Q450NQR1 exposed to marine atmospheric environment in Nansha, China for 34 months [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58 (12): 1623-1632.

[20] 陈杨崛,贺小燕,黄谦,等.碳钢和不锈钢在海洋 SRB、IRB 和 IOB 下的点蚀研究现状[J].表面技术,2024,53(2):15-27+70.
CHEN Yangmei, HE Xiaoyan, HUANG Qian, et al. Research status of pitting corrosion of carbon steel and stainless steel under marine SRB, IRB and IOB[J].Surface Technology,2024,53(2):15-27+70.

[21] WANG S Y, GUO T, XU G, et al. Corrosion behavior and mechanism of electric arc-sprayed Al-Mg coating and Zn-Al-Mg pseudo-alloy coatings [J]. Surface & Coatings Technology,2023,475:130126.

[22] 张潇华,于思荣,刘彦,等.粉末渗锌钢渗层的形成机理及影响因素研究进展[J].表面技术,2020,49(11):141-150.
ZHANG Xiaohua, YU Sirong, LIU Yan, et al. Research progress of formation mechanism and influencing factors of sherardizing coating on steel[J].Surface Technology,2020,49(11):141-150.

[23] 李拔,王成彪,王向东,等.烧结钕铁硼电镀锌铁合金工艺与耐蚀性能[J].稀有金属材料与工程,2015,44(1):174-178.
LI Ba, WANG Chengbiao, WANG Xiangdong, et al. Technology and corrosion resistance of electrodeposited Zn-Fe Alloys onto Nd-Fe-B sintered magnets[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2015,44(1):174-178.

[24] BIRYUKOV A I, GAKUB R G, ZAKHARYEVICH D A, et al. The effect of the chemical composition of intermetallic phases on the corrosion of thermal diffusion zinc coatings [J].Surface & Coatings Technology,2019,372:166-172.

[25] TOKUDA S, NISHIDA Y, NISHIMOTO M, et al. Initial dissolution of Mg-containing phase and corrosion product formation in cut-edge corrosion of Zn-11% Al-3% Mg-0.2% Si coated steel[J].Corrosion Science,2023,225:111605.