# 深井高应力电化学腐蚀环境下锚杆腐蚀及防护研究*

李山存，王伟康，程东旭，唐忠伟，郭钦鹏

（长沙有色冶金设计研究院有限公司， 湖南 长沙 410019）

**摘要**：在深井高应力和侵蚀性介质的耦合作用下，支护体系极易因应力-电化学耦合腐蚀发生结构失效，严重威胁矿山生产安全。以山东某深井矿山的盐碱腐蚀环境下锚杆腐蚀防护为工程背景，采用现场调研、室内试验和数值模拟相结合的手段，研究了添加$Cr_2O_3$缓蚀剂后锚杆电化学腐蚀速率的变化规律，对比分析了深井高应力环境下普通锚杆与添加缓蚀剂锚杆的腐蚀演化过程。研究结果表明，随着$Cr_2O_3$浓度提高，锚杆自腐蚀电位由－1.062 V升至－0.924 V，腐蚀电流密度从$7.76\times10^{-5}$ A/cm$^2$降至$1.47\times10^{-5}$ A/cm$^2$，腐蚀速率由0.936 mm/a降至0.181 mm/a，$Cr_2O_3$缓蚀剂对电化学腐蚀具有显著抑制作用。注浆体抗压强度试验显示，随着$Cr_2O_3$浓度升高，试样1 d和7 d抗压强度均呈现先升高后降低的趋势。数值模拟结果显示，普通锚杆腐蚀1 500 d后电位差异大、电流密度集中；添加$Cr_2O_3$的锚杆电位分布均匀，电极腐蚀总厚度由68.7 μm降至0.182 μm，降幅为99.7%，防腐锚杆表面氯、铁、钠离子浓度显著低于普通锚杆，说明$Cr_2O_3$缓蚀剂在高应力、高腐蚀环境下可实现电化学腐蚀的长效抑制。

**关键词**：深井矿山；电化学腐蚀；锚杆；$Cr_2O_3$缓蚀剂

**中图分类号**：TD353　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)08-0049-11

**Study on Bolt Corrosion and Protection Under High-Stress Electrochemical Corrosion Environment in Deep Mines**

*Li Shancun*, *Wang Weikang*, *Cheng Dongxu*, *Tang Zhongwei*, *Guo Qinpeng*

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410019, China)

**Abstract**: Under the coupled action of high stress and aggressive media in deep mines, the support system is highly prone to structural failure due to stress-electrochemical coupled corrosion, which seriously threatens mine production safety. With the corrosion protection of bolts under a saline-alkali corrosive environment in a deep mine in Shandong taken as the engineering background, field investigation, laboratory tests, and numerical simulation were combined to investigate the variation law of the electrochemical corrosion rate of bolts after adding $Cr_2O_3$ corrosion inhibitor, and to comparatively analyze the corrosion evolution process of ordinary bolts and bolts with the corrosion inhibitor under the high-stress environment of deep mines. The results show that as the $Cr_2O_3$ concentration increases, the self-corrosion potential of the bolt rises from −1.062 V to −0.924 V, the corrosion current density decreases from $7.76\times10^{-5}$ A/cm$^2$ to $1.47\times10^{-5}$ A/cm$^2$, and the corrosion rate drops from 0.936 mm/a to 0.181 mm/a. The $Cr_2O_3$ corrosion inhibitor exhibits a significant inhibitory effect on electrochemical corrosion. The grouting body compressive strength test shows that with the increase of $Cr_2O_3$ concentration, both the 1 d and 7 d compressive strengths of the specimens present a trend of first increasing and then decreasing. The numerical simulation results show that after 1 500 d of corrosion, the ordinary bolt has large potential differences and concentrated current density, whereas the bolt with $Cr_2O_3$ has a uniform potential distribution. The total electrode corrosion thickness decreases from 68.7 μm to 0.182 μm, a reduction of 99.7%, and the surface concentrations of chloride, iron, and sodium ions on the anti-corrosion bolt are significantly lower than those on the ordinary bolt, indicating that the $Cr_2O_3$ corrosion inhibitor can achieve long-term inhibition of electrochemical corrosion under high-stress and high-corrosion environments.

**Key words**: Deep mine, Electrochemical corrosion, Bolt, $Cr_2O_3$ corrosion inhibitor

---

* **收稿日期**：2026-04-19

**基金项目**：湖南省科技创新计划项目(2025CK1003)

**作者简介**：李山存(1981—)，男，青海乐都人，硕士，高级工程师，主要从事金属非金属矿山采矿工程设计及矿山安全方面的研究。E-mail：shancun1981@163.com

## 0 引言

锚杆支护技术是深井矿山开采中应用最广泛的安全高效支护方式之一[1-3]。随着开采深度的持续增加,巷道围岩处于高地应力、高地温、复杂水化学介质的耦合环境中,锚固体系的可靠性与耐久性对围岩长期稳定控制作用愈发关键。工程实践表明,深井高应力条件下,锚固结构不仅承担围压静载约束作用,还经受采动扰动与动力加载的反复作用,其服役性能直接决定巷道维护成本与矿井安全水平。

现有的金属锚杆防护措施主要有镀锌、注浆包裹、防腐涂层及"注浆+缓蚀剂"复合防护等,但各类措施在高应力-高温-侵蚀性介质等多场耦合作用下的防护效果与服役寿命差异显著,且缺乏面向深部工况的系统评价方法与可推广的工程选型依据。基于此,本研究综合考虑镀锌、注浆、注浆+缓蚀剂双重防腐等措施,设计多种防护方案,并通过室内加速腐蚀试验、注浆体强度试验与锚杆材料剩余强度测试等手段,开展不同防护措施的防腐耐久性研究,为高应力、高腐蚀环境下锚护材料防护提供可行的技术路径。

然而,近 15 年矿井事故统计与工程维护记录显示,支护结构普遍存在未达到预期服役周期就出现功能衰退的问题,现场调研及试验研究证实,锚固系统过早失效多与锚杆腐蚀相关[4-6]。深井环境下,金属支护材料在多场耦合作用下性能退化特征显著:高应力与侵蚀性介质的协同作用易诱发电化学劣化与应力腐蚀开裂,主要表现为锚杆腐蚀坑槽、局部截面削弱、注浆体-钢材界面剥离等。这类损伤会大幅度降低锚固体系对围岩的约束效能,削弱巷道稳定控制能力,显著增加围岩大变形与发生动力灾害的风险。工程维护记录显示,部分服役期超过 15 a 的运输巷已累计开展支护修复 7 次以上,年度运维费用约占总生产成本的 23.6%,给矿井安全生产与经济效益带来长期负担。

围绕锚杆材料腐蚀与应力腐蚀破坏机制,国内外学者开展了大量研究。Wang 等[7]利用自主研发的试验装置,研究了不同应力水平、腐蚀环境与服役时间对灌浆锚杆应力腐蚀效应的影响。Gamboa 等[8]通过观察裂缝表面形貌,讨论了应力腐蚀裂纹的萌生与拓展机制。Hadjigeorgiou 等[9]分析硬岩矿山腐蚀环境下锚杆材料退化与力学性能损失的影响因素,指出腐蚀敏感性差异对支护设计的重要影响。Gamboa 等[10]采用线性递增应力加载(LIST)试验,构建了含氢致裂解的腐蚀环境模拟体系。Nie 等[11]建立了耐候钢连接件质量损失率与腐蚀时间的量化关系。Spearing 等[12]通过矿井水环境加速腐蚀试验,研究了不同侵蚀介质下矿用锚杆的性能退化规律。Hassell 等[13]通过腐蚀-力学耦合试验,揭示了高盐环境对锚固体系的破坏机制。Qian 等[14]探讨了微生物修复剂对裂缝修复与钢筋锈蚀的抑制作用。Vandermaat 等[15]基于新型评价装置分析了材料特性对应力腐蚀敏感性的影响,提出了"环境参数-材料特性-结构设计"交互决定服役寿命分析框架。Zhang 等[16]研究了冻融循环与硫酸盐侵蚀对锚杆抗拉能力的影响,为耐久性评价提供了新思路。

总体来看,现有研究为揭示腐蚀与应力腐蚀机理、分析性能劣化规律奠定了理论基础,但针对深部"高应力-侵蚀介质-注浆体-界面"多要素耦合条件下,不同工程防护措施的耐久性差异、失效模式演化及其对锚杆剩余承载能力的影响,仍缺乏系统比较和量化评价方法。

因此,开展深部复杂工况下锚杆防护措施的对比研究具有重要的工程意义与科学价值:一方面,可从"材料-注浆体-界面"系统层面识别关键劣化环节与控制指标,为锚固体系寿命设计、维护策略与防护方案选型提供依据;另一方面,有助于降低巷道全寿命周期运维成本,提高长期服役巷道的支护可靠性,进而减少因支护性能衰退引发的巷道失稳与动力灾害风险,支撑深部矿井安全、高效与绿色开采。

本研究以山东盐碱地质条件下的深井煤矿锚杆腐蚀为研究对象,采用现场调研、室内试验、数值模拟相结合的手段,研究了氧化铬($Cr_2O_3$)缓蚀剂作用下锚杆电化学腐蚀速率变化规律,对比高应力环境下普通锚杆与添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂锚杆的腐蚀演化过程,为高应力、高腐蚀环境下锚护材料的防护提供可行的技术方案与理论支撑。

## 1 工程背景

图 1 为山东某深井高应力支护体系的腐蚀情况。现场调研表明,在高地应力与高腐蚀性介质的环境下,支护材料力学性能随服役时间的延长发生持续劣化,支护体系的抗冲击能力显著下降,最终加剧了冲击地压发生时的巷道破坏程度。



(a)支护腐蚀情况 (b)巷道表面腐蚀

**图 1 山东某高应力深井支护体系的腐蚀情况[17]**

**Fig.1 Corrosion of support system for a high-stress deep well in Shandong[17]**

冲击地压是煤矿开采过程中常见的动力灾害之一,随开采深度的增加,其发生的频率与强度均显著升高。本文研究的矿井是典型的深井煤矿,地质条件和开采环境十分复杂,冲击地压风险突出。在高应力冲击地压频发的环境下,对锚索支护材料的服役性能要求更为严格;同时,矿井地处黄泛区,属于典型盐碱地质条件,土壤中可溶性盐分含量高,富含 $Cl^-$、$SO_4^{2-}$ 等腐蚀性离子;主要开采煤层为二叠系山西组煤层,煤层厚度大,顶底板岩性以砂岩、泥岩为主,局部发育软弱夹层。矿井水文地质条件复杂,地下水丰富,地下水以高矿化度离子水为主,并含有较高浓度的 $Cl^-$、$SO_4^{2-}$ 等腐蚀性离子,对锚杆具有强烈的腐蚀作用。

本文以山东某深井矿山的盐碱腐蚀环境下锚杆腐蚀防护为工程背景,配制模拟碱性矿井水的复合腐蚀溶液,矿井水主要阴离子含量见表 1。本文拟开展 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂作用下锚杆电化学腐蚀速率变化规律研究,探究深井矿山高应力腐蚀环境下普通锚杆与添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂锚杆的腐蚀过程。

**表 1 矿井水主要阴离子含量[17]**

**Table 1 Main anion contents in mine water[17]** mg/L

| $Cl^-$ | $SO_4^{2-}$ | $HCO_3^-$ | $CO_3^{2-}$ | $NO_3^-$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 156.83 | 4 762.21 | 582.95 | 44.68 | 6.28 |

## 2 氧化铬对锚杆电化学腐蚀的影响研究

### 2.1 材料选取

氧化铬($Cr_2O_3$)作为缓蚀剂能有效减缓地下矿山锚杆的腐蚀进程,但其掺量过高会降低注浆体的力学强度,且铬作为重金属元素,也会对井下环境造成影响。因此,采用 $Cr_2O_3$ 作缓蚀剂加入注浆体时,其浓度应控制在0.5%~1.5%,通常不超过 2.0%[18]。基于此,本试验选取的 $Cr_2O_3$ 浓度分别为 0、0.4%、0.8%和 1.6%。

为研究 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂对锚护材料腐蚀速率的影响规律,选取山东某深井矿山井下工作面现场使用的锚护材料,加工成 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试件,每组浓度梯度设置三个平行试样。预处理采用金相抛磨机完成:首先依次使用 400、800、1 200 目水砂纸逐级打磨,再用金刚石抛光剂抛光至表面平整光滑,最后用去离子水冲洗并吹干。对抛光后的试件进行侧面绝缘封装处理,仅暴露一面作为工作电极。将处理后的试件分别置于浓度为 0.4%、0.8%、1.6%的 $Cr_2O_3$ 溶液中浸泡 72 h,使试样表面形成保护膜。

### 2.2 试验方法

采用 CS 电化学工作站开展测试,将预处理后的试样作为工作电极(阳极),饱和甘汞电极作为参比电极,铂丝作为辅助电极(对电极)。电解液取自山东深井矿山工作面运输巷的顶板淋水。试验过程中将电解池置于法拉第屏蔽箱内,屏蔽外部电磁干扰,提高试验精度。

动电位极化曲线测试范围为 −1.5~+1.5 V(相对于自由腐蚀电位),扫描速率为 0.01 mV/s。电化学阻抗谱(EIS)测试在自腐蚀电位下进行,频率范围为 0.01~100 000 Hz,振幅为±3 mV。最后,分别对对照组试样及用 0.4%、0.8%、1.6% $Cr_2O_3$ 溶液处理过的试样进行测试,获得试验数据并进行分析。

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 动电位极化曲线分析

极化曲线反映了自腐蚀电位($E_{corr}$)与腐蚀电流密度($i_{corr}$)的对应关系,可表征腐蚀原电池反应中电位推动力与反应速率之间的函数关系,曲线的阴极、阳极斜率分别对应反应速率。为降低试验误差,对每组平行试样试验结果取平均值,结果见图 2 和表 2。

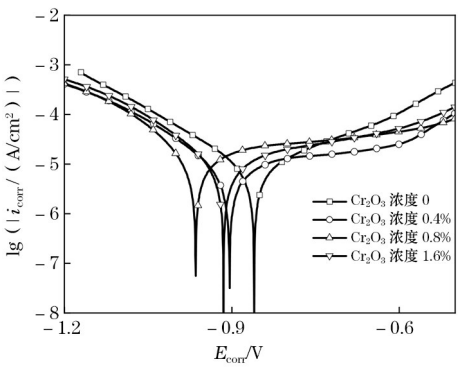



**图 2 不同 $Cr_2O_3$ 浓度下电化学腐蚀反应极化曲线**

**Fig.2 Electrochemical corrosion reaction polarization curves under different $Cr_2O_3$ concentrations**

**表 2 不同 $Cr_2O_3$ 浓度下极化曲线特征参数**

**Table 2 Characteristic parameters of polarization curves under different $Cr_2O_3$ concentrations**

| 组别 | $i_{corr}$/($\times10^{-5}$ A/cm$^2$) | $E_{corr}$/V | 腐蚀速率/(mm/a) |
|---|---|---|---|
| $Cr_2O_3$ 浓度 0 | 7.76 | −1.062 | 0.936 |
| $Cr_2O_3$ 浓度 0.4% | 3.01 | −0.913 | 0.365 |
| $Cr_2O_3$ 浓度 0.8% | 2.61 | −0.972 | 0.317 |
| $Cr_2O_3$ 浓度 1.6% | 1.47 | −0.924 | 0.181 |

由图 2 可知,随着 $Cr_2O_3$ 浓度的升高,极化曲线整体呈现下移趋势,说明缓蚀剂抑制了腐蚀反应的进行,有效地提高了材料的耐腐蚀性能。同时结合 CS 电化学工作站所测得的 $E_{corr}$ 和腐蚀速率,通过塔菲尔外推法拟合得到 $i_{corr}$,以及 $i_{corr}$、$E_{corr}$ 和腐蚀速率之间的关系,随着 $Cr_2O_3$ 浓度由 0 升高至 1.6%,$E_{corr}$ 由 −1.062 V 升至 −0.924 V,正移幅度约为 0.138 V,增幅约 12.99%,表明 $Cr_2O_3$ 的加入提升了锚杆材料的自腐蚀电位,热力学稳定性增强,材料腐蚀反应更难发生;而腐蚀电流密度和腐蚀速率分别由 $7.76\times10^{-5}$ A/cm$^2$、0.936 mm/a 降至 $1.47\times10^{-5}$ A/cm$^2$、0.181 mm/a,差值分别为 $6.29\times10^{-5}$ A/cm$^2$、0.755 mm/a,降幅分别为 81.06%、80.66%,表明 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂可显著降低锚杆材料的腐蚀电流密度和腐蚀速率,缓蚀效果随 $Cr_2O_3$ 浓度的升高而增强,腐蚀反应得到有效抑制,材料耐蚀性能显著提升。经 $Cr_2O_3$ 浸泡钝化处理的锚杆,在碱性环境下的耐腐蚀性能得到大幅提升,可为盐碱环境下巷道支护结构的长期稳定提供有效保障。

2.3.2 电化学阻抗谱分析

为进一步揭示 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂对锚杆的缓蚀作用,对各组试样开展电化学阻抗谱(EIS)测试,结果如图 3 和图 4 所示。

图 3 为不同 $Cr_2O_3$ 浓度下 EIS 测试拟合 Nyquist 图。由图 3 可知,随着 $Cr_2O_3$ 浓度升高,试样的电化学阻抗逐渐增大,表明 $Cr_2O_3$ 对腐蚀反应具有显著的抑制作用。当 $Cr_2O_3$ 浓度为 0 时,Nyquist 图呈现较为简单的半圆形,表明腐蚀反应较为活跃,阻抗值较低。随着 $Cr_2O_3$ 浓度升高,图形逐渐变大并接近完整的半圆形,电化学反应的阻抗值增大,腐蚀速率减缓。当 $Cr_2O_3$ 浓度为 1.6% 时,图中的半圆形达到最大,阻抗值显著增大,表明 $Cr_2O_3$ 在此浓度下的腐蚀抑制作用最优。总体而言,$Cr_2O_3$ 可有效地提高试样的抗腐蚀性能,且随着浓度升高,腐蚀速率逐渐减缓,表现出较强的抑制效果。

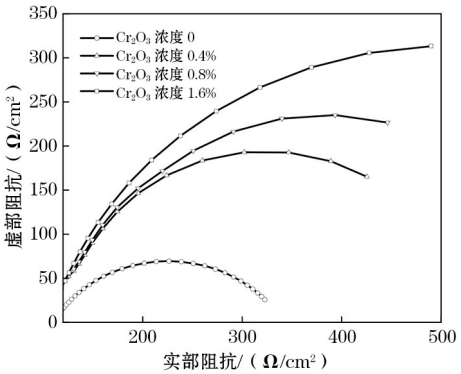



**图 3 不同 $Cr_2O_3$ 浓度下 EIS 测试拟合 Nyquist 图**

**Fig.3 The fitting Nyquist diagram of EIS test under different $Cr_2O_3$ concentrations**

EIS 测试拟合得到的 Bode 图可反映锚杆体系在不同频率下的电化学过程,涵盖溶液/孔隙溶液导电特性、金属/电解质界面电荷转移行为、腐蚀产物膜/镀层/涂层的屏蔽效应及缺陷演化,以及孔隙扩散与离子迁移等传质控制特征。Bode 幅值图的高频段主要对应溶液或孔隙的电阻;中频段阻抗的频率变化斜率与相位角峰值反映界面电荷转移过程;低频段阻抗水平及相位角特征则指示膜层/防护层的阻隔能力与扩散控制效应。随腐蚀进程的推进,体系的特征时间常数可由单一界面过程逐渐向外层膜-内层界面的双时间常数响应转变,表明防护层发生吸水、开裂或缺陷连通,并产生渗透通道,导致界面反应加速、低频阻抗显著降低。

不同 $Cr_2O_3$ 浓度下 EIS 测试拟合 Bode 图如图 4 所示。

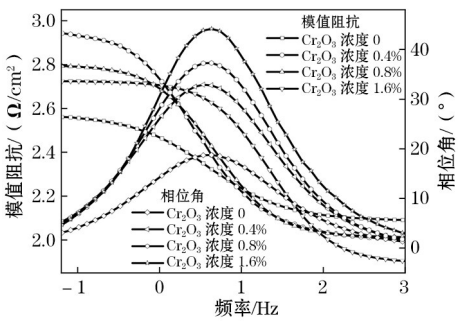



**图 4 不同 $Cr_2O_3$ 浓度下 EIS 测试拟合 Bode 图**

**Fig.4 The fitting Bode diagram of EIS test under different $Cr_2O_3$ concentrations**

由图 4 可知,随着 $Cr_2O_3$ 浓度的升高,试样的阻抗响应呈现规律性变化。未添加 $Cr_2O_3$ 时,Bode 图低频阻抗水平较低且相位角峰值较小,表明界面

电荷转移过程占主导,腐蚀反应较为活跃。随着 $Cr_2O_3$ 浓度升高至 0.4%、0.8%和 1.6%,整体阻抗水平逐步升高,相位角峰值增大并呈现更为清晰的时间常数特征,表明 $Cr_2O_3$ 的加入可显著提高膜层/界面的极化阻抗,削弱电荷转移与传质过程,从而有效抑制腐蚀反应。其中,当 $Cr_2O_3$ 浓度为 1.6%时,阻抗水平最高、相位角峰值最大,表明对锚护材料的防护效果最为显著。

综上所述,$Cr_2O_3$ 缓蚀剂可显著改善盐碱环境下锚杆的腐蚀状况。但该深井矿山部分工作面埋深已近千米,支护体系不仅面临盐碱环境影响,还承受高应力的持续作用。因此,有必要通过数值模拟方法深入揭示锚杆在 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂、盐碱环境和高应力耦合作用下的劣化机制,为冲击地压防控提供理论支撑。

## 3 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂注浆体抗压强度分析

添加缓蚀剂的注浆体对锚杆材料起了一定保护作用,但缓蚀剂强度过高,易导致注浆体强度降低,极易开裂并加快锚杆的腐蚀,因此保障注浆体整体结构完整性尤为重要。本节研究不同浓度 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂对注浆体抗压强度的影响规律,验证其能否满足深井高腐蚀环境下对锚杆的防护性能要求。

首先,将对照组按照水和注浆材料质量比为 0.325∶1 进行配比,浇筑成尺寸为 50 mm×50 mm×50 mm 的标准正方体试样,如图 5 所示。在对照组的基础上,对注浆体分别添加浓度为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%的 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂作为试验组,每组设置 3 个平行试样,试样成型后放入养护箱养护 24 h,分别测试其 1 d 和 7 d 龄期的单轴抗压强度。




(a) 对照组　(b) 1 d 龄期　(c) 7 d 龄期

**图 5　注浆体试样示意**

**Fig.5　Schematic of grouting body samples**

采用 WHY-600 型压力机进行单轴压缩试验。试验时先施加 0.2 MPa 的预压力使试块对中固定,随后以 0.5 mm/min 的位移控制速率连续加载至试样破坏,同步记录应力-应变全过程曲线,计算试样的单轴抗压强度。最终选取各浓度 3 个试样的平均值,观察注浆体的抗压强度变化规律。

不同 $Cr_2O_3$ 浓度下的注浆体试样 1 d、7 d 龄期的平均抗压强度如图 6 所示,由试验结果可知,随着 $Cr_2O_3$ 浓度升高,注浆体试块的抗压强度呈现先升高后降低的变化趋势。1 d 龄期试样的抗压强度从浓度 0 时的 27.76 MPa 增大到浓度 1.2%时的 35.2 MPa,增幅约 26.8%;之后降低到浓度 1.6%时的 31.3 MPa,降幅约 11.1%。7 d 龄期试样的抗压强度从浓度 0 时的 40.08 MPa 升高到浓度 1.2%时的 49.16 MPa,增幅约 22.7%;随后降低到浓度 1.6%时的 45.52 MPa,降幅约 7.4%。

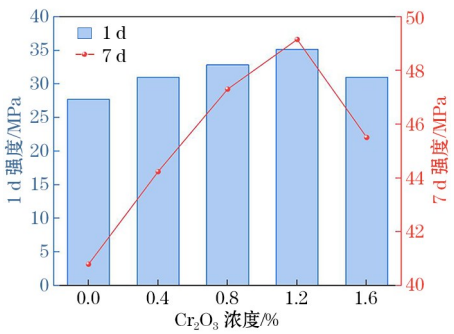



**图 6 注浆体试样 1 d、7 d 龄期的平均抗压强度**

**Fig.6 Average compressive strength of grouting body samples at curing ages of 1 d and 7 d**

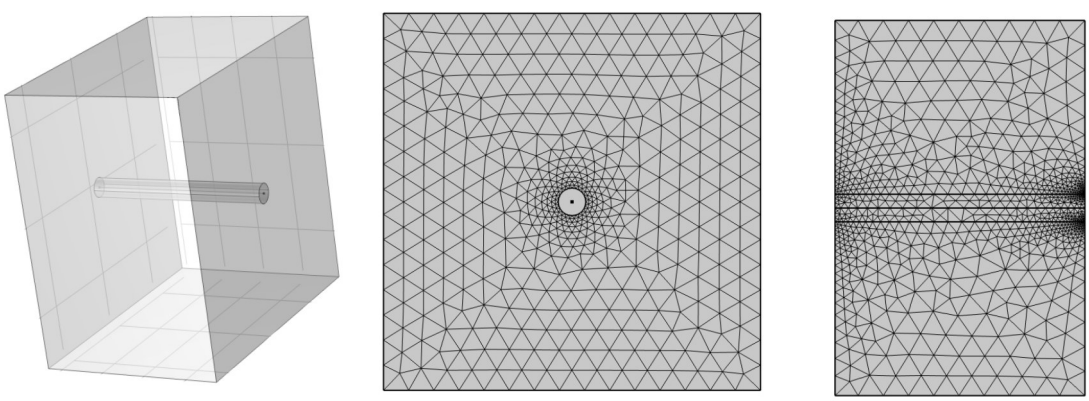
因此,添加适量 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂不仅可延缓锚杆电化学的腐蚀速率,还能在一定程度上增强注浆体的整体力学强度,使其具有更好的包裹性,减少腐蚀离子与锚杆接触时发生的电化学腐蚀反应。但当 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂的浓度超过最优值后,抗压强度有所下降。因此,$Cr_2O_3$ 缓蚀剂的工程掺量不宜过高,浓度一般不超过 1.5%。

## 4 锚杆应力-电化学耦合腐蚀的数值模拟

### 4.1 数值模型构建

受室内试验条件限制,常规腐蚀试验难以实现锚杆腐蚀过程与轴向拉应力的同步加载。为进一步揭示千米深井高应力环境下锚杆的应力-电化学耦合腐蚀行为,结合现场地质条件与室内试验结果,采用 COMSOL 数值模拟软件建立三维应力-电化学耦合腐蚀模型,对比分析高应力作用下普通锚杆与添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂锚杆的腐蚀演化规律。

以赵楼煤矿深井高应力服役环境为工程背景,模型中锚杆直径取 22 mm,环境温度设为 45 ℃,氯离子浓度取 350 mg/L;在锚杆两端施加 100 MPa 的轴向拉应力,表征深部围岩支护体系中锚杆的长期受拉应力状态。模拟服役时长设定为 1 500 d,应力-电化学耦合腐蚀计算模型如图 7 所示。



(a) 计算模型三维图 (b) 计算模型平面图 (c) 计算模型剖面图

**图 7 应力-电化学耦合腐蚀计算模型**

**Fig.7 Stress-electrochemical coupled corrosion calculation models**

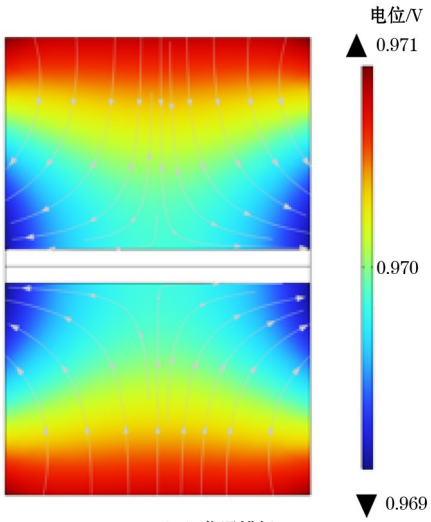
### 4.2 数值模拟结果分析

结合矿山现场地质条件与室内试验结果,对深井高应力服役条件下的锚杆电化学腐蚀过程开展模拟分析,结果如图 8 至图 14 所示。

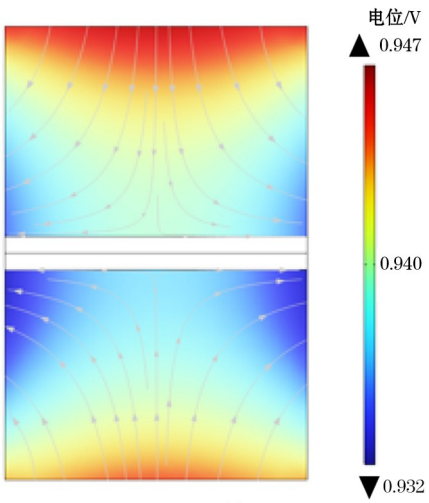
由图 8 可知,普通锚杆周边的电位图表现出较大的电位差异,表明其在腐蚀过程中存在较强的局部腐蚀现象,导致电位分布不均。而添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂的锚杆其周边电位分布更加均匀,电位差大幅减小,表明缓蚀剂有效抑制了锚杆的腐蚀进程,提升了电化学体系的稳定性,减少了腐蚀的局部集中,增强了锚杆的耐久性和使用安全性。

图 9 显示,普通锚杆的电流密度集中于锚杆与电解质的接触表面,流线密集且分布不均,表明该区域腐蚀较为严重。添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂后,电流密度流线整体稀疏且分布更均匀且数值更低,表明 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂有效减缓了腐蚀反应,减少了局部腐

蚀集中,提升了电化学体系的稳定性。



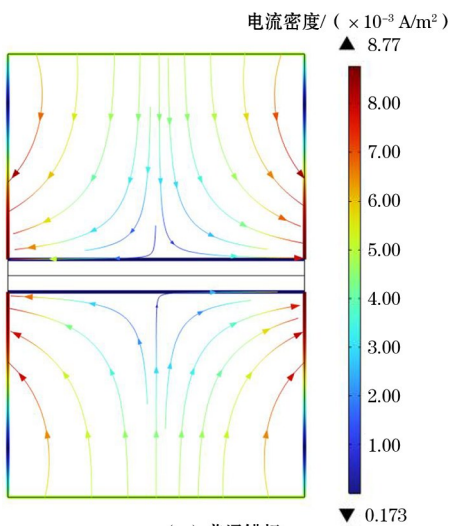

(a) 普通锚杆



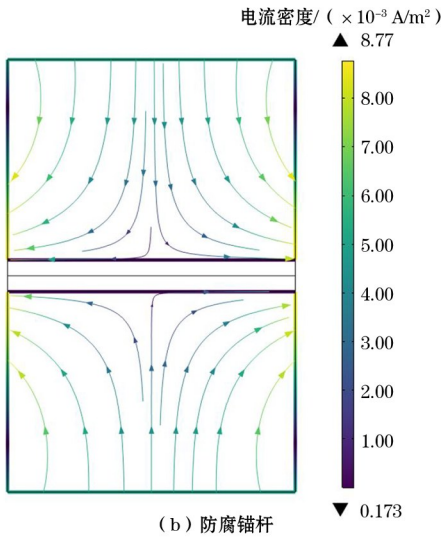

(b) 防腐锚杆

**图 8 电解质电位图**

**Fig.8 Electrolyte potential diagrams**




(a) 普通锚杆



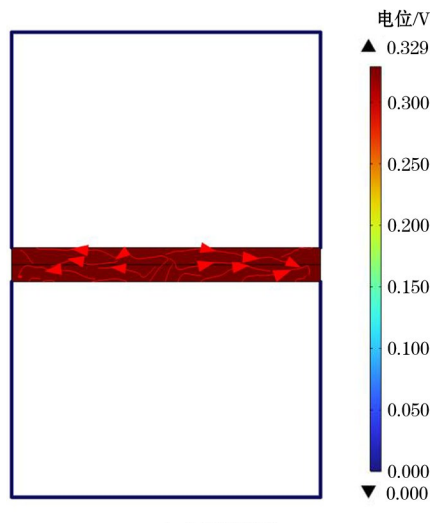

(b) 防腐锚杆

**图 9 电解质电流密度流线图**

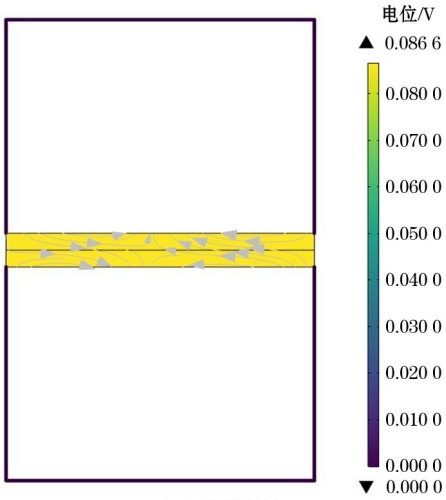
**Fig.9 Electrolyte current density streamline diagrams**

图 10 为对地电极电位图。普通锚杆表面电位差异大、分布不均,腐蚀反应较严重;而添加 $Cr_2O_3$ 后,电位分布更均匀、电位差变小,腐蚀的强度与影响范围明显减小。整体来看,$Cr_2O_3$ 缓蚀剂显著改善了锚杆的耐腐蚀性,使电位分布更均匀,减少了局部腐蚀集中,提高了锚杆长期使用的稳定性和安全性。

从图 11 可以看出,普通锚杆表面的电流密度局部集中特征显著,高电流密度区域腐蚀反应更强烈。添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂后,电流密度分布更均匀且数值更低,表面和接触处的电流集中现象被有效抑制。另外,普通锚杆的电位差较大,表面电化学腐蚀较严重;添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂后的锚杆电位分布更均匀、电位差更小。总体来看,$Cr_2O_3$ 缓蚀剂的添加明显改善了锚杆的电化学稳定性,减少了局部腐蚀,从而提升了锚杆长期使用下的耐久性和安全性。



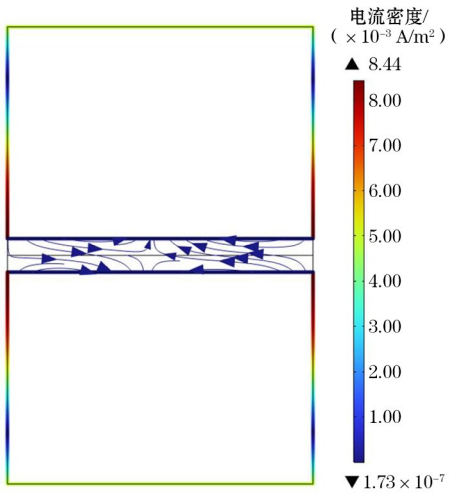

(a) 普通锚杆



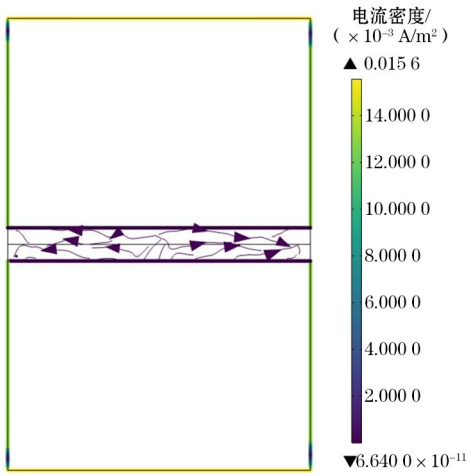

(b) 防腐锚杆

**图 10 对地电极电位图**

**Fig.10 Ground electrode potential diagrams**




(a) 普通锚杆



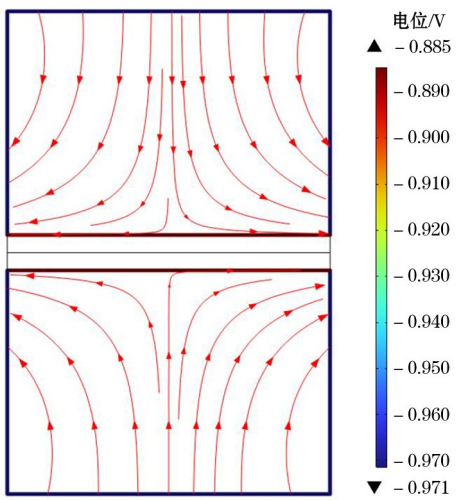

(b) 防腐锚杆

**图 11 电极电流密度图**

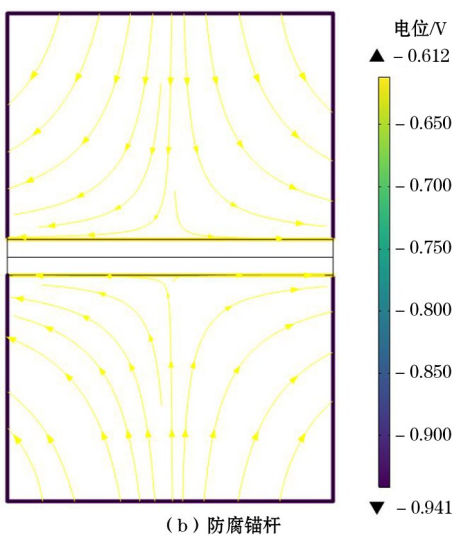
**Fig.11 Electrode current density diagrams**

由图 12 可以看出,普通锚杆的电位差较大,尤其是在接触表面附近,分布很不均匀,表明该区域腐蚀反应较强。添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂后,电位分布更加均匀,电位差显著减小,说明 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂有效减缓了腐蚀,改善了锚杆表面的电化学稳定性。总之,$Cr_2O_3$ 缓蚀剂使电位更均匀、腐蚀集中区域减少,显著提升了锚杆的耐腐蚀性、安全性和耐久性。

综合对比各项电化学参数,添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂后,锚杆的电解质电位和电流密度等关键指标均明显下降,表明在应力与高腐蚀共同作用下,$Cr_2O_3$ 缓蚀剂能有效抑制锚杆腐蚀,延缓因应力-电化学耦合腐蚀造成的支护失效过程,对保障巷道安全具有重要意义。




(a) 普通锚杆



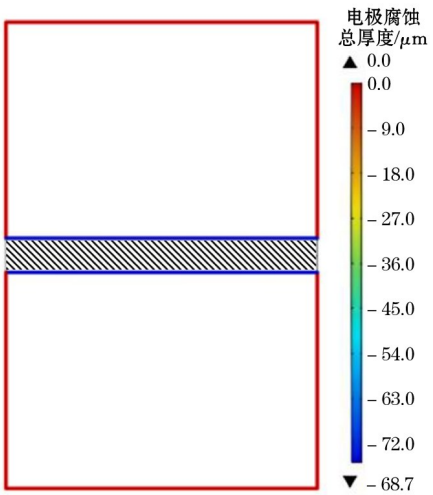

(b) 防腐锚杆

**图 12 电极电位与相邻参比电位图**

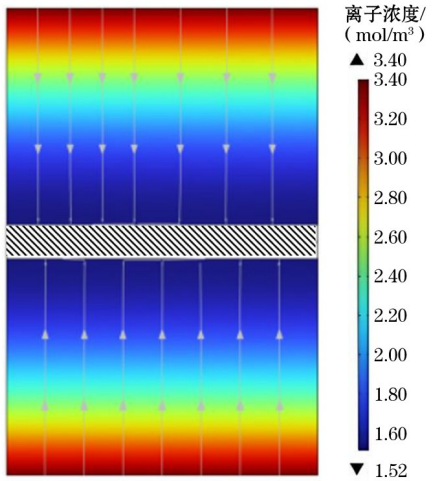
**Fig.12 Electrode potential and adjacent reference potential diagrams**

图 13 为普通锚杆和添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂的锚杆

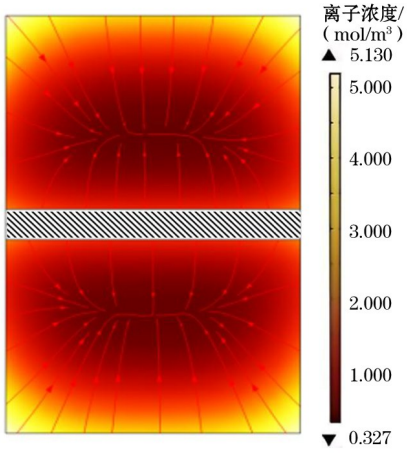
在腐蚀 1 500 d 后的二维纵向截面图,直观展示了电极厚度及氯离子、铁离子、钠离子的空间分布。普通锚杆的电极腐蚀总厚度最高达 68.7 μm,氯离子、铁离子、钠离子平均浓度分别为 2 mol/m$^3$、2.5 mol/m$^3$、39 mol/m$^3$,电位和浓度变化剧烈,表面和接触面区域腐蚀集中,局部腐蚀较为严重。而防腐锚杆的电极腐蚀总厚度最高仅 0.182 μm,电极腐蚀总厚度降幅为 99.7%,氯离子、铁离子、钠离子平均浓度分别为 1.5 mol/m$^3$、2.1 mol/m$^3$、34 mol/m$^3$,电位变化平缓,物质浓度分布更均匀。这表明 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂可显著抑制腐蚀,减少了局部积聚,提高了锚杆的耐腐蚀性和长期稳定性。



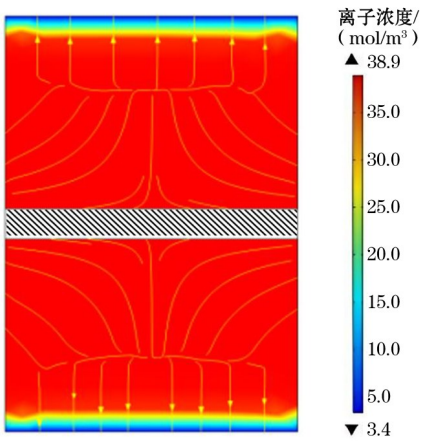

(a) 普通锚杆,电极腐蚀总厚度



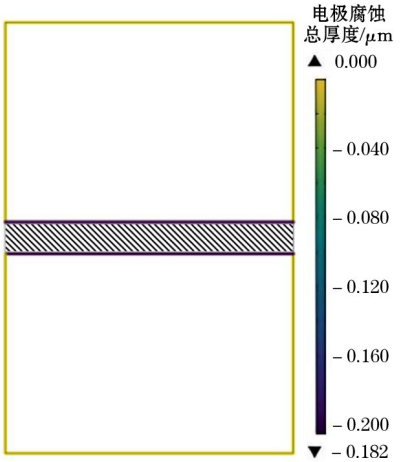

(b) 普通锚杆,氯离子浓度



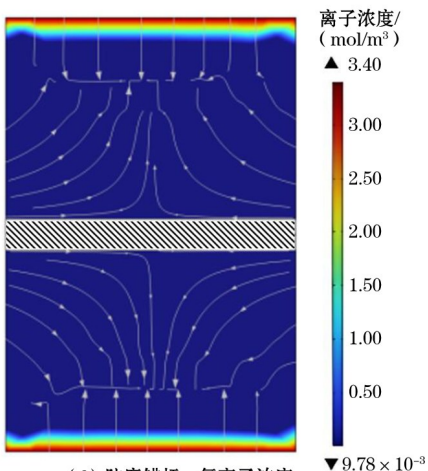

(c) 普通锚杆,铁离子浓度



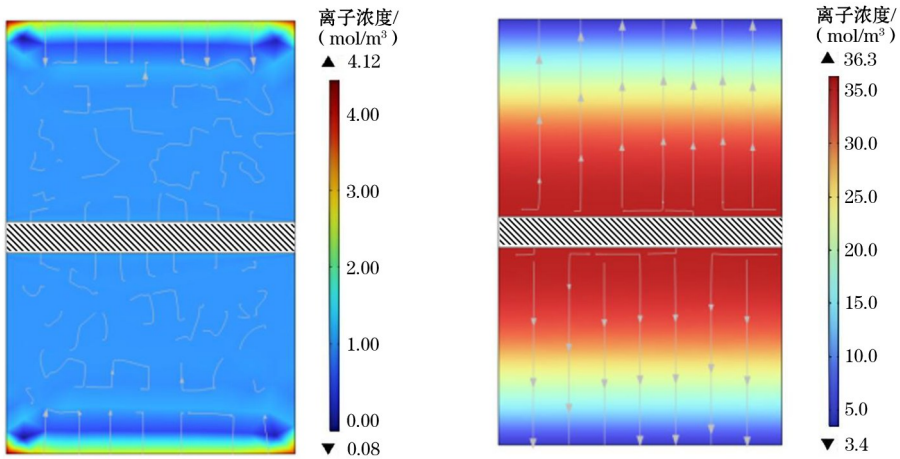

(d) 普通锚杆,钠离子浓度




(e) 防腐锚杆,电极腐蚀总厚度




(f) 防腐锚杆,氯离子浓度




(g) 防腐锚杆，铁离子浓度　　(h) 防腐锚杆，钠离子浓度

**图 13　电极腐蚀总厚度与离子浓度变化图**

**Fig.13　Variation diagrams of total electrode corrosion thickness and ion concentration**

总体来看，$Cr_2O_3$ 缓蚀剂改善了锚杆的电化学性能，减少了局部腐蚀，提升了耐久性和安全性，在长期服役中能明显延长锚杆的使用寿命。

图 14 为普通锚杆和添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂锚杆外表面的电流密度变化曲线。可以看出，全服役周期内普通锚杆的电流密度远大于添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂的锚杆。这表明在高应力高腐蚀环境下，$Cr_2O_3$ 缓蚀剂对锚杆的应力-电化学耦合腐蚀具有优异的抑制效果，可大幅减缓锚杆的腐蚀反应，保障巷道支护体系的长期安全。

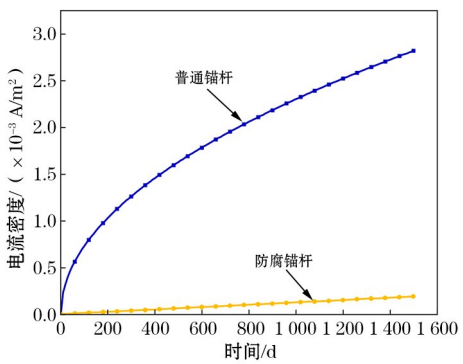



**图 14　不同锚杆外表面电流密度变化曲线**

**Fig.14　Variation curves of current density on the outer surface of different bolts**

综上所述，在深井高应力环境下，添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂可显著提升锚杆的耐腐蚀性。$Cr_2O_3$ 缓蚀剂通过优化电位分布，使得电解质电位和电流密度分布更合理，从而增强锚杆的电化学稳定性。

## 5　结论

本文针对不同 $Cr_2O_3$ 浓度下的锚杆电化学腐蚀开展了试验，采集了动电位极化曲线和电化学阻抗谱，测试了添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂的注浆体单轴抗压强度。同时，结合矿山现场环境特征，采用 COMSOL 软件建立三维应力-电化学耦合腐蚀数值模型，模拟了深井高应力高腐蚀环境下普通锚杆与添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂锚杆的腐蚀演化过程。通过对比分析得出以下结论。

(1) 电位极化曲线测试表明，$Cr_2O_3$ 浓度从 0 增至 1.6%时，锚杆材料自腐蚀电位升至−0.924 V，腐蚀电流密度、腐蚀速率分别降至 $1.47\times10^{-5}$ A/cm²、0.181 mm/a，降幅均超 80%，缓蚀剂缓蚀效果显著。

(2) 电化学阻抗谱分析表明，提高 $Cr_2O_3$ 浓度可增大 Nyquist 图谱半圆半径与阻抗值，Bode 图低频阻抗及相位角峰值同步升高。$Cr_2O_3$ 浓度为 1.6%时的防护效果最优，可有效阻滞电荷转移与离子传质，强化界面防护性能。

(3) 注浆体抗压强度试验表明，适量添加 $Cr_2O_3$ 时，可提高注浆体强度；当 $Cr_2O_3$ 浓度超过 1.2%后，强度开始下降。这说明适量添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂可同时实现防腐与增强注浆体抗压强度的作用，过量添加 $Cr_2O_3$ 缓蚀剂则会削弱其力学性能，因此，$Cr_2O_3$ 缓蚀剂的浓度一般不宜超过 1.5%。

(4) 应力-电化学耦合数值模拟结果显示，$Cr_2O_3$ 可优化锚杆电位分布、降低电流密度，相较普通锚杆，其电极腐蚀总厚度降幅达 99.7%，长效防腐性能突出。

(5) 防腐锚杆表面氯、铁、钠离子浓度均低于普通锚杆。结合电流密度曲线可知，$Cr_2O_3$ 缓蚀剂在高应力高腐蚀环境下可持续抑制锚杆电化学耦合腐

蚀,显著延缓支护结构的腐蚀失效过程。

**参考文献**(References):


[1] 康红普.我国煤矿巷道锚杆支护技术发展60年及展望[J].中国矿业大学学报,2016,45(6):1071-1081.
Kang Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2016,45(6):1071-1081.

[2] 邓东平,李亮,赵炼恒,等.基于锈胀开裂的预应力锚杆(索)使用寿命预测研究[J].岩土工程学报,2014,36(8):1464-1472.
Deng Dongping, Li Liang, Zhao Lianheng, et al. Prediction of service life of pre-stressed anchorage bolt (cable) due to corrosion expansion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(8):1464-1472.

[3] 高博,李广涛,施仁智,等.顶板锚固支护条件下的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):20-30.
Gao Bo, Li Guangtao, Shi Renzhi, et al. Optimization of stope structure parameters under the condition of roof anchoring support[J]. Mining Research and Development, 2024,44(12):20-30.

[4] 朱杰兵,李聪,刘智俊,等.腐蚀环境下预应力锚筋损伤试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(7):1579-1587.
Zhu Jiebing, Li Cong, Liu Zhijun, et al. Damage tests of pre-stressed anchor bars in corrosion environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017, 36(7):1579-1587.

[5] 褚晓威,鞠文君,卢志国,等.锚杆在高矿化度矿井水中应力腐蚀行为试验[J].中国矿业大学学报,2023,52(2):255-266.
Chu Xiaowei, Ju Wenjun, Lu Zhiguo, et al. Experiments on stress corrosion behaviors of rockbolt in highly-mineralized mine water[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(2):255-266.

[6] 吴赛赛,张曾瑞,金韬,等.深部矿山锚杆腐蚀失效风险评估研究[J].中国安全科学学报,2023,33(增刊1):180-184.
Wu Saisai, Zhang Zengrui, Jin Tao, et al. Investigation into risk assessment of bolt corrosion failure in deep mines[J]. China Safety Science Journal,2023,33(Suppl.1):180-184.

[7] Wang Bo, Guo Xinxin, Jin Hui, et al. Experimental study on degradation behaviors of rock bolt under the coupled effect of stress and corrosion[J]. Construction and Building Materials,2019,214:37-48.

[8] Gamboa E, Atrens A. Stress corrosion cracking fracture mechanisms in rock bolts[J]. Journal of Materials Science, 2003,38:3813-3829.

[9] Hadjigeorgiou J, Savguira Y, Thorpe S. Impact of steel properties on the corrosion of expandable rock bolts[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(2): 705-721.

[10] Gamboa E, Atrens A. Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts[J]. Engineering Failure Analysis,2003,10(5):521-558.

[11] Nie Shidong, Wang Hui, Yang Bo, et al. Corrosion-induced mechanical properties of shear bolted connections in high-strength weathering steel[J]. Thin-Walled Structures,2023, 190:111013.

[12] Spearing A, Mondal K, Bylapudi G. The corrosion of rock anchors in US coal mines[C]//SME Annual Meeting,2010.

[13] Hassell R, Villaescusa E, Thompson A. Testing and evaluation of corrosion on cable bolt anchors[C]//ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2006: ARMA-06-996.

[14] Qian Chunxiang, Wu Zefan, Ren Xinwei, et al. Study on crack repair effect of microbial self-healing concrete and corrosion inhibition of steel bar[J]. Structures, 2024, 70:107810.

[15] Vandermaat D, Saydam S, Hagan P C, et al. Laboratory-based coupon testing for the understanding of SCC in rockbolts[J]. Mining Technology,2016,125(3):174-183.

[16] Zhang Weili, Wang Liangqing, Song Yuhuang, et al. Experimental study on the mechanical properties of grouted rock bolts subjected to sulfate attack and freeze-thaw cycling [J]. Construction and Building Materials,2021,291:123391.

[17] 王猛,朱斯陶,李士栋,等.深井高应力腐蚀环境下锚杆强度劣化机理及预测[J].煤炭学报,2024,49(10):4295-4310.
Wang Meng, Zhu Sitao, Li Shidong, et al. Mechanism and prediction of anchor rod strength degradation with deep mine high-stress corrosion environment[J]. Journal of China Coal Society,2024,49(10):4295-4310.

[18] Wang Meng, Zhu Sitao, Jiang Fuxing, et al. Corrosion inhibition mechanism and performance prediction of corrosion inhibitors in grouting materials for anchor cables in deep coal mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025,59(1):1-22.