

矿山锚杆托盘腐蚀损伤及力学性能试验研究

李伟宁¹,刁琰龙¹,李源浦^{2*},董健伟¹,刘军晓¹,冯帆²

1. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿, 山东 莱州 261441;
2. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590



摘要:在矿井支护工程中,托盘的力学性能常常受到周围恶劣作业环境的腐蚀作用,导致其性能逐渐退化。为研究腐蚀环境中托盘的腐蚀损伤演化规律,考虑温度和pH值的影响,在室内环境开展盐雾加速腐蚀试验及托盘力学性能试验。研究表明:(1)试验初期托盘腐蚀速率较快,腐蚀产物在短时间内迅速附着于托盘表面,并生成内部含有腐蚀液的膨胀泡,从而加速腐蚀。(2)温度对托盘腐蚀质量损失率和抗压强度的影响不同。温度升高导致腐蚀产物相对松散,容易脱落,有助于整体均匀腐蚀的发生,质量损失率随着温度的升高而逐渐增大,而抗压强度在35℃腐蚀环境下损失最为严重。(3)无论是强酸环境还是弱酸环境,温度变化对托盘抗压强度的影响并不明显,pH值是影响其力学性能的主要因素。(4)当酸性较强时,侵蚀介质中H⁺浓度较高,促进了腐蚀产物的快速溶解,从而加剧了腐蚀程度。本研究明确了pH值是影响托盘腐蚀后力学性能退化的主导因素,而温度升高主要通过促进均匀腐蚀导致质量损失加剧。

关键词:托盘;腐蚀环境;力学性能;温度;pH值;损伤演化;抗压强度

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1180-09 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.108
引用格式:李伟宁,刁琰龙,李源浦,等.矿山锚杆托盘腐蚀损伤及力学性能试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(6):1180-1188.LI Weining, DIAO Yanlong, LI Yuanpu, et al. Experimental Study on Corrosion Damage and Mechanical Properties of Mine Bolt Tray[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1180-1188.

矿产资源是经济社会发展的重要基础,是国家安全和经济发展的重要保障(李光等,2018;胡建华等,2020;陈立强等,2022;马印禹,2023;侯新澳等,2024;Li et al, 2025)。矿用托盘作为井下支护系统的重要组成部分,在优化应力分布、增强支护强度、适应复杂地质条件、提升围岩自稳能力以及简化安装与维护等方面发挥着重要作用(李桐等,2023;潘立志等,2023)。托盘的力学性能直接关系到支护系统在复杂地质条件下的表现,其通过紧密贴合围岩表面,促进围岩内部应力的重新分布,激发围岩自身的承载潜力。然而,腐蚀问题对托盘的力学性能构成了严重威胁(肖玲等,2007;朱杰兵等,2017;

朱乾坤,2017;魏泽捷,2021;张瑾等,2023)。腐蚀不仅会削弱其承受荷载的能力,还会加速疲劳累积,缩短托盘的使用寿命。此外,腐蚀使托盘的延展性和韧性下降,导致变形能力减弱,无法有效吸收和分散能量,增加了局部应力集中的可能性。更为严重的是,腐蚀容易发生在托盘与锚杆等部件的连接处,这些区域的损伤可能导致连接部位松动甚至脱落,严重破坏支护结构的整体性,影响支护安全。

近年来,随着井巷工程对支护结构耐久性和安全性要求的不断提高(程良奎等,2008;Cai et al, 2017),支护结构的腐蚀行为成为研究热点。国内外学者针对支护结构腐蚀失效问题开展了大量研

收稿日期:2025-03-11;修订日期:2025-08-21

基金项目:山东省自然科学基金青年科学基金(B类)项目“深部硬岩非常规灾变机制与防控”(编号:ZR2025QB45)和山东黄金集团有限公司科技项目“深部金矿腐蚀性环境支护系统长期强度评估及防腐蚀技术研究”(编号:J-2024-425)联合资助

作者简介:李伟宁(1978—),男,山东莱州人,工程师,从事采矿技术及生产工作。E-mail:931120999@qq.com

*通信作者:李源浦(2001—),男,河南淇县人,硕士研究生,从事工程灾害防治研究工作。E-mail:2915376530@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

究, 研究内容主要聚焦环境因素(离子浓度、pH值、温度等)和力学因素(应力水平)对锚杆索腐蚀速率、形态及力学性能退化的影响。研究表明, 矿井腐蚀环境会显著诱发局部腐蚀(坑蚀和穿孔等), 导致锚杆塑性损伤远大于强度损失(肖玲等, 2008)。对酸性、中性和碱性3种腐蚀环境, 在腐蚀初期, 中性溶液中预应力锚杆腐蚀最快, 酸性溶液中腐蚀次之, 碱性溶液中腐蚀最慢, 随着腐蚀的进行, 酸性溶液对锚杆的腐蚀损伤程度越明显(Liu et al, 2023)。此外, 除氧水中温度升高加快了腐蚀进程, 而离子浓度变化对腐蚀速率的影响相对有限(Yilmaz et al, 2005)。同时, 应力水平和材料类型也在腐蚀过程中扮演着重要角色, 共同决定了构件的耐久性和失效模式(Li et al, 2011)。

相较于锚杆本身, 当前针对矿用托盘腐蚀行为

的研究相对匮乏, 特别是在复杂腐蚀环境下的系统性研究较为有限。为此, 本文以管缝式锚杆蝶形托盘作为研究对象, 通过在不同温度和pH值的腐蚀环境下进行盐雾加速腐蚀试验和力学性能试验, 探讨各类腐蚀因素对托盘损伤程度的影响, 以期为深入理解其在实际开采中的耐腐蚀性提供科学依据。

1 腐蚀环境调查

本研究对山东省莱州市焦家金矿焦家分矿和寺庄分矿的地下巷道开展现场调查, 探讨矿井不同中段支护材料的腐蚀现状。为此, 选择-710, -830, -870 m中段进行环境调研, 采集相关样本并拍照记录, 获取不同区域的腐蚀性裂隙水进行化学分析。井下托盘的腐蚀状况如图1所示, 井下温度、裂隙水中的离子浓度和pH值数据详见表1。

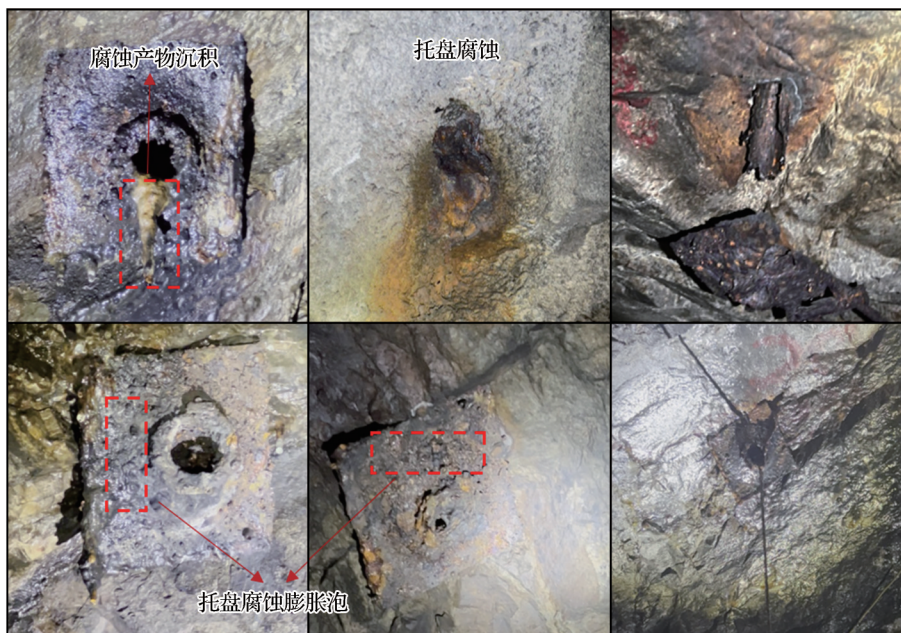


图1 井下托盘腐蚀情况

Fig. 1 Corrosion situation of underground tray

2 托盘腐蚀损伤试验设计

2.1 试件制作与试验腐蚀环境

为便于开展试验, 将矿用蝶形托盘加工成边长为100 mm、起拱高度为6 mm的试样, 如图2(a)所示。试验采用KZ-60盐雾试验箱[图2(b)], 结合现

场环境调研结果, 设定不同的试验变量, 设置温度分别为30, 35, 40 °C, pH值分别为3, 4, 5。通过调节盐雾试验箱温度并配制不同pH值的腐蚀液来设定腐蚀环境, 每种条件下进行2组重复性试验, 试验参数见表2。以GT-30-3-1试样为例, GT代表管缝式锚杆托盘, 30代表试验温度为30 °C, 3代表试

表1 不同中段巷道腐蚀性矿井水离子浓度、温度及pH值

Table 1 Ion concentration, temperature and pH value of corrosive mine water in different middle roadways

测点	中段/m	$w(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH	温度/ $^{\circ}\text{C}$
1#	-710	6 952	6.33	31.6
2#	-710	7 832	6.12	31.4
3#	-830	8 863	3.76	32.6
4#	-830	8 412	4.79	32.8
5#	-870	18 231	4.66	34.8
6#	-870	15 123	3.79	37.2

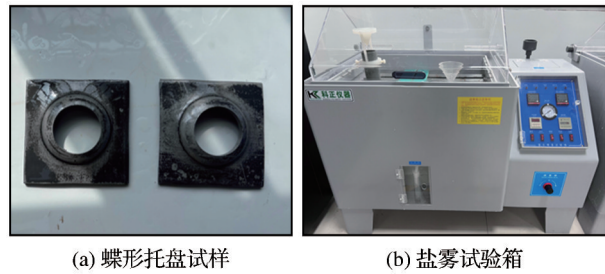


图2 托盘盐雾试验
Fig. 2 Tray salt spray test

表2 加速腐蚀试验环境参数

Table 2 Environmental parameters for accelerated corrosion test

环境参数编号	试样编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH值
1	GT-30-3-1,GT-30-3-2	30	3
2	GT-30-4-1,GT-30-4-2	30	4
3	GT-30-5-1,GT-30-5-2	30	5
4	GT-35-3-1,GT-35-3-2	35	3
5	GT-35-4-1,GT-35-4-2	35	4
6	GT-35-5-1,GT-35-5-2	35	5
7	GT-40-3-1,GT-40-3-2	40	3
8	GT-40-4-1,GT-40-4-2	40	4
9	GT-40-5-1,GT-40-5-2	40	5

验环境pH值为3,1代表第一组试样。所用的腐蚀溶液为5%NaCl溶液,通过将分析纯NaCl和蒸馏水按比例调配而成。再使用冰乙酸和NaOH修正腐蚀溶液pH值到设定范围。对试样开展为期15天的腐蚀试验,在试验开始前,先使用中性除锈液清除试样表面铁锈,再用蒸馏水清洗并干燥,最后采用电子天平称量并记录初始质量,便于后期分析质量损失情况。

2.2 腐蚀试样材料力学性能试验

当完成腐蚀后,对托盘进行除锈干燥处理并进

行称重,然后通过ZSTS-107试验系统对托盘进行压缩试验(图3),探究不同腐蚀环境对托盘力学性能的影响。



(a) ZSTS-107岩石三轴试验系统 (b) 力学性能试验

图3 托盘压缩试验

Fig. 3 Tray compression test

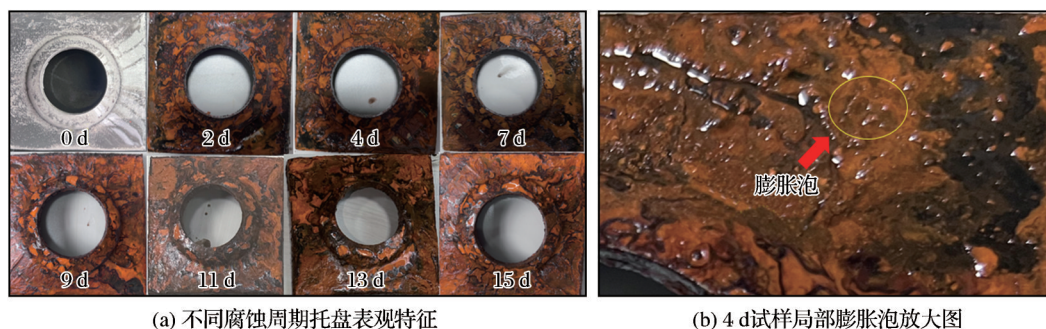
3 腐蚀因素对托盘腐蚀的影响规律

在腐蚀过程中,对不同腐蚀周期的试样进行照片采集,记录盐雾试验不同周期内托盘表面观腐蚀特征,试验前后记录托盘质量和物理力学参数。基于试验数据,分析不同因素对托盘腐蚀的影响规律。

3.1 托盘表面观腐蚀特征

(1)不同周期表面观腐蚀特征。图4所示为盐雾试验腐蚀周期内托盘表面颜色及形态变化过程。通过观察照片腐蚀特征发现,由于托盘形状较为平整,且表面积较大,与盐雾环境充分接触,试验初期腐蚀速率较快,氧化膜在较短时间内迅速附着于托盘表层,发生均匀腐蚀。随着试验的进行,表面腐蚀产物由最初的红黑腐蚀产物(Fe_3O_4 、 Fe_2O_3)随机覆盖,到试验结束红色腐蚀产物占比增加。试验第4天托盘腐蚀外表层出现连续的膨胀泡,使氧化膜凸起。膨胀泡内为腐蚀溶液,在氧化膜内部进行二次腐蚀,最终膨胀泡发育到一定程度,彼此之间相互连通,导致腐蚀层面积变大,厚度增加。

(2)不同温度表面观腐蚀特征。图5所示为pH=5条件下不同温度腐蚀环境试验后托盘表面观形貌特征,可以看出,35 $^{\circ}\text{C}$ 托盘腐蚀呈不均匀分布,相较于30 $^{\circ}\text{C}$ 和40 $^{\circ}\text{C}$ 托盘试样,其点蚀坑分布更加密集,且在托盘边缘存在较大腐蚀坑,腐蚀程度远大于其余2组环境。30 $^{\circ}\text{C}$ 托盘表面呈现出均匀腐蚀的特征,局部产生小点蚀坑,整体腐蚀情况较轻;40 $^{\circ}\text{C}$ 托盘

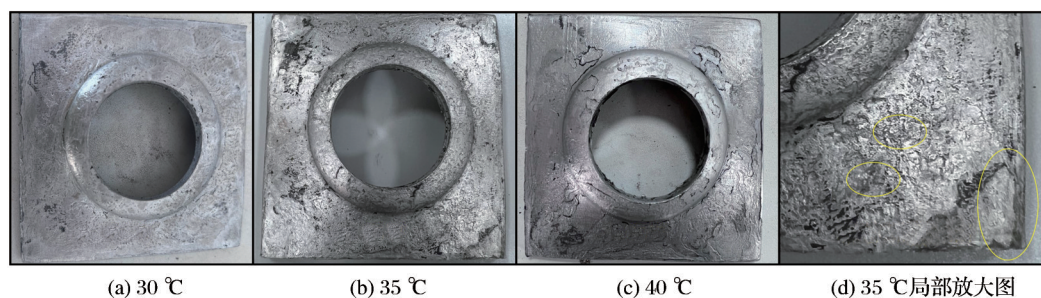


(a) 不同腐蚀周期托盘表面特征

(b) 4 d试样局部膨胀泡放大图

图4 不同腐蚀周期托盘表面特征

Fig. 4 Surface characteristics of trays with different corrosion cycles



(a) 30 °C

(b) 35 °C

(c) 40 °C

(d) 35 °C局部放大图

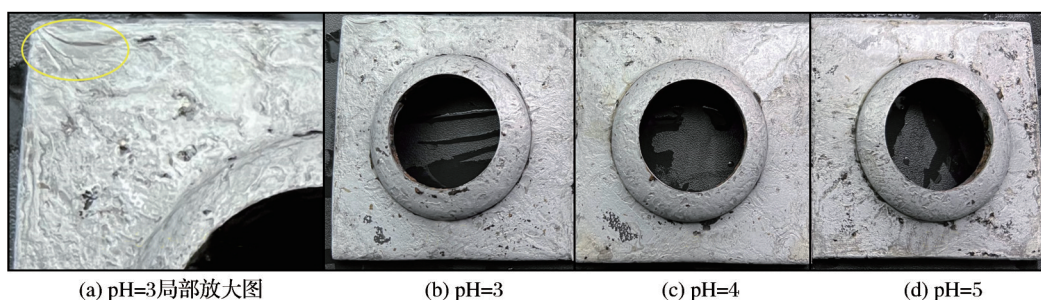
图5 pH=5条件下不同温度腐蚀环境试样形貌特征

Fig. 5 Morphological characteristics of the samples in different temperature corrosive environment with pH=5

表面表现出明显的腐蚀痕迹,局部区域可见一定数量的腐蚀坑和腐蚀裂纹,腐蚀深度较浅,整体以均匀腐蚀为主。

(3)不同pH值表面腐蚀特征。图6所示为pH值分别为3、4和5条件下的托盘腐蚀情况。当pH=

3时,托盘腐蚀严重,蚀坑现象明显,部分腐蚀区域失去金属光泽,受腐蚀面积相对较大;当pH=4时,托盘腐蚀以细小的点蚀为主,在托盘边缘局部区域形成较浅的大块腐蚀坑;当pH=5时,托盘腐蚀面积相对较小,腐蚀程度较轻,以均匀腐蚀为主。



(a) pH=3局部放大图

(b) pH=3

(c) pH=4

(d) pH=5

图6 35 °C腐蚀环境下试样形貌特征

Fig. 6 Morphological characteristics of the sample under 35 °C corrosion environment

3.2 质量损失率

质量损失是评价锚杆腐蚀程度的基本参数。不同腐蚀环境下托盘的质量损失率如表3所示,由表3可知,腐蚀环境变化对蝶形托盘试样的质量损失产生了显著影响。

当pH=3时,30 °C、35 °C和40 °C腐蚀环境下的质量损失率分别为1.75%、2.15%和2.51%。当pH=4时,30 °C、35 °C和40 °C腐蚀环境下的质量损失率分别为1.64%、1.88%和2.28%。当pH=5时,3种温度环境下的质量损失率分别为1.4%(30 °C)、1.82%

(35 °C)和2.21%(40 °C)。通过观察质量损失率发现,在相同的酸碱环境中,随着温度的升高,质量损失率逐渐升高。前人研究指出,在盐雾加速腐蚀试验中,温度每升高10 °C,腐蚀速度提高2~3倍,电解质的导电率提高10%~20%(唐毅等,2009;陈锐等,2021)。在本试验中,40 °C腐蚀环境下的平均腐蚀速率是30 °C腐蚀环境下的1.46倍。40 °C腐蚀环境下的平均腐蚀速率是35 °C腐蚀环境下的1.2倍。

由表3可知,在相同的温度条件下,托盘的腐蚀质量损失率随着pH值的升高而逐渐降低。例如:当温度为35 °C时,pH值为3、4和5环境下的质量损失率分别为2.15%、1.88%和1.82%。

表3 腐蚀对试样质量的影响(以第一组试样为例)
Table 3 Effect of corrosion on sample quality
(taking the first group of samples as an example)

编号	初始质量/g	最终质量/g	损失质量/g	质量损失率/%
GT-30-3-1	383.0	376.3	6.7	1.749347
GT-35-3-1	385.5	377.2	8.3	2.153048
GT-40-3-1	383.0	373.4	9.6	2.506527
GT-30-4-1	384.5	378.2	6.3	1.638492
GT-35-4-1	382.5	375.3	7.2	1.882353
GT-40-4-1	386.0	377.2	8.8	2.279793
GT-30-5-1	384.5	379.1	5.4	1.404421
GT-35-5-1	385.5	378.5	7.0	1.815824
GT-40-5-1	384.5	376.0	8.5	2.210663

3.3 腐蚀托盘力学性能

图7所示为不同腐蚀环境下托盘压缩试验的荷载位移曲线。托盘压缩试验主要分为4个阶段,第一阶段荷载随着变形量的增加而逐渐上升,并呈

现出近似线性关系,该阶段变形主要集中在托盘的底盘区域,底盘由初始的拱形逐步被压平;第二阶段为托盘孔口处的压缩变形,拱口受到挤压,导致孔径收缩;第三阶段为托拱部被渐渐压平的同时,底盘四角产生翘边现象,该阶段托盘所承受的荷载达到峰值;第四阶段托盘整体逐渐被压平,当蝶形托盘完全变形为平托盘时,托盘失效,试验结束。在荷载位移曲线末端为压缩平托盘的数据,此阶段不作为蝶形托盘的荷载数据,即蝶形托盘抗压强度为第三阶段峰值数据。通过对腐蚀后的托盘图像进行分析,发现其抗压强度随着温度的升高呈现出先减小后增大的变化趋势。值得注意的是,温度变化对托盘力学性能的影响与其质量损失率的影响并不一致。在观察托盘表面腐蚀特征时发现,相较于其他2组试样,35 °C腐蚀环境下试样表面腐蚀坑最为严重,而腐蚀坑的大小对托盘抗压强度高低起到决定性作用。随着温度升高至40 °C,腐蚀产物变得相对松散且易于脱落,使得托盘基体与腐蚀介质接触更为频繁。这一现象促使托盘整体以均匀腐蚀为主,缺乏较大深度蚀坑。

此外,当酸性较强时,温度变化对托盘力学性能的影响相对较小,当pH=3时,30 °C、35 °C和40 °C环境下托盘抗压强度损失率分别为4.68%、5.05%和4.82%,三者相差不大;当pH=4时,不同温度环境下托盘抗压强度损失率分别为2.46%、4.31%和3.63%;当pH=5时,3种环境的托盘抗压强度损失率分别为0.51%、2.35%和1.30%,托盘抗压强度的衰减均随温度变化而产生较大变化。可见,在强酸环境下,H⁺浓度过高,温度升高对腐蚀产物溶解的

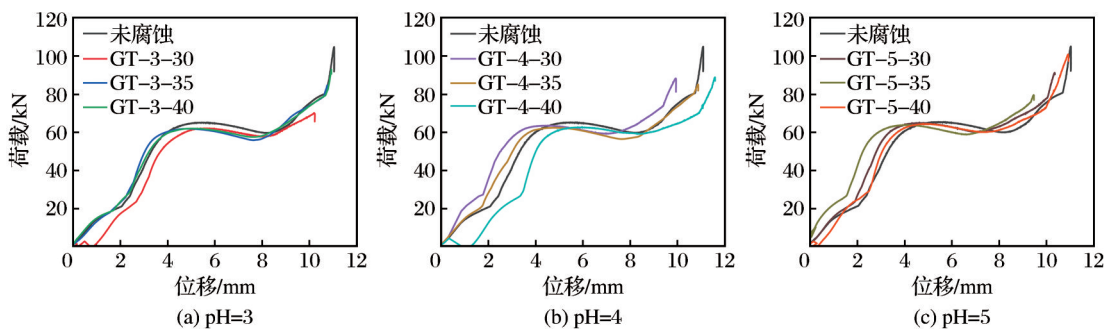


图7 不同温度腐蚀环境下托盘力学性能(以第一组试样为例)

Fig. 7 Mechanical properties of trays under different temperature corrosion environments (taking the first group of samples as an example)

促进作用并不明显;当 H^+ 浓度降低时,温度对蚀坑形成的影响程度虽然有所增加,但是变化幅值不大, H^+ 仍是决定其力学损伤的主要因素。

不同pH值环境下的托盘抗压强度如图8所示。当温度为30℃时,3种酸性腐蚀环境(pH值分别为3、4和5)下的试样抗压强度依次为62.12, 63.57, 64.84 kN;当温度为35℃时,3种酸性腐蚀环境(pH值分别为3、4和5)下的试样抗压强度依次为61.88, 62.36, 63.64 kN;当温度为40℃时,3种酸性腐蚀环境(pH值分别为3、4和5)下的试样抗压强度分别为62.03, 62.80, 64.32 kN。pH值对托盘力学性能的影响与其对质量损失率的影响呈现相同的规律,可见托盘在强酸性环境下更容易被腐蚀。

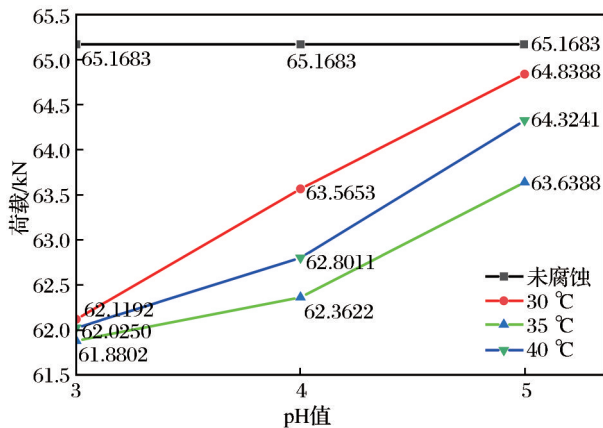


图8 不同pH值腐蚀环境下托盘力学性能(以第一组试样为例)

Fig. 8 Mechanical properties of trays under corrosion environments with different pH Value (taking the first group of samples as an example)

pH值对托盘腐蚀行为的影响体现在多方面,在酸性溶液中, H^+ 浓度的升高会增强质子的活性,降低阳极反应的活化能,从而促进金属表面的阳极溶解。同时, H^+ 浓度的升高对阴极反应的驱动力增强,进一步加速了整体的腐蚀过程。除此之外,酸性环境还会增加腐蚀产物的溶解度。通过MiniFlex 600X射线衍射仪对托盘腐蚀产物进行物相分析(图9),结果表明,腐蚀产物主要成分为红棕色的 Fe_2O_3 和黑色的 Fe_3O_4 。该腐蚀产物具有较低的溶解度,会在托盘表层形成一层保护性的钝化膜,减缓腐蚀的进一步发生。然而,在强酸性环境

中,腐蚀产物往往更容易溶解,从而去除原本形成的钝化层,使得金属表面暴露在酸性溶液中,导致腐蚀加剧。因此,酸性越强,腐蚀产物的溶解速度越快,托盘的腐蚀程度也更为严重。

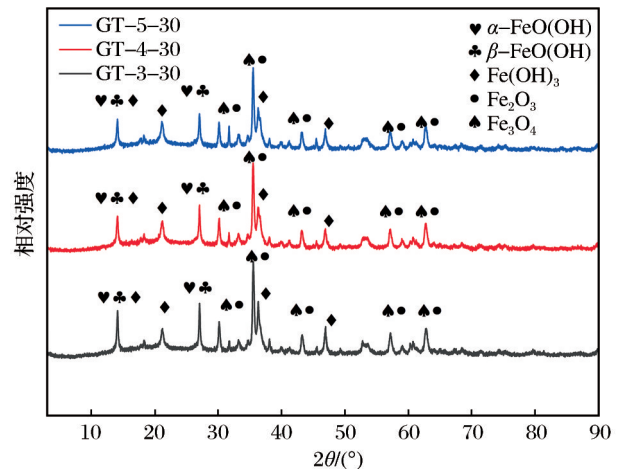


图9 托盘腐蚀产物XRD

Fig. 9 Tray corrosion product XRD

4 结论

通过开展室内加速腐蚀试验,并结合力学性能试验,对托盘在复杂腐蚀环境下的腐蚀规律进行了研究,得到以下主要结论:

(1) 试验初期托盘腐蚀速率较快,腐蚀产物在短时间内迅速附着于托盘表面,同时生成内部含有腐蚀液的膨胀泡。内部腐蚀液促进托盘发生二次腐蚀,最终膨胀泡发育到一定程度后彼此之间相互连通,导致腐蚀层面积变大,厚度增加。

(2) 温度对托盘腐蚀质量损失率和抗压强度的影响并不一致。温度升高导致腐蚀产物相对松散,容易脱落,有助于整体均匀腐蚀的发生,质量损失率随着温度的升高而逐渐增大。而抗压强度由托盘整体结构决定,蚀坑深度起到决定性因素。

(3) 在强酸环境下, H^+ 浓度过高,温度升高对腐蚀产物溶解的促进作用并不明显。当酸性减弱, H^+ 浓度降低时,温度对抗压强度的影响程度略有增大。酸性环境是决定其力学性能的主导因素。

(4) pH值对托盘腐蚀行为的影响体现在多方面,在酸性溶液中, H^+ 浓度的升高会增强质子的活性,降低阳极反应的活化能,从而促进金属表面的

阳极溶解。同时, H^+ 浓度的升高对阴极反应的驱动力增强, 进一步加速了整体的腐蚀过程。除此之外, 酸性环境还会增加腐蚀产物的溶解度。

(5)本研究通过调控盐雾试验箱的温度参数及配置不同pH值的腐蚀溶液, 模拟多种腐蚀环境, 系统研究了温度和pH值对管缝式锚杆托盘腐蚀行为的影响, 结果表明, 酸性环境是造成锚杆托盘力学性能劣化的主导因素。因此, 在实际工程防护中, 应优先选用耐酸性能优异的防腐涂层, 如热浸锌或达克罗涂层。然而, 矿井环境复杂多变, 腐蚀因素具有多样性, 现有防腐技术难以全面应对所有腐蚀机制, 建议在防腐设计中充分考虑现场实际腐蚀环境, 因地制宜地选择和优化防护方案, 以实现更有效、更持久的腐蚀防护。

参考文献 (References):

- Cai M F, Brown E T, 2017. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources [J]. *Engineering*, 3 (4) : 9-12.
- Li F M, Yuan Y S, Li C Q, 2011. Corrosion propagation of prestressing steel strands in concrete subject to chloride attack [J]. *Construction and Building Materials*, 25 (10) : 3878-3885.
- Li S Q, Du Z W, Wen Z Y, 2025. Experimental study on corrosion behavior and failure mechanism of bolts in acidic environment [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 329: 130123.
- Liu D D, Chen A, 2023. Performance evolution of prestressing anchor bars in corrosive environments experimental study [J]. *Scientific Reports*, 13: 9004.
- Yilmaz A, Rebak R B, Chandra D, 2005. Corrosion behavior of carbon steel rock bolt in simulated Yucca Mountain ground waters [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36 (5) : 1097-1105.
- 陈立强, 赵国彦, 李洋, 等, 2022. 开挖卸荷扰动下的深部巷道支护及其效果评价[J]. *黄金科学技术*, 30(3) : 438-448. Chen Liqiang, Zhao Guoyan, Li Yang, et al, 2022. Deep roadway support and its effect evaluation under excavation unloading disturbance [J]. *Gold Science and Technology*, 30(3) : 438-448.
- 陈锐, 刘万里, 闫清泉, 2021. 人工模拟盐雾环境试验探讨 [J]. *汽车实用技术*, 46(19) : 122-124. Chen Rui, Liu Wanli, Yan Qingquan, 2021. Discussion on salt spray test in artificial atmospheres [J]. *Automobile Applied Technology*, 46 (19) : 122-124.
- 程良奎, 韩军, 张培文, 2008. 岩土锚固工程的长期性能与安全评价 [J]. *岩石力学与工程学报*, 27 (5) : 865-872. Cheng Liangkui, Han Jun, Zhang Peiwen, 2008. Long-term performance and safety assessment of anchorage in geotechnical engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(5) : 865-872.
- 侯新澳, 万文, 赵延林, 等, 2024. 深部磷矿大断面交叉口软弱围岩稳定性分析及支护方案优化研究 [J]. *矿业研究与开发*, 44 (8) : 132-138. Hou Xin'ao, Wan Wen, Zhao Yanlin, et al, 2024. Stability analysis of weak surrounding rock at the intersection with large section and optimization of its support scheme in the deep phosphate mine [J]. *Mining Research and Development*, 44(8) : 132-138.
- 胡建华, 庞乐, 王学梁, 等, 2020. 基于正交试验的过断层软破段巷道支护参数优化 [J]. *黄金科学技术*, 28(6) : 859-867. Hu Jianhua, Pang Le, Wang Xueliang, et al, 2020. Optimization of roadway support parameters in soft broken sections based on orthogonal test [J]. *Gold Science and Technology*, 28(6) : 859-867.
- 李光, 马凤山, 刘港, 等, 2018. 金川矿区深部巷道支护效果评价及参数优化研究 [J]. *黄金科学技术*, 26(5) : 605-614. Li Guang, Ma Fengshan, Liu Gang, et al, 2018. Study on supporting parametric optimizing design and evaluate supporting effect of deep roadway in Jinchuan mine [J]. *Gold Science and Technology*, 26(5) : 605-614.
- 李桐, 左宇军, 潘超, 等, 2023. 锦丰金矿深部巷道中空注浆锚杆支护参数优化研究 [J]. *矿业研究与开发*, 43(6) : 97-102. Li Tong, Zuo Yujun, Pan Chao, et al, 2023. Study on support parameter optimization of hollow grouted bolt in deep roadway of Jinfeng gold mine [J]. *Mining Research and Development*, 43(6) : 97-102.
- 马印禹, 2023. 基于预应力膨胀支柱支护的残矿回采技术及经济效益评价 [J]. *矿业研究与开发*, 43(6) : 22-26. Ma Yinyu, 2023. Residual ore recovery technology and economic benefit evaluation based on prestressed expansion pillar support [J]. *Mining Research and Development*, 43 (6) : 22-26.
- 潘立志, 赵同彬, 邢明录, 等, 2023. 矿用碟形托盘压缩变形及承载特性研究 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 42(2) : 53-61. Pan Lizhi, Zhao Tongbin, Xing Minglu, et al, 2023. Research on compression deformation process and load-bearing characteristics of saucer tray used in mining [J]. *Journal of Shandong University of Science and*

- Technology (Natural Science), 42(2):53-61.
- 唐毅, 宋爱民, 2009. 盐雾试验条件对试验结果的影响[J]. 微电子学, 39(2):289-292. Tang Yi, Song Aimin, 2009. Effect of salt spray conditions on test results [J]. Microelectronics, 39(2):289-292.
- 魏泽捷, 2021. 高腐蚀环境下锚杆腐蚀耐久性及其防护技术试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学. Wei Zejie, 2021. Experimental research on corrosion durability and protection technology of rock bolts in high corrosion environment [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology.
- 肖玲, 李世民, 曾宪明, 等, 2008. 地下巷道支护锚杆腐蚀状况调查及力学性能测试[J]. 岩石力学与工程学报, 27(增刊2):3791-3797. Xiao Ling, Li Shimin, Zeng Xianming, et al, 2008. Investigation on corrosion status and mechanical properties test of supporting anchor rod in underground roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(Suppl.2):3791-3797.
- 肖玲, 李长松, 曾宪明, 等, 2007. 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, 26(4):720-726. Xiao Ling, Li Changsong, Zeng Xianming, et al, 2007. Comparison test study on mechanical performance of loaded bolt and unloaded bolt against corrosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(4):720-726.
- 张瑾, 王梦雪, 朱淳, 等, 2023. 氯盐环境下螺纹钢锚杆力学性能退化研究[J]. 金属矿山, 52(12):76-85. Zhang Jin, Wang Mengxue, Zhu Chun, et al, 2023. Study on the degradation of mechanical properties of threaded steel bolts in chloride environment [J]. Metal Mine, 52(12):76-85.
- 朱杰兵, 李聪, 刘智俊, 等, 2017. 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, 36(7):1579-1587. Zhu Jiebing, Li Cong, Liu Zhijun, et al, 2017. Damage tests of pre-stressed anchor bars in corrosion environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(7):1579-1587.
- 朱乾坤, 2017. 煤矿巷道树脂锚杆支护系统腐蚀现象试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学. Zhu Qiankun, 2017. Experimental study on corrosion of resin bolt support system in coal mine roadway [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University.

Experimental Study on Corrosion Damage and Mechanical Properties of Mine Bolt Tray

LI Weining¹, DIAO Yanlong¹, LI Yuanpu², DONG Jianwei¹, LIU Junxiao¹, FENG Fan²

1. Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou) Co., Ltd., Laizhou 261441, Shandong, China;

2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China

Abstract: In the context of the mine support project, the mechanical properties of metal trays are significantly influenced by corrosion due to the surrounding harsh working conditions, resulting in their gradual degradation. To investigate the damage evolution of metal trays in corrosive environments, this study focuses on the saucer tray used in mine pipe-seam bolts. It comprehensively considers the factors of temperature and pH value and conducts salt spray accelerated corrosion tests and mechanical performance assessments in a controlled laboratory setting. The impact of varying corrosion conditions on tray performance was systematically evaluated by analyzing the apparent corrosion morphology, mass loss rate, and compressive strength attenuation. The results indicate that: (1) At the beginning of the test, the tray exhibited a rapid corrosion rate, with corrosion products quickly adhering to its surface, leading to the formation of expansion bubbles containing the corrosive liquid. The internal corrosion liquid facilitates secondary corrosion of the tray, ultimately leading to the development of expansion bubbles to a certain extent. These bubbles are interconnected, resulting in an increased area and depth of the corrosion layer. (2) The effect of temperature on the corrosion mass loss rate and the compressive strength of the tray is in consistent. As temperature rises, corrosion products become relatively

loose and prone to detachment, promoting overall uniform corrosion, and the mass loss rate gradually increases with temperature. The compressive strength is influenced by the overall structure of the tray, with the depth of the corrosion pits being a decisive factor. (3) In a strong acidic environment, when the H^+ concentration is excessively high, the impact of temperature rise on the dissolution of corrosion products is not significant. However, as acidity decreases and H^+ concentration diminishes, the influence of temperature on compressive strength slightly increases. The acidic environment is the predominant factor determining the tray's mechanical properties. (4) The influence of pH value on the corrosion behavior of trays manifests in several dimensions. In acidic solutions, an elevated concentration of H^+ ions enhances proton activity and decreases the activation energy required for the anodic reaction, thereby facilitating the anodic dissolution of the metal surface. Concurrently, the heightened H^+ concentration augments the driving force of the cathodic reaction, further accelerating the overall corrosion process. Moreover, the acidic environment increases the solubility of corrosion products. This study elucidates that pH value is the primary factor affecting the degradation of the mechanical properties of pallets post-corrosion, while an increase in temperature predominantly contributes to mass loss by promoting uniform corrosion.

Key words: tray; corrosion environments; mechanical properties; temperature; pH value; damage evolution; compressive strength

第十九次李四光地质科学奖在京颁奖

12月23日,第十九次李四光地质科学奖颁奖仪式在京举行。自然资源部党组书记、部长,李四光地质科学奖委员会主任关志鸥出席并讲话。自然资源部副部长、李四光地质科学奖委员会副主任许大纯主持仪式。

根据《李四光地质科学奖章程》规定,经李四光地质科学奖委员会十届二次会议决定,授予李亚林、丁正江、王炯辉、陈景河、许向宁、周尚国、彭云彪和荆少东8人李四光地质科学奖野外奖,代世峰、吴珍汉、侯明才、王学求、王汝成、王贵玲和胡祥云7人李四光地质科学奖科研奖。自然资源部副部长孙书贤宣读第十九次李四光地质科学奖奖励决定,关志鸥等部领导和李四光地质科学奖委员会副主任为获奖者颁奖。熊盛青、代世峰和丁正江三位新老获奖代表作了精彩发言。

关志鸥代表自然资源部向本次李四光地质科学奖获奖者致以热烈的祝贺和崇高的敬意,希望他们继续做爱国奉献的先锋、开拓创新的闯将、艰苦奋斗的表率。他表示,当前我国正处在奋力保障国

家能源资源安全、实现高水平科技自立自强的关键时期,地质工作使命光荣、责任重大。新时代地质科技工作者要不断继承和发扬李四光精神。一是要弘扬爱国奉献的优良品质,筑牢地质报国的精神根基。要胸怀“国之大事”,将个人的科研工作与国家需求同频共振,牢记“为国找矿、科技报国”的初心使命。二是要增强开拓创新的奋斗精神,勇攀地质科技高峰。新时代的地质工作已经与人工智能、大数据、高端制造等前沿领域深度融合,要勇闯科研“无人区”,不断开拓地质工作的新领域、新赛道,推出更多原创性、引领性的科技成果。三是要坚守艰苦奋斗的优良作风,锤炼扎根打底的过硬本领。地质工作面对大自然、探索未知境的基本属性没有变,吃苦耐劳、脚踏实地的作风不能丢,要“把论文写在祖国的大地上”,为国家找大矿、找好矿、找急需的矿不断作出新贡献。

李四光地质科学奖是面向全国地质科技工作者的最高层次地质科学奖,奖项自1989年设立,每两年评选一次,一人只能获得一次,并作为终身荣誉。

(来源:中国日报)