



基于模糊综合评价法的煤矿环境腐蚀倾向性分析

李帅乾 郭忠平 温卓越 谢中辉 侯正涛 李鹏

引用本文:

李帅乾, 郭忠平, 温卓越, 等. 基于模糊综合评价法的煤矿环境腐蚀倾向性分析[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 52–63.
LI Shuaiqian, GUO Zhongping, WEN Zhuoyue. Analysis of coal mine environment corrosion tendency based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 52–63.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0150>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

闭坑煤矿井下空间资源开发利用评价

Development and utilization evaluation of underground space resources in closed pit coal mine

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/51259a33-4c01-47d3-9c75-ced68ba0825c>

基于变权模糊理论的残煤连采可行性评价研究

Study on feasibility evaluation of continuous mining of residual coal based on variable weight fuzzy theory

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 30–37 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ddc7f15d-83fb-478d-a62b-faef619014ca>

矿井煤层冲击危险性多层次综合评价研究

Research on multi-level comprehensive evaluation of coal seam rockburst risk in underground mine

煤炭科学技术. 2020, 48(8): 82–89 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e07e7cae-990c-4e34-88ad-71bdb68f9bb8>

基于模糊综合评价的导水通道超前探查判识技术

Judgment technique for over-exploration of water-conducting channel based on process analysis and fuzzy comprehensive evaluation

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 178–186 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1269>

基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究

Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 291–298 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f09c6c57-2768-4b38-8d21-1ed8f604fee5>

压裂液腐蚀效应下煤体力学损伤规律及增透效果研究

Study on coal mechanical damage law and anti-reflection effects under fracturing fluid corrosion affecting

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2dba456a-f88a-42b7-8558-6d959a183469>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李帅乾, 郭忠平, 温卓越, 等. 基于模糊综合评价法的煤矿环境腐蚀倾向性分析[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 52-63.

LI Shuaiqian, GUO Zhongping, WEN Zhuoyue, *et al.* Analysis of coal mine environment corrosion tendency based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 52-63.

基于模糊综合评价法的煤矿环境腐蚀倾向性分析

李帅乾¹, 郭忠平¹, 温卓越¹, 谢中辉², 侯正涛², 李 鹏²

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 陕西正通煤业有限责任公司, 陕西 咸阳 713600)

摘要: 煤矿环境因其复杂性易导致锚固材料在长期使用中遭受腐蚀破坏, 威胁巷道支护安全。为表征煤矿环境腐蚀特性, 进行了煤矿环境腐蚀因素及腐蚀倾向性研究。根据现场调研结果分析了煤矿环境特征及主要腐蚀因素; 运用层次分析-熵值组合赋权法及隶属度分析法研究了煤矿环境腐蚀倾向性; 开展工业性应用试验确定了高家堡煤矿井下巷道环境腐蚀倾向性等级。结果表明: 煤矿环境可划分为水环境、大气环境和围岩环境 3 类, 共包含 9 种主要环境腐蚀因素, 采用组合赋权法分析得到水环境价值权重为 0.648 295 62、大气环境价值权重为 0.229 673 09、围岩环境价值权重为 0.122 031 29; 运用隶属度分析, 提出了 pH 影响指数、Cl⁻影响指数、SO₄²⁻影响指数等 9 项煤矿主要环境腐蚀因素影响指数, 构建了各主要环境腐蚀因素隶属度函数; 结合指标赋权及隶属度分析, 设计了煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评价方法, 通过环境检测、指标量化、评价指数确定和工程判据对照对煤矿环境腐蚀倾向性进行综合判断; 应用多参量耦合评价方法得到了高家堡煤矿北翼回风巷、西翼集中辅运巷、西区回风巷、3403 运输巷和 3407 运输巷环境腐蚀倾向性分别为 V 级、Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级; 对比巷道环境评价及工业性腐蚀试验结果可知该评价方法能准确评估煤矿环境腐蚀特性。本研究可有效评估矿井环境, 为煤矿巷道防腐支护提供指引。

关键词: 煤矿环境; 腐蚀因素; 腐蚀倾向; 模糊数学; 评价方法

中图分类号: TD167

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)05-0052-12

Analysis of coal mine environment corrosion tendency based on fuzzy comprehensive evaluation method

LI Shuaiqian¹, GUO Zhongping¹, WEN Zhuoyue¹, XIE Zhonghui², HOU Zhengtao², LI Peng²

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shaanxi Zhengtong Coal Industry Co., Ltd., Xi'an 713600, China)

Abstract: The coal mine environment is easy to cause corrosion damage to the anchorage material in long-term use because its complexity, which threatens the safety of roadway support. To characterize the corrosion characteristics of coal mine environment, the corrosion factors and corrosion tendency of coal mine environment were studied. The environmental characteristics and main corrosion factors of coal mine were analyzed based on field investigation. The multi-parameter coupling evaluation method of coal mine environmental corrosion tendency is designed by analytic hierarchy process-entropy combination weighting and membership degree analysis. The environmental corrosion tendency grade of underground roadway in Gaojiabao Coal Mine was determined by industrial application test. The results indicate that the coal mine environment can be divided into three categories: water environment, atmospheric environment and surrounding rock environment, including 9 main environmental corrosion factors. By index weighting analysis, the weight of water environment was determined as 0.648 295 62, the weight of atmospheric environment was determined as 0.229 673 09, and the weight of surrounding rock environment was determined as 0.122 031 29. Nine influence indexes of main environmental corrosion factors in coal mines

收稿日期: 2024-01-25

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 陈思成

DOI: 10.12438/cst.2024-0150

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52374129)

作者简介: 李帅乾(2000—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生。E-mail: 2664525875@qq.com

通讯作者: 郭忠平(1962—), 男, 山东临朐人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: gzp57046@126.com

were put forward by membership analysis, such as pH influence index, Cl^- influence index and SO_4^{2-} influence index. The membership function of each main environmental corrosion factor was constructed. Combined with index weighting and membership analysis, the multi-parameter coupling evaluation method of coal mine environmental corrosion tendency was designed, the environmental corrosion tendency of coal mine is comprehensively judged by environmental detection, index quantification, evaluation index determination and engineering criterion comparison. The environmental corrosion tendency of the north wing return air roadway, the west wing concentrated auxiliary transportation roadway, the west return air roadway, the 3403 transportation roadway and the 3407 transportation roadway in Gaojiabao Coal Mine were determined as grade V, grade III, grade II, grade III and grade IV by applying the multi-parameter coupling evaluation method of coal mine environmental corrosion tendency. Comparing the results of roadway environmental evaluation and industrial corrosion test, it can be seen that the evaluation method can accurately evaluate the corrosion characteristics of coal mines environmental. This study can effectively evaluate the mine environment and provide guidance for the anti-corrosion support of coal mine roadway.

Key words: coal mine environment; corrosion factor; corrosion tendency; fuzzy mathematics; evaluation method

0 引言

锚固支护是世界公认安全高效的煤矿支护方式之一^[1]。然而,复杂地质条件下矿井中 pH、污染气体、侵蚀介质等环境因素易导致锚固材料腐蚀失效^[2]。锚固材料过早失效是诱发围岩失稳、巷道变形等矿井安全事故的重要原因。因此,开展煤矿环境腐蚀倾向性评价研究具有重要的现实意义。

煤矿环境腐蚀倾向性是煤矿环境能否导致锚固支护材料腐蚀失效的自然属性,其受环境腐蚀因素种类及含量影响。如何选定用于表征煤矿环境腐蚀倾向性的环境腐蚀因素,对此国内外学者进行了大量、深入的研究。吴赛赛等^[3]调研了多个煤矿锚杆腐蚀情况及其环境特征,发现 pH 是导致锚杆腐蚀的主要环境因素之一; ANDERMAAT 等^[4]探究了 Mount Isa 矿锚固结构的服役环境,指出 pH、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、DO 是诱导锚固材料腐蚀失效的主要环境因素;潘继良等^[5]通过研究深井岩体锚固结构腐蚀失效现象,发现地下水、矿井大气、微生物、围岩体等均会对锚固材料产生腐蚀劣化作用; CRAIG 等^[6]现场调研了澳大利亚 12 座煤矿锚杆服役环境,指明应力、地下水和微生物是导致锚杆腐蚀的重要因素; WU 等^[7]研究了深井岩层锚杆的腐蚀状态及其工作环境,发现温度、湿度亦会影响锚杆腐蚀进展。

上述研究对于了解煤矿环境腐蚀因素具有重要意义。然而,煤矿环境复杂多变,不同煤矿或同一煤矿不同巷道之间的环境腐蚀因素千差万别,基于固定的环境腐蚀因素构建具有广泛适用性的环境腐蚀倾向性评价体系是煤矿环境腐蚀特性评价研究的重要问题之一。MANQUEHUAL 等^[8]以 pH、侵蚀离子、溶解氧为主要环境腐蚀因素构建了锚杆腐蚀深度预测体系,实现了对地下工程腐蚀环境中锚杆使

用寿命的宏观估计。黎慧珊等^[9]基于环境腐蚀效应和锚杆索腐蚀特征构建了锚杆索健康评价体系,实现了对煤矿腐蚀环境下锚杆索健康状况的综合评价。然而,上述 2 种煤矿腐蚀特性评价体系均为基于锚固材料腐蚀特征的被动评价,无法在锚固支护前对煤矿环境进行腐蚀倾向性评估。

鉴于此,笔者依据锚杆服役条件对煤矿环境进行划分,确定 pH、矿井温度、围岩渗透性等主要环境腐蚀因素,构建煤矿环境腐蚀倾向性评价指标体系,应用层次分析-熵值组合赋权法量化各评价指标价值权重,采用模糊综合评价方式设计煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评价方法,并结合工程实际对该评价方法进行验证。本研究有助于矿山企业明确煤矿井下环境腐蚀特性,为矿井锚固支护设计提供参考。

1 煤矿环境分析

锚杆作为锚固支护结构的关键部位,其自由段和锚固段深入围岩,端头与巷道中支护结构物相连。基于锚杆不同部位工作条件可将煤矿环境划分为水环境、大气环境和围岩环境 3 部分,如图 1 所示。

1.1 煤矿水环境

煤矿水环境主体为地下水与开采用水共同形成的矿井淋水,其作为锚固材料腐蚀的主要反应载体对煤矿环境腐蚀倾向性具有重要影响。研究表明矿井淋水中 pH、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、DO 等环境因素均可直接影响锚固材料腐蚀过程^[10]。pH 与腐蚀速率呈负相关:当 $\text{pH}>8$ 时,碱性环境可诱导锚固材料钝化减缓腐蚀进展;当 $4<\text{pH}\leq 8$ 时,腐蚀速率随 pH 变化较小;当 $\text{pH}\leq 4$ 时,酸性环境可溶解锚固材料表面氧化膜致使腐蚀加剧^[11]。 Cl^- 、 SO_4^{2-} 可穿透破坏矿井淋水中 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子在锚固材料表面沉积而成

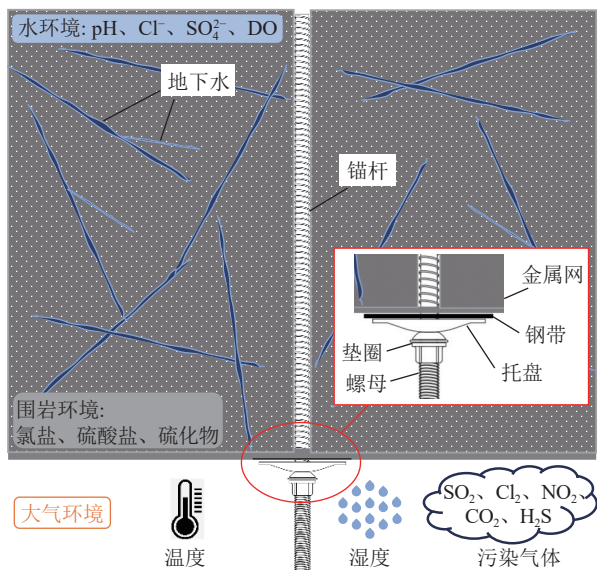


图1 煤矿环境示意

Fig.1 Schematic diagram of coal mine environment

的盐类物质保护层和锚固材料钝化膜,导致腐蚀加剧并诱发点蚀形核发展^[12]。随着 Cl⁻、SO₄²⁻ 质量浓度增大,此穿透破坏作用愈加强烈,局部腐蚀逐渐成为主要腐蚀形态,锚固材料承载能力显著劣化^[13]。DO 作为氧化性物质直接参与电化学腐蚀阴极反应,可促进锚固材料氧化溶解,表明溶解氧质量浓度与腐蚀速率呈正相关^[14]。我国煤矿地下水系发育且多透水性顶板,流动性地下水逐渐成为煤矿水环境溶解氧的主要来源,煤矿矿井淋水溶解氧质量浓度平均可达 5.00 mg/L,溶解氧已成为影响煤矿环境腐蚀倾向性的主要环境因素之一。

1.2 煤矿大气环境

裸露于巷道中的锚杆端头及锚固支护结构物主要受到温度、湿度、污染气体等大气环境因素的腐蚀作用。温度对金属材料腐蚀起促进作用,其与腐蚀速率呈指数函数关系^[15]。我国煤矿工程中,东部矿井地温梯度约为 0.01~0.03 °C/m,西部矿井地温梯度约为 0.03~0.05 °C/m。随着煤矿开采逐渐向深部发展,温度对锚固支护材料的腐蚀促进作用愈加明显。伴随温度提升,煤矿大气湿度亦逐渐增大。空气水分是金属腐蚀及侵蚀介质离子化的主要载体,大气湿度增加必然加速锚固材料腐蚀^[16]。然而,腐蚀速率并非正相关于大气湿度,研究表明饱和湿度环境下锚杆腐蚀速率仅为永久浸泡和干湿交替环境的 20%^[17]。我国煤矿大气湿度平均为 70%,如此潮湿环境中,除大气湿度自身的促腐蚀作用,污染气体(SO₂、Cl₂、NO₂ 等)的溶解亦会加快锚固材料腐蚀速率,特别是 SO₂、Cl₂ 等酸性气体,其溶解可降低锚固

材料表面薄液膜酸度,加速腐蚀进展^[18]。

1.3 煤矿围岩环境

围岩作为锚固支护结构的组成部分直接影响煤矿环境腐蚀倾向性。一方面,围岩中天然节理、断层等构造和采动所致裂缝均可作为腐蚀介质渗透接触锚固材料提供通道^[19];另一方面,围岩中矿物成分溶解可改变锚固材料服役环境。研究表明硫化物是围岩中对腐蚀影响最大的矿物成分^[20]。潮湿空气中,硫化物可被氧化生成硫酸,在锚固支护结构局部形成酸性环境,促进锚固材料电化学腐蚀。此外,硫酸盐、氯盐等盐类矿物在锚固材料表面薄液膜中的水解增加了环境盐度,在加速锚固材料电化学腐蚀速率的同时易诱发点蚀形核发展^[21]。硫酸盐溶液腐蚀试验显示:SO₄²⁻ 侵蚀下,锚固材料力学性能快速退化,锚固结构稳定性大大降低,点腐蚀取代均匀腐蚀成为主要腐蚀形态^[22]。

1.4 煤矿环境腐蚀因素

经分析研究煤矿水环境、大气环境、围岩环境,发现煤矿井下存在温度、湿度、pH、Cl⁻等多种可对金属锚固材料产生腐蚀劣化效果的环境因素。综合考虑各环境因素赋存特征及腐蚀作用机制,结合工程经验及前人研究,提取出 9 种煤矿主要环境腐蚀因素。其中,煤矿水环境存有 4 种,分别为 pH、Cl⁻、SO₄²⁻、DO;煤矿大气环境存有 3 种,分别为矿井温度、矿井湿度、污染气体;煤矿围岩环境存有 2 种,分别为围岩渗透性、围岩体含硫矿物。

2 环境腐蚀因素权重分析

权重是评价模型中反映各评价指标相对重要程度的关键参数。指标赋权方法主要分为主观赋权、客观赋权两类。主观赋权因过度依赖工程经验判断而缺乏一定客观性,客观赋权因忽略指标间相关性而难以结合实际工程^[23]。本文模型结合主观赋权和客观赋权,采用层次分析-熵值组合赋权法对各主要环境腐蚀因素进行定性-定量分析,使其权重同时反映主观经验和客观数据。

2.1 评价指标及分级

煤矿环境腐蚀倾向性多元评价指标是衡量煤矿环境能否导致锚固支护材料腐蚀失效的基础,是多元评价理论应用于煤矿环境系统分析的结果。综合考虑煤矿水环境、大气环境、围岩环境中可导致井下金属材料腐蚀劣化的各项因素,建立煤矿环境腐蚀倾向多元评价指标体系,如图 2 所示。该评价指标体系为 2 层层次结构,共划分为 3 个一层指标和 9

个细化指标。其中，一层指标 $T=\{T_1, T_2, T_3\}=\{\text{水环境腐蚀倾向, 大气环境腐蚀倾向, 围岩环境腐蚀倾向}\}$ ；细化指标包含： $T_1=\{T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}\}=\{\text{pH, Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{DO}\}$ ， $T_2=\{T_{21}, T_{22}, T_{23}\}=\{\text{矿井温度, 矿井湿度, 污染气体含量}\}$ ， $T_3=\{T_{31}, T_{32}\}=\{\text{围岩渗透性, 含硫矿物含量}\}$ 。

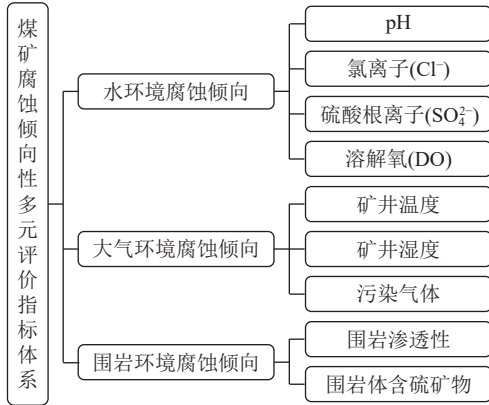


图 2 煤矿环境腐蚀倾向性多元评价指标体系

Fig.2 Multivariate evaluation index system for corrosion tendency in coal mine environment

借鉴大气腐蚀性标准 GB/T 19292.1—2018，依据单位面积锚固材料年平均腐蚀深度将煤矿环境腐蚀倾向性划分为 I（很低）、II（低）、III（中等）、IV（高）、V（很高）5 个等级，见表 1。

表 1 煤矿环境腐蚀倾向性分级标准

Table 1 Classification standard for corrosion tendency of coal mine environment

等级	腐蚀倾向性	年平均腐蚀深度/ μm
I	很低	<50
II	低	50 ~ 150
III	中等	150 ~ 250
IV	高	250 ~ 350
V	很高	≥ 350

2.2 层次分析法

层次分析法是一种依据专家评价及评分量化进行多准则决策的主观赋权方法。依据多元评价指标体系对煤矿环境腐蚀倾向与评价指标构建层次结构。其中，煤矿环境腐蚀倾向性为目标层，评价指标为因素层。

2.2.1 煤矿水环境指标主客观权重

应用比例标度法和同行业专家评审意见对水环境腐蚀倾向 T_1 中各因素指标 ($T_{11} \sim T_{14}$) 构建煤矿环境腐蚀倾向指标判断矩阵，如下：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.33 & 2 & 0.5 \\ 3 & 1 & 4 & 2 \\ 0.5 & 0.25 & 1 & 0.5 \\ 2 & 0.5 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

对该判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}=4.0458$ 所对应特征向量进行归一化处理记为 $W_{Z1}=(0.16444698, 0.47167762, 0.10774507, 0.25613032)$ ，此过程为层次单排序。对层次单排序结果进行一致性检验。通过式(1)计算一致性指标 C_1 。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中： n 为判断矩阵阶数。

以 0 为标准， C_1 值越接近 0，表示层次单排序结果越具有一致性。判断矩阵的一致性指标 C_1 为 0.01526667，表明通过该判断矩阵所得层次单排序结果具有可接受的一致性。

引入平均随机一致性指标 R_1 对 C_1 的结果进行评估。由文献可知，当判断矩阵阶数为 3、4 时， R_1 取值为 0.52、0.89^[24]。

引入检验系数 C_R 对判断矩阵的一致性进行验证，以保证决策结果可靠性。 C_R 定义为一致性指标 C_1 与随机一致性指标 R_1 的比值，如式(2)所示。当 $C_R < 0.1$ 时，判断矩阵通过一致性检验，反之则未通过。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (2)$$

判断矩阵一致性检验系数 $C_R=0.01715356 < 0.1$ ，表明该判断矩阵适用一致性矩阵特性。因此，层次单排序结果即为煤矿水环境中各因素指标主观权重 W_{Z1} ：

$$W_{Z1} = (W_{Z11}, W_{Z12}, W_{Z13}, W_{Z14}) = (0.16444698, 0.4716776, 0.10774507, 0.25613032)$$

2.2.2 煤矿大气环境指标主客观权重

应用比例标度法和同行业专家评审意见对大气环境腐蚀倾向 T_2 中各因素指标 ($T_{21} \sim T_{23}$) 构建大气环境腐蚀倾向指标判断矩阵，如下：

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 2 & 1 & 0.5 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

对该判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}=3.0536$ 所对应特征向量进行归一化处理记为 $W_{Z2}=(0.19579258, 0.31081996, 0.49338746)$ 。通过式(1)、式(2)计算得 $C_1=0.0268$ 、 $C_R=0.04620689 < 0.1$ ，则该判断矩阵适用一致性矩阵特性，大气环境腐蚀倾向指标主观权重 W_{Z2} ：

$$W_{Z2} = (W_{Z21}, W_{Z22}, W_{Z23}) = (0.195\ 792\ 58, 0.310\ 819\ 96, 0.493\ 387\ 46)$$

2.2.3 煤矿围岩环境指标主观权重

应用比例标度法和同行业专家评审意见对围岩环境腐蚀倾向 T_3 中各因素指标 (T_{31} 、 T_{32}) 构建围岩环境腐蚀倾向指标判断矩阵, 如下:

$$R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}$$

对该判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}=2$ 所对应特征向量进行归一化处理记为 $W_{Z3}=(0.750\ 019\ 76, 0.249\ 980\ 24)$ 。由于二阶矩阵本身即具有完全一致性, 则围岩环境腐蚀倾向指标主观权重 W_{Z3} :

$$W_{Z3} = (W_{Z31}, W_{Z32}) = (0.750\ 019\ 76, 0.249\ 980\ 24)$$

2.3 熵值法

熵值法是一种依据数据统计及离散分析进行信息量判断的客观赋权方法^[25]。在信息理论中, “熵”用于表示某一指标因素的随机性、混淆程度及离散程度, 熵值越小则表示该指标因素变异程度越大, 提供信息量越多, 权重越大^[26]。

通过调研我国彬长矿区高家堡煤矿已出现锚固材料腐蚀现象的5条巷道巷内各细化指标参数, 应用熵值法确定煤矿水环境、大气环境、围岩环境各细化指标客观权重。所调研巷道 $K=\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5\}=\{\text{北翼回风巷、西翼集中辅运巷、西区回风巷、3403 运输巷、3407 运输巷}\}$ 。

2.3.1 煤矿水环境指标客观权重

构建水环境腐蚀倾向指标评估矩阵如下:

$$R_4 = \begin{bmatrix} 8.54 & 484.446 & 1363.1 & 2.3 \\ 7.029 & 174.193 & 841.729 & 5.7 \\ 6.788 & 104.071 & 935.09 & 1.4 \\ 7.344 & 88.086 & 298.278 & 7.2 \\ 8.17 & 162 & 1250 & 7.4 \end{bmatrix}$$

通过式(3)计算煤矿水环境各细化指标 T_{ij} 下, 被评对象 K_i 归一化数值。

$$P_{ij} = \frac{K_i T_{ij}}{\sum_{i=1}^i K_i T_{ij}} \quad (3)$$

通过式(4)计算煤矿水环境各细化指标 T_{ij} 熵值。

$$e_j = -\frac{1}{\ln i} \sum_{i=1}^i P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

通过式(5)计算煤矿水环境各细化指标 T_{ij} 偏差度。

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

通过式(6)对煤矿水环境各细化指标 T_{ij} 偏差度

进行归一化处理, 计算得煤矿环境腐蚀倾向性评价指标客观权重。

$$W = \frac{g_j}{\sum_{k=1}^n g_k} \quad (6)$$

水环境腐蚀倾向指标客观权重 W_{K1} :

$$W_{K1} = (W_{K11}, W_{K12}, W_{K13}, W_{K14}) = (0.196\ 616\ 59, 0.413\ 463\ 99, 0.152\ 275\ 72, 0.237\ 643\ 71)$$

2.3.2 煤矿大气环境指标客观权重

构建大气环境腐蚀倾向指标评估矩阵如下:

$$R_5 = \begin{bmatrix} 35 & 85 & 4.41 \times 10^{-3} \\ 24 & 62 & 7.92 \times 10^{-4} \\ 31 & 53 & 1.85 \times 10^{-4} \\ 29 & 64 & 8.27 \times 10^{-4} \\ 32 & 67 & 3.38 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

通过式(3)一式(6)计算得大气环境腐蚀倾向指标客观权重 W_{K2} :

$$W_{K2} = (W_{K21}, W_{K22}, W_{K23}) = (0.231\ 073\ 22, 0.316\ 869\ 47, 0.452\ 057\ 31)$$

2.3.3 煤矿围岩环境指标客观权重

构建围岩环境腐蚀倾向指标评估矩阵如下:

$$R_6 = \begin{bmatrix} 8.54 & 484.446 \\ 7.029 & 174.193 \\ 6.788 & 104.071 \\ 7.344 & 88.086 \\ 8.17 & 162 \end{bmatrix}$$

通过式(3)一式(6)计算得围岩环境腐蚀倾向指标客观权重 W_{K3} :

$$W_{K3} = (W_{K31}, W_{K32}) = (0.716\ 598\ 93, 0.283\ 401\ 07)$$

2.4 组合赋权

为使权重同时反映主观权重信息和客观权重信息, 采用最小鉴别信息原理计算煤矿环境腐蚀倾向性评价指标组合权重 W_{ij} , 构建目标函数如式(7)所示。

$$\begin{cases} \min \{J(W)\} = \sum_{j=1}^n \left(W_j \ln \frac{W_j}{W_{Zj}} + W_j \ln \frac{W_j}{W_{Kj}} \right) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^n W_j = 1, W_j \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解该目标函数得煤矿水环境、大气环境、围岩环境各细化指标的组合权重 W_{ij} , 如式(8)所示。

$$W_{ij} = \frac{\sqrt{W_{Zj} W_{Kj}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{W_{Zj} W_{Kj}}} \quad (8)$$

煤矿环境腐蚀倾向性各细化指标组合权重分布如下。

$$W_{H1} = (W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}) = (0.180\ 494\ 27, 0.443\ 283\ 81, 0.443\ 283\ 81, 0.247\ 647\ 55)$$

$$W_{H2} = (W_{21}, W_{22}, W_{23}) = (0.212\ 957\ 51, 0.314\ 206\ 16, 0.314\ 206\ 16)$$

$$W_{H3} = (W_{31}, W_{32}) = (0.733\ 643\ 09, 0.266\ 356\ 91)$$

2.5 一层指标权重

采用层次分析法分析一层指标(水环境腐蚀倾向, 大气环境腐蚀倾向, 围岩环境腐蚀倾向)对煤矿环境腐蚀倾向性的影响权重。同上述3.2节分析, 对煤矿环境腐蚀倾向指标体系中3个一层指标构建煤矿环境腐蚀倾向一层指标判断矩阵, 如下:

$$R_7 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0.33 \\ 0.5 & 1 & 0.2 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

对该判断矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}=3.003\ 7$ 所对应特征向量进行归一化处理记为 $W=(0.229\ 673\ 09, 0.122\ 031\ 29, 0.648\ 295\ 62)$ 。通过式(1)、式(2)计算得 $C_1=0.001\ 85$ 、 $C_R=0.003\ 189\ 66<0.1$, 表明该判断矩阵适用一致性矩阵特性, 煤矿环境腐蚀倾向一层指标权重 W :

$$W = (W_1, W_2, W_3) = (0.648\ 295\ 62, 0.229\ 673\ 09, 0.122\ 031\ 29)$$

3 煤矿环境腐蚀倾向性分析

3.1 环境腐蚀因素隶属度研究

将 pH、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、DO、矿井温度、矿井湿度、污染气体体积分数、围岩渗透系数、含硫矿物质量分数对煤矿环境腐蚀倾向的影响程度分别用 pH 影响指数、 Cl^- 影响指数、 SO_4^{2-} 影响指数、DO 影响指数、温度影响指数、湿度影响指数、气体影响指数、渗透影响指数、硫矿影响指数表示, 采用模糊数学和工程经验相结合的方法研究上述指标对煤矿环境腐蚀倾向性的归属程度。

1) pH 影响指数。应用煤矿水环境 pH 值的算数值 I_{pH} 表征煤矿环境酸碱程度。结合工程经验与试验研究, 引入 pH 影响指数 μ_1 表示煤矿环境酸碱程度 I_{pH} 对煤矿环境腐蚀倾向性隶属度, 如式(9)所示。

$$\mu_1 = \begin{cases} 1, & I_{pH} < 2 \\ -0.133I_{pH} + 1.267, & 2 \leq I_{pH} < 8 \\ -0.05I_{pH} + 0.6, & I_{pH} \geq 8 \end{cases} \quad (9)$$

2) Cl^- 影响指数。煤矿水环境中 Cl^- 主要源于地下水, 然而地下水中离子多种多样, 不同离子间相互作用会对锚杆腐蚀速率产生不同影响, 引入环境含

氯水平 I_{Cl^-} 反映 Cl^- 对煤矿环境腐蚀倾向性影响准则。 I_{Cl^-} 定义为 Cl^- 质量浓度与矿井水溶解性总固体 T_{DS} 的比值, 如式(10)所示。

$$I_{Cl^-} = \frac{\omega_{Cl^-}}{T_{DS}} \quad (10)$$

根据工程经验及已有研究, 引入 Cl^- 影响指数 μ_2 表示 Cl^- 对煤矿环境腐蚀倾向性隶属度, 如式(11)所示。

$$\mu_2 = \begin{cases} 1.5I_{Cl^-}, & I_{Cl^-} < 0.1 \\ 5.667I_{Cl^-} - 0.417, & 0.1 \leq I_{Cl^-} < 0.25 \\ 1, & I_{Cl^-} \geq 0.25 \end{cases} \quad (11)$$

3) SO_4^{2-} 影响指数。煤矿水环境中 SO_4^{2-} 亦主要来源于地下水。引入环境含硫水平 $I_{SO_4^{2-}}$ 反应 SO_4^{2-} 对煤矿环境腐蚀倾向性影响准则。 $I_{SO_4^{2-}}$ 定义为 SO_4^{2-} 质量浓度与矿井水溶解性总固体 T_{DS} 的比值, 如式(12)所示。

$$I_{SO_4^{2-}} = \frac{\omega_{SO_4^{2-}}}{T_{DS}} \quad (12)$$

结合工程经验及已有研究, 引入 SO_4^{2-} 影响指数 μ_3 表示 SO_4^{2-} 对煤矿环境腐蚀倾向性隶属度, 如式(13)所示。

$$\mu_3 = \begin{cases} 0.75I_{SO_4^{2-}}, & I_{SO_4^{2-}} < 0.2 \\ 2.835I_{SO_4^{2-}} - 0.417, & 0.2 \leq I_{SO_4^{2-}} < 0.5 \\ 1, & I_{SO_4^{2-}} \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

4) DO 影响指数。DO 作为氧去极化腐蚀的主要参与者, 煤矿环境腐蚀倾向性随着矿井水环境溶解氧质量分数增大持续增强^[27]。应用 DO 质量分数 I_{DO} 表示煤矿水环境含氧能力, 根据工程经验及已有研究, 引入 DO 影响指数 μ_4 表示 DO 对煤矿环境腐蚀倾向性的隶属度, 如式(14)所示。

$$\mu_4 = \begin{cases} 0.043I_{DO}, & I_{DO} < 4 \\ 0.138I_{DO} - 0.383, & 4 \leq I_{DO} < 10 \\ 1, & I_{DO} \geq 10 \end{cases} \quad (14)$$

5) 温度影响指数。应用矿井大气温度算数值 I_t 表示煤矿环境中各分子热运动剧烈程度, 根据工程经验及已有研究^[28], 引入温度影响指数 μ_5 表示矿井大气温度对煤矿环境腐蚀倾向性的隶属度, 如式(15)所示。

$$\mu_5 = \begin{cases} 0.013I_t, & I_t < 20 \\ 0.05I_t - 0.75, & 20 \leq I_t < 35 \\ 1, & I_t \geq 35 \end{cases} \quad (15)$$

6) 湿度影响指数。应用矿井相对湿度算数值 I_{RH} 表示煤矿大气环境干湿度, 根据工程经验及已有研究^[29], 引入湿度影响指数 μ_6 表示矿井相对湿度对煤矿环境腐蚀倾向性的隶属度, 如式(16)所示。

$$\mu_6 = \begin{cases} 0.25I_{RH}, & I_{RH} < 0.6 \\ 2.833I_{RH} - 1.55, & 0.6 \leq I_{RH} < 0.9 \\ -8I_{RH} + 8.2, & I_{RH} \geq 0.9 \end{cases} \quad (16)$$

7) 气体影响指数。煤矿大气环境中可对锚固材料产生腐蚀劣化作用的气体主要为 CO_2 、 NO_2 、 SO_2 、 NH_3 、 H_2S ，应用上述 5 种气体总体积分数 ρ_{PG} 的修正数值 I_{PG} ($I_{PG}=100\ 000\rho_{PG}$) 表示煤矿大气环境中污染气体含量。根据工程经验及已有研究，引入气体影响指数 μ_7 表示矿井污染气体体积分数对煤矿环境腐蚀倾向性隶属度，如式(17)所示。

$$\mu_7 = \begin{cases} 0.175I_{PG}, & I_{PG} < 1 \\ 0.275I_{PG} - 0.1, & 1 \leq I_{PG} < 4 \\ 1, & I_{PG} \geq 4 \end{cases} \quad (17)$$

8) 渗透影响指数。应用矿井围岩渗透系数数量级的算数值 I_{PC} 表示流体通过矿井围岩孔隙骨架的难易程度。根据工程经验及已有研究，引入气体影响指数 μ_8 表示矿井围岩渗透系数对煤矿环境腐蚀倾向性隶属度，如式(18)所示。

$$\mu_8 = \begin{cases} -0.025I_{PC} + 1, & I_{PC} < 6 \\ -0.233I_{PC} + 2.25, & 6 \leq I_{PC} < 9 \\ -0.05I_{PC} + 0.6, & I_{PC} \geq 9 \end{cases} \quad (18)$$

9) 硫矿影响指数。硫化物是煤矿围岩环境中可对金属锚固支护材料产生腐蚀作用的主要矿物^[30]。采用矿井围岩体中硫化物总质量分数 ρ_{SM} 的修正数

值 I_{SM} ($I_{SM}=100\rho_{SM}$) 表示矿井围岩环境中含硫矿物质质量分数。根据工程经验及已有研究，引入气体影响指数 μ_9 表示矿井围岩渗透系数对煤矿环境腐蚀倾向性隶属度，如式(19)所示。

$$\mu_9 = \begin{cases} 0.058I_{SM}, & I_{SM} < 3.0 \\ 0.551I_{SM} - 1.478, & 3.0 \leq I_{SM} < 4.5 \\ 1, & I_{SM} \geq 4.5 \end{cases} \quad (19)$$

3.2 评价指数及工程判据指标

通过研究煤矿水环境、大气环境、围岩环境及各主要环境腐蚀因素对煤矿环境腐蚀倾向性的权重和隶属度，结合 W 、 $W_{H1} \sim W_{H3}$ 和式(9)一式(19)可得煤矿环境腐蚀倾向性评价指数 μ ，如式(20)所示，其所对应煤矿环境腐蚀倾向性工程判据指标见表 2。

$$\mu = W_1(W_{11}\mu_1 + W_{12}\mu_2 + W_{13}\mu_3 + W_{14}\mu_4) + W_2(W_{21}\mu_5 + W_{22}\mu_6 + W_{23}\mu_7) + W_3(W_{31}\mu_8 + W_{32}\mu_9) \quad (20)$$

式中： $W_1 \sim W_3$ 分别表示水环境腐蚀倾向、大气环境腐蚀倾向、围岩环境腐蚀倾向对煤矿环境腐蚀倾向性的影响权重； $W_{11} \sim W_{14}$ 分别表示 pH、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、DO 对水环境腐蚀倾向的影响权重； $W_{21} \sim W_{23}$ 分别表示矿井温度、矿井湿度、污染气体含量对大气环境腐蚀倾向的影响权重； $W_{31} \sim W_{32}$ 分别表示围岩渗透系数、含硫矿物质质量分数对围岩环境腐蚀倾向的影响权重。

表 2 煤矿环境腐蚀倾向性工程判据指标

Table 2 Engineering criteria for corrosion tendency in coal mine environment

μ	<0.15	0.15 ~ 0.25	0.25 ~ 0.35	0.35 ~ 0.45	≥ 0.45
倾向	很低	低	中等	高	很高

3.3 煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评价方法

基于模糊综合评价方法，设计包含煤矿环境酸碱程度、含氯水平、含硫水平、含氧能力、温度水平、干湿程度、污染气体体积分数、围岩渗透能力、含硫矿物质质量分数的煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评价方法，以期实现对煤矿环境腐蚀特性的准确评估。

具体评价流程如图 3 所示：① 检测并分析矿井水质、矿井大气、矿井煤层；② 确定各主要环境腐蚀因素参数，包括 pH、 Cl^- 质量浓度、 SO_4^{2-} 质量浓度、DO 质量浓度、矿井温度、矿井湿度、污染气体体积分数、围岩渗透系数、含硫矿物质质量分数，此外还需确定矿井水溶解性总固体用以量化煤矿环境含氯水平和含硫水平；③ 分析各主要环境腐蚀因素赋存特征，确定煤矿环境酸碱程度、环境含氯水平、环境含硫水平、环境含氧能力、大气温度水平、大气干湿程

度、污染气体体积分数、围岩渗透能力、含硫矿物质质量分数。酸碱程度 I_{pH} 即为煤矿水环境 pH，含氯水平 I_{Cl^-} 和含硫水平 $I_{SO_4^{2-}}$ 可由式(10)、式(12)计算得，含氧能力 I_{DO} 即为煤矿水环境 DO 浓度，温度水平 I_t 即为煤矿大气温度，干湿程度 I_{RH} 即为煤矿大气相对湿度，污染气体体积分数 I_{PG} 即为 $100\ 000\rho_{PG}$ (ρ_{PG} 为污染气体体积分数和)，围岩渗透能力 I_{PC} 即为围岩体渗透系数数量级，含硫矿物质质量分数 I_{SM} 即为 $100\rho_{SM}$ (ρ_{SM} 为含硫矿物质质量分数和)；④ 基于各主要环境腐蚀因素赋存特征，经式(9)一式(19)确定 pH 影响指数、 Cl^- 影响指数、 SO_4^{2-} 影响指数、DO 影响指数、温度影响指数、湿度影响指数、气体影响指数、渗透影响指数、硫矿影响指数；⑤ 依据各主要环境腐蚀因素影响指数及其对煤矿环境腐蚀倾向性的影响权重，经式(20)计算得出煤矿环境腐蚀倾向性评价指数 μ ，

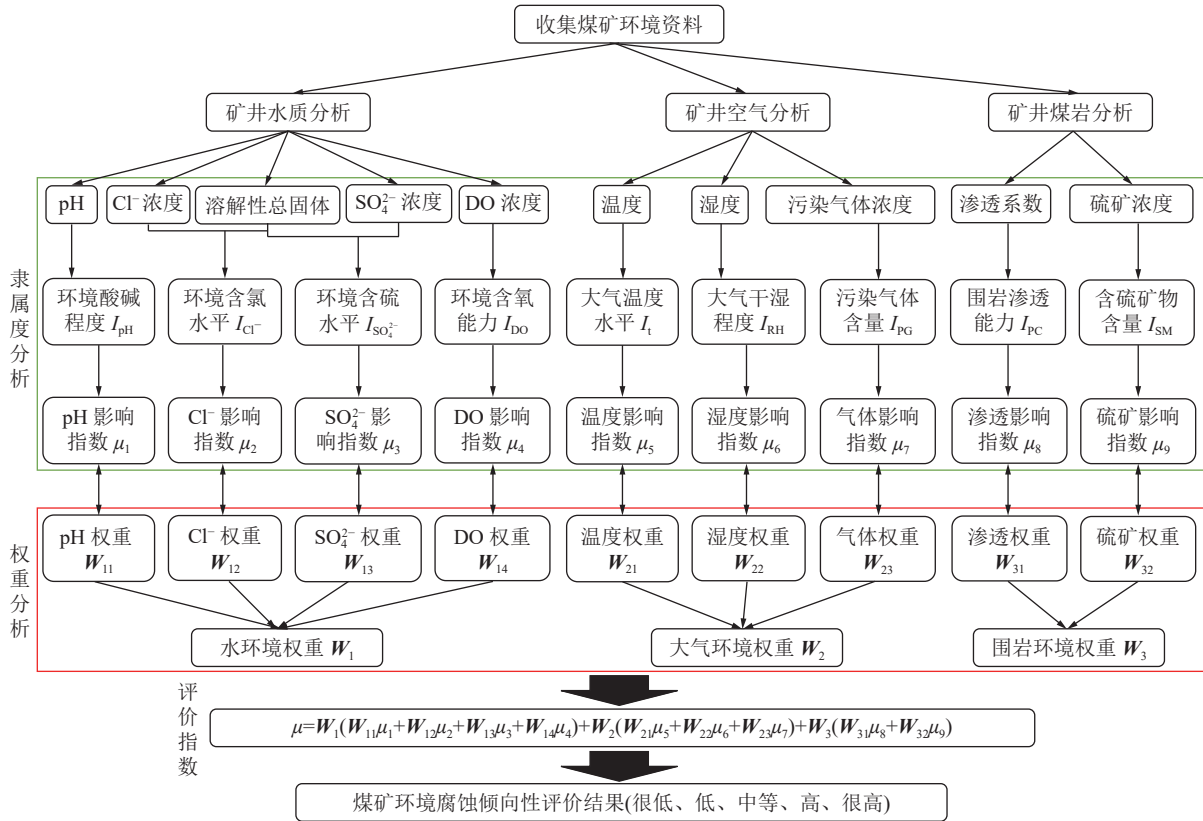


图 3 煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评价方法

Fig.3 Multi parameter coupling evaluation method for corrosion tendency in coal mine environment

结合工程判据指标确定环境倾向性等级。

该方法可评估煤矿环境腐蚀特性，辨识煤矿环境主控腐蚀因素，指导矿山企业针对性防腐支护。

4 工程案例

4.1 工程背景

高家堡煤矿位于我国西北部彬长矿区，处于盐类物质广泛分布的地质环境区内。据调研，其北翼回风巷、西翼集中辅运巷、西区回风巷、3403 运输巷、3407 运输巷巷内锚固材料服役后出现程度不一的腐蚀现象，如图 4 所示。

4.2 环境腐蚀倾向性综合评价

收集并分析上述 5 条巷道矿井水质、空气成分、围岩成分，确定巷内环境 pH、Cl⁻质量浓度、SO₄²⁻质量浓度、DO 质量浓度、溶解性总固体、矿井温度、矿井湿度、污染气体体积分数和、围岩渗透系数、含硫矿物质量分数和，分析结果见表 3。

按照 3.1 节中的方法对各主要环境腐蚀因素参数数据进行处理，形成环境酸碱程度、环境含氯水平、环境含硫水平、环境含氧能力、环境温度水平、环境干湿程度、污染气体体积分数、围岩渗透能力、含硫矿物质量分数 9 项主要环境腐蚀因素量化指标(表 4)。

依据 9 项主要环境腐蚀因素量化指标，应用式(9)一式(19)计算 pH 影响指数、Cl⁻影响指数、SO₄²⁻影响指数、DO 影响指数、温度影响指数、湿度影响指数、气体影响指数、渗透影响指数、硫矿影响指数，以表征各巷道主要环境腐蚀因素对该巷道环境腐蚀倾向性的隶属关系(表 5)。

基于各巷道主要环境腐蚀因素对该巷道环境腐蚀倾向性隶属关系，结合各主要环境腐蚀因素价值权重，通过式(20)计算得各巷道环境腐蚀倾向性评价指数，并结合工程判据指标，确定各巷道环境腐蚀倾向性(表 6)。

4.3 工业性腐蚀试验验证

于高家堡煤矿北翼回风巷、西翼集中辅运巷、西区回风巷、3403 运输巷、3407 运输巷 5 条巷道巷内开展为期 100 d 的工业性腐蚀试验。

4.3.1 试验材料

锚杆试样选用 MSGLD-400/20 规格无纵筋等强螺纹钢锚杆，长度为 400 mm，共 30 根。于巷道内顶板及两帮各布置 2 根锚杆试样。

4.3.2 试验过程

试验前对每根锚杆试样进行质量测定，质量测定仪器选用电子秤，精度为 0.01 g。试验 100 d 后，

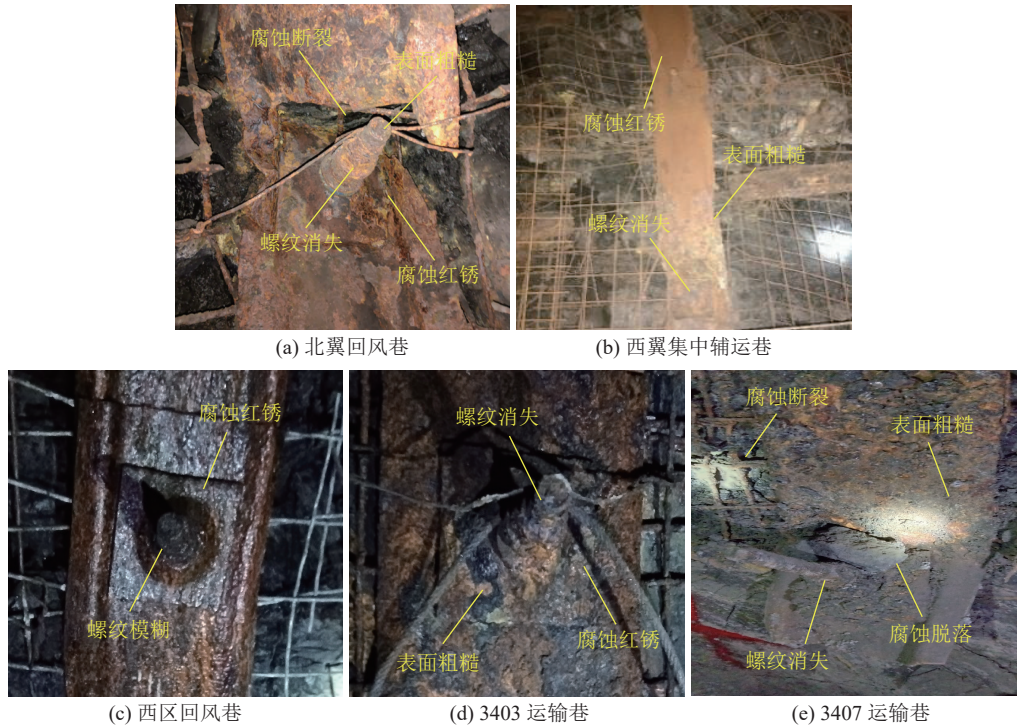


图 4 锚固材料腐蚀现状
Fig.4 Corrosion status of anchoring materials

表 3 各煤矿主要环境腐蚀因素参数数据

Table 3 Parameter data of main environmental corrosion factors in coal mines

K	pH	Cl ⁻ 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	DO质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	T _{ps} / (mg · L ⁻¹)	温度/ ℃	湿度/ %	ρ _{PG} /%	渗透系数	ρ _{SM} /%
K ₁	8.540	484.446	1 363.100	2.3	2 786.465	35	85	4.41×10 ⁻³	5.26×10 ⁻⁹	5.54
K ₂	7.029	174.193	841.729	5.7	2 346.991	24	62	7.92×10 ⁻⁴	3.81×10 ⁻⁹	3.48
K ₃	6.788	104.071	935.090	1.4	2 644.823	31	53	1.85×10 ⁻⁴	8.47×10 ⁻⁷	2.93
K ₄	7.344	88.086	298.278	7.2	1 869.976	29	64	8.27×10 ⁻⁴	5.53×10 ⁻⁷	3.66
K ₅	8.170	162.000	1 250.000	7.4	1 816.000	32	67	3.38×10 ⁻³	6.72×10 ⁻⁶	4.10

表 4 各煤矿主要环境腐蚀因素赋存特征

Table 4 Occurrence characteristics of main environmental corrosion factors in coal mines

K	I _{pH}	I _{Cl⁻}	I _{SO₄²⁻}	I _{DO}	I _t	I _{RH}	I _{PG}	I _{PC}	I _{SM}
K ₁	8.540	0.174	0.489	2.300	35	0.85	4.410	9	5.54
K ₂	7.029	0.074	0.359	5.700	24	0.62	0.792	9	3.48
K ₃	6.788	0.039	0.354	1.400	31	0.53	0.185	7	2.93
K ₄	7.344	0.047	0.160	7.200	29	0.64	0.827	7	3.66
K ₅	8.170	0.089	0.688	3.500	32	0.67	3.380	6	4.10

将 5 条巷道内各锚杆试样取出, 拍摄外观腐蚀照片, 并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(CH₃COONH₄), 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, 并对干燥后的锚杆试样进行质量测定。

采用失重法计算锚杆试样年平均腐蚀深度^[31], 如式(21)所示。

$$h = 365\,000 \frac{m_1 - m_2}{S\rho t} \quad (21)$$

式中: h 为锚杆年平均腐蚀深度, μm ; m_1 为锚杆试样腐蚀前质量, g ; m_2 为锚杆试样腐蚀后质量, g ; (质量

表5 各煤矿主要环境腐蚀因素影响指数

Table 5 Influence index of main environmental corrosion factors in coal mines

K	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9
K ₁	0.173	0.569	0.969	0.099	1.000	0.858	1.000	0.150	1.000
K ₂	0.332	0.111	0.601	0.404	0.450	0.206	0.127	0.150	0.439
K ₃	0.364	0.059	0.587	0.060	0.800	0.132	0.032	0.619	0.173
K ₄	0.290	0.071	0.120	0.611	0.700	0.263	0.145	0.619	0.539
K ₅	0.180	0.134	1.000	0.638	0.850	0.348	0.829	0.850	0.781

表6 各煤矿环境腐蚀倾向性评价结果

Table 6 Evaluation results of environmental corrosion tendency in coal mines

K	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
评价指数 μ	0.546	0.266	0.231	0.304	0.427
腐蚀倾向性	V级(很高)	Ⅲ级(中等)	Ⅱ级(低)	Ⅲ级(中等)	Ⅳ级(高)

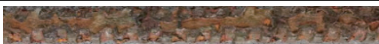

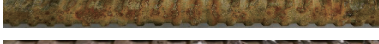


取值选用巷内6根试验锚杆平均值); S 为锚杆试样表面积, m^2 ; ρ 为锚杆试样材料密度, kg/m^3 ; t 为腐蚀时间, d 。

试验锚杆腐蚀特征及失重数据见表7。由表7可知, 锚杆试样在高家堡煤矿北翼回风巷、西翼集中辅运巷、西区回风巷、3403运输巷、3407运输巷5条巷道巷内腐蚀100 d后, 其质量分别损失23.7、

10.8、6.5、13.1、16.4 g, 由失重法计算得其年平均腐蚀深度分别为392.7、178.9、107.7、217.1、271.7 μm 。结合煤矿环境腐蚀倾向性分级标准(表1), 可知: 高家堡煤矿北翼回风巷、西翼集中辅运巷、西区回风巷、3403运输巷、3407运输巷巷内环境腐蚀倾向性分别为V级(很高)、Ⅲ级(中等)、Ⅱ级(低)、Ⅲ级(中等)、Ⅳ级(高)。

表7 试验锚杆腐蚀特征及年平均腐蚀深度

Table 7 Corrosion characteristics and annual average corrosion depth of test anchor rods

K	锚杆外观	腐蚀特征	质量损失/g	年平均腐蚀深度/ μm
K ₁		表层崩解, 大量不规则腐蚀坑	23.7	392.7
K ₂		大量红锈, 轴线长片状腐蚀坑	10.8	178.9
K ₃		附着红锈, 点状腐蚀痕迹	6.5	107.7
K ₄		少量红锈, 局部较深点状腐蚀坑	13.1	217.1
K ₅		表层金属脱落, 条状腐蚀坑	16.4	271.7

对比工业性腐蚀试验结果与腐蚀倾向性评价结果, 发现二者一致, 这表明评价结果可准确反映各巷道环境腐蚀特性。

5 结 论

1) 基于锚杆服役条件, 煤矿环境可被划分为水环境、大气环境、围岩环境。确定了pH、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、溶解氧(DO)、矿井温度、矿井湿度、污染气体、围岩渗透性、含硫矿物9种煤矿主要环境腐蚀因素。

2) 构建了煤矿环境腐蚀倾向性多元评价指标体系, 采用层次分析-熵值组合赋权量化了各评价指标在煤矿环境腐蚀倾向性评价体系中的价值权重。

3) 提出了“煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评

价方法”。评价过程中, 检测煤矿环境并量化各评价指标, 利用隶属度函数确定各评价指标影响指数, 结合各指标影响指数和权重对煤矿环境腐蚀倾向性进行综合判断。

4) 应用煤矿环境腐蚀倾向性多参量耦合评价方法对高家堡煤矿5条巷道进行环境腐蚀倾向性综合评价, 评价结果分布于Ⅱ级至V级, 对比工业性腐蚀试验结果可知该评价方法能准确反映煤矿环境腐蚀特性。

参考文献(References):

- [1] 王卫军, 范磊, 赵志强等. 基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 320-336.

- WANG Weijun, FAN Lei, ZHAO Zhiqiang, et al. Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 320–336.
- [2] 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 rock bolt in highly-mineralized mine water[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(2): 255–266.
- [3] 吴赛赛, 金韬, 郝文青, 等. 深部环境下锚索耐久性退化及应力腐蚀断裂研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(2): 267–276.
WU Saisai, JIN Tao, HAO Wenqing, et al. Investigation into the durability and stress corrosion cracking of cable bolts in underground mine environments[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(2): 267–276.
- [4] VANDERMAAT D, SAYDAM S, HAGAN P C, et al. Back-calculation of failure stress of rockbolts affected by Stress Corrosion Cracking in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 100: 310–317.
- [5] 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.
- [6] CRAIG P, SERKAN S, HAGAN P, et al. Investigations into the corrosive environments contributing to premature failure of Australian coal mine rock bolts[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(1): 59–64.
- [7] WU S S, ZHANG Z R, CHEN J H, et al. Characterisation of stress corrosion durability and time-dependent performance of cable bolts in underground mine environments[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 150: 107292.
- [8] MANQUEHUAL C J, JAKOBSEN P D, BRULAND A. Corrosion level of rock bolts exposed to aggressive environments in Nordic Road tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(11): 5903–5920.
- [9] 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(S1): 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(S1): 2913–2924.
- [10] PENG Ya, TIMMS W. Hydrogeochemical modelling of corrosive environment contributing to premature failure of anchor bolts in underground coal mines[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(5): 1599–1610.
- [11] 杨晓阳, 范文亮, 李正良, 等. 酸雨环境下 Q420B 钢材腐蚀疲劳裂纹扩展试验与模型研究[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(2): 1–11.
YANG Xiaoyang, FAN Wenliang, LI Zhengliang, et al. Experimental and model study on corrosion fatigue crack propagation of Q420B steel in acid rain condition[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(2): 1–11.
- [12] MU J, LI Y Z, WANG X. Crevice corrosion behavior of X70 steel in NaCl solution with different pH[J]. *Corrosion Science*, 2021, 182: 109310.
- [13] 俞小彤, 常西栋, 周文涛, 等. 氯盐与硫酸盐复合侵蚀下钢筋混凝土锈裂行为[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(2): 151–160.
YU Xiaotong, CHANG Xidong, ZHOU Wentao, et al. Corrosion-induced cover cracking of reinforced concrete under combined chloride and sulfate attack[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(2): 151–160.
- [14] 王小伟, 朱杰兵, 李聪. pH 和 O₂ 协同作用下预应力锚杆腐蚀损伤行为试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11): 4306–4312, 4370.
WANG Xiaowei, ZHU Jiebing, LI Cong. Experimental study on prestressed anchor bars corrosion damage behavior under the synergistic effect of pH and O₂[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4306–4312, 4370.
- [15] 尹志彪, 王莎莎, 祝振洪, 等. 北京地区土壤腐蚀性关键参量与 Q235 钢腐蚀速率预测模型研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(11): 1939–1947.
YIN Zhibiao, WANG Shasha, ZHU Zhenhong, et al. Key parameters of soil corrosivity and a model for predicting the corrosion rate of Q235 steel in Beijing[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(11): 1939–1947.
- [16] 王文华, 赵齐, 张大旭, 等. 相对湿度对海水海砂混凝土环境下 GFRP 筋拉伸性能影响[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(2): 148–160.
WANG Wenhua, ZHAO Qi, ZHANG Daxu, et al. Effects of relative humidity on tensile property degradation of GFRP rebars in seawater and sea sand concrete environment[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(2): 148–160.
- [17] 李玉星, 刘兴豪, 王财林, 等. 含杂质气态 CO₂ 输送管道腐蚀研究进展[J]. *金属学报*, 2021, 57(3): 283–294.
LI Yuxing, LIU Xinghao, WAANG Cailin, et al. Research Progress on Corrosion Behavior of Gaseous CO₂ Transportation Pipelines Containing Impurities[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(3): 283–294.
- [18] 张明, 付冬梅, 张达威, 等. 基于综合智能模型的碳钢大气腐蚀重要变量提取和依赖关系挖掘[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(3): 407–418.
ZHANG Ming, FU Dongmei, ZHANG Dawei, et al. Extraction of important variables and mining of dependencies of atmospheric corrosion of carbon steel based on a comprehensive intelligent model[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(3): 407–418.
- [19] GUO Q F, LIU H L, XI X, et al. Experimental investigation of corrosion-induced degradation of rockbolt considering natural fracture and continuous load[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(3): 947–961.
- [20] MA F P, ZENG Q, LU X Y, et al. Electrochemical study of stainless steel anchor bolt corrosion initiation in corrosive under-

- ground water[J]. *Processes*, 2021, 9(9): 1553.
- [21] 程相榜, 张自强, 孟贺超. Cl^- 和 SO_4^{2-} 对矿井高含水液液腐蚀行为的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(4): 98-101.
CHENG Xiangbang, ZHANG Ziqiang, MENG Hechao. Study on Cl^- and SO_4^{2-} affected to corrosion behavior of mine high water content hydraulic fluid[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(4): 98-101.
- [22] 农喻媚, 陈正, 陈晔, 等. 基于第一性原理的不同侵蚀性离子作用下混凝土孔溶液中钢筋腐蚀机理[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1191-1201.
NONG Yumei, CHEN Zheng, CHEN Hua, et al. Corrosion Mechanism of Reinforcement Subjected to Different Corrosive Ions in Concrete Pore Solution Based On First-Principles[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(5): 1191-1201.
- [23] 李闯, 端木京顺, 蔡忠义, 等. 基于判断矩阵的专家模糊核聚类组合赋权方法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(9): 1411-1414, 1420.
LI Chuang, DUANMU Jingshun, CAI Zhongyi, et al. Method for combination weighting experts based on judgment matrix and fuzzy kernel clustering analysis[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(9): 1411-1414, 1420.
- [24] 齐庆杰, 孙祚, 刘文岗, 等. 洪水灾害诱发煤矿水害事故风险评估模型研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 395-402.
QI Qingjie, SUN Zuo, LIU Wengang, et al. Study on risk assessment model of coal mine water accident induced by flood disaster[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 395-402.
- [25] 杨明, 朱林, 金星苑, 等. 废弃煤矿采空区瓦斯抽采可行性评价模型构建及应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(7): 107-117.
YANG Ming, ZHU Lin, QUAN Xingyuan, et al. Construction and application of feasibility evaluation model for gas extraction in goafs of abandoned coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(7): 107-117.
- [26] 王佳奇, 卢明银, 王庆雄, 等. 基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 291-298.
WANG Jiaqi, LU Mingyin, WANG Qingxiong, et al. Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 291-298.
- [27] 严春莲, 秦汉成, 崔桂彬, 等. 氧含量对钢耐蚀性能的影响[J]. *工程科学学报*, 2024, 46(4): 704-714.
YAN Chunlian, QIN Hancheng, CUI Guibin, et al. Effect of oxygen content on corrosion resistance of steel[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(4): 704-714.
- [28] WU S S, HAO W Q, YAO Y, et al. Investigation into durability degradation and fracture of cable bolts through laboratorial tests and hydrogeochemical modelling in underground conditions[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 138: 105198.
- [29] WANG H, HU Y, WANG X Q, et al. Behaviour of austenitic stainless steel bolts at elevated temperatures[J]. *Engineering Structures*, 2021, 235: 111973.
- [30] QIU Xiang, FAN Xiaoming, XU Hong, et al. Corrosion characteristics of low-carbon steel anchor bolts in a carbonaceous mudstone environment[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(4): 1107-1122.
- [31] 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 prestressed anchor bars in corrosion environment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(7): 1579-1587.