

新疆阜康深层煤层气井腐蚀机理与防护研究

顾军*, 邢坤, 薛文亭

新疆亚新煤层气投资开发(集团)有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年6月9日; 发布日期: 2026年6月23日

摘要

新疆阜康深层煤层气井因高矿化度、高CO₂分压与复杂流场的协同作用, 面临严峻的管柱腐蚀与套损挑战。本文通过现场大规模调研(73口井)、系统流体分析(30口井)、井下挂片实验(5口井)及多尺度室内表征, 明确了腐蚀失效的时空规律。结果表明, 产出水高矿化度(7278.66~18922.74 mg/L)与高CO₂分压(0.16~0.99 MPa)是驱动电化学腐蚀的核心环境因素。通过腐蚀产物膜微观分析, 揭示了Cl⁻与HCO₃⁻协同破坏FeCO₃膜完整性的“竞争吸附-化学溶解”机制, 并阐明了井筒780 m以下射孔/造斜段“冲蚀-腐蚀-结垢”三重动态耦合的宏观失效模式。基于灰色关联度分析, 量化了各影响因素权重: 流场剪切力(~40%) > Cl⁻浓度(~35%) > CO₂分压(~15%) > 垢层不均度(~10%)。结合腐蚀速率、点蚀深度与电化学参数(I_{corr} , R_p)的强关联性, 建立了腐蚀风险四级评价模型及“材料-药剂-监测-管控”四位一体的精准防护体系, 其工程有效性与经济性显著。

关键词

深层煤层气, CO₂腐蚀, 高矿化度, 腐蚀结垢耦合, 风险分级, 精准防护

Corrosion Mechanisms and Precision Protection Technologies for Deep Coalbed Methane Wells in Fukang, Xinjiang

Jun Gu*, Kun Xing, Wenting Xue

Xinjiang Yaxin Coalbed Methane Investment and Development (Group) Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: April 22, 2026; accepted: June 9, 2026; published: June 23, 2026

*通讯作者。

文章引用: 顾军, 邢坤, 薛文亭. 新疆阜康深层煤层气井腐蚀机理与防护研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(2): 280-292. DOI: 10.12677/jogt.2026.482033

Abstract

Deep coalbed methane (CBM) wells in the Fukang area of Xinjiang face severe tubing corrosion and casing damage due to the synergistic effects of high salinity, high CO₂ partial pressure, and complex flow fields. Through extensive field surveys (73 wells), systematic fluid analyses (30 wells), down-hole coupon testing (5 wells), and multi-scale laboratory characterization, this study identifies the spatio-temporal patterns of corrosion failure. The results indicate that high produced-water salinity (7278.66~18,922.74 mg/L) and elevated CO₂ partial pressure (0.16~0.99 MPa) are the primary environmental drivers of electrochemical corrosion. Microscopic analysis of the corrosion product film reveals a “competitive adsorption-chemical dissolution” mechanism, where Cl⁻ and HCO₃⁻ synergistically compromise the integrity of the FeCO₃ scale. Furthermore, a macro-failure mode characterized by a “erosion-corrosion-scaling” triple dynamic coupling was elucidated for the perforated and deviated sections below 780 m. Using Gray Relational Analysis (GRA), the influence of various factors was quantified: flow field shear stress (~40%) > Cl⁻ concentration (~35%) > CO₂ partial pressure (~15%) > scale layer inhomogeneity (~10%). By correlating corrosion rates and pitting depth with electrochemical parameters (I_{corr} , R_p), a four-tier corrosion risk assessment model was established and an integrated “Material-Chemical-Monitoring-Management” precision protection system was developed. The system’s engineering efficacy and economic viability is obvious.

Keywords

Deep Coalbed Methane (CBM), CO₂ Corrosion, High Salinity, Corrosion-Scaling Coupling, Risk Grading, Precision Protection

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

深层煤层气(埋深 > 1500 m)是我国能源结构转型中非常规天然气开发的重要接续领域[1]。新疆阜康矿区作为西部重点区块,资源潜力巨大。然而,该区井筒环境具有“高温、高压、高矿化度、高 CO₂ 分压”[2]的极端特征,由此引发的管柱腐蚀、套管损坏等问题频发,严重制约了煤层气的经济有效开发。在阜康矿区 73 口生产井中,套损井占比高达 43.8%(32 口);由腐蚀直接导致的修井成本占总开发成本的 32%以上;部分井因腐蚀失效导致产量下降超过 30%,最短检泵周期仅为 3 个月。此外,在 24 口低产低效井中,71%的井史分析表明其低效与腐蚀引发的套管变形或管柱落井直接相关。

国内外学者针对油气田 CO₂ 腐蚀已开展了广泛研究,明确了温度、压力、CO₂ 分压、Cl⁻ 浓度等因素对腐蚀速率的影响,并发展了缓蚀剂、内涂层等常规防护技术[3][4]。然而,针对阜康深层煤层气井的特殊性与复杂性,现有研究仍存在一定的不足:对高矿化度地层水中多种离子协同作用破坏腐蚀产物膜微观过程的机理解析尚不深入;井筒动态生产过程中冲蚀、腐蚀、结垢三者耦合的交互机制与定量贡献认识模糊;现有防护技术多采用“静态”和“普适”策略,难以适应阜康区块井况差异大、腐蚀主导因素多变的现实[5]-[8]。

针对深层煤层气井腐蚀与防护的实际工程难题,以阜康深层煤层气井为对象,采用“现场调研-系统实验-微观表征-理论分析”相结合的综合研究方法,基于大规模现场数据与精细微观表征,以期系

统揭示阜康区块腐蚀失效的时空分布规律与多过程耦合特征；结合灰色关联度分析，明确“冲蚀-腐蚀-结垢”三重耦合中各影响因素的定量权重；同时，构建以腐蚀风险四级动态评价模型为核心的“四位一体”精准防护技术体系，实现从“被动处置”到“主动精准防控”的根本转变。

在经典 CO₂ 腐蚀理论中，De Waard-Milliams 模型及其后续修正版本被广泛用于预测裸钢的均匀腐蚀速率，其核心假设是腐蚀受碳酸直接还原的阴极控制，并引入温度、pH 及流速修正因子[5] [6]。然而，该模型通常适用于低矿化度(TDS < 10,000 mg/L)和较低 Cl⁻浓度的常规油气环境，对于阜康区块高 TDS(可达~19,000 mg/L)和高 Cl⁻-HCO₃⁻共存的水化学条件，其适用性需重新审视。对于 Cl⁻诱导点蚀，经典的点蚀诱导电位模型认为 Cl⁻通过竞争吸附破坏表面钝化膜，但针对 FeCO₃ 产物膜的“竞争吸附-化学溶解”微观机制的定量描述仍有不足。在流动加速腐蚀方面，Efrid 等提出的壁面剪切应力模型将临界剪切应力与腐蚀产物膜破裂相关联，但未充分考虑管柱几何形态(如射孔段、造斜段)与多相流场的复杂耦合[7] [8]。上述理论研究的不足构成了本文研究的直接出发点。

2. 区域概况与研究方法

阜康西区目标煤层为侏罗系西山窑组，埋深变化较大，井筒流场复杂，为腐蚀与结垢的发生提供了动力学条件[9]。对 30 口代表性生产井产出流体的系统监测与分析，结果如表 1 所示。

Table 1. Typical ionic composition of produced fluids and gas components in DCM wells in Fukang area

表 1. 阜康深层煤层气井产出流体典型离子组成与气体组分

参数	范围/平均值	单位	意义
矿化度	7278.66~18922.74/9302.6	mg/L	腐蚀介质浓度总指标
Cl ⁻	平均值 2995	mg/L	主要侵蚀性离子，破坏钝化膜
HCO ₃ ⁻	平均值 3698	mg/L	主要成垢离子，影响缓冲能力
Ca ²⁺	86~152	mg/L	影响结垢趋势与垢层性质
CO ₂ 分压	0.16~0.99	MPa	驱动酸性腐蚀的关键因素
水型	NaHCO ₃	-	弱碱性，但腐蚀结垢风险并存

对阜康矿区全部 73 口生产井进行详尽分析，选取 15 口腐蚀特征各异的典型井，系统采集出水样、腐蚀结垢产物及失效管柱试样(如断裂接箍、穿孔油管)。在 FSL64、FSL74、FK28-2L、FK18-1L、FK20-7L 五口关键井中，部署 N80 和 P110 钢标准挂片，用于后续分析。

采用 Davis-Stiff 饱和指数法(SI)和溶度积法预测 CaCO₃ 和 CaSO₄ 结垢趋势[10]、腐蚀速率与宏观形貌分析依据 GB/T 23258-2020 [11]、微观形貌与产物分析采用扫描电子显微镜[12]、CHI660E 电化学工作站进行动力学分析[13]。采用宏观至微观的多尺度研究策略，方法体系如图 1 所示。

3. 腐蚀失效特征与多参数关联规律

3.1. 腐蚀时空分布与管柱类型特异性

管式泵腐蚀集中于抽油杆/油管丝扣、尾管及泵筒，丝扣部位因几何形状导致的应力集中，与腐蚀介质长期浸泡形成“应力-腐蚀”协同效应(图 2(a))。射流泵的中心管接箍和油管内壁是腐蚀高发区，失效接箍断口分析表明，流场剪切力先破坏腐蚀产物膜，随后 Cl⁻侵入引发快速的冲蚀-腐蚀耦合失效(图 2(b))。螺杆泵的转子及抽油杆本体局部减薄严重，在交变载荷下易发生“腐蚀-疲劳”交互断裂(图 2(c))。现场调研与挂片数据清晰显示腐蚀程度随井深增加的规律。



Figure 1. Multi-scale integrated research framework (field investigation → laboratory experiments → theoretical analysis)
图 1. 多尺度综合研究方法体系(现场→实验→理论分析)

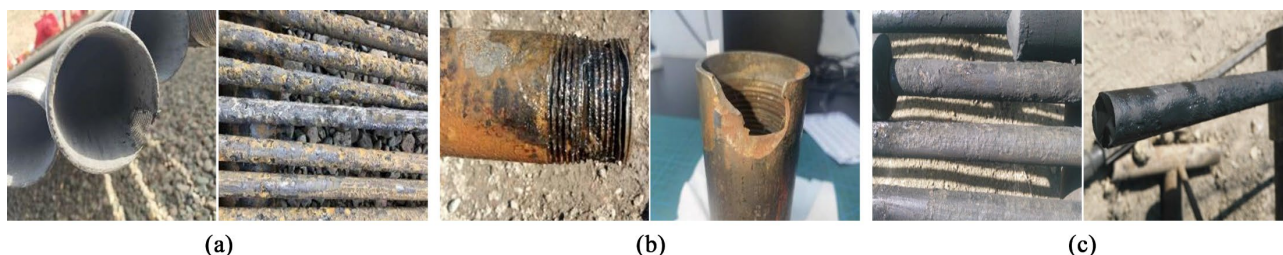


Figure 2. Corrosion characteristics identified from field operating data. (a) Production string of tubing pump: tubing coupling and sucker rod; (b) Production string of jet pump: central tube thread and central tube collar; (c) Production string of progressive cavity pump: sucker rod and rotor fracture

图 2. 现场资料腐蚀特征图。(a) 管式泵生产管柱 - 油管接箍、抽油杆；(b) 射流泵生产管柱 - 中心管丝扣、中心管节箍；(c) 螺杆泵生产管柱 - 抽油杆、转子断裂

3.2. 套管腐蚀失效的强选择性

对阜康矿区 32 口套损井的失效位置、材质类型及环境参数进行系统统计分析，结果显示套损井中 P110 钢级套管占比高达 90.6% (29/32)，而 N80 套管仅占 9.4% (3/32)。对比取自同一口井造斜段与直井段的 P110 套管试样，前者的 I_{corr} 值较后者高 1.8~2.3 倍，而 R_p 值低 40% 以上(图 3(c))，主要由于在流场剪切力被模拟施加的旋转柱电极实验中进一步放大。阜康深层煤层气井套管腐蚀失效呈现“P110 材质不耐蚀”与“射孔/造斜段流场恶劣”双重选择性。

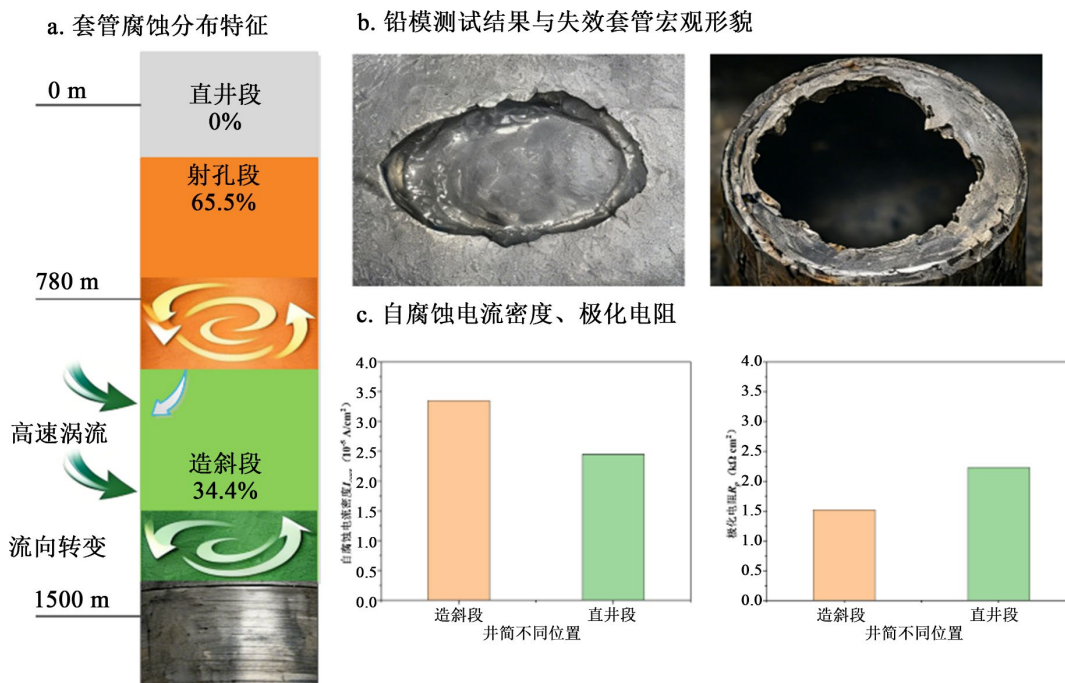


Figure 3. Comparative corrosion behavior and failure analysis of P110 Casing in the build-up section and perforated interval
图 3. P110 套管在造斜段与射孔段腐蚀行为对比与失效分析

3.3. 腐蚀速率、点蚀深度与电化学参数的定量关联

根据腐蚀速率 (CR , mm/a)与腐蚀电流密度 (I_{corr})的理论关系式[14], 如式(1):

$$CR = \frac{M \cdot I_{corr}}{n \cdot F \cdot \rho} \times K \quad (1)$$

其中, M 为铁的摩尔质量(55.85 g/mol), n 为电荷转移数(取 2), F 为法拉第常数(96,485 C/mol), ρ 为钢材密度(7.85 g/cm³), 常数 K 为单位换算系数(3.1536×10^4 , 将 cm/s 转换为 mm/a) [14], 建立有效的瞬时电化学响应与长期腐蚀损伤之间的定量关系。

将各常数代入, 上式可简化为 $CR \approx 0.0116 \times I_{corr}$ 。实际腐蚀过程受产物膜覆盖、局部 pH 变化等因素影响, I_{corr} 与失重法测得的平均腐蚀速率并非严格线性[15]。基于 5 口典型井的挂片实验与电化学测试结果(表 2 中 I_{corr} 与 CR), 进行线性回归分析(图 4(a)), 得到经验公式 $CR \approx 0.049 \times I_{corr} + 0.007$ ($R^2 = 0.968$)。

斜率 0.049 略大于理论值 0.0116, 表明在阜康实际井况下, 电化学测试所反映的瞬时腐蚀倾向可能因产物膜的不完全保护性而被放大[16]。此外, 极化电阻 R_p 与腐蚀速率呈显著负相关(图 4(b)), 拟合关系

Table 2. Corrosion coupon data and electrochemical parameters of representative wells
表 2. 代表性井挂片腐蚀数据与电化学参数

井号	腐蚀速率(mm/a)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	R_p ($k\Omega \cdot cm^2$)	最大点蚀深度(μm)	主要风险特征
FSL64	0.32	5.89	0.85	13.96	高均匀腐蚀
FK28-2L	0.22	3.42	1.52	23.95	高风险点蚀
FK18-1L	0.05	0.98	8.76	8.30	低腐蚀
FK20-7L	0.11	1.85	4.23	10.80	结垢显著

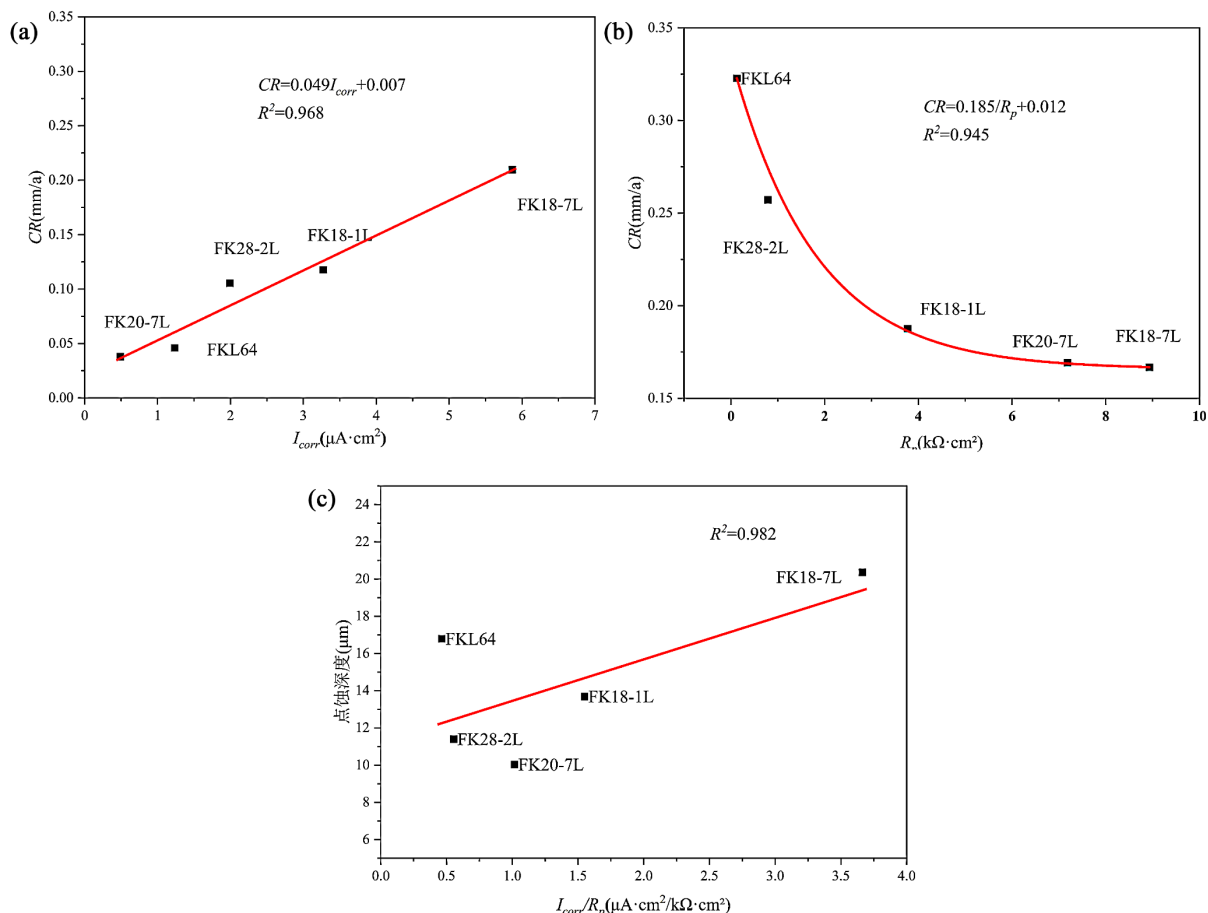


Figure 4. Quantitative correlation between corrosion rate and electrochemical parameters. (a) Average corrosion rate versus corrosion current density; (b) Average corrosion rate versus polarization resistance; (c) Relationship between pitting depth and electrochemical parameters

图 4. 腐蚀速率与电化学参数的定量关联分析。(a) 平均腐蚀速率与腐蚀电流密度; (b) 平均腐蚀速率与极化电阻; (c) 点蚀深度与电化学参数比值

为 $CR = \frac{0.185}{R_p} + 0.012$ ($R^2 = 0.945$)。统计分析显示, 平均腐蚀速率与 I_{corr} 呈强正相关 ($R^2 = 0.968$), 与 R_p 呈强负相关 ($R^2 = 0.945$)。

进一步分析发现, 点蚀深度与“ I_{corr}/R_p ”比值呈现更强的正相关性 ($R^2 = 0.982$), 该比值可作为表征局部腐蚀发展倾向的敏感指标(图 4(c))。建立的适用于阜康区块的 $CR - I_{corr} - R_p$ 经验关联模型, 同时发现“ I_{corr}/R_p ”比值是比单一 I_{corr} 或 CR 更能有效预警高风险点蚀的电化学复合参数。

3.4. 结垢与腐蚀的空间耦合与双重效应

对回收的挂片及管壁垢层进行 XRD 与 EDS 分析, 结果显示所有垢层伴有 FeCO_3 (菱铁矿) 的衍射峰(图 5(a))。在腐蚀严重的 FK28-2L 井, 检测到少量 Fe_3O_4 (磁铁矿) 相, 表明局部存在缺氧环境[17]。垢层并非均质, Ca、Fe、O 元素呈层状或岛状分布(图 5(b))。计算 Ca/Fe 原子比发现, 在覆盖度高的区域 (>80%), Ca/Fe 比可达 4.2:1 (如 FK20-7L), 而在覆盖度低、裂缝发育的区域, Ca/Fe 比降至 1.8:1 (如 FSL64), 且后者 Cl 元素在裂缝处显著富集, 浓度是基体的 3~5 倍(表 3)。

垢层的双重效应机制与量化分析发现, 连续、致密且 Ca/Fe 比高的 CaCO_3 主导型垢层, 能有效阻隔

腐蚀介质。如 FK20-7L 井部分挂片区域, 在厚度约 $50\ \mu\text{m}$ 的致密垢层下, 微电极测得的局部腐蚀电流密度比相邻无垢区低 30%~40%。然而, 不均匀、多裂缝的混合垢层(尤其是 FeCO_3 含量高时)危害极大。

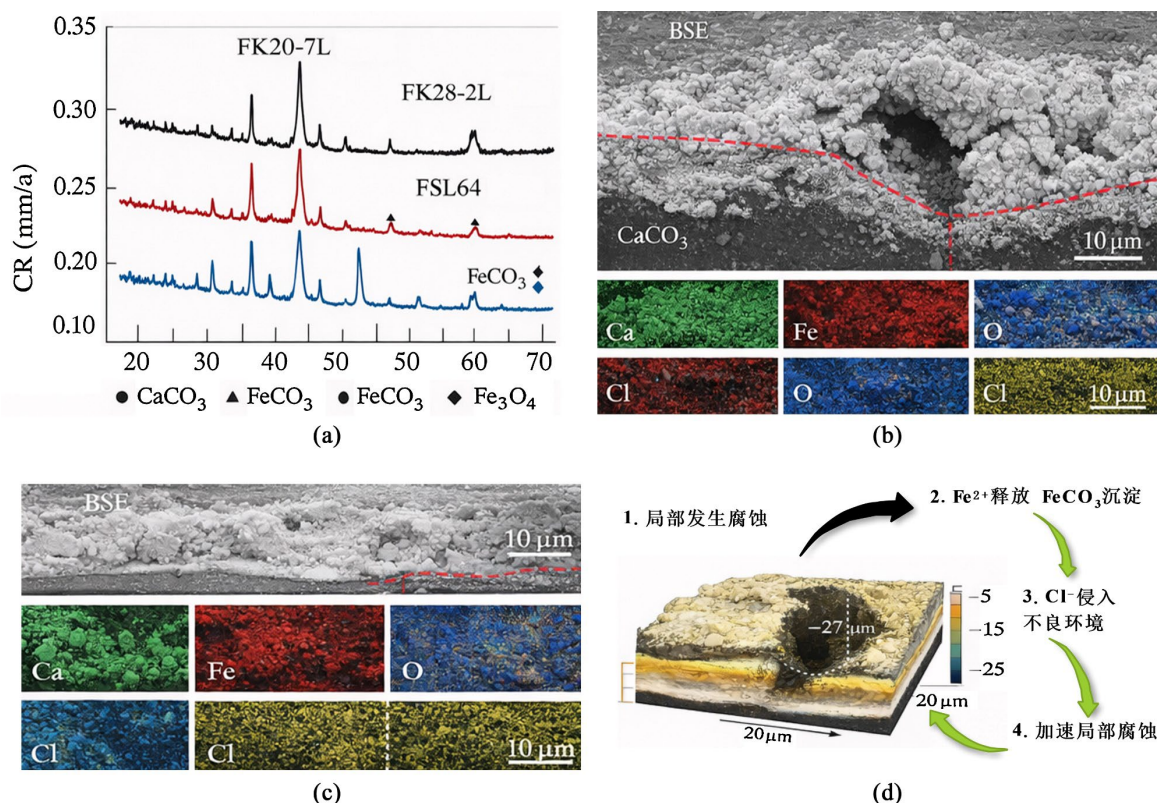


Figure 5. Relationship between scale composition, structure, and corrosion behavior. (a) Comparison of typical scale XRD patterns: “FK20-7L (compact)”, “FK28-2L (fractured)”, and “FSL64 (mixed)”; (b) Elemental surface mapping of mixed scale cross-section by EDS; (c) Three-dimensional morphology of under-deposit pitting reconstructed by LSCM; (d) Vicious cycle of corrosion coupled with unfavorable scaling

图 5. 结垢成分、结构与腐蚀行为的关联分析。(a) 典型垢层 XRD 谱图对比“FK20-7L (致密)”、“FK28-2L (裂缝)”和“FSL64 (混合)”；(b) 混合垢层截面 EDS 元素面分布；(c) 垢下点蚀坑的三维形貌(LSCM 重构)；(d) “腐蚀 - 不良结垢”恶性循环

Table 3. XRD patterns and EDS elemental analysis of typical scale deposits

表 3. XRD 谱图和 EDS 能谱分析结果

样品位置	主要物相 (XRD)	Ca/Fe 原子比 (EDS)	垢层覆盖率 (%)	裂缝密度 (条/mm ²)	垢下局部 I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	最大点蚀深度 (μm)	垢下腐蚀速率 (mm/a)
FK20-7L	CaCO_3 , FeCO_3	4.2 : 1	85	< 1	1.2	8.5	0.08
FK28-2L	CaCO_3 , FeCO_3 , Fe_3O_4	3.1 : 1	60	6	4.8	23.9	0.21
FSL64	CaCO_3 , FeCO_3	1.8 : 1	45	12	6.5	14.0	0.31

通过激光共聚焦显微镜(LSCM)对垢下形貌进行三维重构(图 5(c)), 发现裂缝底部存在深而窄的点蚀坑。腐蚀过程释放的 Fe^{2+} 与溶液中的 CO_3^{2-} 结合生成的 FeCO_3 , 其结晶度(通过 XRD 半高宽计算)通常比溶液直接沉积的 CaCO_3 低 30%~50%, 导致膜层疏松多孔。这种不良结垢为 Cl^- 侵入提供通道, 反过来加速局部腐蚀, 形成自催化循环(图 5(d))。结垢对腐蚀具有显著的“双重效应”, 其影响取决于垢层的致密性、成分均匀性及与基体的结合力。

4. 腐蚀机理的耦合解析与量化

4.1. 高矿化度- CO_2 协同腐蚀宏观电化学机制

阜康深层煤层气井的腐蚀是高矿化度与高 CO_2 分压共同驱动的强化电化学过程，其协同效应远大于两者单独作用之和(如图 6)。根据电解质溶液理论，高电导率显著降低腐蚀微电池的溶液欧姆电阻(R_Ω) [18]。根据欧姆定律，欧姆压降 $\Delta E_\Omega = I_{\text{corr}} \cdot R_\Omega$ ， R_Ω 的降低意味着在相同驱动电位下，腐蚀电流 I_{corr} 可以更大[19]。同时，高离子强度减弱了阳极反应产物 Fe^{2+} 的活度系数，降低了阳极极化，促进了金属溶解反应($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)的持续进行。

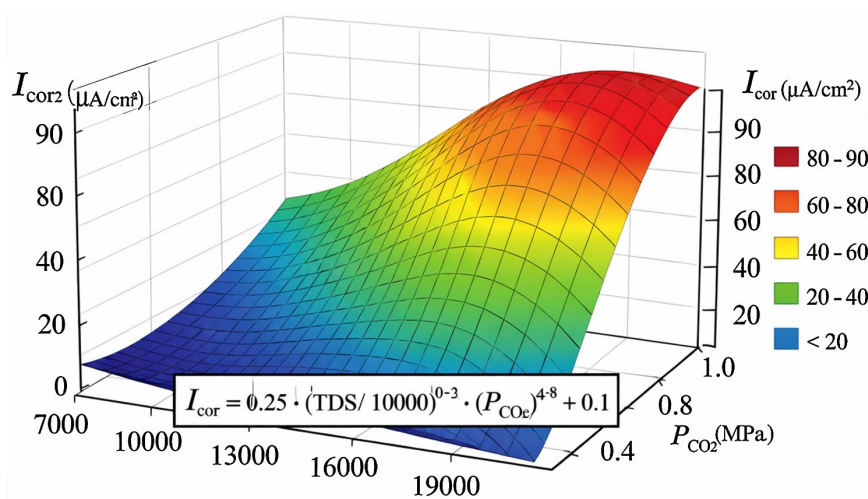


Figure 6. Synergistic effects of high salinity and CO_2 partial pressure on corrosion current density
图 6. 高矿化度与 CO_2 分压对腐蚀电流的协同效应

CO_2 溶解于水生成碳酸($\text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$), 其溶解度遵循亨利定律 $[\text{H}_2\text{CO}_3] = K_H \cdot P_{\text{CO}_2}$, K_H 为亨利常数。在阜康井底条件下($\sim 50^\circ\text{C}$), K_H 约为 $0.035 \text{ mol}/(\text{L}\cdot\text{MPa})$ 。当 $P_{\text{CO}_2} = 0.7 \text{ MPa}$ 时, 理论 $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ 可达 0.0245 M 。 H_2CO_3 及其一级解离产物 HCO_3^- 是比 H^+ 更有效的阴极去极化剂, 其还原反应 ($2\text{H}_2\text{CO}_3 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{H}_2$ 及 $2\text{HCO}_3^- + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2$) 交换电流密度更高, 且受扩散控制较小[20]。因此, 高 P_{CO_2} 直接提供了高浓度的去极化剂, 极大地促进了阴极反应速率。

基于电化学混合电位理论, I_{corr} 同时受阳极和阴极过程控制[21]。假设高矿化度主要降低欧姆与阳极阻力(因子 A), 高 P_{CO_2} 主要提升阴极反应速率(因子 C), 则协同效应可初步表述为两者乘积的函数: $S \propto f(A \cdot C)$ 。通过对不同 TDS (7000~19,000 mg/L) 和 P_{CO_2} (0.2~1.0 MPa) 组合条件下的室内模拟实验数据进行多元非线性回归, 得到经验协同模型如式(2):

$$I_{\text{corr}} = 0.25 \cdot (TDS/10000)^{0.32} \cdot (P_{\text{CO}_2})^{0.48} + 0.1 \quad (2)$$

其中, TDS 单位为 mg/L , I_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。模型指数显示, P_{CO_2} 的贡献权重(0.48)高于 TDS (0.32), 表明在阜康条件下, CO_2 分压是更强的腐蚀驱动因素, 但高矿化度为其提供了极低阻力的“电路”环境, 两者协同将腐蚀电流放大至单一因素下的 1.5~2.8 倍[22]。

4.2. Cl^- 破坏 FeCO_3 保护膜的微观界面机制

对在不同 Cl^- 浓度(1000 mg/L 与 5000 mg/L) 溶液中形成的 FeCO_3 膜进行截面 FIB-SEM 观察(图 7(a))、

图 7(b)), 低 Cl^- 环境下形成的膜厚约 $3.5\ \mu\text{m}$, 结构致密, 与基体结合紧密, 高 Cl^- 环境下形成的膜厚减薄至约 $1.8\ \mu\text{m}$, 且呈现明显多孔、分层结构, 存在大量垂直裂纹。

XRD 分析(图 7(c))显示, 随着 Cl^- 浓度升高, FeCO_3 主衍射峰(104 晶面)的半高宽(FWHM)从 0.28° 增至 0.45° , 根据 Scherrer 公式计算[23], 其表观晶粒尺寸从 $45\ \text{nm}$ 减小至 $28\ \text{nm}$, 表明结晶度下降, 缺陷增多。对成膜后溶液进行电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)分析, 发现高 Cl^- 环境下的溶液中 Fe^{2+} 浓度是低 Cl^- 环境下的 2.3 倍。这源于吸附的 Cl^- 能够与膜中的 Fe^{2+} 形成可溶性的络合物, 如 $[\text{FeCl}]^+$ 或 $[\text{FeCl}_2]^0$, 其反应可简化为式(3):

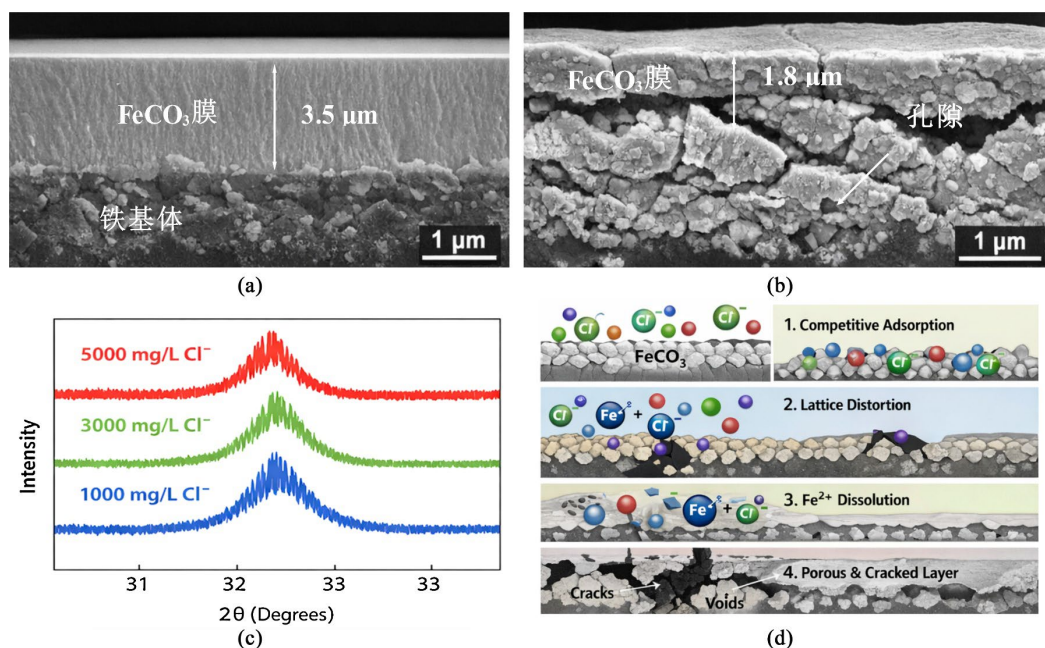


结合上述分析, Cl^- 破坏 FeCO_3 膜的“竞争吸附 - 化学溶解”微观过程, 详尽如图 7(d)所示。其中, 过程简化为一阶动力学模型: 膜层完整性损失速率 $(-\text{d}\theta/\text{d}t, \theta$ 为完整膜覆盖率)与表面吸附的 Cl^- 浓度 $[\text{Cl}^-]_{\text{ads}}$ 成正比, 如式(4):

$$-\frac{\text{d}\theta}{\text{d}t} = k \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{ads}} \approx k' \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{bulk}} \quad (4)$$

其中, k 和 k' 为速率常数。实验测得在本研究温压条件下, $k' \approx 2.1 \times 10^{-4}\ \text{h}^{-1} \cdot (\text{mg/L})^{-1}$ 。

Cl^- 通过竞争吸附于膜表面、诱导膜晶格缺陷、并促进膜基 Fe^{2+} 以可溶络合物形式溶解, 最终导致 FeCO_3 保护膜疏松、多孔、易剥离, 这是阜康高 Cl^- 环境诱发严重局部点蚀的微观起点。



注: Cl^- “竞争吸附 - 化学溶解”破坏膜层过程: Cl^- 与 $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 在 FeCO_3 膜表面竞争吸附, 吸附的 Cl^- 导致局部晶格畸变形成缺陷, Fe^{2+} 从缺陷处溶出与 Cl^- 形成可溶性络合物, 形成孔隙和通道导致膜层变薄、多孔、开裂。

Figure 7. Microscopic mechanisms and characterization of Cl^- -induced degradation of the FeCO_3 protective film. (a) Cross-sectional FIB-SEM image of FeCO_3 film under low Cl^- concentration ($1000\ \text{mg/L}$); (b) Cross-sectional FIB-SEM image of FeCO_3 film under high Cl^- concentration ($5000\ \text{mg/L}$); (c) XRD patterns of FeCO_3 under different Cl^- concentrations (around the (104) plane); (d) Degradation of the protective film through Cl^- -induced “competitive adsorption-chemical dissolution”

图 7. Cl^- 破坏 FeCO_3 保护膜的微观机制与表征。(a) FeCO_3 膜截面 FIB-SEM 图 - 低 Cl^- ($1000\ \text{mg/L}$); (b) FeCO_3 膜截面 FIB-SEM 图 - 高 Cl^- ($5000\ \text{mg/L}$); (c) 不同 Cl^- 浓度下 FeCO_3 的 XRD 谱图(104 晶面附近); (d) Cl^- “竞争吸附 - 化学溶解”破坏膜层过程

4.3. “冲蚀 - 腐蚀 - 结垢”三重动态耦合效应及其量化权重

在阜康煤层气井的射孔与造斜段, 腐蚀失效是冲蚀(E)、腐蚀(C)、结垢(S)三个过程动态耦合的结果, 形成“E-C-S 失效三角” [24]。冲蚀使金属基体反复裸露, 为腐蚀反应提供持续的新鲜阳极, 同时阻碍了致密保护性垢层的稳定沉积[25]。腐蚀(C)与结垢(S)具有相互反馈的作用, 其中腐蚀反应 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 释放的 Fe^{2+} 离子, 与溶液中的 CO_3^{2-} 结合生成 FeCO_3 沉淀[26]。

对比静态腐蚀、施加剪切力、诱导 CaCO_3 结垢以及三重耦合实验, 结果表明(图 8(a)), 组 4 的腐蚀失重速率是组 1 的 4.2 倍, 组 2 的 2.1 倍, 组 3 的 1.8 倍。组 4 试样表面点蚀坑密度和深度也显著最大, 证实了三重耦合的协同破坏效应远大于任何单一或两两过程之和。

以现场 32 口井的“综合失效指数”作为参考序列, 选取五个关键影响因素作为比较序列: 流场剪切力、 Cl^- 浓度、 CO_2 分压、 Ca^{2+} 浓度、垢层不均度, 通过数据无量纲化处理、计算序列差、计算关联系数、求取各因素的平均关联系数(灰色关联度) Γ_i [27], 计算结果如表 4 所示。分析发现, 流场剪切力的关联度最高(0.89), 其对综合失效的影响最大, 其次是 Cl^- 浓度(0.83)。

基于以上分析, 构建“冲蚀 - 腐蚀 - 结垢”三重动态耦合循环的机理模型(图 8(b)), 展示了三者之间通过“机械剥离膜层 - 化学溶解 - 沉积反馈”形成的正反馈循环, 以及量化权重, 为制定打断此恶性循环的防护策略提供了直接依据。

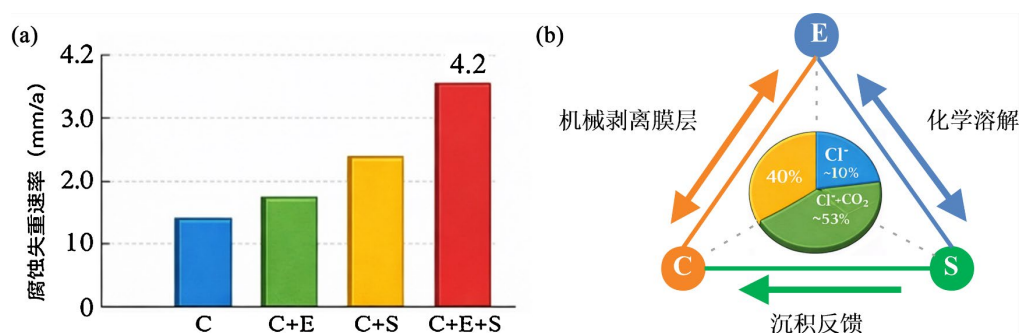


Figure 8. Triple coupled effects of erosion, corrosion, and scaling. (a) Comparison of corrosion weight loss under different coupled laboratory simulation conditions; (b) Dynamic coupling cycle and relative weighting of “erosion-corrosion-scaling” interactions

图 8. “冲蚀 - 腐蚀 - 结垢”三重耦合效应。(a) 室内模拟不同耦合条件下的腐蚀失重对比; (b) “冲蚀 - 腐蚀 - 结垢”三重动态耦合循环与权重

Table 4. Weighting of influencing factors based on grey relational analysis

表 4. 基于灰色关联分析的影响因素权重

影响因素(X_i)	灰色关联度(Γ_i)	贡献权重(%)
流场剪切力(X_1)	0.89	40.3
Cl^- 浓度(X_2)	0.83	37.6
CO_2 分压(X_3)	0.71	16.1
垢层不均度(X_5)	0.65	9.4
Ca^{2+} 浓度(X_4)	0.41	6.6*

5. 精准防护技术体系构建与现场验证

将本文建立的经验协同模型(式 2)与 De Waard-Lotz 半经验模型[5] [6]进行对比分析, 发现在低 TDS

(<10,000 mg/L)和中等 P_{CO_2} (<0.5 MPa)条件下,两者预测的均匀腐蚀速率偏差在±20%以内;然而,当 TDS 增至 15,000 mg/L 以上、 P_{CO_2} 接近 1.0 MPa 时,本文模型给出的预测值较 De Waard 模型高出 1.8~2.3 倍,这一差异主要源于 De Waard 模型未显式考虑高离子强度下溶液欧姆电阻降低所导致的腐蚀电流放大效应。因此,本文经验模型可为高盐、高 CO_2 环境提供更接近实际腐蚀行为的局部腐蚀倾向参考。

均一化防护模式无法应对阜康区块复杂的腐蚀场景,基于此提出以“风险精准评估、措施差异化配置、管理动态调整”为核心的精准防护新策略[28]。腐蚀风险动态评价模型以两个关键参数为判据,即自腐蚀电流密度和最大点蚀深度,与长期失重法结果高度相关,最大点蚀深度直接量化了最危险的局部腐蚀发展程度[29]。

综合行业标准、历史失效数据和本研究实验结果,设定一级风险(红色)、二级风险(橙色)、三级风险(黄色)与四级风险(绿色)。通过定期的井下挂片和在线电化学监测进行数据更新,实现风险等级的动态调整。基于风险四级评价的“四位一体”精准防护体系,如图 9 所示。

相较于传统“均匀覆盖、被动补救”的防护模式,本文提出的“四位一体”精准防护体系实现了以下三个层面的创新:

(1) 决策逻辑创新:基于四级腐蚀风险动态评价模型,以现场实测 I_{corr}/R_p 比值和最大点蚀深度为关键判据,实现了风险等级的定量划分与动态调整,将防护决策从“经验定性”升级为“数据驱动的定量评估”。

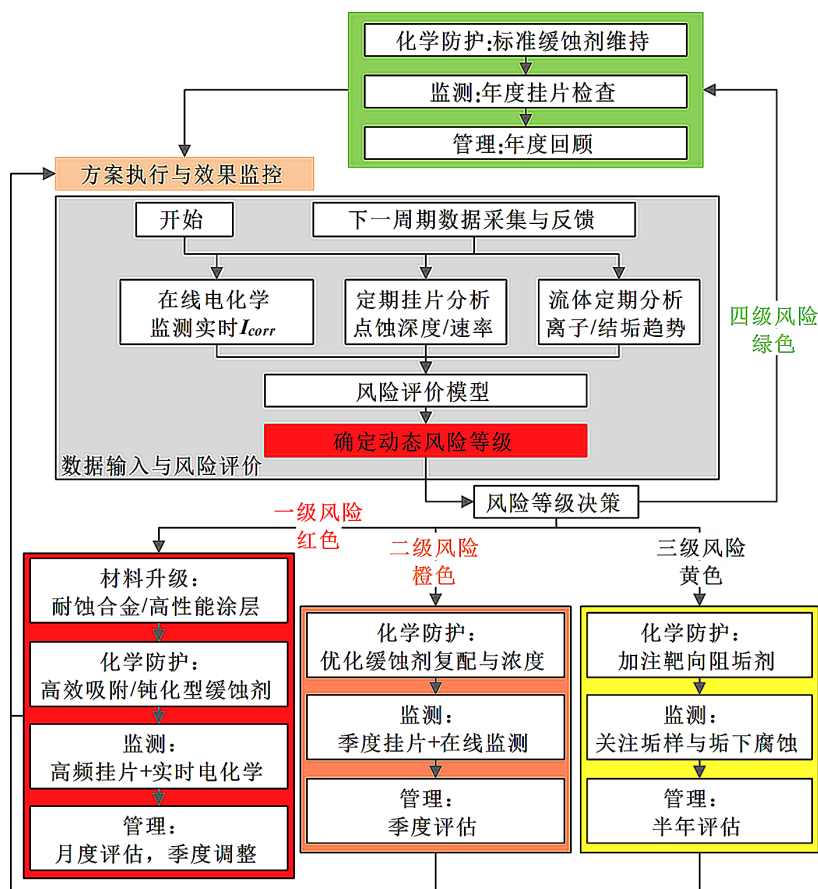


Figure 9. Implementation flowchart of the “Four-in-One” targeted protection system based on a four-level risk assessment framework

图 9. 基于风险四级评价的“四位一体”精准防护体系实施流程图

(2) 技术集成创新：在空间上对不同井段实施差异化的“材料-药剂”组合，在时间上通过对电化学及点蚀深度的持续监测动态调整药剂加注方案，形成“材料匹配-缓蚀剂优配-电化学在线监测-风险分级管控”的全链条技术闭环。

(3) 管理模式创新：将腐蚀管理从“工程维修部门单点响应”转变为全井生命周期的“风险预警-动态干预-效果评估-持续优化”主动防控模式，使得防护资源优先配置于高风险井段，显著提升了经济性与工程有效性。

在阜康区块筛选出的 12 口涵盖不同风险等级的典型井中进行了为期 18 个月的先导性工业试验。结果显示，一级风险井(如 FSL64)的平均腐蚀速率从 0.32 mm/a 降至 0.12 mm/a 以下，降幅超 58.7%；高风险点蚀得到有效抑制。因腐蚀导致的非计划性检泵作业大幅减少，平均检泵周期从基准的 3~6 个月普遍延长至 15 个月以上；总体修井成本下降 42.1%。管柱可靠性提高保障了排采连续性，试验区单井平均综合开发效益提升约 28.3%。应用结果表明，该体系成功实现了从“事后补救”到“事前预防”、从“粗放管理”到“精准防控”的转变。

6. 结论

本研究针对深层煤层气井腐蚀与防护的实际工程难题，以阜康深层煤层气井为对象，开展系统分析研究，主要结论如下：

(1) 阜康深层煤层气井腐蚀本质上是“高矿化度-Cl⁻-高 CO₂ 分压”化学环境与“复杂流场-温压波动”物理环境强耦合作用的结果，失效特征具有显著的时空差异和管柱类型特异性。高 Cl⁻环境通过“竞争吸附-化学溶解”机制破坏 FeCO₃ 保护膜完整性，是诱发局部点蚀的关键微观路径。通过灰色关联度分析，初步评估了各因素的相对重要性，其中流场剪切力(关联度 0.89)和 Cl⁻浓度(关联度 0.83)的贡献相对突出。

(2) 基于 I_{corr} 和最大点蚀深度两项关键指标，建立了适用于阜康区块的四级腐蚀风险动态评价模型，并以此为核心构建了四位一体精准防护体系。上述结论和经验关联模型的建立均基于阜康区块特定井况(高 TDS、NaHCO₃ 水型、 $P_{CO_2} = 0.16 \sim 0.99$ MPa、井深 > 780 m 的射孔/造斜段)，外推至其他地质环境或生产工况时需开展进一步验证。此外，本研究现场挂片覆盖 5 口井、先导性试验仅涵盖 12 口井 18 个月，样本规模和验证周期的局限性客观存在。当前结论尚待更大范围、更长周期的现场数据积累加以检验与完善。

基金项目

《新疆深层煤层气赋存机理与开发关键技术研究(“两区”科技发展计划项目)深层煤层气储层压后排采工艺技术研究》省部级项目(2023LQ01005)。

参考文献

- [1] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 等. 深部煤层气勘探开发进展与研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 24-31.
- [2] Li, X.Z., Wang, Y.H., Jinag, Z.S., et al. (2016) Progress and Study on Exploration and Production for Deep Coalbed Methane. *Journal of China Coal Society*, **41**, 24-31.
- [3] Cao, Y., Zhang, J., Zhang, X., Liu, S. and Elsworth, D. (2022) Micro-Fractures in Coal Induced by High Pressure CO₂ Gas Fracturing. *Fuel*, **311**, Article 122148. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122148>
- [4] 杨涛, 许磊, 王建春, 等. 油套管 CO₂ 腐蚀和防护研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(5): 1134-1144.
- [5] Yang, T., Xu, L., Wang, J.C., et al. (2024) Research Progress on CO₂ Corrosion and Protective Counter Measures for Oil Casing. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, **44**, 1134-1144.
- [6] Liu, W., Wan, L.P., Guan, B., Sun, Z., Lu, X. and Guo, Y. (2024) Study on Corrosion Law of Coiled Tubing in High

- CO₂ Gas Field. *AIP Advances*, **14**, Article 035205. <https://doi.org/10.1063/5.0187777>
- [7] 朱卫平. 煤层气田产出水水质与水量动态分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2026.
- [8] Zhu, W.P. (2026) The Quality and Quantity Dynamic Analysis of Producing Water from Coalbed Methane Field. China University of Geosciences.
- [9] 徐凤银, 甄怀宾, 李曙光, 等. 深部煤层气储层改造技术迭代升级历史与发展方向——以鄂尔多斯盆地东缘大吉区块为例[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(3): 1-18.
- [10] Xu, F.Y., Zhen, H.B., Li, S.G., *et al.* (2025) History and Development Direction of Iterative Upgrading of Deep Coalbed Methane Reservoir Reconstruction Technology: Taking the Daji Block in the Eastern Margin of the Ordos Basin as an Example. *Coal Science and Technology*, **53**, 1-18.
- [11] 严少洋. 高压气体冲击下煤体动态力学响应及增透机理研究[D]: [博士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- [12] Yan, S.Y. (2023) Study on Dynamic Mechanical Response and Permeability Enhancement Mechanism of Coal under High-Pressure Gas Impact. Henan Polytechnic University.
- [13] Fu, Y., Yuan, W., Xu, Z., Zhao, R., Wu, Y., Zheng, H., *et al.* (2023) Geological Adaptability of Deep CBM Fractured Horizontal Well in SLN Block. *Frontiers in Earth Science*, **11**, Article 1127995. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1127995>
- [14] Zhang, L., Yang, L., Wang, Z., Zhang, C., Meng, W. and Ren, S. (2021) Experimental Study on Scaling and Adhesion Characteristics in Water-Producing Gas Wellbore. *Natural Gas Industry B*, **8**, 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.04.004>
- [15] Kreinovich, V. (2021) Visual Knowledge Discovery and Machine Learning Springer, Cham, Switzerland, 2018. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **40**, 5753-5755. <https://doi.org/10.3233/jifs-189730>
- [16] Chen, L., Dong, B., Liu, W., Wu, F., Li, H. and Zhang, T. (2022) Failure Analysis of Corrosion Products Formed during CO₂ Pre-Corrosion of X70 and 3cr Steels: Effect of Oxygen Contamination. *Engineering Failure Analysis*, **140**, Article 106529. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106529>
- [17] Shrestha, S. (2016) Chemical, Structural and Elemental Characterization of Biosorbents Using FE-SEM, SEM-EDX, XRD/XRPD and ATR-FTIR Techniques. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, **7**, 1-11. <https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000295>
- [18] 赵博, 杜翠薇, 刘智勇, 等. Cl⁻和 HCO₃⁻对 N80 钢阳极电化学行为的协同作用[J]. *工程科学学报*, 2012, 34(12): 1385-1390.
- [19] Zhao, B., Du, C.W., Liu, Z.Y., *et al.* (2012) Synergistic Effect of Cl⁻ and HCO₃⁻ on the Anodic Electrochemical Behavior of N80 Steel. *Chinese Journal of Engineering*, **34**, 1385-1390.
- [20] Pedrosa, F. and Andrade, C. (2017) Corrosion Induced Cracking: Effect of Different Corrosion Rates on Crack Width Evolution. *Construction and Building Materials*, **133**, 525-533. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.030>
- [21] Fix, D., Skorb, E.V., Shchukin, D.G. and M \ddot{o} hwald, H. (2011) Quantitative Analysis of Scanning Electric Current Density and pH-Value Observations in Corrosion Studies. *Measurement Science and Technology*, **22**, Article 075704. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/7/075704>
- [22] 刘政宇, 曹学乾, 王少龙, 等. 油气开采环境下管道的协同腐蚀及防护研究进展[J]. *中国表面工程*, 2024, 36(6): 36-48.
- [23] Liu, Z.Y., Cao, X.Q., Wang, S.L., *et al.* (2024) Research Progress in Synergetic Corrosion and Protection of Pipelines in Oil and Gas Production Environment. *China Surface Engineering*, **36**, 36-48.
- [24] Liu, J., Wu, Y., Yan, Y., Wang, F., Zhang, G., Zeng, L., *et al.* (2025) Preparation and Performance Study of Graphene Oxide Doped Gallate Epoxy Coatings. *Materials*, **18**, Article 3536. <https://doi.org/10.3390/ma18153536>
- [25] Sulaiman, M.S., Abd Rahman, M.F. and Adam, A.F.M. (2023) Variance of Total Dissolved Solids and Electrical Conductivity for Water Quality in Sabak Bernam. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, **13**, 2259-2269. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp2259-2269>
- [26] 警杨. 3Cr 钢表面超疏水性膜的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [27] Yang, Z. (2021) Study on Preparation and Performance of Super-Hydrophobic Film on the Surface of 3Cr Steel. Xi'an University of Architecture & Technology.
- [28] 王明闯. 金属复合材料的制备及其电催化 CO₂ 还原性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [29] Wang, M.C. (2023) Preparation of Metal Composites and Their Electrocatalytic CO₂ Reduction Performance. Jilin University.