

基于COMSOL的铝合金钻杆腐蚀分析

梁健^{1,2,3}, 赵杰⁴, 王成彪³, 何鑫⁴, 尹浩^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质调查局深部地质钻探技术研究中心, 河北廊坊 065000;

3. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 4. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617)

摘要:为预测科学超深井钻探工程中铝合金钻杆耐腐蚀性能,运用COMSOL软件,建立多物理场腐蚀分析模型,开展“松科二井”铝合金钻杆“应力-温度-电化学”作用下的腐蚀规律仿真分析。分析结果表明:腐蚀体系达到平衡时,铝合金电极一侧的电解质电位偏高,钢接头电极一侧电解质电位偏低,靠近钢接头电极一侧铝杆体电流密度高;随着钻杆所受应力、温度的增加,腐蚀速率加快,相对于温度的影响,载荷对腐蚀影响较小;腐蚀速率和井下工作时间成正线性相关;离钢接头的电偶腐蚀处越近,铝合金钻杆的界面电流密度越大,并成指数关系,外壁强影响区域大约在距电偶腐蚀处0~200 mm,内壁为0~110 mm。研究成果将为铝合金钻杆的工程防腐提供参考。

关键词:科学超深井;科学钻探;铝合金钻杆;腐蚀;数值模拟

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)04-0001-10

Analysis of aluminum alloy drill pipe corrosion based on COMSOL

LIANG Jian^{1,2,3}, ZHAO Jie⁴, WANG Chengbiao³, HE Xin⁴, YIN Hao^{1,2}

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;*

2. *Deep Geological Drilling Technology Research Center, China Geological Survey, Langfang Hebei 065000, China;*

3. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

4. *School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)*

Abstract: In order to predict the corrosion resistance of aluminum alloy drill pipes (ADP) in scientific ultra-deep drilling, COMSOL software was used to establish a multi physical field corrosion analysis model for simulation and analysis of the corrosion law of ADP used in SK-2 well under the action of “stress temperature electrochemistry”. The results show that when the corrosion system reaches equilibrium, the electrolyte potential on one side of the aluminum alloy electrode is higher than the steel joint electrode, and the current density of the aluminum rod near the steel joint electrode is higher. With the increase of stress and temperature, the corrosion rate of ADP is accelerated. Compared with temperature, the influence of stress on corrosion is smaller. It is a positive linear relationship between the corrosion rate and the working time. The closer to the galvanic corrosion site, the higher the interface current density of ADP, exhibiting an exponential relationship. The intensive influence area in the outer wall is about 0~200mm away from galvanic corrosion and that in the inner wall 0~110mm away from. The research results can provide reference for the anti-corrosion of aluminum alloy drill pipes.

Key words: scientific ultra-deep well; scientific drilling; aluminum alloy drill pipe; corrosion; numerical simulation

收稿日期:2021-02-14; **修回日期:**2021-03-18 **DOI:**10.12143/j.ztgc.2021.04.001

基金项目:国家自然科学基金项目“科学超深井铝合金钻杆的腐蚀防护机制研究”(编号:41772390);国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题三“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号:2018YFC0603403);中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑”(编号:DD20190585)

作者简介:梁健,男,汉族,1980年生,教授级高级工程师,地质工程、机械工程专业,博士研究生,从事深部钻探工程的科研与管理工作,河北省廊坊市金光道77号,raul9942718@163.com。

引用格式:梁健,赵杰,王成彪,等.基于COMSOL的铝合金钻杆腐蚀分析[J].钻探工程,2021,48(4):1-10.

LIANG Jian, ZHAO Jie, WANG Chengbiao, et al. Analysis of aluminum alloy drill pipe corrosion based on COMSOL[J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):1-10.

0 引言

作为“入地”重要手段的科学超深井钻探工程,是一项超复杂的系统工程^[1-6],更是我国地质科学发展的重要里程碑。面对这项系统庞大的勘探工程,须就其关键技术难题展开攻关,研究出切实可行的工艺技术体系和相应的钻井工具与设备。在科学超深井钻探作业过程中,除地层条件复杂及不确定性外,其将遇到的困难与挑战可概括为“热、高、长、大”,即“井温高、压力高、管柱长、井径大”,采用常规钻井机具难以满足钻井要求。尤其当钻井超过某一深度时,钻柱的自重即能使钻杆发生破坏,尚且随着井深的不断增加,钻井工程存在裸眼井段长、井壁稳定性差、井内环境温度高等恶劣工况。铝合金钻杆以其独特的优越性,即具有质量轻、比强度高、钻进深度大、所需能耗小等特点,已成为科学超深井钻柱设计的优选方案^[7-10]。在前苏联 SG-3 科学超深井中,铝合金钻杆技术作为其三大特色技术之一,为提高人类向地下空间进军的能力做出了巨大的贡献^[11]。在塔里木油田哈拉哈塘区块哈 15 井,为解决钢钻杆氢脆化断裂这一难题,引用了进口铝合金钻杆,顺利钻进至 6515 m,累计进尺 4983 m^[12]。我国大陆科学钻探“松科二井”应用了铝合金钻杆,最大钻深 4963 m,累计进尺 337 m,井下使用 970 h^[13],在提高井口效率、减轻工人劳动强度等方面体现了其优势。为此,国产铝合金钻杆的成功开发与应用,对推动科学钻探技术进步以及节能降耗工作具有重大现实意义。

在自然条件下,铝合金表面容易形成一层厚约 4 nm 的自然氧化膜,但该膜多孔、不均匀,难以抵抗恶劣环境的腐蚀,导致腐蚀失效^[14-15]。钻井过程中,所使用的低固相、无固相、水基和油基等不同的泥浆体系中含多种有机和无机添加剂,添加剂在井内高温高压的作用下具有较强的腐蚀性。由于铝合金钻杆特殊的结构设计使其自身的异金属腐蚀敏感性较强,钢、铝接触时将产生严重的电偶腐蚀^[16-17]。钻柱在其自重作用下承受的拉伸应力,在腐蚀介质环境中持续的作用下,可致铝合金材料产生应力腐蚀^[18-20],拉长的晶粒、晶界电偶腐蚀共同提供腐蚀通道,并在应力腐蚀的综合作用下易造成铝合金的剥落腐蚀^[21-22]。盐类添加剂,增加了介质溶液的导电性,尤其氯离子对铝合金钝化膜的破坏,致使其发生小孔腐蚀^[23-25]。井内温度对铝合金腐蚀

的影响是多样的,其变化将影响反应物和产物的溶解性,改变腐蚀产物,从而影响腐蚀速度^[26-27]。在“松科二井”工程铝合金钻杆的使用过程中,发现其产生了不同程度的腐蚀^[13](见图 1),致使钻杆柱承载力降低,加大了井内事故隐患。因此,深入认知铝合金钻杆的腐蚀失效机制,是科学超深井铝合金钻杆技术应用的核心与关键。

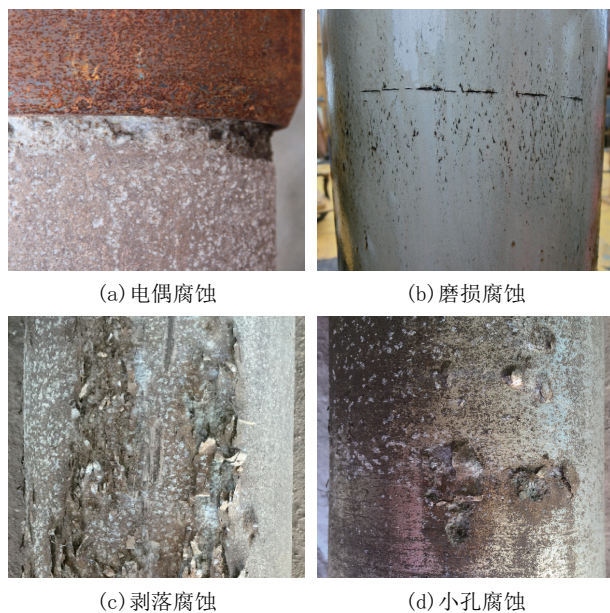


图 1 铝合金钻杆典型腐蚀宏观照片

Fig.1 Typical corrosion of ADP

本文针对“松科二井”复杂钻井工程服役条件,运用 COMSOL 多物理场仿真软件,通过理论公式分析和修订模拟作业工况,建立多物理场腐蚀分析模型,开展铝合金钻杆“应力-温度-电化学”作用下的腐蚀规律仿真分析,进一步支撑铝合金钻杆的工程防腐手段和措施。

1 工程应用概况

1.1 铝合金钻杆结构性能参数

“松科二井”铝合金钻杆应用是我国自主研发的科学深井铝合金钻杆在国内的首次应用,以考核国产铝合金管材强度、安全性的同时,观察验证抗高温、耐腐蚀能力,为后续批量化制造技术的完善和优化提供技术数据。采用的 $\Phi 147$ mm 规格特制铝合金钻杆结构尺寸参数见表 1,铝合金常温性能参数见表 2,钢接头力学参数见表 3。

表 1 铝合金钻杆尺寸参数

Table 1 Sizes of ADP					
接头 外径/ mm	接头 内径/ mm	杆体加 厚段外 径/mm	杆体 外径/ mm	杆体 内径/ mm	定尺 长度/ m
193.68	112.71	168.00	147.00	114.65	9.40

表 2 铝合金常温性能参数

Table 2 Properties of aluminum alloy at room temperature						
合金 牌号	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性 模量/ MPa	剪切 模量/ MPa	屈服 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	伸长 率/ %
2024	2.78	71000	27000	335	504	17.5

表 3 钢接头力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of steel joints				
屈服强 度/MPa	整体抗拉 能力/kN	整体抗扭能力/(kN·m)		
		主台肩	副台肩	总抗扭
820	6140	91.75	60.53	152.28

1.2 复合钻柱组合设计

根据铝合金杆体耐温性能及钻杆测试性能和井内钻进情况,确定其以下使用要求:在套管内使用,如遇铝合金钻杆的钻井事故便于后续处理作业;考虑项目经费和井下安全,与钢钻杆组合使用,下入 4 柱铝合金钻杆,共计 12 单根;置于钻柱中上部,同时考虑井温情况(建议铝合金钻杆部位井段的循环井温<120 ℃);长时间停钻时,考虑温度和腐蚀影响,应将铝合金钻杆提出井外。铝合金钻杆入井前的钻井工艺参数见表 4。针对“松科二井”取心钻进工艺参数,进行了复合钻柱设计,见表 5。

1.3 井下试验情况

铝合金钻杆结合“松科二井”(见图 2)开展了工程应用,其井下工作量见表 6。2015 年,进行了 Ø147 mm 规格铝合金钻杆第一次野外生产试验,下井 21 回次,累计进尺 233.13 m,井下使用时间 634 h(约 27 d),使用井段为 2966.11~3199.24 m。2016 年,进行了第二次生产试验,下井 8 回次,累计进尺 103.96 m,井下使用时间 336 h(约 14 d),使用井段为 4862.94~4963.05 m。

表 4 取心钻进工艺参数

Table 4 Core drilling parameters							
悬重/kN	钻压/kN	立压/MPa	扭矩/(kN·m)	转盘转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·s ⁻¹)	井深/m	测井温度/℃
1700	50~80	9~11	6~8	15	22~25	4680	165

注:钻具组合:Ø194 mm 取心筒(Ø216 mm 热压钻头)+Ø172 mm 螺杆钻具+Ø177.8 mm 钻铤+Ø139.7 mm 钻杆。

表 5 复合钻柱设计

Table 5 Design of the composite drill string					
序 列	钻具规格/mm	长度/m	累计长度/m	空气中质量/t	累计质量/t
(1)取心钻具	194	32	32	2.2	2.2
(2)螺杆钻具	172	9.1	41.1	1.2	3.4
(3)钻铤	177.8	72	113.1	11.6	15.0
(4)钢钻杆	139.7	2567	2680.1	75.8	90.8
(5)铝合金钻杆	147	112.8	2792.2	3.14	93.94
(6)钢钻杆	139.7	1888	4680.90	55.7	149.64
(7)方钻杆		2.04(方入)	4682.94		

表 6 铝合金钻杆井下工作量^[13]

Table 6 Down-hole workload of ADP						
试验时间	下井次数/回次	使用井段/m	使用时间/h	井径/mm	测井温度/℃	钻井液 pH 值
2015 年	22	2966.11~3199.24	634	311	110~116	>10
2016 年	8	4862.94~4963.05	336	216	170~172	>10



图2 铝合金钻杆在“松科二井”的工程应用

Fig.2 Engineering application of ADP in SK-2

2 腐蚀模型及其理论公式

2.1 腐蚀模型

图3是腐蚀仿真分析模型,铝合金钻杆为对称结构,取其1/4半剖模型为研究对象。在电偶腐蚀模型中,阴极为钢接头,阳极为铝合金杆体;在铝合金杆体区域的电化学腐蚀中,由于杆体的变截面加工等原因,不同区域内的电化学腐蚀性能略有不同。根据钻杆的几何尺寸及区域属性,将其定义为:接头连接区、铝合金杆体加厚区和铝合金杆体区^[28-29];由于机加工及装配工艺的需求,在钻杆接头区存在几何突变小凹面,该点距离钢接头30 mm,位于电偶腐蚀影响区域内,真实工程中该区域腐蚀情况较为严重^[13]。

另外,整个电极被钻井液电解质包围,电极反应发生在电解质与钻杆的液接表面。物理模型对体系外边界为绝缘,考虑钻杆内外管壁流体流动,阴阳极电位采用动力学 Tafel 方程进行计算,仿真体系中考虑所受载荷、温度参数、溶质的扩散与电迁移,耦合二次电流场、固体力学场、流场和稀物质传递场,模拟体系中的受载和腐蚀情况^[30]。

2.2 多物理场下理论公式及修订

与钢接头接触的铝合金杆体外壁区域会产生电偶腐蚀,同样该区域的钻杆内壁与弱电极发生电偶腐蚀^[31]。同时,金属的溶解速度与阳极电流密度

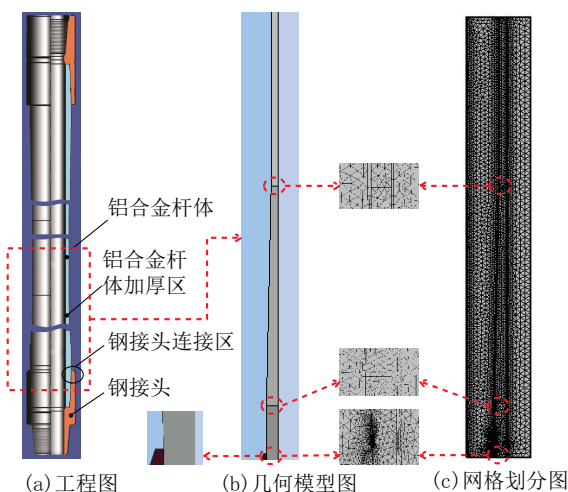


图3 腐蚀仿真分析模型

Fig.3 Corrosion simulation analysis model

呈正相关。由 Tafel 公式可知,阳极电流密度与阳极平衡电位有关,阳极平衡电位越负,阳极电流密度越大^[32]。对阴阳极的平衡电位,根据 Nernst 方程式进行计算^[33]。一般地温梯度为 3 °C/100 m,可知井下绝对温度随钻深 d 变化的公式为:

$$T = 273.15 + \frac{d}{1000} \times 30 \quad (\text{K}) \quad (1)$$

因此,考虑温度的 Nernst 方程可修订为:

$$E = E_{a,eq}^0 + \frac{R(298.15 + 0.03d)}{nF} \ln \frac{C_o^m}{C_R^p} \quad (2)$$

式中: $E_{a,eq}^0$ ——标准状态下的材料的电极电位, V; R

——气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; d ——钻井深度, m ; n ——电极反应中转移电子数; F ——法拉第常数, $96485 \text{ C}/\text{mol}$; C_o 、 C_R ——氧化物、还原物浓度, mol/L ; m 、 P ——氧化物、还原物浓度反应系数。

根据实验和理论推导,得到了应力对电极电位的影响的半经验模型,分为弹性变形下的 Von-Mises 力和有效塑性变形 2 部分,影响程度公式^[34]为:

$$E_v = E_{a,eq}^0 - \frac{\Delta P_{\text{循环}} V_m}{nF} - \frac{TR}{nF} \ln \left(\frac{v\alpha}{N_0} \epsilon_{\max} + 1 \right) \quad (3)$$

式中: E_v ——钻井过程中某一时刻的阳极平衡电位, V ; V_m ——铝合金摩尔体积, m^3/mol ; T ——井下绝对温度, K ; v ——取向依赖因子; α ——反应传递系数, $0.3 \sim 0.7$ 之间,一般取 0.5 ; N_0 ——塑性变形前的错位初始密度; $\epsilon_{\max}$ ——最大应力下有效塑性应变。

在铝合金钻杆井下使用过程中,一般不会出现塑性变形的阶段,所以上式可简化为:

$$E_v = E_{a,eq}^0 - \frac{\Delta P_{\text{循环}} V_m}{nF} \quad (4)$$

针对铝合金钻杆井下使用的工况,阳极平衡电位受应力场和电化学场共同影响,同时考虑温度影响因素,仿真模拟中 Nernst 方程修订如下:

$$E_{\text{总}} = E + E_v = E_{a,eq}^0 + \frac{R(298.15 + 0.03d)}{nF} \ln \frac{C_o^m}{C_R^P} - \frac{\Delta P_{\text{循环}} V_m}{nF} \quad (5)$$

当电化学反应中,正向和逆向的反应进行速度相等时,电极反应处于平衡状态,此时阳极反应和阴极反应所对应的电流密度的绝对值为交换电流密度,用符号 I_0 表示,该参数只与电极反应本身的性质有关,与外界施加条件无关。也就是说,无论电极的状态是否处于平衡态,交换电流密度可以用来表示某电极反应得失电子的能力,还可以反映一个反应进行的难易程度^[35]。在标准状态下,氧化物和还原物的浓度均为 1 ,此时的标准交换电流密度^[36]可表示为:

$$I^{00} = Fk_s (C_o)^{(1-\alpha)} (C_R)^{\alpha} \quad (6)$$

式中: I^{00} ——标准状态下电极交换电流密度, A/m^2 ; k_s ——化学反应常数。

随着钻深的不断增加,钻杆柱所处状态为非标准状态。因此,非标准状态下的交换电流密度^[37]可表示为:

$$I_0 = I^{00} \frac{(C_o^*)^{(1-\alpha)} C_R^{*\alpha}}{C_o^{(1-\alpha)} C_R^{\alpha}} \quad (7)$$

通常,可通过腐蚀电流密度来表示一个电化学反应速率, I_{corr} 与 I_0 的关系为:

$$I_{\text{corr}} = I_{0,a} \frac{\beta_a}{\beta_a + \beta_c} I_{0,c} \frac{\beta_c}{\beta_a + \beta_c} \exp \left(\frac{E_{e,c} - E_{e,a}}{\beta_a + \beta_c} \right) \quad (8)$$

式中: I_{corr} ——腐蚀电流密度, A/m^2 ; $I_{0,a}$ 、 $I_{0,c}$ ——阳极、阴极交换电流密度, A/m^2 ; β_a 、 β_c ——阳极、阴极塔菲尔斜率; $E_{e,c}$ 、 $E_{e,a}$ ——阴极、阳极平衡电极电位, V 。

2.3 仿真边界条件

钻井过程中,钻柱的运动状态十分复杂,主要包括:自转、涡动、纵向振动、扭转振动、横向振动等。根据“松科二井”井下动力驱动取心钻进工艺参数,为便于仿真分析且兼顾准确性,分析中仅考虑拉应力,应力场采用固体力学接口。钻柱上部受拉力最大,钻柱顶端施加固定约束 $u=0$,水平方向位移约束 $u_{0x}=0$ 。钻杆施加受载应力为其下部钻杆总质量与其钻井液带来的浮力的和,总受载为:

$$F_{\text{tot}} = M_{\text{总}} - F_f \quad (9)$$

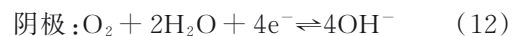
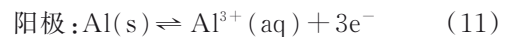
式中: F_{tot} ——钻杆所受拉力,随深度 h 的变化而变化, N ; $M_{\text{总}}$ ——下部钻杆重力和, N ; F_f ——下部钻杆浮力和, N 。

钻杆受载与钻井深度的关系式为:

$$F_{\text{tot}} = M_{\text{总}} - F_f = \frac{-1324787}{4680} h \quad (10)$$

式中: h ——钻井深度,取值范围为 $1 \sim 4680 \text{ m}$ 。

钻井液为碱性环境,电解质中富含 OH^- ,当铝合金钻杆处于工作状态时,整个电化学体系发生吸氧反应。标准平衡电位较低的 Al 充当阳极,发生氧化反应,标准平衡电位较高的 OH^- 充当阴极,发生还原反应。电极反应式如下:



腐蚀电化学体系仿真采用二次电流分布接口,电解质分布在铝合金钻杆内外两侧。电解质电导率为 $4.5 \text{ S}/\text{m}$,铝合金杆体和钢接头接触面的电势为 0 。为体现铝合金钻杆制造致使不同区域内钻杆的耐蚀性的不同,通过定性调节铝合金钻杆的参考平衡电位及交换电流密度,改变了钻杆接头区、加厚区和杆体区的电化学参数,且除电极反应面外,体系其余边界为绝缘。阴阳极的电极动力选取阴/

阳极 Tafel 公式求解, 方程以残差 $<1 \times 10^{-6}$ 为终止依据。

考虑浓度引起的浓差极化对模拟仿真的影响, 采用稀物质传递。在稀物质传递中, 速度变化是从流场接口传递而来的, 在整个钻井过程中流场的状态是层流与湍流并存^[38], 而电化学腐蚀是在微观下进行的, 对模型流动情况进行简化, 采用层流接口进行模拟分析^[39-40]。钻杆内钻井液流速约为 2.35 m/s, 钻杆外壁钻井液流速为 0.31 m/s。液体流动过程中发生的速度变化传递给稀物质传递。同时, 通过电极表面耦合对电场迁移进行仿真, 扩散系数为 $1e^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 粒子属性为各项同性, 参与电子数为 3, 化学计量系数为 4。仿真模型的基本电化学参数见表 7。

表 7 基本电化学参数

Table 7 Basic electrochemical parameters

参 数	符号	数值	单位
阳极铝的平衡电极电位	E_{Al}	-0.9	V
阴极 OH ⁻ 的平衡电极电位	E_{OH^-}	-0.54	V
反应转移电子数	n	3	
法拉第常数	F	96459	C/mol
气体常数	R	8.314	J/mol
溶液中铝离子浓度	$C_{\text{Al}^{3+}}$	1	mol/L
溶液中 OH ⁻ 浓度	C_{OH^-}	1	mol/L
电解质电导率	σ	4.5	S/m
阳极 Tafel 斜率	β_a	54.7	mV
阴极 Tafel 斜率	β_c	-100	mV

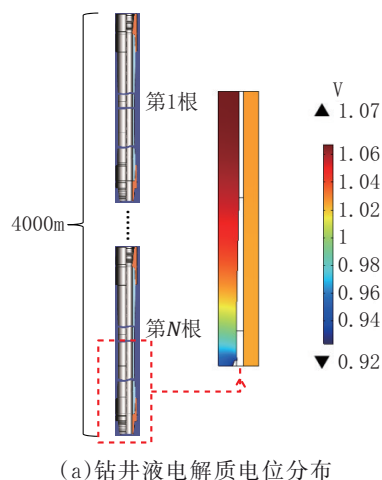
仿真以不同的入井时间和下深开展钻杆腐蚀分析, 即钻杆井下工作时间 10、20、30、40 d 和井深 10、1000、2000、4000 m 时的腐蚀情况, 也可理解为分析第 1、第 100、第 200、第 400 根铝合金钻杆的多物理场耦合腐蚀情况, 并与实际工程情况进行对比分析。

3 铝合金钻杆腐蚀特性分析

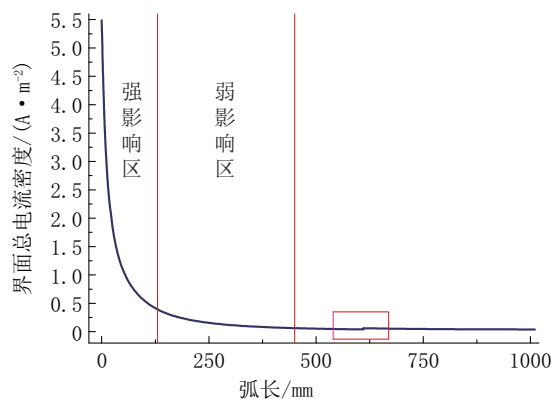
3.1 腐蚀特性分析

图 4(a) 是第 4000 m 段铝合金钻杆在井下工作 40 d 时的电解液电位分布图。从图中可知, 在体系达到平衡时, 铝合金电极一侧的电解质电位偏高, 钢接头电极一侧电解质电位偏低。这是由于铝合金发生了氧化反应, Al^{3+} 进入溶液相, 导致铝合金电

极周围正电荷富集, 电位较高; 钢接头区域 OH^- 发生还原反应, 周围负电荷富集, 电位较低, 约 0.94 V。对于腐蚀体系, 铝合金钻杆电极取外表面, 导出的总界面电流密度图见 4(b) 所示, 靠近钢接头电极一侧受影响较大, 电流密度高, 最高为 $5.5 \text{ A}/\text{m}^2$ 。



(a) 钻井液电解质电位分布



(b) 电极界面总电流密度

图 4 4000 m 段铝合金钻杆的体系电化学参数

Fig.4 Electrochemical parameters of 4000m long ADP system

图 5 是钻深为 10、1000、2000、4000 m, 服役时间为 40 d, 铝合金钻杆柱 a、b 观测位置腐蚀情况。从图中可以看出, 最大腐蚀位置均为铝/钢电偶腐蚀处, 其中, a 处最大腐蚀深度变化分别为 1.114、1.114、1.114、1.115 mm, b 处最大腐蚀深度分别为 1.115、1.264、1.570、2.442 mm。也就是说, a、b 两位置处的腐蚀深度随着钻井深度的增加而增大, 即随着钻杆应力、温度的增加导致腐蚀速率加快; 相对于温度的影响, 载荷对腐蚀影响相对较小。另外, 最小腐蚀区域的管内壁随温度和载荷的变化影响

不大,腐蚀深度均在 0.017 mm。

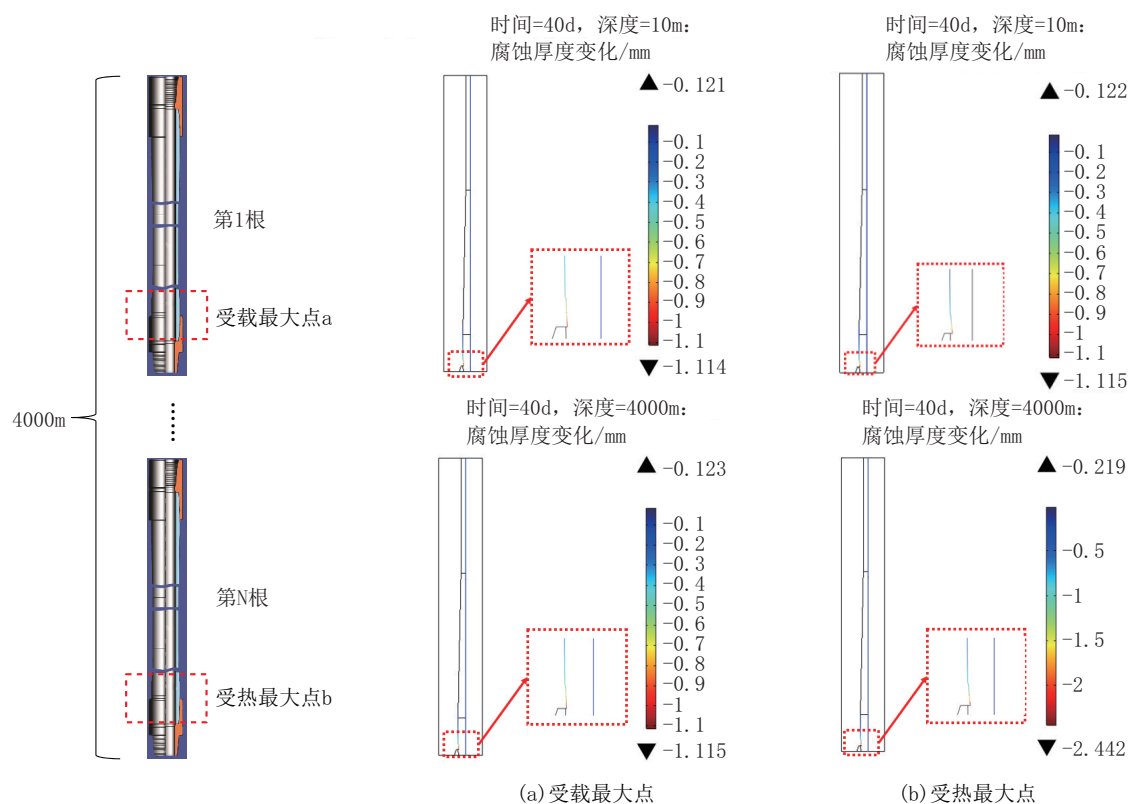


图5 不同钻深下钻柱顶部底部腐蚀情况

Fig.5 Corrosion of the top and bottom of the drill string at different drilling depths

图6是仿真最大腐蚀位置与真实最大腐蚀位置对比图。从图中可以看出,在对比真实工况下的腐蚀情况,管外壁和内壁最大腐蚀厚度^[26]为4 mm和0.20 mm,与仿真结果的腐蚀厚度变化较为相近。

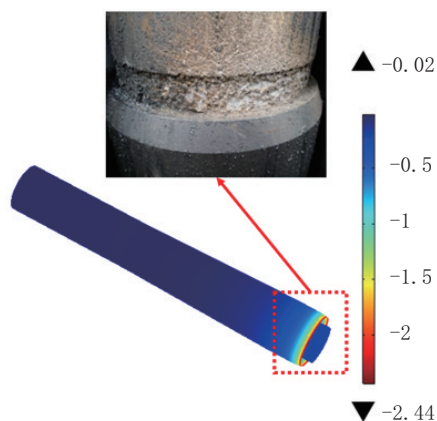


图6 仿真与真实最大腐蚀位置对比

Fig.6 Comparison of simulated and real maximum corrosion locations

图7是受热最大点b腐蚀深度随时间的变化图。由图可知,腐蚀速率和工作时间成正线性关系,工作时间越长、腐蚀深度越大、铝合金钻杆表皮脱落越严重。腐蚀初期,4个钻深下的腐蚀速率分别为0.018、0.022、0.026、0.034 mm/d;在第4天时,腐蚀速率开始变缓,分别为0.017、0.021、0.025、0.033 mm/d;随后,腐蚀速度开始加快,分别为0.019、0.023、0.026、0.037 mm/d。可以理解为开始时电偶腐蚀所产生的腐蚀产物会对铝基体进行保护,但随着反应的进行和钻井液的冲刷,腐蚀层开始脱落,对基体的保护减小并形成更为严重的钢接头/腐蚀产物的电偶腐蚀,腐蚀速率对比刚开始时的腐蚀速率加快8%。

3.2 电偶腐蚀管壁腐蚀影响分析

图8是电偶腐蚀对管外壁腐蚀影响距离分析图。从图中可以看出,离电偶腐蚀处越近,铝合金钻杆的界面电流密度越大,并成指数关系。电偶腐蚀的强影响区域大约在距电偶腐蚀处0~200 mm,

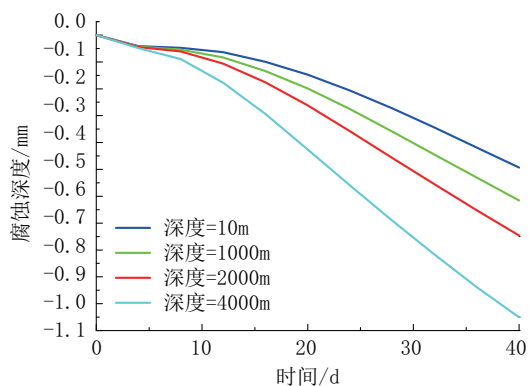


图7 b点腐蚀深度随时间的变化

Fig.7 Corrosion depth at Point b vs time

弱影响区大约在距电偶腐蚀处 200~400 mm, 与真实工况下钻杆腐蚀现象相似。同时, 还可以发现, 在 600 mm 处, 曲线出现了起伏和电流密度略微升高, 是由于铝合金钻杆的加工工艺所致, 接头区和加厚区的耐腐蚀性能较优^[27], 也就是说杆体区的界面总电流密度较大, 耐腐蚀性能较弱。

图9是铝合金杆体内壁和接头区管内壁腐蚀情况云图。从图9(a)中可以看出, 钻杆杆体区腐蚀状况最严重, 腐蚀深度为 0.238 mm; 加强区腐蚀情况

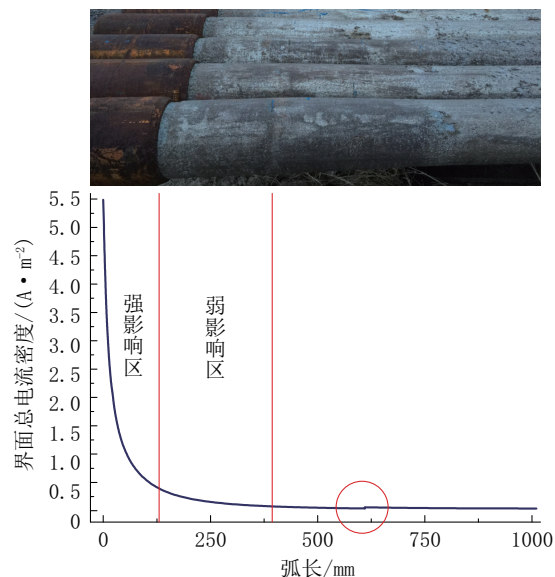
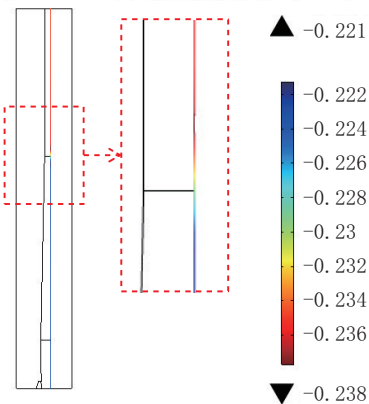


图8 电偶腐蚀对管外壁腐蚀影响距离

Fig.8 Influence distance of galvanic corrosion on the outer wall

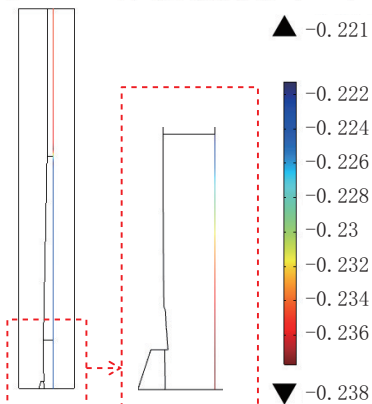
较轻, 腐蚀深度为 0.221 mm。从9(b)可以发现, 离电偶腐蚀区域越近, 腐蚀情况越为严重, 但影响区域较小, 约为 110 mm。

时间=40d, 深度=4000m: 腐蚀厚度变化/mm



(a) 受载最大点

时间=40d, 深度=4000m: 腐蚀厚度变化/mm



(b) 受热最大点

图9 铝合金钻杆内壁腐蚀情况

Fig.9 Corrosion on the inner wall

4 结论

运用 COMSOL 多物理场仿真软件, 进行了铝合金钻杆“应力-温度-电化学”多物理场耦合作用下的腐蚀规律仿真分析, 得到以下结论。

(1) 腐蚀体系达到平衡时, 铝合金电极一侧的

电解质电位偏高, 钢接头电极一侧电解质电位偏低。靠近钢接头电极一侧铝杆体电流密度高, 最高为 5.5 A/m^2 。

(2) 随着钻杆所受应力、温度的增加, 腐蚀速率加快; 相对于温度的影响, 载荷对腐蚀影响较小。

(3) 腐蚀速率和井下工作时间成正线性关系,

工作时间越长、腐蚀深度越大、铝合金钻杆表皮脱落越严重。

(4) 离电偶腐蚀处越近, 铝合金钻杆的界面电流密度越大, 并成指数关系。外壁强影响区域大约在距电偶腐蚀处 0~200 mm, 内壁为 0~110 mm。

参考文献(References):

- [1] 刘广志. 超深井钻探与深部地质学[J]. 地质评论, 1983, 29(1): 75-80.
LIU Gangzhi. Ultra deep well drilling and deep geology[J]. Geological Review, 1983, 29(1): 75-80.
- [2] 张伟. 科学钻探——钻探技术发展的机遇和挑战[J]. 探矿工程, 1993(2): 32-35, 39.
ZHANG Wei. Scientific drilling—opportunities and challenges of drilling technology development[J]. Exploration Engineering, 1993(2): 32-35, 39.
- [3] 刘振铎, 张洪叶, 孙昭伟. 刘广志文集[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
LIU Zhenduo, ZHANG Hongye, SUN Zhaowei. Collected works of Liu Guangzhi[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [4] 刘广志. 刘广志论科学钻探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
LIU Gangzhi. Liu Guangzhi on scientific drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [5] 王达, 张伟. 第五届国际科学钻探会议暨 KTB 主孔开工典礼侧记[C]//王达. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文选集. 北京: 地质出版社, 2007.
WANG Da, ZHANG Wei. Sidelights of the 5th international scientific drilling conference and the opening ceremony of KTB main hole[C]//WANG Da. Selected papers on drilling technology for the Chinese Mainland Scientific Drilling Project. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [6] 张金昌, 谢文卫. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 887-894.
ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra deep well[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 887-894.
- [7] Aquatic Company and Maurer Engineering Inc. Development of aluminum drill pipe in Russia (Final Report TR99-23)[R]. Implement Russian Aluminum Drill Pipe and Retractable Drilling Bits into the USA, Contract NO.DE-FG26-98FT40128, 1999.
- [8] 吕拴录, 骆发前, 周杰, 等. 铝合金钻杆在塔里木油田推广应用前景分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 74-77.
Lü Shuanlu, LUO Faqian, ZHOU Jie, et al. Prospects of aluminum alloy drill pipe in Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 74-77.
- [9] 梁健, 彭莉, 孙建华, 等. 地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 304-308.
LIANG Jian, PENG Li, SUN Jianhua, et al. Development of the aluminum alloy drill rod and laboratory tests[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(2): 304-308.
- [10] Gelfgat M.Y., Basovich V.S., Tikhonov V.S. Drill string with aluminum alloy pipes design and practices[C]//IADC/SPE Drilling Conference (Amsterdam). 2003, 79873.
- [11] 王达, 张伟, 汤松然. 俄罗斯科学深钻技术概况和特点——技术考察系列报道之四[J]. 探矿工程, 1995(4): 53-56.
WANG Da, ZHANG Wei, TANG Songran. General situation and characteristics of scientific deep drilling technology in Russia—Technical investigation series report 4[J]. Exploration Engineering, 1995(4): 53-56.
- [12] 中国石油新闻中心. 塔里木油田利用铝合金钻杆完成重点探井进尺 4983 米[N]. 中国石油报, 2011-04-14.
Petro China News Center. Using aluminum alloy drill pipe to complete 4983m footage of key exploration wells in Tarim Oil-Field[N]. China Petroleum News, 2011-04-14.
- [13] 梁健, 顾艳红, 岳文, 等. 科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(2): 60-66.
LIANG Jian, GU Yanhong, YUE Wen, et al. Analysis on corrosion failure of aluminum alloy drill pipe for scientific ultra-deep well drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(2): 60-66.
- [14] Godard H P, Jepson W B, Bothwell M R, et al. The Corrosion of light metals[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [15] Mahindru D V. Protective treatment of aluminum and its alloys[J]. Global Journal of Research in Engineering, 2011, 11(3): 10-14.
- [16] 梁健, 顾艳红, 杨远航, 等. 微弧氧化处理对铝合金钻杆与钢接头电偶腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2018, 51(6): 110-114.
LIANG Jian, GU Yanhong, YANG Yuanhang, et al. Effects of micro-arc oxidation treatment on galvanic corrosion behavior between aluminum alloy drill pipe and steel joints[J]. Materials Protection, 2018, 51(6): 110-114.
- [17] Subramanian G, Palrai S, Palanichamys S. Galvanic corrosion behaviour of aluminum 3004 and copper in tropical marine atmosphere[J]. Journal of Marine Science and Application, 2014, 13(2): 230-236.
- [18] Claralldl S W, Grimes D R, Nlchois H F, et al. Corrosion and stress-corrosion cracking of aluminum alloy drill pipe in a water-based, low-solids, non-dispersed drilling mud[J]. SPE Drilling Engineering, 1990(6): 135-140.
- [19] Song R G, Dietzel W. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Acta Mater, 2004, 52(16): 4727-4743.
- [20] Speidel M O. The theory of stress corrosion cracking in alloys[M]. 1971: 289-344.
- [21] Kelly D J, Robinson M J. Influence of heat treatment and grain shape on exfoliation corrosion of Al-Li alloy[J]. Corrosion,

- 1993,49(10):787-795.
- [22] Robinson M J, Jackson N C. Exfoliation corrosion of high strength Al-Cu-Mg alloys: Effect of grain structure[J]. British Corrosion Journal, 1999, 34(1):45-49.
- [23] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- WEI Baoming. Theory and application of metal corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [24] Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum [J]. Corrosion Science, 1999, 41(9):1743-1767.
- [25] Foley R T. Localized corrosion of aluminum alloy—A review [J]. Corrosion, 1986, 42(5):277-288.
- [26] 黄雨舟, 董丽华, 刘伯洋. 合金深海腐蚀的研究现状及发展趋势[J]. 材料保护, 2014, 47(1):44-47.
- HUANG Yuzhou, DONG Lihua, LIU Boyang. Current status and development trend of study on corrosion of aluminum alloy in deep sea[J]. Materials Protection, 2014, 47(1):44-47.
- [27] Fu C, Liu Y, Yu M, et al. Effect of cerium acetate doping on corrosion behavior of sol-gel coatings on 2A12 aluminum alloy [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10: 2014-2025.
- [28] 丁超豪. 铝合金材料的腐蚀性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- DING Chaohao. An investigation of corrosion performance of aluminum alloy drilling pipe materials [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [29] 毛建设. 铝合金钻杆杆体与钢接头过盈连接热组焊工艺数值模拟及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- MAO Jianshe. Numerical simulation and experimental research on interference hot assembling connection of aluminium alloy drill pipe body with steel tool joint[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [30] 张健能. Fe-Cr-Al合金的耐腐蚀性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- ZHANF Jianneng. The corrosion resistance property of Fe-Cr-Al alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [31] Liu J, Lin G. Scaled boundary FEM solution of short-crested wave interaction with a concentric structure with double-layer arc-shaped perforated cylinders [J]. Computers & Fluids, 2013, 79:82-104.
- [32] Xu H, Li Z. Galvanic corrosion of AZ91D magnesium alloy [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(4):298-305.
- [33] Cross S R, Gollapudi S, Schuh C A. Validated numerical modeling of galvanic corrosion of zinc and aluminum coatings [J]. Corrosion Science, 2014, 88(11):226-233.
- [34] 李天奇, 张顶学, 王亚. 基于有限元模拟的应力腐蚀对带腐蚀坑抽油杆寿命的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8):51-57.
- LI Tianqi, ZHANG Dingxue, WANG Ya. Effect of stress corrosion on life of sucker rod with corrosion pit based on finite element simulation [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(8): 51-57.
- [35] Fonna S, Huzni S, Putra M A, et al. Simulation the effect of anode-cathode displacement and anode type on reinforced concrete cathodic protection using BEM[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 197.
- [36] Lall P, Luo Y, Luu N. Multiphysics-modeling of corrosion in copper-aluminum interconnects in high humidity environments [C]//Electronic Components & Technology Conference. IEEE, 2015.
- [37] Radouani R, Echcharqy Y, Essahli M. Numerical simulation of galvanic corrosion between carbon steel and low alloy steel in a bolted joint [J]. International Journal of Corrosion, 2017: 1-10.
- [38] 徐金星. TZ凝析气田集输管道内腐蚀预测与防腐研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- XU Jinxing. Corrosion prediction and anticorrosion research on inner wall of gathering pipeline in TZ condensate gas field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [39] 冯焕春. 填料塔内两相流动与相界面传质的数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- FENG Huanchun. The numerical simulation study about the two phase flow dynamics and mass transfer in the packed column [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [40] 刘玉明. 水平井钻井岩屑运移特性及水力参数优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
- LIU Yuming. Study on the cuttings transport characteristics and hydraulic optimization in horizontal well drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.

(编辑 李艺)