

# 含缓蚀剂钻井液对铝合金钻杆材料的腐蚀影响

王姝婧<sup>1,2</sup>, 刘宝昌<sup>1,2,3</sup>, 李 闯<sup>1,2</sup>, 田烈余<sup>4</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130012; 4. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

**摘要:** 铝合金钻杆在钻井液 中发生腐蚀 会引发严重的孔内事故。为了延缓钻井液对铝合金钻杆的腐蚀作用, 在 pH 值为 10、温度为 70 °C 的聚磺体系钻井液中, 分别加入一定比例的有机缓蚀剂(十二烷基苯磺酸钠, C<sub>18</sub>H<sub>29</sub>NaO<sub>3</sub>S 或 SDBS)及稀土缓蚀剂[硫酸镧, La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>], 通过力学性能测试, 研究缓蚀剂对 7075 系铝合金钻杆材料腐蚀的影响。结果表明: 上述 2 种缓蚀剂均可降低铝合金在碱性钻井液中的腐蚀, 提高铝合金钻杆抗拉强度最高达 6.73%; 合金中 Cu、Mg、Si 等元素的第二相粒子是腐蚀的敏感区域, 第二相粒子脱落后即形成腐蚀坑; 在产生腐蚀裂纹时, 腐蚀产物主要由 Al、C、O 等元素组成。

**关键词:** 铝合金钻杆; 碱性钻井液; 腐蚀; 缓蚀剂; 第二相粒子

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)02-0042-07

## Effect of drilling fluids containing corrosion inhibitors on aluminum alloy drill pipe corrosion

WANG Shujing<sup>1,2</sup>, LIU Baochang<sup>1,2,3</sup>, LI Chuang<sup>1,2</sup>, TIAN Lieyu<sup>4</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. Key Laboratory of Drilling and Exploration Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China;

3. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China;

4. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China)

**Abstract:** Corrosion of the aluminum alloy drill pipe in the drilling fluid can affect the drilling performance and even cause serious downhole incidents. In order to improve the corrosion resistance of the aluminum alloy drill pipe, the organic corrosion inhibitor (C<sub>18</sub>H<sub>29</sub>NaO<sub>3</sub>S or SDBS) or rare earth corrosion inhibitor (La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) was added at some ratio to the polysulfonate drilling fluid at 10 pH and 70 °C, and its effect on the 7075 aluminum alloy drill pipe corrosion was investigated through the mechanical test. The results show that both corrosion inhibitors can reduce aluminum alloy corrosion in alkaline drilling fluids, and improve the tensile strength of aluminum alloy drill pipe by up to 6.73%. The second phase particles of Cu, Mg, Si and other elements in the alloy are the corrosion-sensitive areas. Corrosion pits are formed where the second phase particles have fell off. The corrosion products mainly consist of Al, C, O and other elements.

**Key words:** aluminum alloy drill pipe; alkaline drilling fluid; corrosion; corrosion inhibitor; second phase particle

## 0 引言

钢和铝合金都是目前钻探常用钻杆材料,但是

钢钻杆在超深井、大位移井钻探应用中存在一定局限性,如:在相同井眼曲率条件下,钢钻杆弯曲应力

收稿日期:2019-04-07; 修回日期:2020-01-16 DOI:10.12143/j.tkge.2020.02.006

基金项目:吉林省自然科学基金(学科布局项目)“铝合金钻杆在钻井液中的腐蚀行为与腐蚀机理研究”(编号:20170101159JC);吉林省科技发展计划重点科技研发项目“高可靠性铝合金钻杆智能制造关键技术”(编号:20180201054GX);国家国际科技合作专项项目“深部油气钻探用高性能钻具系统关键技术合作研究”(编号:2013DFR70490)

作者简介:王姝婧,女,汉族,1996年生,硕士研究生在读,地质工程专业,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号,wsj18@mails.jlu.edu.cn.

通信作者:刘宝昌,男,汉族,1975年生,副院长,教授,博士生导师,自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室副主任,长期从事钻探用超硬复合材料及工具、轻质高强铝合金钻杆、地下资源钻采、科学钻探等方面的研究工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号,liubc@jlu.edu.cn.

引用格式:王姝婧,刘宝昌,李闯,等.含缓蚀剂钻井液对铝合金钻杆材料的腐蚀影响[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):42-48.

WANG Shujing, LIU Baochang, LI Chuang, et al. Effect of drilling fluids containing corrosion inhibitors on aluminum alloy drill pipe corrosion[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):42-48.

远大于铝合金钻杆;钢的密度为  $7.8 \text{ t/m}^3$ , 铝合金的密度为  $2.8 \text{ t/m}^3$ , 因此单位长度的钢钻杆质量远大于铝合金钻杆, 钢钻杆的钻深能力低于铝合金钻杆;钻杆中的交变弯曲应力与材料弹性模量成正比, 在其他因素相同条件下, 铝合金钻杆和钢钻杆对应交变弯曲应力比例为  $1:2.96$  等<sup>[1-3]</sup>。铝合金材料具有密度小, 比强度高, 柔性大, 抗疲劳强度高, 易加工制造等优点<sup>[4-5]</sup>, 并且在酸性腐蚀环境中稳定性很好, 其表面可覆盖一层稳定的氧化膜阻止与环境反应, 故在硫化氢和二氧化碳环境下均可使用<sup>[6-7]</sup>。这些优势使得铝合金成为钻杆的优选材料, 铝合金钻杆也被广泛地应用于超深井、大位移井、海洋钻井等诸多领域。但是铝合金在碱性环境中稳定性差。由于在碱性环境中, 铝合金表面的氧化膜会不断溶解, 因而发生自腐蚀<sup>[8]</sup>, 并时常伴随析氢过程<sup>[9]</sup>。BERNARD 等<sup>[10]</sup>用旋转圆盘电极等方法研究发现: 在碱性环境中, 由于溶解和析氢反应形成多孔结构的铝氧化膜脱落而发生腐蚀。在钻井过程中所使用的钻井液在高温高压下有较强的腐蚀性, 铝合金钻杆极易发生腐蚀, 同时由于井深的增加、地温的升高, 铝合金钻杆的稳定性也随之下降<sup>[11]</sup>。国内外的使用经验发现, 铝合金钻杆在钻井液中会发生不同程度的腐蚀现象, 影响钻进效率的提高<sup>[12-15]</sup>, 如: “松科二井”试验应用中尝试使用铝合金钻杆, 由于缺乏在钻井液中腐蚀的相关经验和技術储备, 导致了铝合金钻杆严重的腐蚀情况<sup>[16]</sup>。因此对铝合金钻杆的腐蚀研究十分必要。国内外研究学者做了大量有关铝合金的防腐研究, 主要有以下 3 个方面: (1)对铝合金材料表面做相应处理; (2)缓蚀剂的研究; (3)在铝合金中添加新的合金元素。研究中发现通过添加少量的缓蚀剂, 可取得显著的防腐效果<sup>[17]</sup>。本文选择在钻井液中加入缓蚀剂, 研究其对铝合金钻杆腐蚀的影响。

缓蚀剂是一种可有效抑制金属材料腐蚀的物质, 种类诸多, 如有机缓蚀剂、无机缓蚀剂、稀土元素缓蚀剂等。有机缓蚀剂的分子通常具有非极性基团和极性基团, 电负性大, 有机分子可以吸附在金属的表面, 可阻碍电化学物质的转移及金属与腐蚀介质接触, 提高腐蚀反应发生的活化能, 起到减缓腐蚀的效果<sup>[18-19]</sup>。Rehim 等<sup>[20]</sup>研究发现加入 SDBS 后, 吸附在铝合金的表面, 表现出缓蚀效果。ARNOTT 等<sup>[21]</sup>通过研究, 加入  $\text{Ce}^{3+}$ 、 $\text{La}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$ 、 $\text{Nd}^{3+}$  等稀土

元素, 在  $0.1 \text{ mol/L}$  NaCl 溶液中, 通过在铝合金的表面生成膜而使 7075 铝合金腐蚀速度得到了抑制。国内对于稀土元素缓蚀剂的研究相对开始的较晚, 刘伯生<sup>[22]</sup>研究显示 7075 铝合金浸泡在  $1000 \text{ ppm}$   $\text{CeCl}_3$  溶液中处理后, 在 NaCl 溶液中腐蚀速度下降。陆峰<sup>[23]</sup>研究发现 2024 铝合金浸泡在醋酸镧的溶液中, 显示出良好的抗腐蚀性能。以上研究发现 SDBS 和硫酸镧对铝合金有较好的缓蚀效果, 因而本文考虑加入到钻井液中, 探究实际工况时铝合金在钻井液中的腐蚀影响。

查阅资料发现, 国内深部钻井常规使用聚磺体系钻井液<sup>[24-26]</sup>。考虑到实际工程效果, 本文采用全浸泡试验, 选用聚磺体系钻井液作为腐蚀介质, 添加 SDBS 或  $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ , 探究对 7075 铝合金钻杆的腐蚀影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

由于常见铝合金钻杆牌号为 2024 和 7075 两种, 目前已有 2024 铝合金钻杆材料的相关腐蚀研究, 所以本文选用 7075 铝合金钻杆材料。“松科二井”自身地下温度梯度较大, 本文选用  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  是比较接近实际钻井现场井段之一的钻井液的温度。

试验材料选取 7075 铝合金钻杆材料, 主要合金元素如表 1 所示。选用“松科二井”现场使用的聚磺体系钻井液作为腐蚀介质, 配方:  $1 \text{ m}^3$  水 + 4% 膨润土 + 0.15% 聚丙烯酸钾 + 0.2% 羧甲基纤维素钠 + 2% 磺甲基酚醛树脂 + 2% 磺化沥青。试验测得的钻井液性能参数如表 2 所示。

表 1 7075 铝合金钻杆材料主要合金元素 %

Table 1 Main alloying elements of 7075 aluminum alloy drill pipe

合金元素	实测含量	合金元素	实测含量	合金元素	实测含量
Al	89.60	Cu	1.61	Mn	0.03
Zn	5.70	Si	0.17	Cr	0.23
Mg	2.29	Fe	0.34	Ti	0.06

表 2 实验室配制聚磺体系钻井液性能参数

Table 2 Performance parameters of the polysulfone drilling fluid

表观粘度/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	塑性粘度/ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	动切 静切力/ $\text{Pa}$			滤失量/ $\text{mL}$		pH 值
		力/ $\text{Pa}$	初切	终切	7.5 min	30 min	
21.5	15	6.5	11	18	6	10	10

### 1.2 试验方法

按照国家标准《金属材料实验室均匀腐蚀全浸

试验方法》(GB 10124-1988)<sup>[27]</sup>规定,铝合金试样在经线切割切制为工字形后,用砂纸逐级打磨表面,再利用无水乙醇和丙酮处理后,将试样全浸泡在腐蚀介质中48 h后,取出。在铝合金试样的两端均用生胶带包裹,其材质为不透明白色膜状四氟乙烯,可保障预腐蚀后的铝合金试样在拉伸测试时的夹持不受影响,如图1所示。模拟实际钻井情况,在pH值为10、温度为70℃的聚磺体系钻井液中,分别加入0.03、0.05、0.10 g/L的SDBS或硫酸镧,放入SDZF-6050型真空干燥箱(图2)升温至70℃(模拟实际工况),且需密封盛有腐蚀介质的烧杯,防止钻井液的挥发。



图1 两端包裹的预腐蚀铝合金拉伸试样

Fig.1 Pre-corrosion aluminum alloy tensile specimen wrapped at both ends



图2 SDZF-6050型真空干燥箱

Fig.2 SDZF-6050 vacuum drying oven

拉伸试验:根据国家标准《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228-2002)<sup>[28]</sup>的规定,在室温(20℃±3℃)下,选用DDL 100电子拉伸试验机,按照0.6 mm/min的速度缓慢拉伸试样,每组试验拉伸3次。

采用Hitachi S-4800场发射扫描电子显微镜在高倍下观察试样的腐蚀样貌,并利用EDS分析腐蚀产物的元素分布情况。

## 2 试验结果

试验测得数据如表3所示,绘制出的应力-应变曲线如图3所示。从表3和图3可以看出,在钻井液中分别加入2种缓蚀剂后,浸泡腐蚀后的铝合金试样的抗拉强度比未加入缓蚀剂的情况明显提高。

表3 在添加SDBS聚磺体系钻井液中预腐蚀后铝合金抗拉强度  
Table 3 Tensile strength (MPa) of aluminum alloy after pre-corrosion in the SDBS polysulfonate drilling fluid

SDBS 加量/(g·L <sup>-1</sup> )	抗拉强度/MPa	抗拉强度增幅/%
0.00	535	
0.03	571 <sup>+8</sup> <sub>-15</sub>	6.73
0.05	562 <sup>+10</sup> <sub>-20</sub>	5.05
0.10	549 <sup>+15</sup> <sub>-8</sub>	2.62

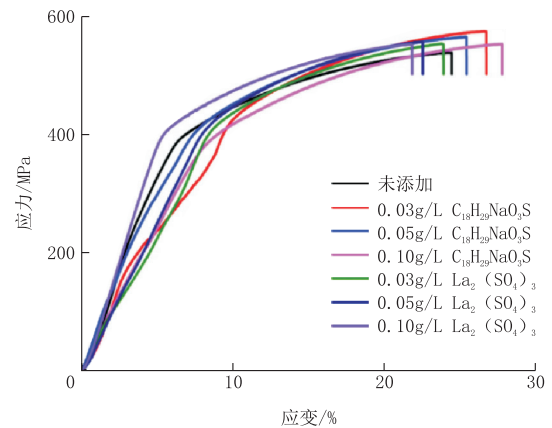


图3 在添加缓蚀剂的钻井液中预腐蚀后铝合金试样应力-应变曲线  
Fig.3 Stress vs strain curve of the aluminum alloy specimen after pre-corrosion in the drilling fluid with the corrosion inhibitor added

添加不同比例和种类的缓蚀剂,测得铝合金试样抗拉强度也不同。从表3中发现添加0.03 g/L的SDBS后,预腐蚀铝合金试样的抗拉强度最高,为571 MPa。表4中发现,在加入0.05 g/L的La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>时,预腐蚀铝合金试样的抗拉强度最高,为553 MPa。

表4 在添加La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>聚磺体系钻井液中预腐蚀后铝合金抗拉强度  
Table 4 Tensile strength (MPa) of aluminum alloy after pre-corrosion in the La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> polysulfonate drilling fluid

La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 加量/(g·L <sup>-1</sup> )	抗拉强度/MPa	抗拉强度增幅/%
0.00	535	
0.03	550 <sup>+2</sup> <sub>-6</sub>	2.80
0.05	553 <sup>+13</sup> <sub>-18</sub>	3.36
0.10	549 <sup>+6</sup> <sub>-13</sub>	2.62

分别添加两种缓蚀剂后,预腐蚀铝合金试样的抗拉强度提高2.62%~6.73%。对比分别添加两



种缓蚀剂后的预腐蚀试样,发现加入 0.03 g/L 的 SDBS,抗拉强度增幅最大,达到 6.73%,说明其抑制铝合金腐蚀的效果较好。有关研究表明<sup>[29-31]</sup>缓蚀剂对铝合金等金属的缓蚀作用,是通过在金属基体表面成膜从而提高金属的耐腐蚀性。具体是因为有机缓蚀剂通常都具有极性基团和非极性基团,这

些基团中存在着孤对电子,电负性较大,能使有机分子牢固的吸附在金属表面,从而起到阻碍金属与腐蚀介质的接触,起到缓蚀的效果。

对分别添加 2 种缓蚀剂腐蚀后的铝合金试样,利用扫描电镜 (SEM) 观察微观形貌并进行能谱 (EDS) 分析,得到结果如图 4~6 和表 5 所示。

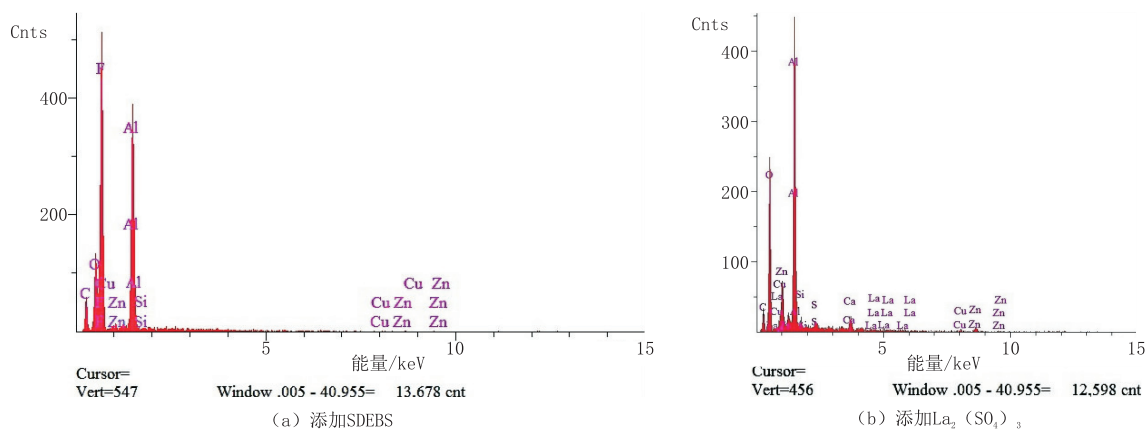
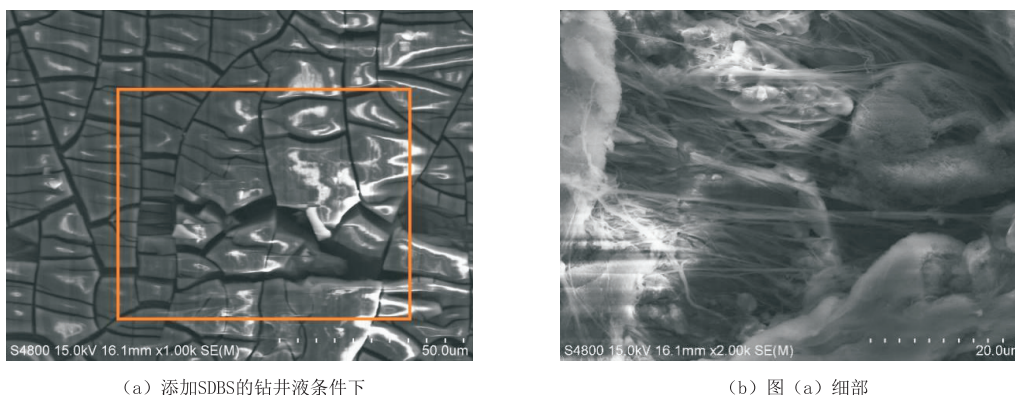


图 4 钻井液腐蚀后铝合金试样能谱分析图

Fig.4 Energy spectrum analysis of the aluminum alloy specimen after corrosion in drilling fluid



(a) 添加SDBS的钻井液条件下

(b) 图(a) 部

图 5 扫描电镜下腐蚀后铝合金试样表面形貌图

Fig.5 Surface topography of aluminum alloy specimens after corrosion by scanning electron microscopy

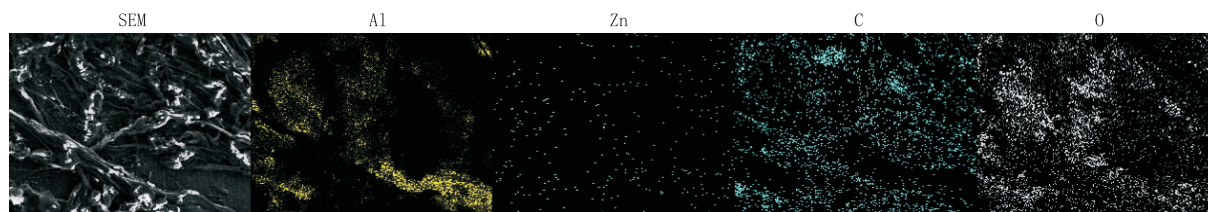


图 6 添加 SDBS 的钻井液条件下腐蚀铝合金试样表面元素分布图

Fig.6 Element distribution on corroded aluminum alloy specimen surface in the drilling fluid with SDBS added

从图 5(a)中框图局部放大的图 5(b)中可以看出,腐蚀坑的表面上存在有丝状物质。分析可能是由于加入了 SDBS,阴极性基团在试样表面产生了均匀吸附或者金属络合。而存在有丝状物可以一定

程度上减少试样表面与腐蚀介质的接触,进而抑制了腐蚀的发展。与测得发现抗拉强度数值提高相吻合。从图 6 元素分布图上可以看出,这些丝状物主要是由 Al、C、O 组成。同时原有的 Cu、Mg、Si 等

表5 添加不同缓蚀剂腐蚀后铝合金试样表面元素含量

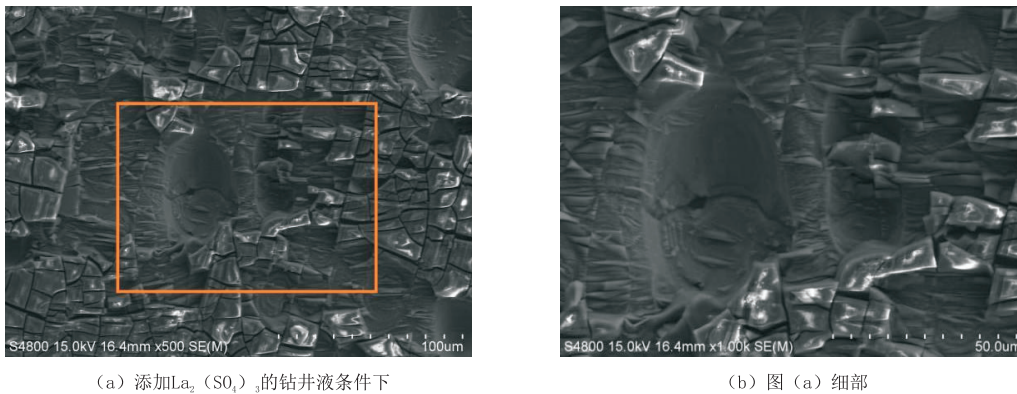
Table 5 Element contents on the aluminum alloy specimen surface after corrosion with different corrosion inhibitors %

缓蚀剂	SDBS	La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	缓蚀剂	SDBS	La <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Al	15.305	23.347	Ca		1.211
Zn	0.645	2.566	C	20.339	20.455
Mg	0.288	0.968	O	16.330	49.365
Cu	0.339	0.915	S		0.468
Si	0.004	0.518	La		0.188

元素含量减少,表明由于腐蚀发生了脱落。

图7添加缓蚀剂硫酸镧钻井液腐蚀的铝合金试样的SEM图片。在试样的表面主要以腐蚀裂纹为

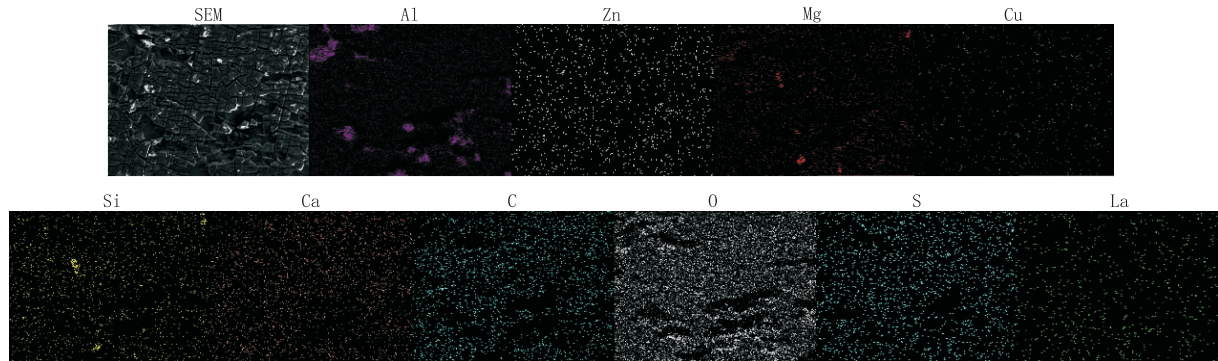
主。从图4(b)和表5中发现,该腐蚀后的铝合金试样表面的Cu、Mg、Si等元素与原始材料中含量(表1)相比明显减少,其表面发生脱落,而生成有新的元素如Ca、C、O等。同时从图8中也可以观察到该试样表面存在着微量的La元素,即表明在铝合金的表面可能生成了少量的La的氧化物或氢氧化物,这些少量的氧化物或氢氧化物可在一定程度上减缓腐蚀,但从图7观察发现效果较差。从SEM图7发现仍然存在较多的腐蚀裂纹及少量腐蚀坑,与力学性能测试中发现加入硫酸镧的抗拉强度提高幅度较小情况相符合。

(a) 添加La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>的钻井液条件下

(b) 图(a) 细部

图7 扫描电镜下腐蚀后铝合金试样表面形貌图

Fig.7 Surface topography of aluminum alloy specimens after corrosion by scanning electron microscopy

图8 添加La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>的钻井液条件下腐蚀试样表面元素分布图Fig.8 Element distribution on corroded aluminum alloy specimen surface in the drilling fluid with La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> added

对添加SDBS和La<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>腐蚀后的铝合金试样EDS分析结果表明,合金中Cu、Mg、Si等元素的第二相粒子是腐蚀的敏感区域,第二相粒子脱落后即形成腐蚀坑,在产生腐蚀裂纹及发生剥落时,腐蚀产物主要由Al、C、O等元素组成。

### 3 结论

通过对聚磺体系钻井液中分别加入2种缓蚀

剂,探究对7075铝合金钻杆腐蚀的力学性能影响,并通过SEM、EDS分析腐蚀试样表面形貌。综合分析得出以下结论:

(1)在pH值为10、温度70℃的聚磺体系钻井液中,分别加入缓蚀剂SDBS及硫酸镧,提高了7075铝合金钻杆的抗拉强度,延缓了铝合金试样的腐蚀发展。

(2)加入0.03 g/L SDBS的钻井液环境下,

7075 铝合金钻杆抗拉强度达到最高为 571 MPa,增幅最大达 6.73%。

(3)通过 EDS 分析,铝合金中腐蚀的敏感区域是第二相粒子,包括 Cu、Mg、Si 等元素,当第二相粒子脱落后即腐蚀坑形成,在产生腐蚀裂纹时,腐蚀产物主要包含 Al、C、O 等元素组成。

### 参考文献 (References):

- [1] 赵金,陈绍安,刘永刚,等.高性能钻杆研究进展[J].石油矿场机械,2011(5):102-105.  
ZHAO Jin, CHEN Shaoan, LIU Yonggang, et al. Progress on high-performance drill pipe [J]. Oil Field Equipment, 2011 (5): 102-105.
- [2] 操建平,孟庆昆,高圣平,等.深井、超深井钻杆技术的研究[J].机电产品开发与创新,2012,25(2):28-30.  
CAO Jianping, MENG Qingkun, GAO Shengping, et al. The techniques of drill pipe in deep well and ultra-deep well [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2012, 25(2): 28-30.
- [3] 孙建华,梁健,王立臣,等.深部钻探铝合金钻杆开发应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):34-39.  
SUN Jianhua, LIANG Jian, WANG Lichen, et al. Development and application of aluminum alloy drill rod in deep drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(4): 34-39.
- [4] 潘复生,张津,张喜燕,等.轻合金材料新技术[M].北京:化学工业出版社,2008:5-6.  
PAN Fusheng, ZHANG Jin, ZHANG Xiyan, et al. New technology of light alloy materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 5-6.
- [5] 刘宝昌,李闯,张弛,等.冷组装铝合金钻杆螺纹副力学性能测试及失效分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):13-17.  
LIU Baochang, LI Chuang, ZHANG Chi, et al. Mechanical performance test and failure analysis on cold assembled aluminum alloy drill pipe thread pair [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6): 13-17.
- [6] 鄢泰宁,薛维,卢春华.铝合金钻杆的优越性及其在地探深孔中的应用前景[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(2):27-29.  
YAN Taining, XUE Wei, LU Chunhua. Superiority of aluminum alloy drill pipe and its application prospects in deep holes for geological exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(2): 27-29.
- [7] 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.
- [8] 李振亚,秦学,余远彬,等.含镓、锡的铝合金在碱性溶液中的阳极行为[J].物理化学学报,1999,15(4):381-384.  
LI Zhenya, QIN Xue, YU Yuanbin, et al. The electrochemical behavior of Al alloys containing Tin and Gallium in alkaline electrolytes [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 1999, 15(4): 381-384.
- [9] 王振林,唐丽文,杨惠.铝的阳极氧化工艺与氧化膜性能[J].轻合金加工技术,2010,38(2):45-48,55.  
WANG Zhenlin, TANG Liwen, YANG Hui. Aluminum anodizing process and performances of the anodic film [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2010, 38(2): 45-48, 55.
- [10] BERNARD J, CHATENET M, DALARD F. Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques—Part I. Rotating ring-disk study [J]. Electrochimica Acta, 2006, 52(1): 86-93.
- [11] 梁健,张金昌,尹浩,等.钻井利器之“铝合金钻杆”[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):1-3.  
LIANG Jian, ZHANG Jinchang, YIN Hao, et al. An efficient drilling tool aluminum alloy drill pipe [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(5): 1-3.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ARMSTRONG R D, BRAHAM V J. The mechanism of aluminium corrosion in alkaline solutions [J]. Corrosion Science, 1996, 38(9): 1463-1471.
- [15] L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, V. M. Klyarovskii, et al. Orfanova. Corrosion behavior of aluminum drill pipe under interoperation storage conditions [J]. Soviet Materials Science: a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov / Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1985, 21(1): 83-84.
- [16] 李闯.铝合金钻杆材料在钻井液中腐蚀行为与机理研究[D].长春:吉林大学,2018.  
LI Chuang. Study on corrosion behavior and mechanism of aluminum alloy drill pipe materials in drilling fluid [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [17] 张宝宏,丛文博,杨萍.金属电化学腐蚀与防护[M].北京:化学工业出版社,2005:164-178.  
ZHANG Baohong, CONG Wenbo, YANG Ping. Electrochemical corrosion and protection of metals [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 164-178.
- [18] 陈振宇.缓蚀剂开发与应用[M].北京:化学工业出版社,2012:1-9.  
CHEN Zhenyu. Development and application of corrosion inhibitors [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 1-9.
- [19] 仓辉,石文艳,邵景玲,等.稀土离子与表面活性剂对金属的缓蚀协同作用[J].江苏农业科学,2012,40(8):339-341.  
CANG Hui, SHI Wenyan, SHAO Jingling, et al. Synergistic effect of rare earth ions and surfactants on corrosion inhibi-