

# 深部钻探铝合金钻杆开发应用

孙建华<sup>1</sup>, 梁健<sup>1</sup>, 王立臣<sup>2</sup>, 彭莉<sup>3</sup>, 张永勤<sup>1</sup>, 单长智<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 吉林麦达斯铝业有限公司, 吉林辽源 136200; 3. 无锡钻探工具厂有限公司, 江苏无锡 214174; 4. 哈尔滨中飞新技术股份有限公司, 黑龙江哈尔滨 150060)

**摘要:** 铝合金钻杆具有质量轻、比强度高、钻进深度大等特点, 开发并应用铝合金钻杆对提高我国难进入地区钻探施工效率、推动深部科学钻探技术进步以及节能降耗等具有重大现实意义。本文介绍了我国铝合金钻杆批量化、系列化开发与应用的现状, 并重点分析了铝合金钻杆应用技术特点、试制关键技术、室内试验和推广应用情况; 根据铝合金钻杆的实钻应用情况及研发趋势, 提出了我国铝合金钻杆开发的新构想。

**关键词:** 深部钻探; 铝合金; 钻杆; 比强度

**中图分类号:** P634.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7428(2016)04-0034-06

**Development and Application of Aluminum Alloy Drill Rod in Deep Drilling/SUN Jian-hua<sup>1</sup>, LIANG Jian<sup>1</sup>, WANG Li-chen<sup>2</sup>, PENG Li<sup>3</sup>, ZHANG Yong-qin<sup>1</sup>, SHAN Chang-zhi<sup>4</sup>** (1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Jilin Midas Aluminium Industries Co., Ltd., Liaoyuan Jilin 136200, China; 3. Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China; 4. Harbin ZhongFei New Technology Co., Ltd., Harbin Heilongjiang 150060, China)

**Abstract:** Aluminum alloy drill rod has the characteristics of lightweight, high specific strength, deeper drilling depth and so on, its development and application has a great practical significance for improving geological drilling efficiency, promoting scientific drilling technological progress and reducing the energy consumption. This paper presented the current situation of batch and serialization of aluminum alloy rod development and application, and especially introduced aluminum alloy rod about its characteristics of application technology, key trial technologies, laboratory test and popularization. Based on the real drilling application and development trend, new ideas of aluminum alloy rod development for China were put forward.

**Key words:** deep drilling; aluminum alloy; drill rod; specific strength

## 0 引言

铝合金钻杆具有密度小、质量轻、比强度高、所需回转扭矩小、易于搬运等优点<sup>[1-3]</sup>, 其应用可增加现有设备钻深能力, 减少起下钻过程中动力消耗, 加快工程进度, 减轻工人劳动强度。开展深部钻探铝合金钻杆的开发与应用, 对提高我国难进入地区地质勘查钻探工程效率、推动深部科学钻探技术进步以及节能降耗工作具有重大现实意义<sup>[4]</sup>。自20世纪60年代, 铝合金钻杆由瑞典的克芮留斯公司研制成功以来, 至70年代一些国家的铝合金钻杆已经形成系列<sup>[5-7]</sup> (见表1)。截止到本世纪初, 我国铝合金钻杆还主要依赖于进口, 鉴于国内石油钻井、地质钻探装备制造企业机加工工艺技术的提升、野外

表1 各国铝合金钻杆研发规格系列

规格系列	研发单位	国别
Ø33、43、53 mm 普通钻杆, EW、AW、BW 绳索钻杆	克芮留斯公司	瑞典
Ø24、34、42、54 mm 普通钻杆, NW 绳索钻杆, 2 7/8、3 1/2、4、4 1/8、4 1/4、5、5 1/8、5 1/2、5.8 in 等石油钻杆	原专业设计局及威德福 Aquatic 公司	俄罗斯
3 1/2、4、4 1/2、5、5 1/2 in 石油钻杆	铝业公司	美国
3 1/2、4、4 1/2、5、5 1/2、5 7/8、6 in 石油钻杆	铝钻杆公司	美国
Ø52 mm 普通钻杆, Ø60 mm 全铝钻杆, H、P 规格绳索钻杆, Ø95 mm 双壁钻杆, 5 1/2 in 石油钻杆(端部加厚)	勘探技术研究所	中国
5 1/2 in 石油钻杆(中部加厚)	吉林大学	中国
Ø34、42 mm 普通钻杆	冶金部	中国

钻探施工队伍承受能力的限制以及深部钻探技术日益需求等因素, 中国地质科学院勘探技术研究所首

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质勘查深孔用高强度铝合金钻杆开发应用”(编号: 12120113016800); 国家自然科学基金项目“高温环境下铝合金钻杆磨损失效及防护机制研究”(编号: 51404217)

作者简介: 孙建华, 男, 汉族, 1962年生, 研究室副主任, 教授级高级工程师, 从事与钻探工程有关的科研工作, 河北省廊坊市金光道77号, sjhiet@qq.com。

先提出了“铝合金钻杆应逐步完成其批量化、系列化和低成本的开发应用”。目前,经多轮立项研究,铝合金钻杆已初步形成系列(见图 1),包括  $\text{O}34$ 、 $42$ 、 $52$  mm 普通钻杆, $\text{O}60$  mm 水文及环境地质评价钻孔抽水与压水试验用全铝钻杆, $\text{O}91$ 、 $114$  mm 绳索取心钻杆, $\text{O}95$  mm 反循环钻进用双壁钻杆, $\text{O}147$  mm 石油及科学深部钻探用钻杆。本文主要介绍了铝合金钻杆的技术特点,并重点分析了我国铝合金钻杆批量化、系列化试制的关键技术、室内试验和生产应用等情况;根据铝合金钻杆的实钻应用情况及研发趋势,提出了我国铝合金钻杆研发的新构想。

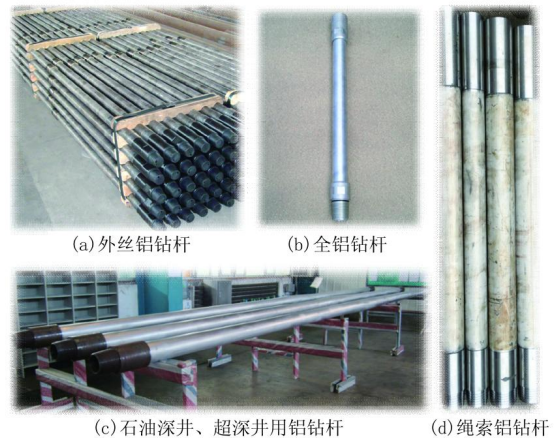


图 1 系列化铝合金钻杆

## 1 应用技术特点与试制关键技术

### 1.1 铝合金钻杆应用技术特点

铝合金钻杆作为难进入地区、大位移井、定向井、超深井及深部科学钻探中钻杆柱设计优选方案之一<sup>[8-10]</sup>,已成为国内外同行关注的热点。铝合金钻杆技术是苏联 CF-3 科学超深井三大技术特色之一<sup>[11]</sup>,在 CF-3 科学超深井中,铝合金钻杆为提高人类向地下空间进军的能力做出了巨大的贡献。

同时,为了解决钢钻杆氢脆化断裂这一难题,铝合金钻杆在塔里木油田哈拉哈塘区块哈 15 井顺利钻进至 6515 m,并完成进尺 4983 m。在西伯利亚 834R/87 水平井中,与钢钻柱相比,采用的铝合金复合钻柱体系具有明显的技术优势(见表 2)<sup>[12]</sup>。与通常采用的钢质钻杆相比,铝合金钻杆应用具有如下一系列的技术特点。

表 2 不同钻柱体系性能对比

钻柱体系	钻柱浮重/kN	扭矩/(kN·m)	大钩载荷/kN	总摩阻/kN	循环压降/MPa	钻杆规格/mm	井深/m	垂深/m
钢钻柱	1348	32.30	1519	616	20.10	$\text{O}127 \times 9.17(12.70)$	4264	2884
铝钻柱	648	17.40	684	270	16.60	$\text{O}147 \times 13$	4264	2884
对比值	2.08	1.86	2.22	2.28	1.21			

(1) 当钻进同一深度时,可降低钻机和绞车能力的要求,减小整套设备体积大小、功率要求以及起下钻时间等。

(2) 当钻孔轴线偏离垂直线时,由于整体钻杆柱质量轻,钻杆对井壁和套管的侧向压力小,管材磨损少,同时降低了孔内事故发生的概率。

(3) 当处理铝合金钻杆事故时,用一般牙轮钻头即可将井内铝合金钻杆柱“消灭掉”。

(4) 铝合金钻杆柱表面的液体阻力系数较钢钻柱低,可以减少钻杆柱部分的流体压力损失;同时,铝合金材料在  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等腐蚀环境中的稳定性较佳。

### 1.2 试制关键技术

铝合金钻杆制造工艺与钢钻杆加工技术有所区别,其有许多独特的工艺方法。在探索铝合金钻杆批量化试制进程中,应重点突破和解决以下关键技术。

#### 1.2.1 杆体端部加厚技术

铝合金钻杆用铝管属无缝管,管体挤压过程中由于挤压强度大、生产效率低,需配备大吨位双向挤压机;同时,挤压出的管体同轴度和壁厚偏差较大等,致使成品合格率低,应对固定挤压垫、挤压针、挤压剂配比以及挤压工艺进行批量的试验研究。一般来讲,模具的设计可根据现有普通无缝管材的方案计算其收缩率,工作带长度根据预挤压铝管壁厚计算。同时,应注意针对内表面粗糙问题,降低铸锭加热温度,在挤压过程中控制挤压速度;针对内表面起皮及缩径问题,通过改变针尖的运动方式以及更改针尖形式未加以解决。

#### 1.2.2 杆体热处理与矫直技术

热处理固溶阶段应采用大型的立式淬火炉,以防止固溶后的温度变形,同时应严格控制加热温度,要求加热温度高度均匀,固溶温度应保证  $\pm 2$  °C 的精确度。固溶后,进行拉伸矫直以消除纵向弯曲并

去应力以提高其力学性能,固溶和矫直之间的时间间隔不应超过12 h。最后,进行铝合金管材的人工时效及相关技术性检验。

### 1.2.3 螺纹加工技术

与钢钻杆相比,铝钻杆螺纹加工没有原则上的区别,铝合金材料因硬度低,接头螺纹在加工过程中,应保证较高的光洁度及尺寸公差,并无裂口、缺肉、毛刺以及有损螺纹连续性和强度的缺陷,同时可为后续的杆体与接头“冷”“热”装配连接做好准备。

### 1.2.4 “冷”、“热”装配技术

铝合金钻杆杆体与钢接头的连接装配方法一般

有两种,即“冷装配”和“热装配”。“冷装配”中铝合金钻杆与钢接头连接部位具有更高的抗扭强度以及螺纹根部具有较小的接触应力,且不存在“热装配”中过高的装配温度可能改变铝合金内部微结构的危险<sup>[13]</sup>。“热装配”法,是将钢接头加热到一定温度使其膨胀,铝杆体冷却至一定温度使其收缩,随后将钢接头装配至铝杆体上雾化冷却后实现必要的预紧度,其可获得比“冷”装配更好的密封性,可有效地避免高泵压条件下螺纹漏水现象的发生。

铝合金钻杆制造技术工艺流程参见图2。

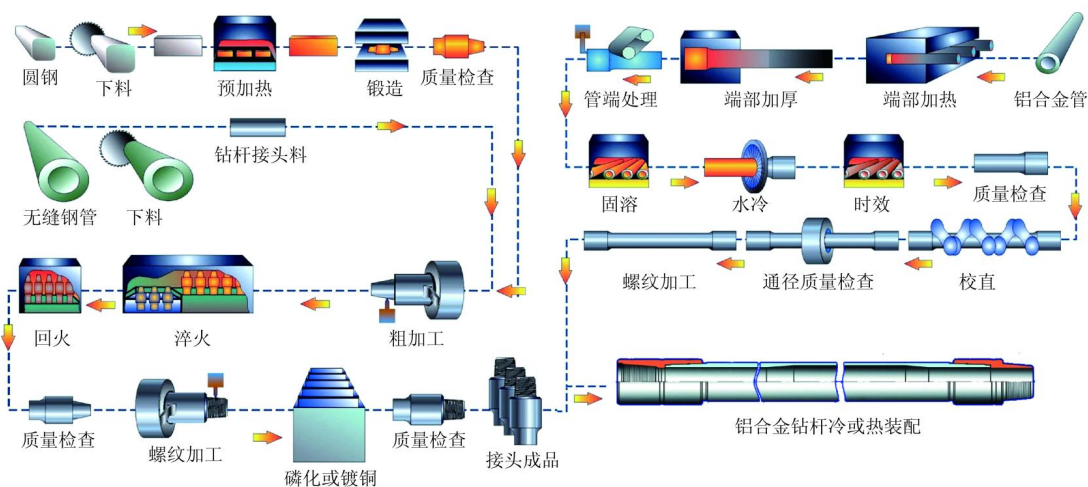


图2 铝合金钻杆制造技术工艺流程

## 2 机械性能测试

### 2.1 标准试样性能测试

#### 2.1.1 试验材料

试验选用了高强度铝合金管材,即7E04、7075和2024三种铝合金管材。

#### 2.1.2 试验方法

##### 2.1.2.1 管材抗拉试验

试验对铝合金管材按相关标准规定的几何尺寸进行切割剖样,将剖样置于电液伺服万能试验机上进行抗拉试验,试验后读取其屈服强度、抗拉强度以及测量断后伸长率,试验严格遵循国家标准《金属材料室内拉伸试验方法》(GB/T 228—2002)进行。

##### 2.1.2.2 冲击韧性试验

试验按规定的几何形状及尺寸制作试样,并置于试验机上,缺口背向打击面放置,摆锤一次打击式样后,测定试样室温状态下的吸收能量,试验严格遵循国家标准《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》

(GB/T 229—2007)进行。

##### 2.1.2.3 腐蚀试验

试验参照标准《石油天然气工业 铝合金钻杆》(GB/T 20659—2006)进行,将管材切割成一定高度的环状试件,打磨、清洁、干燥、称重后,常温下放入3种不同pH值的特定溶液中,72 h后取出,在经清洗、除垢、晾干后再称重,计算腐蚀速率。

##### 2.1.3 试验结果分析

从表3中可以看出,铝合金钻杆机械性能接近或略低于普通地质钢钻杆,但在密度为 $1.2 \text{ g/cm}^3$ 泥浆中,屈服极限与其容重的比值则是铝合金钻杆远远大于钢钻杆,即铝合金钻杆的比强度较大。也就是说,对于同一台钻机,当使用同一规格的钻杆,铝合金钻杆钻进深度远大于钢钻杆;当钻进同一深度时,可降低钻机和绞车能力的要求,减小整套设备体积、功率要求。

从表4中可以发现,铝合金钻杆在似盐水泥浆中性与酸性环境下几乎没有腐蚀;与酸性环境下相比,

表 3 基本力学参数对比

材料	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	极限强度 $\sigma_{ult}/\text{MPa}$	延伸率 $\delta/\%$	冲击 功/J	耐温/ $^{\circ}\text{C}$	屈服强度与容 重比 $\sigma_{0.2}/\gamma/\text{m}$	来源
7E04	585	645	10.2	4	<120	36563	文献 4
7075	530	584	12.9	8	<120	33126	本文
2024	375	454	15.7	11	<160	23734	本文
DZ60	590	770	12.0			8940	文献 4

表 4 管材腐蚀速率对比

腐 蚀 环 境	腐蚀前质量/g			腐蚀后质量/g			腐蚀速率/ $(\text{g} \cdot (\text{m}^2\text{h})^{-1})$		
	7E04	2024	DZ60	7E04	2024	DZ60	7E04	2024	DZ60
pH 值 2.5 (5% NaCl + $\text{CH}_3\text{COOH}$ )	28.9	45.3	58.4	28.8	45.3	57.5	0.03	无腐蚀	0.270
pH 值 7 (5% NaCl)	29.0	48.5	69.7	29.0	48.4	69.4	无腐蚀	0.02	0.080
pH 值 11 (5% NaCl + NaOH)	28.7	43.6	61.3	27.2	42.1	61.2	0.43	0.33	0.029
来源	文献 4	本文	文献 4	文献 4	本文	文献 4	文献 4	本文	文献 4

36 MPa 的清水,维持 20 min 后泄压,观察钻杆螺纹连接处是否有漏水现象,试验参照《ISO 15546—2011 石油天然气铝合金钻杆》。

螺纹副抗拉试验(参见图 3a)。将 2 根(或 3 根)铝合金钻杆以一定的上扣扭矩连接成一双根(或立柱),将其装夹于拉伸矫直机上进行全尺寸抗拉强度试验。

螺纹副抗扭试验(参见图 3b)。将铝钻杆装卡在液压静扭试验机上,一次性加载扭矩(从小逐渐增大),直至铝钻杆螺纹连接处断裂或脱扣后终止。

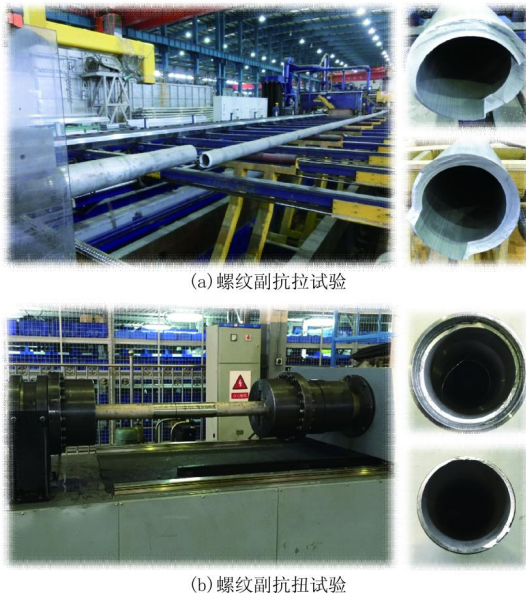


图 3 铝钻杆台架性能试验

### 3 生产应用情况

1973 年,冶金部组织有关单位开展了铝合金钻杆研制及钻进试验工作。先后研制成功 150 铝合金

在碱环境下铝合金钻杆的腐蚀速率相对较大;与 DZ60 钢腐蚀特性相比,铝合金钻杆在酸性、中性(或弱碱性)环境下具有较好的抗腐蚀性能。

### 2.2 全尺寸钻杆性能测试

螺纹副保压试验。将铝钻杆与闷头连接后置于耐压装置中,通过控制台控制增压泵向钻杆内打入

的  $\text{O}33.5 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$  和  $\text{O}42 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$  普通钻杆 3 批<sup>[1]</sup>。其后,在湖南锡矿山矿务局、辽宁红透山铜矿、铜陵有色金属公司、广西冶金地质勘探公司 215 队及广东冶金地质勘探公司 934 队等单位进行了野外生产试验,累计进尺近 7000 m,最大孔深达 630 m,总纯钻进时间近 6000 h。野外生产试验表明,国产铝钻杆基本能满足金刚石钻进技术要求,为进一步提高铝钻杆寿命应开发出更加符合钻探特殊要求的高质量铝管坯料;同时,还应加强铝钻杆耐磨性能的研究工作。

2009 年,中国地质科学院勘探技术研究所立项进行了“地质岩心钻探铝合金钻杆研究”的工作,在高性能铝合金管材研制、管材热处理工艺研究、钻杆结构设计中,克服了众多难题及技术“瓶颈”,取得了大量的基础性数据。2010 年,在安徽地勘局 325 地质队承担的淮北彭桥煤矿区的野外生产试验中, $\text{O}52 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$  铝合金普通钻杆应用取得了良好的效果,使用最大孔深 960 m; $\text{O}95 \text{ mm}$  反循环钻进用双壁钻杆在大庆钻探工程公司特种装备分公司进行了野外试验,试验工作量为  $62 \text{ m}^{[14]}$ 。生产试验表明,试制的 2 种铝合金钻杆为岩心钻探施工及物探爆破孔快速钻进提供了必要的技术支撑;同时,推进了我国勘查新技术、新装备等快速勘查实用化技术的开发。

2013—2014 年,中国地质科学院勘探技术研究所再次立项进行了“地质勘查深孔用高强度铝合金钻杆开发应用”的研究工作。同年, $\text{O}52 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$  铝合金普通钻杆配合高原生态环境脆弱区综合钻探技术应用示范,在四川诺尔盖铀矿区进行了野

外生产试验,共使用200回次,累计进尺858.42 m,最大使用孔深813.13 m,使用孔段为251.02~286.72 m,373.3~813.13 m。此次试验充分体现了铝合金钻杆在海拔高、山势险峻、地形复杂、自然条件恶劣、地理位置偏远、交通不便的特殊地带钻探施工时,在减少钻机动力消耗,降低钻探施工难度,提高钻探效率,减轻工人劳动强度等方面的技术优势;Ø60 mm全铝轻合金钻杆结合某研究院外协任务,在新疆吐鲁番雅满苏镇水文及环境地质评价工作钻孔水文压力试验中进行了应用,该规格全铝钻杆成功代替了国外进口产品,表现出了综合性能好的技术特性,且产出价格仅为国外产品的75%左右。

2015年,Ø147 mm科学钻探用铝合金钻杆结合松辽盆地科学钻探工程进行了野外生产试验,“松科二井”预定完钻井深6400 m,是我国目前最深的大陆科学探井,该批铝合金钻杆共下井21回次,累计进尺233.13 m,井下使用时间634 h(约27天),使用井段为2966.11~3199.24 m,本次生产试验是我国自主开发的科学深井铝合金钻杆在国内的首次应用,试验将持续进行下去,在考核国产铝合金管材强度、安全性的同时,观察验证抗高温、耐磨损及耐腐蚀能力,为制造技术的完善优化提供数据。2016年,经阳极氧化、微弧氧化和表面超声滚压处理的H规格绳索取心铝合金钻杆正在辽宁金羊盆地地质调查井“羊D1井”中进行野外生产试验;同时,N、H规格绳索取心铝合金钻杆还将结合青南藏北高原冻土区天然气水合物资源勘查进行野外生产示范,以缓解机台搬迁困难、减轻工人劳动强度以及合理匹配钻探装备等。



图4 Ø147 mm铝合金钻杆在“松科二井”生产试验

#### 4 构想与展望

虽然铝合金钻杆表现出了优异的技术优势,然

而深入剖析现阶段铝合金钻杆技术的不足之处,是实现设计制造长寿命、高可靠性、高耐磨性铝合金钻杆的必要前提和重要基础。目前,铝合金钻杆技术的薄弱之处有以下3个方面。

(1) 硬度因素。铝合金钻杆的材料硬度较低,大约是钢钻杆的 $1/2 \sim 2/3$ <sup>[15]</sup>,在钻进过程中铝合金钻柱与井筒摩擦磨损频繁,导致钻杆偏向磨损以及易产生划痕和压痕等损伤,致使钻具承载力降低,加大了井内事故隐患<sup>[16-18]</sup>。前苏联CT-3科学超深井中,曾做过一项统计表明:在井深7200~11500 m井段,铝合金钻杆的平均使用寿命是钢钻杆的 $1/2 \sim 4/5$ <sup>[15]</sup>,这与二者间的自身硬度差别十分吻合;同时,这也预示着钻杆磨损对钻井安全影响至关重要。

(2) 热稳定性因素。一般来讲,正常的地温梯度为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,随着井深的不断增加、地温的持续升高,科学深井、超深井井底温度将达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,因铝合金钻杆在高温条件下具有力学性能衰减的特性,开展耐高温铝合金钻杆的研究已迫在眉睫,以解决井内高温带来的难度更大、要求更高的钻井难题。据相关资料报道,美国铝业公司最近研制出了一种新型的耐高温铝合金,能经受 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温而不易产生热变形,且可保持长期稳定,短时热稳定温度可达 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;俄罗斯某科研单位也研制出了能耐 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温的铝合金材料<sup>[11]</sup>。

(3) 腐蚀因素。通常,铝合金与其他金属一样,也面临着严重的腐蚀问题。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<sup>[19-20]</sup>。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;同时,钻柱还将承受自重带来的较大的拉伸应力,加之其与井壁的摩擦磨损,复杂的服役工况条件致使铝合金钻杆极易发生腐蚀失效。

为此,在我国铝合金钻杆初步形成系列化的背景下,应加强高温环境下铝合金钻杆性能的研究,以实现铝合金钻杆技术的优化,设计制造出长寿命、高可靠性、高耐磨性、高耐蚀性铝合金钻杆。同时,为满足我国《国土资源“十二五”科学和技术发展规划》中提出实施的万米科学深钻计划,提供理论支撑和技术支持。

## 参考文献:

- [1] 胡福昌. 铝合金钻杆试验概况[J]. 地质与勘探, 1978, (4): 52-54.
- [2] M. Y. Gelfgat, V. S. Basovich, A. Adelman. Aluminum alloy tubules for the oil and gas industry[J]. World Oil, 2006, 227(7): 45-51.
- [3] M. Y. Gelfgat, V. S. Basovich, V. S. Tikhonov. Drill String with aluminum alloy pipes design and practices [A]. In: IADC/SPE Drilling Conference (Amsterdam). Paper no. 79873, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Alcoa Inc. Aluminum Alloy Drill Pipe (technical guide version 2.0) [J/OL]. [http://www.alcoa.com/oil\\_gas/en/pdf/alcoa\\_oil\\_and\\_gas\\_aadp\\_drill\\_pipe\\_technical\\_guide\\_brochure.pdf](http://www.alcoa.com/oil_gas/en/pdf/alcoa_oil_and_gas_aadp_drill_pipe_technical_guide_brochure.pdf), 2013-11-25.
- [7] Aluminum Alloy Drill Pipe, Inc. Drill faster, farther, deeper [J/OL]. <http://aluminumdrillpipe.com/ADP.Broucher.pdf>, 2013-11-25.
- [8] 郝瑞. 钻井工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 107-110.
- [9] 刘希圣. 钻井工艺原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988: 269-272.
- [10] 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.
- [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.
- [12] M. Y. Gelfgat, V. S. Basovich, et al. Aluminum vs. Steel: Preventing Drill String Buckling when Drilling Horizontally [J]. Oil & Gas Eurasia, 2007, (6): 32-38.
- [13] C. Santus, L. Bertini, M. Beghini, A. Merlo, A. Baryshnikov. Torsional strength comparison between two assembling techniques for aluminum drill pipe to steel tool joint connection [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86: 177-186.
- [14] 孙建华, 梁健, 张永勤, 等. 地质钻探高强度铝合金钻杆研制及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(7): 5-8.
- [15] 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.
- [16] 王小红, 郭俊, 闫静, 等. 铝合金钻杆材料生产工艺及磨损研究进展[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(S1): 1-6.
- [17] 唐继平, 狄勤丰, 胡以宝, 等. 铝合金钻杆的动态特性分析及其磨损机制[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 684-688.
- [18] 胡以宝. 基于实际井眼轨迹的钻柱动力学特性有限元分析[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [19] H P Godard, W B Jepson, M R Bothwell, et al. The Corrosion of Light Metals [M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [20] D V Mahindru. Protective treatment of aluminum and its alloys [J]. Global Journal of Research in Engineering, 2011, 11(3), 10-14.