

地质钻探高强度铝合金钻杆研制及其应用

孙建华¹, 梁 健¹, 张永勤¹, 刘秀美¹, 彭 莉², 王 铁², 朱彦彬³, 王汉宝¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 地质矿产部无锡钻探工具厂, 江苏 无锡 214174; 3. 安徽省地质矿产勘查局 325 地质队, 安徽 淮北 235037)

摘 要: 铝合金钻杆的设计制造技术属高新技术范畴, 世界上只有俄罗斯、美国等少数发达国家能够批量生产。简要介绍了我国地质钻探用铝合金管材研制、铝合金钻杆制造关键技术及野外试验情况, 并对今后铝合金钻杆的研发和应用方向提出了建议。项目工作成果对今后我国开发特深孔铝合金绳索取心钻杆和超深孔铝合金钻杆具有重要价值。安徽彭桥煤矿区的铝合金钻杆钻探试验最大孔深超过 1000 m, 应用效果良好, 开辟了我国地质钻探铝合金钻杆在中深孔应用的先河。

关键词: 地质钻探; 7E04 铝合金; 外丝钻杆; 钢接头; 钻杆柱

中图分类号: P634.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2011)07-0005-04

Development of High-strength Aluminum Alloy Drill Rod and Its Application in Geological Drilling/SUN Jian-hua¹, LIANG Jian¹, ZHANG Yong-qin¹, LIU Xiu-mei¹, PENG Li², WANG Tie², ZHU Yan-bin³, WANG Han-bao¹ (1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Wuxi Drilling Tools Factory, Wuxi Jiangsu 214174, China; 3. 325 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Huaibei Anhui 235037, China)

Abstract: The paper introduced the study on high-strength aluminum alloy drill rod and its application in geological drilling. The results shows that it has better mechanical properties with the maximum hole depth of more than 1000m in drilling test of aluminum alloy drill rod.

Key words: geological drilling; 7E04 aluminum alloy; external threaded drill rod; steel tool joint; drilling string

1 概述

铝合金钻杆的制造技术对于钻探装备制造行业尚属高新技术范畴。目前, 世界上只有俄罗斯、美国、日本及法国等少数发达国家能够批量生产。我国石油勘探用铝合金钻杆的研发还处于起步阶段, 地质钻探用高强度铝合金钻杆的研制尚属空白。开展地质钻探铝合金钻杆研究, 对提高我国西部难进入地区地质调查钻探工程效率、推动地质钻探科学技术进步以及节能降耗工作具有重大现实意义。囿于国内地质钻探装备制造企业条件和野外钻探施工单位承受能力, 地质钻探用铝合金钻杆应从普通钻杆起步, 逐步完成系列化的研究与应用^[1]。本文主要介绍了我国地质钻探用铝合金外丝钻杆研制的关键技术及其野外试验情况。试验表明, $\varnothing 52 \text{ mm} \times$

7.5 mm 铝合金外丝钻杆具有较好的综合性能, 在安徽淮北彭桥矿区野外试验中取得了良好的效果。

2 铝合金外丝钻杆的研制

2.1 铝合金管材研制

应用的 7E04 铝合金是在 B95 铝合金的基础上, 通过系统研究化学成分范围对 7E04 合金管材 T6 状态的影响、研究 7E04 合金管材加工过程的组织精细控制技术、强化固溶技术、强韧化时效处理技术, 以解决 7E04 合金 T6 状态管材性能不稳定问题^[2], 为 7E04 合金钻探管材批量生产应用奠定基础。研制出的地质钻探专用铝合金管材, 具有强度和剪切性能高、疲劳性能好并具有适当塑性的特点。7E04 铝合金的化学成分见表 1。

表 1 7E04 铝合金化学成分

化学成份/wt%									其它杂质/wt%		Al
Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Fe	Si	Ti	Ni	单个	合计	/wt%
1.4~2.0	1.8~2.8	0.2~0.6	0.1~0.25	5.0~6.5	0.05~0.25	≤0.1	≤0.05	≤0.1	≤0.05	≤0.1	余量

收稿日期: 2011-04-01

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质岩心钻探铝合金钻杆研究”(1212010916023)

作者简介: 孙建华(1962-), 男(汉族), 山东人, 中国地质科学院勘探技术研究所教授级高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻探工程有关的科研工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, sunjianhua@cniect.com。

2.2 钻杆结构优化设计

应用有限元分析软件,结合非线性有限元法的相关理论,在一定参数条件下,计算得出的铝合金外丝钻杆螺纹副结构应力场仿真结果,用于指导钻杆结构设计。铝合金钻杆采用钢接头连接方式,杆体材料为7E04 铝合金 $\text{O}52 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 管材,端部内外墩粗,可增大螺纹副抗拉、抗扭强度以及增加钻杆耐磨时间;钢接头外径 $\text{O}65 \text{ mm}$,使用优质合金钢并进行激光表面硬化处理,进一步提高其孔内抗磨损性能;与钢钻杆相比,为体现铝合金钻杆密度小、

质量轻,在实施钻探工程作业时,可增加现有钻探设备钻进能力,减少钻机动力消耗,降低钻探施工难度,减轻工人劳动强度的优势,钻杆定尺长度设计为 4.5 m ;基于我国异型变截面管材制造技术的局限,由于铝合金钻杆具有较高的弹性变形,在孔内显正弦或余弦屈曲变形的杆体可能有过度的磨损,且与钢钻杆相比,铝合金钻杆易产生划痕、压痕等损伤,设计一个防磨钢套夹粘于杆体中部^[2]。铝合金钻杆结构见图1。

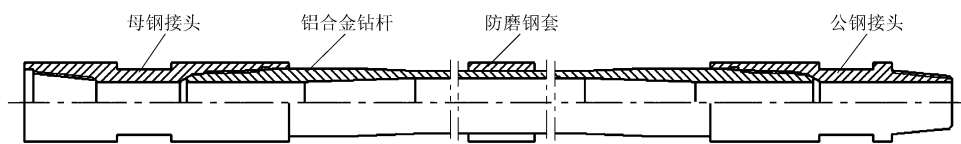


图1 铝合金钻杆结构图

2.3 钻杆性能测试

进行管材剖样的相关试验表明,铝合金外丝钻杆杆体在固溶温度 $470 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、水冷以及人工时效温度 $130 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 、空冷的热处理条件下,其机械强度可以达到最优,即屈服强度 585 MPa 、抗拉强度 645 MPa ,墩粗段表面硬度 286 HB ;进行的抗拉、抗扭破坏试验表明,钻杆的抗拉强度不小于 631 kN ,抗扭转能力超过了 $4900 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。7E04 铝合金外丝钻杆与 DZ60 钢钻杆各项参数对比见表2。

表2 7E04 铝合金外丝钻杆与 DZ60 钢钻杆性能参数对比

管材类型	规格/mm	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	硬度	实重/($\text{kg} \cdot 4.5 \text{ m}^{-1}$)
7E04 铝合金	$\text{O}52 \times 7.5$	2.78	585	645	10.2	HB286	19.9
DZ60 合金钢	$\text{O}50 \times 6.5$	7.85	590	770	12.0	HRC20	38.1

针对7E04 铝合金在似盐水泥浆腐蚀环境下,进行了中性、酸性和碱性的腐蚀对比试验。试验结果表明,7E04 铝合金在中性环境下无腐蚀;与酸性环境下相比,在碱环境下铝合金钻杆的腐蚀速率相对较大;与 DZ60 合金钢腐蚀特性相比,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]。

2.4 钻杆试制加工

2.4.1 钻杆端部墩粗

钻杆端部墩粗采用低温加热、二次成型的方法,即先对钻杆杆体端部进行外加厚后,再进行二次内加厚。该工艺方法的成品合格率达 98% 。由于7E04 铝合金材料的热变形温度低于其固溶温度(即

$\leq 370 \text{ }^\circ\text{C}$),因此,钻杆端部墩粗的低温加热、二次成型工艺方法不会影响其机械性能的改变。

2.4.2 钻杆螺纹加工

为合理分布钻杆螺纹副的受力,铝合金钻杆采用螺纹大小径端部的双锥面(不等锥度)密封设计,可使锥面承载部分钻进扭矩,适当的降低钻杆螺纹处的受力,尽可能的提高钻杆的使用寿命。为此,试制钻杆全部采用专业数控车床进行加工,保证加工精度要求。同时,除应用传统量规外,还采用了量规卡板以保证公母螺纹双锥面的精度要求。

2.4.3 钻杆组合装配

铝合金钻杆杆体与钢接头的连接装配方法一般有2种,即“热装配”和“冷装配”。国外相关研究表明,“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^[3]。为此,专门改造了 Q1319A 型管螺纹车床,加工专用工装,采用管螺纹车床卡盘夹紧钢质锁接头,机械回转施加预扭矩,并通过电流表控制预扭矩大小,以防止过载;钢接头与钻杆杆体螺纹采用高强度固结胶粘接。

3 铝合金外丝钻杆野外试验

3.1 试验矿区概况

$\text{O}52 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 铝合金外丝钻杆在安徽省地质勘查局 325 地质队承担的淮北彭桥煤矿勘探区进行了野外钻探试验。矿区位于淮北市濉溪县境内,南北宽约 2 km ,东西长约 4 km ,面积 8 km^2 。阜夹铁路从矿区北部穿过,东北 5 km 处为京沪铁路,北距

301省道约6 km,区内为平原地貌,乡村道路密布,交通便利。

该区被第四系松散层掩盖,受燕山期构造运动影响,构造复杂,褶皱与断层发育,区内构造以北北东为主,地层主要为奥陶系、石炭系、二叠系、第四系,主要煤层赋存于向斜中。试验钻孔地层以泥岩、细粒砂岩、中粗粒砂岩为主,设计孔深一般为960~1000 m。590~1000 m有3组煤层,除煤层及顶、底板取心外,其它孔段采取全面钻进、40 m/次点取心方式。

机台使用XY-44型立轴钻机(45/37 kW发电机驱动)、BW250/40型变量泥浆泵、18 m四角钻塔等装备。使用水基中低固相泥浆。

3.2 钻进参数优选

分析总结钻进过程中各参数间的基本关系,并根据ZK504钻孔的地质条件及钻孔设计,优选了钻头类型,钻压、转速及泥浆泵量的大小范围。为钻进过程中寻求合理的钻压、转速参数配合,使钻进过程达到最佳的技术经济效果奠定了良好的技术基础。

3.2.1 钻头选型

该钻孔设计孔深960 m,终孔直径91 mm,全孔采取全面钻进、点取心的方式,地层以泥岩、细粒砂岩及中粗粒砂岩为主。为此,选用 $\varnothing 91$ mm三翼刮刀式PDC钻头(见图2),其适用地层范围广、排屑槽大、出刃高及可快速钻进硬夹层。



图2 三翼刮刀式PDC钻头

3.2.2 钻头钻压、转速及泵量选择

在一定范围内,随着钻压和转速的增加,PDC钻头钻速相应增大,但地层硬度的不同,增大幅度不一。在软地层中钻进,钻头主要以剪切破碎岩石,增加转速可明显提高钻速,而钻压对钻速的影响则不十分显著,而且钻压过大可能会导致钻头泥包,使钻速骤减,因此,最佳钻压应在较低的范围;在中等硬度地层中钻进,钻头以剪切、预破碎、犁削等综合方式破碎岩石,因而,钻压对钻速的影响增大,而转速

的增加对钻速影响已不太明显。中等硬度地层研磨性相对较强,钻头切削磨损加快、使用寿命降低,因此,应将转速控制在较低的范围,同时,采用中等钻压、中等钻速,以获得最佳的使用。

一般根据液流上返速度来确定金刚石复合片钻进所需的泵量,由于铝合金外丝钻杆外径比试验孔终孔口径小一个级配,因此,选取较低值即可满足钻进用泵量,如泵量过大不仅增加工作泵压,容易冲蚀孔壁和岩心,还会过量抵消钻压,引起钻具的振动。PDC钻头钻压、转速及泥浆泵量优选参考值见表3。

表3 钻头钻压、转速及泥浆泵量取值范围

岩层性质	钻压 /kN	转速 /(r·min ⁻¹)	泵量 /(L·min ⁻¹)
软、弱研磨性	3.2~5.6	252~336	78~132
中硬、较小研磨性	6.4~14.4	189~252	

3.3 组合钻杆柱

在我国地质钻探施工作业中,中深孔应用铝合金钻杆尚属首次。因此,为确保优质、高效、安全的钻进,综合考虑钻杆柱在孔内的工况、受力、变形协调以及充分验证铝合金钻杆性能等问题,采取组合钻杆柱的方式更为合理^[4,5]。钻杆柱在孔内的工作条件十分复杂与恶劣,在以抗拉强度计算为主的钻杆柱强度设计中,主要考虑由钻杆柱重力、浮重引起的静拉载荷,其他一些载荷(如动载、摩擦力、解卡上提力等)通过一定的设计系数进行考虑。设计的组合钻杆柱见表4。

表4 组合钻杆柱设计结果

钻杆柱组合	规格 /mm	长度 /m	实测质量/(kg·4.5m ⁻¹)	空气中重力 /kN	泥浆中重力 /(1.2g·cm ⁻³) /kN
铝合金钻杆	$\varnothing 52 \times 7.5$	751.5	19.9	33.4	19.0
钢钻杆	$\varnothing 50 \times 6.5$	148.5	38.1	12.6	10.7
加重钻杆	$\varnothing 68 \times 20.0$	57.8	106.7	13.7	11.6
合计		957.8		59.7	41.3

3.4 野外钻探试验过程及分析

首个试验钻孔于2010年10月初开钻,该孔设计深度960 m,开孔直径150 mm,终孔直径91 mm。钻具组合为: $\varnothing 91$ mmPDC钻头+ $\varnothing 68$ mm加重钻杆+ $\varnothing 50$ mm钢钻杆+ $\varnothing 52$ mm铝合金钻杆+六方钢钻杆+水龙头提引器。

ZK504孔钻进至孔深131 m时,下入 $\varnothing 146$ mm套管后,采用 $\varnothing 91$ mmPDC钻头全面钻进;钻进至352.96 m时,试验用铝合金外丝钻杆下孔使用,取代钻杆柱上部部分钢钻杆;钻进到819.67 m,孔内异常,提钻发现钢质钻杆锁接手脱扣,螺纹损坏,致

使下部钻具脱落。机台确定采用铝合金钻杆和正丝公锥打捞,因埋钻起拔不动进行了多次大冲击力晃车和强力起拔,导致后来采用反丝钻杆无法反脱孔内的铝合金钻杆和钢质钻杆。随后的处理事故过程中,因方法不当,事故复杂化,铝合金钻杆、反丝钢钻杆同时多处折断落入孔内,发生严重的“插蜡”事故。经过试验单位研究,确定 ZK504 钻孔在 380 m 处封孔,下入偏心楔,绕过孔内遗留事故钻柱,重新施工,孔号变更为 ZK504-2。ZK504-2 孔钻进至孔深 500 m 时,试验用铝合金外丝钻杆再次下孔使用,至孔深 1010 m。

此处应当说明,从钻孔结构和钻具组合分析, $\text{O}52 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 普通外丝铝合金钻杆在 $\text{O}146 \text{ mm}$ 套管和 $\text{O}91 \text{ mm}$ 钻孔内施工,并不符合最佳技术要求,加之钻机较为破旧,钻柱振动剧烈,对铝合金钻杆来说是一个极具风险的试验环境。但因钻杆试制延期、深孔提钻试验矿区较难落实等情况以及获取极端条件下铝合金钻杆试验数据的考虑,铝合金钻杆的试验还是选择了安徽彭桥煤矿区 ZK504 钻孔。

事故发生前,钢质钻杆曾发生断裂、接箍“吃扣”等情况,但铝合金钻杆从未发生孔内破坏。试验表明铝合金钻杆的综合力学性能更佳。测试数据亦证实,铝合金钻杆的强度不比钢质钻杆差。

彭桥煤矿区钻孔试验还证明,在孔内铝合金杆体折断情况下,现有的事故处理工具——公锥、母锥等基本可用。但如发生严重埋钻事故,公母锥的适应性不佳。

根据机台电流表记录分析,在孔内处理事故进行大冲击力晃车时,钻机瞬时最大输出扭矩多次超过 $8000 \text{ N} \cdot \text{m}$,最终导致钢钻杆与铝合金钻杆同时多处发生折断,打捞上来的部分钻杆杆体、接箍和锁接头的破坏形式见表 5。

表 5 两种钻杆破坏形式

破坏形式	$\text{O}50 \text{ mm}$ 钢钻杆	$\text{O}52 \text{ mm}$ 铝 合金钻杆	原因
接箍劈裂	1 单根		
杆体拉、扭断		2 单根	强扭、长时间多次晃车等
杆体拉、扭塑性变形	1 单根		
钻杆外丝螺纹断裂	1 单根		

对事故处理后杆体损坏的铝合金钻杆锁接头进行了剖样检查。铝合金杆体螺纹齿根完整,未发生破坏。但铝杆体螺纹小端端部发生轻微收缩(塑性变形),铝合金杆体螺纹大端发生弹性变形(线切割后涨开)。

4 铝合金双壁钻杆研制与试验情况

为寻求铝合金钻杆合理应用的经济技术条件,扩大铝合金钻杆应用领域,探索铝合金绳索取心钻杆的制造工艺和应用适应性,研制了 $\text{O}95 \text{ mm}$ 铝合金双壁钻杆。2010 年 8 月,铝合金双壁钻杆在大庆钻井集团物探公司特种装备分公司进行了野外试验。试验地点选择在黑龙江省肇源县松花江畔某河床,地层为砂粒土层。完成物探爆破孔 3 个,进尺 62 m。由于铝合金双壁钻杆为基本外平结构,松散砂层试验中钻杆磨损稍快,同时因钻杆定尺较短,钻杆质量降低幅度不大。

5 结论及建议

5.1 结论

(1) 地质钻探用 7E04 铝合金管材的成功开发,为今后系列化铝合金钻杆研制工作奠定了重要基础;进行的铝合金外丝钻杆螺纹副有限元分析,确定了螺纹副参数优化方向及钻杆测试方案。

(2) 进行的铝合金材料机械性能、腐蚀特性、钻杆低温挤压镦粗工艺、机加工及螺纹副装配工艺等试验研究,取得了重要的技术数据,形成了具有核心竞争力的铝合金钻杆制造专有技术,对今后研制特深孔铝合金绳索取心钻杆柱和超深孔铝合金钻杆柱具有重要的参考价值。

(3) 进行了铝合金钻杆成品静拉、静扭破坏性试验,确定了螺纹副最优机械组配工艺,试制完成了外丝铝合金钻杆和双壁铝合金钻杆。试验表明, $\text{O}52 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 铝合金钻杆抗拉断力不小于 631 kN ,抗扭强度超过 $4900 \text{ N} \cdot \text{m}$,技术性能达到了国际领先水平。

(4) 第一轮野外试验完成钻孔 2 个,最大试验孔深超过 1000 m。野外钻探试验显示了铝合金钻杆回转功耗低、卸扣扭矩小,易于搬运及钻工劳动强度低等优势特点。本次野外试验证明,铝合金钻杆可适用于水文水井深孔钻进、深部煤田钻探、4000 m 以上高原或边远的难进入地区及特深孔钻进。

5.2 存在的问题

项目研究和野外试验中还存在一些尚未解决的技术问题:

(1) 铝合金杆体与钢质接头之间的螺纹副采用了特殊结构和机械紧固工艺,现场更换钢接头困难;

(2) 铝合金杆体强度高、硬度低、耐磨性差,如孔壁有坚硬异物、钻孔弯曲,表面极易产生快速磨损;

(下转第 62 页)

工,根据场区地质资料,建议采用桩侧后压浆法,可以更大的发挥砂层的桩侧摩阻力,合理的减小桩长,在一定程度上降低成本。

(3)对两种支盘桩的竖向承载力结果结合内力图进行分析,在最大承载能力下,这两种桩的桩端承载力已经发挥到了最大(超过2000 kN),并且竖向承载力试验结果均不能满足设计要求。

(4)如果采用两种支盘桩型时应考虑增加桩长或者增加桩数。但根据地质资料分析并结合支盘桩设计要求,在增加桩长的情况下没有符合要求的桩端持力层。因此只有考虑增加桩数以提高群桩的承载力,但应充分考虑桩间距引起的群桩效应。

(5)三岔双向挤扩桩因采用切削成孔易造成塌孔、孔内泥浆含砂量高、沉渣不易控制的缺点;支盘挤扩桩工艺施工采用挤压成盘,因此对孔壁较稳定,但也会产生一定的沉渣,对孔内泥浆有一定的恶化。因此建议大规模工程桩施工时若采用两种挤扩工艺进行施工时泥浆若需循环利用应采取净化措施,进行除砂处理。

(6)通过对钻孔过程中的地层分布情况分析,场区部分范围内存在着较厚的软塑~可塑状态的粘性土层,当采用挤扩支盘工艺时,成孔时容易造成局部缩孔,并且挤扩、支盘效果不明显,在此范围内不宜采用支盘桩。建议在粘性土层较薄、较易布置支盘的场地区域采用支盘桩,但是在存在较厚粘性土层的区域建议采用钻孔灌注桩加后注浆施工工艺。

(7)场区未进行地基处理,因此3种桩型水平承载力试验成果(240 kN)均达不到设计要求;后期施工前应对场区20 m范围内吹填砂进行处理,增加其密实度;主要方法有振冲碎石桩法和强夯法。处理后如仍达不到设计要求,可以采用桩头增设橡胶垫来削弱水平力对桩的影响。

(8)综合上述结果,并且考虑到对场地(圆形建筑场地)的要求,后压浆钻孔灌注桩工艺承载力满足设计要求并且能够有效减少工艺交叉施工的相互影响,最利于大规模施工。

(9)通过本次试桩,证明了旋挖钻机成孔工艺普遍适合本工程地层地质条件,另外随着国内旋挖成孔技术的不断发展,旋挖钻机成孔深度可以达70 m以上,可以有效解决施工桩长的问题;并且旋挖钻机成孔有着工效较高、泥浆量少、成孔泥皮薄、桩承载力较传统工艺高、文明施工易保证、流水化作业水平高的特点。

参考文献:

- [1] GB 5007-2002, 建筑地基基础设计规范[S].
- [2] JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S].
- [3] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S].
- [4] JGJ 106-2003, 建筑桩基检测技术规范[S].
- [5] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] 王雪峰, 吴世明. 基桩检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 史佩栋, 顾晓鲁, 高大钊. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(上接第8页)

(3)铝合金管材生产技术较复杂,钻杆制造工艺难度大、小批量生产成本高。

5.3 建议

(1)加大铝合金钻杆研究、推广扶持力度,不断提升研究和应用水平。同时,从产品研制和野外应用等方向入手,摸索铝合金钻杆磨损防范技术措施。

(2)通过开发变截面铝合金管材制造技术及其批量化生产工艺,提高铝合金钻杆使用时间,降低铝合金管材及钻杆产品制造成本。

(3)铝合金钻杆的使用,工艺规程上有一些特殊性。铝合金钻杆质量轻,全面钻进和大直径钻孔条件下因钻压较大应与钢钻杆组合使用,其几何尺寸尽量与钢质钻杆匹配;除顶驱钻机外,全液压动力头、回转器立轴钻机均需要使用钢质主动钻杆;与钢钻杆相比,泥浆密度对铝合金钻杆的影响因子大。

铝合金钻杆孔内事故预防与处理、磨损形态、报废判断依据应有所不同。因此,今后应加强地质钻探用铝合金钻杆的应用研究及技术经济比对。

参考文献:

- [1] 梁健, 刘秀美, 王汉宝. 地质钻探铝合金钻杆应用浅析[J]. 勘察科学技术, 2010, (3): 62-64.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王达. 深孔岩心钻探的技术关键[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 35(S1): 1-4.
- [5] 张伟. 特深岩心钻孔套管程序和钻具级配等问题的探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(11): 1-5.