

地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究

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

[摘要]与钢钻杆相比, 铝合金钻杆具有比强度高、刚度低、耐腐蚀性好等优点, 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。开展地质钻探铝合金钻杆研究, 对提高我国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。本文介绍了 7E04 铝合金管材研制的关键技术、铝合金钻杆的结构设计, 进行了钻杆热处理、基本力学性能、腐蚀特性的室内试验研究。研究结果表明 7E04 铝合金钻杆在一定热处理条件下, 屈服强度可达 585 MPa、抗拉强度 645 MPa; 在似盐水泥浆腐蚀环境下, 具有较好的耐腐蚀性。

[关键词]地质钻探 7E04 铝合金 钻杆 钢接头

[中图分类号]634.5

[文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2011)02-0304-05

Liang Jian, Peng Li, Sun Jian-hua, Wang Tie, Zhang Yong-qin, Wang Han-bao, Liu Xiu-mei.
Development of the aluminum alloy drill rod and laboratory tests[J]. Geology and Exploration, 2011, 47
(2): 304-308.

1 引言

铝合金钻杆因其具有密度小、重量轻、比强度高、弹性变形大, 所需回扭转矩小、抗冲击能力强、耐腐蚀性好、与孔壁间摩擦阻力小、易于搬运等优点(胡福昌, 1978; M. Y. Gelfgat 等, 2003; M. Y. Gelfgat 等, 2006), 成为难进入地区、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(刘希圣, 1988; 郝瑞, 1989; 鄢泰宁等, 2010)。自上世纪 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 年代在比利时、加拿大、美国和前苏联等国得到推广应用。一些国家的铝合金钻杆已经初步形成系列, 如瑞典克芮留斯公司的 $\Phi 33$ 、 $\Phi 43$ 、 $\Phi 53$ 普通钻杆和 EW、AW、BW 绳索取心钻杆; 比利时 Boart Exploration Service 公司的 Alu $\Phi 76$ 绳索取心钻杆; 美国 Raynoldas Meta 公司的 APIP $\Phi 101$ 、 $\Phi 114$ 铝合金钻杆; 前苏联 ЛБРН $\Phi 24$ 、 $\Phi 34$ 、 $\Phi 42$ 、 $\Phi 54$ 、 $\Phi 68$ 铝合金钻杆和用于深孔取心钻进的

ТБЛ- $\Phi 71$ 铝合金钻杆等。

我国西部地区是新一轮国土资源大调查地质调查的主要区域。该地区多是海拔高、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, 地质钻探施工作业困难, 甚至有些勘查区域无法施钻(孙建华等, 2007)。在这些难进入地区应用铝合金钻杆实施钻探工程作业, 可增加现有钻探设备钻进能力, 降低钻机动力消耗, 减少货物搬运质量, 减轻工人劳动强度, 同时还可降低施工难度, 提高钻探效率。因此, 开展地质钻探铝合金钻杆研究, 对于提高我国难进入地区地质调查钻探工程施工效率、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条件和野外钻探施工单位承受力, 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。本文将针对 7E04 铝合金管材进行钻杆的结构设计, 完成钻杆的热处理、基本力学性能、腐蚀特性的室内试验研究, 为后续野外钻孔示范工程提供重要性的指标数据, 以确定合理的钻探工艺参

[收稿日期]2010-06-29; [修订日期]2010-11-06; [责任编辑]郝情情。

[基金项目]国土资源部国土资源大调查地质调查项目(编号:1212010916023)资助。

[第一作者]梁 健(1980年-), 男, 毕业于兰州大学地质工程专业, 获硕士学位, 工程师, 现主要从事与钻探工程有关的科研工作。E-mail: raul9942718@163.com。

数。

2 铝合金管材研制的关键技术

地质钻探铝合金钻杆研究中,高性能铝合金管材的研制、钻杆固溶及时效热处理工艺、结构设计及杆体与接头间螺纹副连接工艺是项目研究工作中的四个关键技术问题(梁健等,2010)。本文应用的7E04铝合金是在B95铝合金的基础上,通过合金成分优化、熔体净化及新的热处理工艺,而研制出的地质钻探专用铝合金管材,7E04铝合金的化学成分见表1。该合金研究的关键技术及结果包括:

表1 7E04 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 7E04 aluminum alloy

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	

(2) 熔铸工艺。确定了熔铸工艺的主要参数,采用精炼剂和通氩气精炼、过滤炉过滤提高熔体的纯度,采用Al-Ti-B细化剂保证铸锭内部质量。

(3) 均匀化退火工艺。研究均匀化退火制度对产品性能的影响及合金的过烧温度,确定最佳均火工艺。铸锭均匀化退火制度为455~470℃、24~48h,出炉空冷。

(4) 挤压工艺。研究现有挤压机的挤压参数及润滑剂。

3 铝合金钻杆室内试验

3.1 钻杆结构设计

铝合金钻杆采用钢接头连接方式(H. Rabia, 1985; R. W Schutz 等, 1998; J. E Smith 等, 2000; ISO 15546, 2002; 刘振铎等, 2003), 杆体材料为7E04铝

(1) 合金成分优化。研究了主要成分的最佳搭配和不同Fe、Si杂质对各项性能的影响,确定了内控标准。7E04合金主元素Zn、Mg、Cu应控制在中、上限;7E04合金的各项性能指标随着Fe、Si含量的增加而逐渐降低;7E04合金的Si对各项性能的不利影响大于Fe的作用, Si含量的升高更容易导致KIC的大幅度降低;7E04合金KIC的大小与Fe和Si的总含量有关, Fe+Si总量高时, KIC的危害大于Fe对KIC的单独作用, 因此铸造时要严格控制Fe、Si的含量, 尽可能提高合金纯度, 减少组织中脆性铁-硅化合物质点。

合金Φ52×7.5 mm管材,端部内外墩粗,试图增大螺纹副抗拉、抗扭强度以及增加钻杆耐磨时间;钢接头外径Φ65 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、重量轻,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,减轻工人劳动强度定的优势,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(唐继平等,2010),设计一耐磨钢套夹粘于杆体中部。铝合金钻杆结构图,见图1。

铝合金钻杆杆体与钢接头的连接装配方法一般

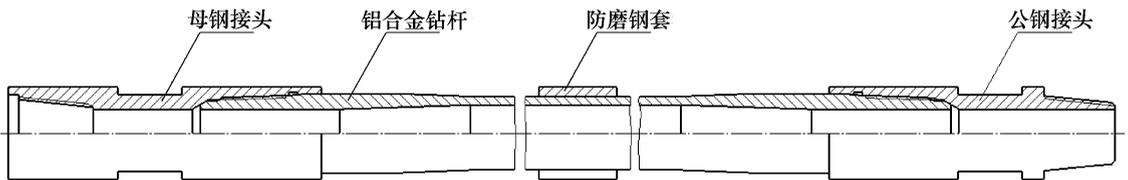


图1 铝合金钻杆结构图

Fig. 1 Aluminum alloy drill rod with steel tool joint

有两种,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(C. Santus 等,2009)。本文中铝合金钻杆与钢接头采用双锥面(两锥面不等锥度)“冷装配”过盈连接,该连接形式可有效的传递拉力,扭矩,弯矩以及钢接头与钻杆间的压缩负

载,且可以保持良好的密封性。

3.2 钻杆基本力学性能试验

3.2.1 试验方法

钻杆杆体剖样抗拉试验。试验采用箱式电炉,对 7E04 铝合金管材进行不同固溶温度、时效温度热处理后,按相关几何尺寸切割剖样,在将剖样置于 WA-1000C 型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、抗拉强度及测量伸长率,试验严格遵循国家标准(GB/T 208-2002,2002)进行。

钻杆小样螺纹副抗拉试验。试验首先对 7E04 铝合金管材端部进行墩粗,墩粗后进行钻杆小样的热处理(最优固溶、时效温度)、螺纹副车削加工,最终将钻杆小样与钢接头“冷装配”连接后,置于 WA-1000C 型电液伺服万能试验机上,进行钻杆小样螺纹副的抗拉试验。

钻杆表面硬度测量。对钻杆墩粗部位进行两组 16 个点的表面硬度测量,求其平均值,得出表面硬度值。

3.2.2 试验结果及分析

(1) 钻杆杆体剖样抗拉试验

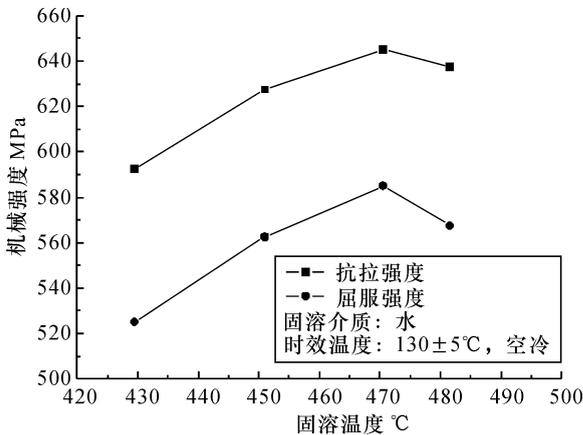


图 2 不同固溶温度下杆体机械强度

Fig. 2 Mechanical strength curves under different solution temperatures

图 2 是分别选择四组不同固溶温度、保温 1 h、水冷后,在人工时效 130±5°C,保温 14 h、空冷的热处理条件下,固溶温度对杆体屈服强度、抗拉强度的影响曲线图。数据表明,随着固溶温度的升高,杆体的屈服强度、抗拉强度先升高后降低;在固溶温度达到 470°C 时,屈服强度、抗拉强度达到最大值,分别是 585MPa、645MPa。

图 3 是在固溶温度 470±5°C、保温 1 h、水冷基础上,选择三组不同人工时效温度,保温 14 h、空冷的热处理条件下,时效温度对杆体屈服强度、抗拉强度的影响曲线图。从图中可以看出,随着时效温度

的升高,杆体的屈服强度、抗拉强度先升高后降低;时效温度在 133°C 时,杆体机械强度最高。

综上所述,钻杆杆体在固溶温度 470±5°C、水冷以及人工时效温度 130±5°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 585MPa、抗拉强度 645MPa,墩粗处表面硬度可达 286HB。

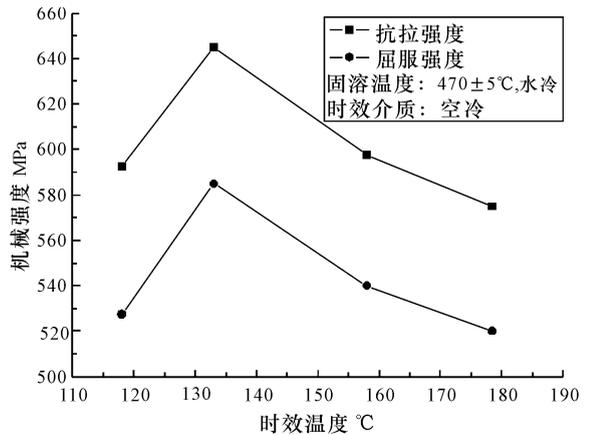


图 3 不同时效温度下杆体机械强度

Fig. 3 Mechanical strength curves under different aging temperatures

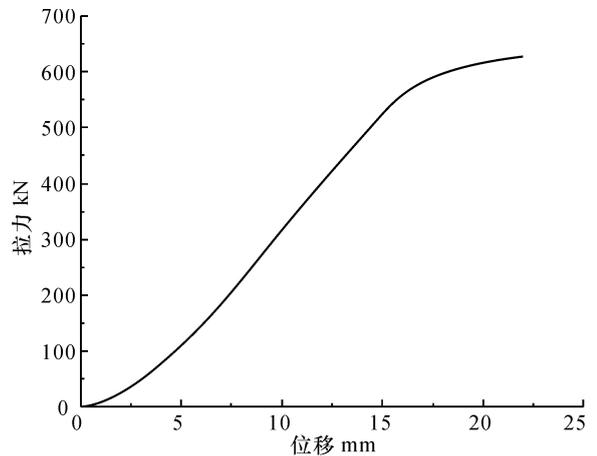


图 4 钻杆小样拉力-位移曲线图

Fig. 4 Tensile curve of drill rod sample

(2) 钻杆小样螺纹副抗拉试验

钻杆设计应遵循等强度原则,即钻杆螺纹副抗拉强度应大于钻杆杆体抗拉强度。图 4 是钻杆小样抗拉强度试验的曲线图,试验结果为钻杆杆体断裂,抗拉力为 631kN,也就是说螺纹副抗拉强度 631kN。从图 4 中我们还可以发现,铝合金钻杆弹性变形大,杆体断裂时具有较大的残余变形,且无明显的屈服阶段和缩颈阶段。

(3) 与钢钻杆的机械性能对比

表 2 是铝合金钻杆与钢钻杆基本机械性能参数

对比表,我们可以看出,7E04 铝合金钻杆机械性能明显高于其他铝合金钻杆,接近普通地质钢钻杆,但低于高强度钢钻杆。值得注意的是,在密度为 1.2 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,由于铝合金钻杆的比强度较大,如果采用同一型号的钻机,钻进深度将有所增加;钻进相同的深度,则所用铝合金钻杆的重量要比钢钻杆轻的多。

表2 两种材料钻杆基本力学参数对比表

Table 2 Basic mechanical parameters of drill rod made from two kinds of materials

材料类型	屈服强度 $\sigma_{0.2}$, MPa	极限强度 σ_{ult} , MPa	延伸率 δ , %	屈服强度与容重比 $\sigma_{0.2}/\gamma$, m	
钢	DZ50	490	690	12.0	7424
	DZ60	590	770	12.0	8940
	G-105	724	792	11.5	10970
	S-135	920	999	9.5	13968
	V-150	1170	1240	9.0	17756
	7E04	585	645	10.2	36563
铝合金	D16T	325	460	12.0	20313
	AK4-1T1	340	410	8.0	21251
	1953 T1	480	530	7.0	30001

表3 两种材料钻杆的腐蚀速率

Table 3 Corrosion rates of drill rod made from two kinds of materials

材料	腐蚀环境	腐蚀时间 h	试验温度 $^{\circ}\text{C}$	腐蚀前质量 g	腐蚀后质量 g	腐蚀速率 $\text{g/m}^2\text{h}$
7E04 铝合金	PH11 (5% NaCl+NaOH)			28.7	27.2	0.430
	pH7 (5% NaCl)	72	28	29.0	29.0	无腐蚀
	PH2.5 (5% NaCl+CH ₃ COOH)			28.9	28.8	0.029
DZ60 钢	PH11 (5% NaCl+NaOH)			61.3	61.2	0.029
	PH7 (5% NaCl)	72	28	69.7	69.4	0.080
	PH2.5 (5% NaCl+CH ₃ COOH)			58.4	57.5	0.269

3.3 钻杆腐蚀试验

3.3.1 试验方法

试验参照标准(GB/T 20659-2006,2006)进行,将7E04 铝合金及 DZ60 钢管材切割成一定高度的环状试件,打磨、清洁、干燥、称重后放入三种不同 pH 值的特定溶液中,72 h 后取出,在经清洗、除垢、晾干后在称重,计算腐蚀速率。

3.3.2 试验结果及分析

腐蚀速率即单位面积上钻杆在不同介质中单位时间内因腐蚀造成的质量损失。表3是7E04 铝合金及 DZ60 钢在似盐水泥浆腐蚀环境下的抗腐蚀性指标。从表中可以看出,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 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。相关研究表明,铝合金钻杆在饱和 H_2S 溶液和 CO_2 溶液里长期浸泡也不腐蚀,经实际应用发现,在任何温度下铝合金钻杆都可有效防

止 H_2S 和 CO_2 的腐蚀(吕拴录等,2009)。

4 结 论

本文针对7E04 铝合金管材进行了钻杆的结构设计,完成了钻杆的热处理、基本力学性能、腐蚀特性的室内试验研究。综合可以得到以下几点结论:

(1) 钻杆杆体在固溶温度 $470\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、水冷以及人工时效温度 $130\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、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 585MPa、抗拉强度 645MPa,表面硬度 286HB。

(2) 钻杆弹性变形大,杆体断裂时具有较大的残余变形,且无明显的屈服阶段和缩颈阶段;钻杆螺纹副抗拉强度 631kN。

(3) 7E04 铝合金钻杆机械性能明显高于其他铝合金钻杆,接近普通地质钢钻杆,但低于高强度钢钻杆;在密度为 1.2 g/cm^3 泥浆中,屈服极限与其容重的比值则是 7E04 铝合金钻杆远远大于钢钻杆,即铝合金钻杆的比强度较大。

(4) 钻杆在似盐水泥浆中性环境下无腐蚀;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 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。

[References]

C. Santus, L. Bertini, M. Beghini, A. Merlo, A. Baryshnikov. 2009. Torsional strength comparison between two assembling techniques for aluminum drill pipe to steel tool joint connection[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86:177-186

GB/T 20659-2006. 2006. Petroleum and natural gas industries-Aluminum alloy drill pipe[S]. Beijing:Standards press of China:1-50

GB/T 208-2002. 2002. Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature[S]. Beijing:Standards press of China:1-51

H. Rabia 1985. Oil well drilling engineering: principles and practice[M]. Graham & Trotman.

Hao Rui. 1989. well drilling engineering[M]. Beijing:Petroleum Industry Press:107-110

Hu Fu-chang. 1978. The overview of test about aluminum alloy drill Pipe [J]. Geology and Exploration, (4):52-54 (in Chinese)

ISO 15546. 2002. Petroleum and natural gas industries-Aluminum alloy drill pipe, 1st edition

J. E. Smith, R. W. Schutz, E. I. Bailey. February 2000. Development of titanium drill pipe for short radius drilling[A]. In: IADC/SPE drilling conference (New Orleans). Paper no. 59140

Liang Jian, Liu Xiu-mei, Wang Han-bao. 2010. Application analysis of aluminum alloy drilling rods in geologic drilling[J]. Site Investigation Science and Technology, 165(3):62-64 (in Chinese with English abstract)

Liu Xi-sheng. 1988. Principles of drilling techniques[M]. Beijing: Petroleum Industry Press:269-272

Liu Zhen-duo, Zhang Hong-ye, Sun Zhao-wei. 2003. Liu Gang-zhi wen ji[M]. Beijing: Geological Publishing House:264-265

Lv Shuan-lu, Luo Fa-qian, Zhou Jie, Liu Yuan-yang, Su Jian-wen, Lu Qiang. 2009. Prospects of aluminum alloy drill Pipe in Tarim oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 37(3):74-77 (in Chinese with English abstract)

M. Y. Gelfgat, V. S. Basovich, A. Adelman. 2006. Aluminum alloy tubules for the oil and gas industry[J]. World Oil, 227(7):45-51

M. Y. Gelfgat, V. S. Basovich, V. S. Tikhonov. 2003. Drill String with aluminum alloy pipes design and practices[A]. In: IADC/SPE Drilling Conference (Amsterdam). Paper no. 79873

R. W. Schutz, H. B. Watkins. 1998. Recent developments in titanium alloy application in the energy industry[J]. Materials Science and Engineering A, 243:305-315

Sun Jian-hua, Zhang Yang-ming. 2007. Analysis on technical economic of aviation transport for drilling engineering in the area difficult to get in[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 34(9):20-23 (in Chinese with English abstract)

Tang Ji-ping, Di Qin-feng, Hu Yi-bao, Wang Wen-chang, Liang Hong-jun, Yang Cheng-xin. 2010. Analysis on dynamic characteristics and wear mechanism of aluminum alloy drill pipe[J]. Acta Petrolei Sinica, 31(4):684-688

Yan Tai-ning, Xue Wei, Lu Chun-hua. 2010. Superiorities of aluminum alloy drilling pipe and its application prospects in deep holes for geological exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 37(2):27-29 (in Chinese)

[附中文参考文献]

GB/T 20659-2006 石油天然气工业 铝合金钻杆[S]. 北京:中国标准出版社, 2002:1-50

GB/T 208-2002 金属材料 室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2002:1-51

郝瑞. 1989. 钻井工程[M]. 北京:石油工业出版社:107~110

胡福昌. 1978. 铝合金钻杆试验概况[J]. 地质与勘探, (4):52-54

梁健, 刘秀美, 王汉宝. 2010. 地质钻探铝合金钻杆应用浅析[J]. 勘察科学技术, 165(3):62-64

刘希圣. 1988. 钻井工艺原理[M]. 北京:石油工业出版社:269~272

刘振铎, 张洪叶, 孙昭伟. 2003. 刘广志文集[M]. 北京:地质出版社:264~265

吕拴录, 骆发前, 周杰, 刘远扬, 苏建文, 卢强. 2009. 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, 37(3):74-77

孙建华, 张阳明. 2007. 难进入地区钻探工程航空运输技术经济分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 34(9):20-23.

唐继平, 狄勤丰, 胡以宝, 王文昌, 梁红军, 杨成新. 2010. 铝合金钻杆的动态特性及磨损机理分析[J]. 石油学报, 31(4):684-688

鄯泰宁, 薛维, 卢春华. 2010. 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), 37(2):27-29

Development of the Aluminum Alloy Drill Rod and Laboratory Tests

LIANG Jian¹, PENG Li², SUN Jian-hua¹, WANG Tie², ZHANG Yong-qin¹, WANG Han-bao¹, LIU Xiu-mei¹

(1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang, Hebei 065000; 2. Wuxi Drilling Tools Inc., Wuxi, Jiangsu 214174)

Abstract: Compared with the steel drill rod, the aluminum alloy drill rod has a higher specific strength, lower stiffness and better corrosion-resistance performance. Thus it can enhance the ability of existing drilling equipment, reduce power consumption, and lower the labor intensity during drilling operation. The study of the aluminum alloy drill rod has a great practical significance for improving geological drilling efficiency and promoting drilling technological progress for geological survey. This paper presents the key technology of 7E04 aluminum alloy rod, design of its structure and experimental studies on its thermal processing, basic mechanical properties and corrosion characteristics. The results show that in a certain condition of thermal processing, the yield strength of this rod can be up to 585 MPa, and its tensile strength can reach 645 MPa. And it has a higher corrosion resistance in the environment similar to the saline water-like mud.

Key words: geological drilling, 7E04 aluminum alloy, drill stem, rod tool joint