

Ø147 mm 铝合金钻杆抗内外压强度试验研究

刘宝昌^{1,2,3}, 孙永辉¹, 孙友宏^{1,2,3}, 李 闯¹, 王立臣⁴, 李 宝⁴, 弗拉基米尔·巴索维奇⁵
(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学复杂条件钻采技术国土资源部重点实验室, 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. 吉林麦达斯铝业有限公司 吉林 辽源 136200; 5. Akvatik 钻杆有限公司, 俄罗斯 莫斯科)

摘要: 铝合金钻杆因具有质量轻、比强度高、抗腐蚀性好、低磁等优点, 在深井与超深井钻探作业中备受关注。在深井与超深井钻进中, 铝合金钻杆需要承受巨大的内外压力, 因此有必要对钻杆所能承受的最大内外压力进行计算与试验, 对自行研制的 Ø147 mm 铝合金钻杆进行了静水内、外压试验与弹性力学理论计算校核, 7075 铝合金钻杆在内压 69.51 MPa 时持续加压 20 min, 没有发生泄漏现象; 最大抗外压值为 107.4 MPa。2024 铝合金钻杆在内压 48.65 MPa 时持续加压 20 min, 没有发生泄漏现象; 最大抗外压值为 72.3 MPa。试验表明, 铝合金钻杆抗内、外压性能良好, 从而保证了铝合金钻杆在深井及超深井钻进时的可靠性。

关键词: 铝合金钻杆; 静水压; 抗压能力

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2016)04 - 0063 - 05

Research on Internal and External Hydrostatic Pressure Resistance of Ø147mm Aluminum Alloy Drill Pipe/LIU Bao-chang^{1,2,3}, SUN Yong-hui¹, SUN You-hong^{1,2,3}, LI Chuang¹, WANG Li-chen⁴, LI Bao⁴, Vladimir Basovich⁵ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Lab of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Land and Resources, Changchun Jilin 130026, China; 3. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China; 4. Jilin Midas Aluminium Industries Co., Ltd., Liaoyuan Jilin 136200, China; 5. Akvatik Drill Pipe LLC, Moscow, Russia)

Abstract: With light weight, high strength, good corrosion resistance and low-magnetic, etc., aluminum alloy drill pipe receives much concern in deep and ultra-deep drilling operations. In the deep and ultra-deep well drilling, as the aluminum alloy drill pipe needs to withstand enormous internal and external pressure, it is necessary to calculate and test its maximum internal and external pressure. Internal and external hydrostatic pressure tests were carried out on Ø147mm self-developed aluminum alloy drill pipe and checked by elasticity theory calculations. No leakage happened for full-size 7075 and 2024 aluminum alloy drill pipes with 69.51MPa and 48.65MPa continuous internal pressure pressure-loading for 20min respectively and the maximum anti-external pressure values were 107.4MPa and 72.3MPa for each. The tests show that the aluminum alloy drill pipe has good property of anti-internal and external pressure to ensure its reliability in deep and ultra-deep drilling.

Key words: aluminum alloy drill pipe; hydrostatic pressure; capability of pressure resistance

0 引言

随着钻探技术的不断发展, 深井和超深井的钻探工作日益增多, 常规钢钻杆面临着因自重过大导致强度不足的问题。因此, 轻质高强度铝合金钻杆便成为替代钢钻杆的首选。在国外, Marcelo Igor Lourenco 等人对两类合金系的铝合金钻杆样品进行了小型试验, 得到了其性能参数, 并对高可靠性轻质钻杆进行了大量的全尺寸试验^[1]; L. Bertini 等人设计了

疲劳试验机, 对铝合金钻杆进行了抗疲劳性试验^[2]。在国内, 梁健、孙建华等人对地质钻探用高强度铝合金钻杆进行了研制与室内试验研究^[3-4, 12]; 曹宇、毛建设等人对铝合金钻杆与钢接头间的螺纹进行了优化, 并对其热处理装配方式进行了大量的试验研究^[5-6, 13]; 张喜超对小口径绳索取心铝合金钻杆进行了研制, 并对其研制的钻杆进行了静拉力和抗扭矩试验。铝合金钻杆在地层中钻进时, 在钻杆内流动的钻

收稿日期: 2016 - 01 - 05; 修回日期: 2016 - 03 - 03

基金项目: 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); 吉林省科技厅重点项目“深井油气钻探用铝合金钻杆关键制造技术”(编号: 20130206023GX)

作者简介: 刘宝昌, 男, 汉族, 1975 年生, 副教授, 地质工程专业, 博士后, 从事岩土钻凿机具与材料方面的研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, liubc@jlu.edu.cn; 孙永辉, 男, 汉族, 1990 年生, 吉林大学在读硕士研究生, 地质工程专业, 从事铝合金钻杆与钢接头热组装机技术研究工作。

井液将会对钻杆内壁产生内压作用^[7]。由于钻井液在钻杆与井壁的环形通道内流通,还会对钻杆外壁施加外压强。当钻杆柱内外2种液柱压强的差值过大时会对钻杆造成疲劳破坏甚至是产生挤毁现象,从而造成钻杆失效,影响钻井工程进度。因此有必要对铝合金钻杆杆体与钢接头、钢接头与钢接头之间的密封性能及抗压能力进行计算与试验研究^[8-9]。

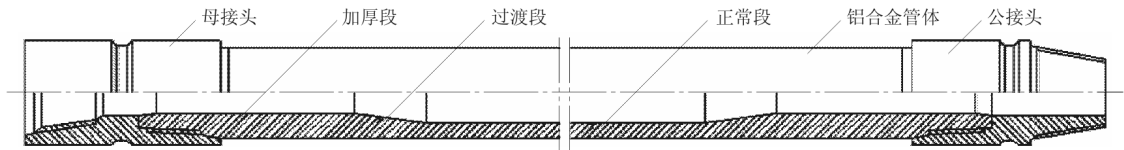


图1 内加厚铝合金钻杆示意图^[5]

表1 7075和2024铝合金化学成分对比分析

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
7075	标准	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.20	余量
	实测	0.17	0.34	1.61	0.03	2.29	0.23	5.70	0.06	89.6
2024	标准	0.50	0.50	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.10	0.25	0.15	余量
	实测	0.11	0.19	4.34	0.57	1.39	0.01	0.01	0.02	95.3

表2 7075和2024铝合金钻杆常温力学性能对比

合金状态	钻杆取样部位	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 A /%
7075-T6	标准要求	530	480	7.0
	内加厚过渡段	593	534	12.6
	内加厚段	588	530	12.9
	薄壁段	583	530	12.9
2024-T4	标准要求	460	325	12.0
	内加厚过渡段	538	362	19.7
	内加厚段	524	357	18.6
	薄壁段	510	370	17.7

1.2 试验方法

1.2.1 静水内压试验

该部分试验所使用的是自行研制的静水内压加压装置(如图2所示),在全长9.1 m通过钢接头连接的全尺寸铝合金钻杆两端加装密封装置。在钻杆一端持续向管体内注水,同时在另一端排出管体内空气,待空气排净后关闭排气口持续注水加压。在升压前,在管体及接头上加装检测装置(传感器),在升压过程中记录接头与管体过盈配合处的长度变化、管体长度变化、周长变化及管体内压强变化。试验时,当管体内压强达到预定压强后停止加压,保持压强20 min后试验结束,然后放水降压。

1.2.2 静水外压试验

静水外压试验使用的是自行研制的静水外压

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用牌号为7075和2024两种材料制作的外径147 mm、壁厚13 mm的内加厚铝合金钻杆(见图1),使用电光谱分析仪对其化学成分分析对比见表1,对其常温力学性能的测试结果与ISO 15546(Petroleum and natural gas industries—Aluminium alloy drill pipe)标准相对比见表2。



图2 静水内压试验装置

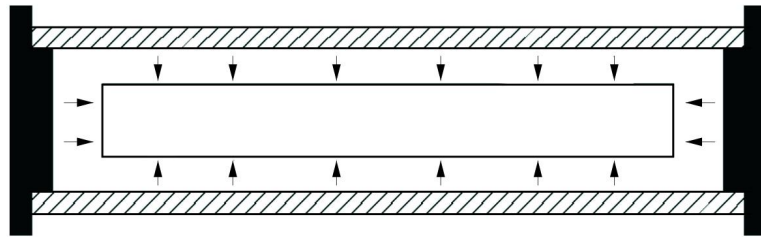
加压装置(如图3a所示,其内部原理如图3b所示)。把两端密封好的2.2 m长的铝合金钻杆放入试验容器内,然后封住容器,持续向容器内注水,同时排出容器内空气,待空气排净后关闭排气口持续加压,直至钻杆破坏,并在试验过程中用传感器记录装置腔内压强的变化。

2 试验结果与讨论

2.1 静水内压试验结果



(a) 静水外压试验装置



(b) 静水外压装置内部原理图

图 3 静水外压试验

2.1.1 7075 铝合金钻杆

7075 铝合金钻杆的静水内压试验数据如表 3 和图 4 所示。可以看出,该全尺寸铝合金钻杆在升压至 69.51 MPa 并保压 20 min 无泄压泄漏现象,且从图 4 可看出:

- (1) 最大压强为 69.51 MPa;
- (2) 随着压强的升高,产品周长没有发生变化;
- (3) 随着压强的升高,长度发生变化,最大变化量为 1.6 mm,取消压强后,变化量恢复到 0,所以,此处为弹性变形。

表 3 7075 铝合金钻杆静水内压实验数据

编号	直径/ m	长度/ mm	壁厚/ mm	静压时 间/min	实际静压 压强/MPa	备注
1	147	9100	13	20	69.51	理论静压强
2					69.06	67.92 MPa

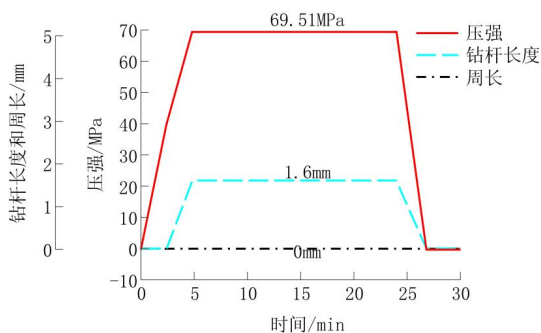


图 4 7075 铝合金钻杆静水内压试验实时数据记录曲线

2.1.2 2024 铝合金钻杆

2024 铝合金钻杆的静水内压试验数据如表 4 和图 5 所示。

表 4 2024 铝合金钻杆静水内压实验数据

编号	直径/ mm	壁厚/ mm	长度/ mm	恒压时 间/min	实际恒压 压强/MPa	备注
1	147	13	9100	20	48.65	理论恒压强
2					47.03	强 45.99 MPa

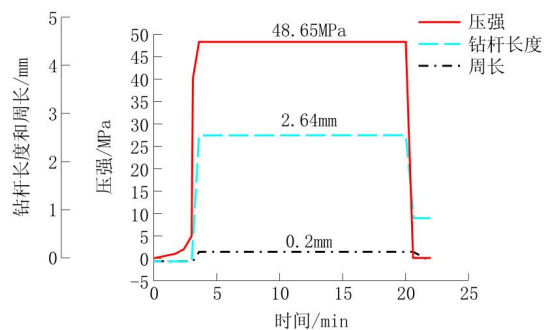


图 5 2024 铝合金钻杆静水内压试验实时数据记录曲线

可以看出,该全尺寸铝合金钻杆试样在升压至 48.65 MPa 并保压 20 min 无泄压泄漏现象,且从图 5 可看出:

- (1) 最大压强为 48.65 MPa;
- (2) 随着压强的升高,周长最大变化量为 0.2 mm,取消压强后,周长变化量恢复到 0;
- (3) 随着压强的升高,长度增大,最大变化量为 2.64 mm,取消压强后,长度减小,到 0.9 mm 位置时不再发生变化。发生此现象的原因是用于检测的传感器固定不好,在产品长度变化时传感器位置松动,所以在压强取消后,没有复位。

2.2 静水外压试验结果

7075 和 2024 铝合金钻杆静水外压的试验数据

及试验现象如表5、图6、表6、图7、图8、图9所示。

表5 7075 铝合金钻杆静水外压实验数据

编号	直径/mm	壁厚/mm	长度/mm	失效压强/MPa	备注
1	147	13	2200	106.62	两端加 端盖焊 接密封
2				96.60	
3		13(20)		104.10	
4		13(25.5)		107.39	

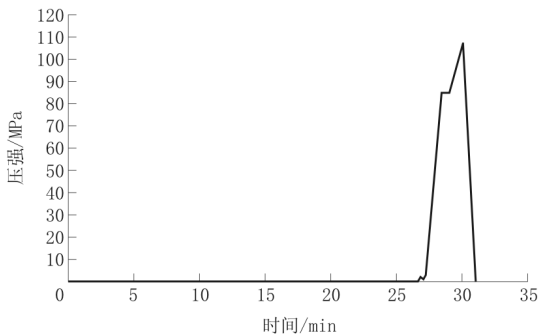


图6 7075 铝合金钻杆静水外压试验压强变化曲线

表6 2024 铝合金钻杆静水外压实验数据

编号	直径/mm	壁厚/mm	长度/mm	失效压强/MPa	备注
1	147	13	2200	70.8	两端加端盖 焊接密封
2				72.3	

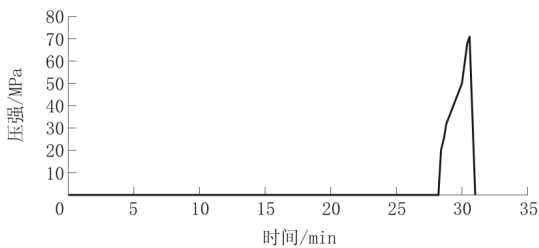


图7 2024 铝合金钻杆静水外压试验压强变化曲线



图8 7075 铝合金钻杆静水外压断裂情况

2.2.1 7075 铝合金钻杆

从图6上可以看出,当在钻杆外部施加的静水压强达到107.39 MPa后,压强随之骤降,表明此刻钻杆被压裂。由图8中3个钻杆试样被破坏的图像可以看出,试样都是在中间部位向管体内部凹陷并断裂,断裂处形成椭圆形孔,孔周围有纵向裂纹,且裂纹向两端延伸。

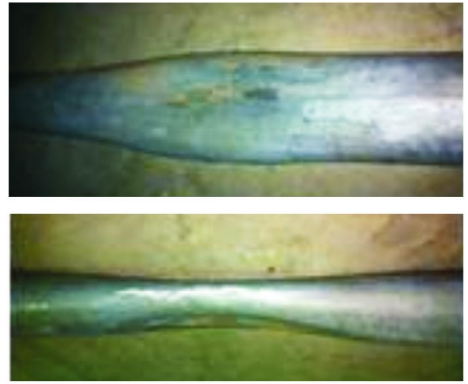


图9 2024 铝合金钻杆静水外压失效情况

2.2.2 2024 铝合金钻杆

从图7上可以看出,当在钻杆外部施加的静水压强达到72.3 MPa后,压强随之骤降,表明钻杆此刻被压裂,由图9中两个钻杆试样被破坏的图像来看,均在中间部位向管体内部凹陷,凹陷处无断裂现象,但凹陷处周围有纵向裂纹,裂纹向两端延伸。

2.3 理论计算

通过试验得到了直径147 mm、壁厚13 mm的7075与2024两种铝合金钻杆可承受内压最大值分别达到了69.51和48.65 MPa,承受静水外压最大值分别为107.39和72.3 MPa。为了评价试验的合理性,对 $\varnothing 147$ mm铝合金钻杆的承压能力进行了理论计算,其静压受力状态如图10所示。

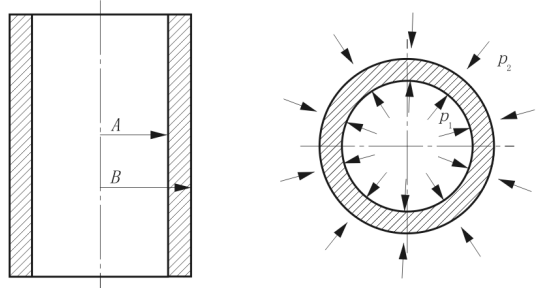


图10 铝合金钻杆在内外压强作用下的受力示意

2.3.1 静水内压计算

静水内压时铝合金钻杆所受的外压 P_2 为0,国家标准《石油天然气工业 铝合金钻杆》(GBT 20659—2006)中规定铝合金钻杆的标准静水压应根据下列公式计算:

$$P_1 = \frac{2f\sigma_{y,\min}t}{D} \quad (1)$$

式中: f ——系数,取0.8; $\sigma_{y,\min}$ ——规定的管体最小屈服强度,7075铝合金为480 MPa,2024铝合金为

325 MPa; D ——管体外径, 147 mm; t ——管体壁厚, 13 mm。

将数据代入公式(1)中可得:7075 铝合金钻杆静水内压强度为 67.92 MPa;2024 铝合金钻杆静水内压强度为 45.99 MPa。

2.3.1 静水外压计算

静水外压时铝合金钻杆所受内压 P_1 为 0,《Petroleum and natural gas industries-Design and operating limits of drill strings with aluminum alloy Components》(ISO 20312—2011) 中规定铝合金钻杆的外压屈服强度应根据下列公式计算:

$$P_2 = P_e P_y (P_e^2 + P_y^2)^{-1/2} \quad (2)$$

式中: P_y ——管体受外压的同时受拉伸的屈服强度, $P_y = 2\sigma_r t/D$, MPa; P_e ——弹性弯曲压强, $P_e = [2E/(1 - \mu^2)](t/D)^3$, MPa; σ_r ——屈服应力降低, $\sigma_r = \sigma_{y, \min} \{ \sqrt{1 - [3S_a/(2\sigma_{y, \min})^2]} - S_a/(2\sigma_{y, \min}) \}$, MPa; S_a ——平均轴向应力, 在本试验中无轴向应力, 即 $S_a = 0$; E ——弹性模量, 72000 MPa; μ ——泊松比, 0.3; D ——管体外径, 147 mm; t ——管体壁厚, 13 mm。

因为在本试验中无轴向应力, 因此, $S_a = 0$, $\sigma_r = \sigma_{y, \min}$ 。

将各参数数据代入(2)中可得:7075 铝合金钻杆静水外压强度为 66.70 MPa;2024 铝合金钻杆静水外压强度为 50.73 MPa。

理论计算与试验结果对比表明, 试验所得结果大于理论计算的结果, 因此该铝合金钻杆可满足《Petroleum and natural gas industries-Design and operating limits of drill strings with aluminum alloy Components》(ISO 20312—2011) 标准中对铝合金钻杆所承受的最大内外压力强度的要求。

3 结语

(1) 通过试验得到了 Ø147 mm × 13 mm 的 7075 与 2024 牌号的铝合金钻杆所承受最大的内压强度分别达到了 69.51 和 48.65 MPa, 最大的外压强度分别为 107.39 和 72.3 MPa。

(2) 通过对全尺寸大直径铝合金钻杆(通过钢接头连接)最大抗压能力的计算, 得出了 7075 与

2024 牌号 Ø147 mm × 13 mm 的铝合金钻杆所承受的最大内压强度分别为 67.92 MPa 和 45.99 MPa, 最大外压强度分别为 66.70 MPa 和 50.73 MPa。

(3) 2 种试样在静水内压破坏泄露时的压强与静水外压试验中开始断裂的压强均超过理论的计算值, 7075 与 2024 两种材料的铝合金钻杆在理论与实际试验中均可满足《Petroleum and natural gas industries-Design and operating limits of drill strings with aluminum alloy Components》(ISO 20312—2011) 标准中对铝合金钻杆设计和工作极限的要求, 且证明这 2 种材料的铝合金钻杆具有良好的力学性能, 可以在钻孔内承受足够大的压力而不破坏, 为深井和超深井钻进采用含铝合金钻杆的钻具组合设计及合理使用提供了可靠的技术参数。

参考文献:

- [1] Marcelo Igor Lourenco, Theodoro A. Netto. Aluminum Drill Pipes—Material and Design Developments [J]. Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2008.
- [2] L. Bertini, M. Beghini. Resonant test rigs for fatigue full scale testing of oil drill string connections. International Journal of Fatigue, 2008; 30: 978–988.
- [3] 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.
- [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, (2): 304–308.
- [5] 曹宇. 铝合金钻杆变断面管体挤压成型及螺纹优化研究 [D]. 吉林长春: 吉林大学, 2013.
- [6] 毛建设. 铝合金钻杆杆体与钢接头过盈连接热组装机工艺数值模拟及试验研究 [D]. 吉林长春: 吉林大学, 2014.
- [7] 张喜超. Ø71 mm 绳索取心铝合金钻杆的研制 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2015, 42(7): 58–61, 71.
- [8] 鄢泰宁, 薛维, 兰凯. 高可靠性铝合金钻杆及其在超深井和水平井中的应用 [J]. 地质科技情报, 2010, (1): 112–115.
- [9] 刘静安. 铝合金钻探管的特点及其应用与发展 [J]. 有色金属加工, 2011, (6): 7–10.
- [10] GB/T 20659—2006, 石油天然气工业 铝合金钻杆 [S].
- [11] ISO 20312—2011, Petroleum and natural gas industries—Design and operating limits of drill strings with aluminum alloy Components [S].
- [12] 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, 62.
- [13] 毛建设, 孙友宏, 刘宝昌, 等. 铝合金钻杆与钢接头可靠连接过盈量的计算及组装机工艺 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 28–31.