

# 冷组装铝合金钻杆螺纹副力学性能测试及失效分析

刘宝昌<sup>1,2</sup>, 李闯<sup>1</sup>, 张弛<sup>1</sup>, 马少明<sup>1</sup>, 孙永辉<sup>1</sup>

(1. 吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室, 建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:**与传统的钢制钻杆相比, 铝合金钻杆具有密度小、比强度高、无磁等优点, 因此在深井与超深井钻井作业中具有较大优势。在实际使用中, 铝合金钻杆两端需要通过钢接头之间的螺纹来实现拧卸钻杆, 而铝合金杆体与钢接头还需要过盈装配以实现紧固连接。以液氮为冷源, 对  $\varnothing 50$  mm 的 7075 铝合金钻杆管体与钢接头进行了“冷组装”过盈装配, 铝合金管体与钢接头之间的过盈量分别为 0.10、0.15、0.20 mm。对组装后两端带钢接头的铝合金钻杆分别进行了拉伸和扭转试验, 评价了铝合金管体与钢接头连接的可靠性, 对断裂试样的断口进行了宏观与微观分析, 阐述了其断裂机理。结果表明, 采用“冷组装”方式可以实现铝合金管体与钢接头的过盈装配, 其中过盈量为 0.15 mm 时, 带钢接头的铝合金钻杆综合性能较优, 可以承受较大的抗拉强度极限和抗扭极限, 其断裂方式为脆性断裂。

**关键词:** 铝合金钻杆; 冷组装; 过盈配合; 断裂机理

中图分类号: P634.4; TE921 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2017)06-0013-05

**Mechanical Performance Test and Failure Analysis on Cold Assembled Aluminum Alloy Drill Pipe Thread Pair/** LIU Bao-chang<sup>1,2</sup>, LI Chuang<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>, MA Shao-ming<sup>1</sup>, SUN Yong-hui<sup>1</sup> (1. Key Laboratory of Geophysical Exploration Equipment, Ministry of Education, 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)

**Abstract:** Compared with the traditional steel drill pipe, aluminum alloy drill pipe has the advantages of low density, high specific strength, non-magnetic and etc., so it has great advantage in deep and ultra-deep drilling operations. In practice, for aluminum alloy drill pipe, the connecting and dismounting at two ends are realized by the screws on the steel joints, while the fasten connection of aluminum alloy drill pipe and steel joint is realized by interference fit. With the cooling source of liquid nitrogen,  $\varnothing 50$ mm 7075 aluminum alloy drill pipe and steel joints were connected with interference by “cold assembly”, the magnitude of interference between aluminum alloy drill pipe and steel joints were 0.1, 0.15 and 0.2mm respectively. The tensile and torsion tests were carried out on the assembled aluminum alloy drill pipe (both ends with steel joints). In this paper, the reliability of the connection between aluminum alloy drill pipe and steel joint was evaluated, and the fracture surface of specimen are analyzed macroscopically and microscopically to elaborate the fracture mechanism. The results show that the interference assembly of aluminum alloy drill pipe and steel joint can be realized by “cold assembly”. The aluminum alloy drill pipe with magnitude of interference of 0.15mm has better comprehensive properties, and it can bear larger tensile strength and anti-torsion limits, and the fracture mode is brittle fracture.

**Key words:** aluminum alloy drill pipe; cold assembly; interference fit; fracture mechanism

## 0 引言

在钻井过程中, 钻杆起到向井底传递钻压与扭矩、输送钻井液等重要作用, 是钻井装备中的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。与传统的钢制钻杆相比, 铝合金钻杆因其密度低、比强度高、耐腐蚀性强、弯曲应力小等

优异性能, 在钻进超深井、定向井、大位移井及酸性腐蚀地层等领域具有巨大的优势<sup>[3-6]</sup>。铝合金钻杆已经在俄罗斯等发达国家应用几十年, 特别是在 SG-3 井等超深井及海洋深水钻井中成功应用<sup>[7-9]</sup>, 积累了大量的使用经验。目前, 中国已经在满足深

收稿日期: 2017-04-17; 修回日期: 2017-05-15

**基金项目:** 国家国际科技合作专项“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); 吉林省自然科学基金项目(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)

**作者简介:** 刘宝昌, 男, 汉族, 1975年生, 副教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事岩土钻凿机具与材料方面的研究工作, 吉林省长春市西民主大街938号, liubc@jlu.edu.cn; 李闯, 男, 满族, 1992年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事铝合金钻杆及金刚石钻头方面的研究工作, 277109985@qq.com。

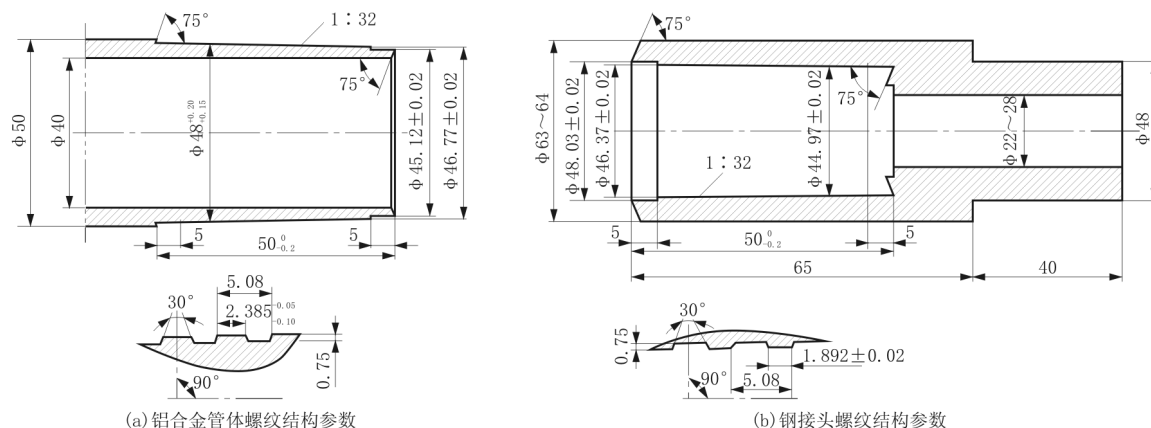
部油气钻井需求的大直径铝合金钻杆及满足地质钻探需求的小直径铝合金钻杆<sup>[10-12]</sup>的制造工艺方面取得了一系列研究成果,国产铝合金钻杆已在“松科二井”及吉林省松原市乾安县安子镇妇字村(大情字井油田黑70区块情28-10定向采油井)定向采油井中进行了试验<sup>[13-16]</sup>。

由于铝合金管体的硬度较低,无法承受频繁的拧卸作业对管体的损伤,因此一般需要在铝合金管体两端连接钢接头,通过钢接头与钢接头之间的螺纹实现钻杆柱的连接和拆卸<sup>[17-19]</sup>。而铝合金管体与钢接头的弹性模量相差较大,采用传统的焊接方法很难将其可靠地连接在一起;若通过普通螺纹连接,在拧卸钻杆的过程中也容易造成铝合金管体与钢接头之间卸扣,从而使连接失效。因此,一般采用在铝合金管体与钢接头之间实现过盈配合的方法,实现二者之间的可靠连接。为了在铝合金管体和钢接头之间实现过盈配合,目前常用“热组装”方法,就是将钢接头加热至一定温度使其膨胀,然后快速拧接到铝合金管体上,同时用冷却水对铝合金管体进行降温,二者达到温度平衡后即可实现过盈配合

连接<sup>[20]</sup>。然而,“热组装”方法在操作过程中,被加热的钢接头与铝合金管体接触瞬间的高温容易使铝合金产生不同程度的热损伤,从而降低其性能<sup>[21]</sup>。C. Santus 研究表明<sup>[22]</sup>,“冷组装”的铝合金钻杆比“热组装”的抗扭强度高,但目前关于铝合金钻杆与钢接头通过“冷组装”方法实现过盈装配的报道较少。本文以液氮作为冷却源,开展了铝合金钻杆和钢接头的“冷组装”试验,对组装后的铝合金钻杆进行了力学性能测试(抗拉伸与抗扭转性能),并根据断口微观形貌对其断裂机理进行了分析。本研究可以为实现铝合金钻杆管体与钢接头的可靠连接提供借鉴。

## 1 试验材料与方法

试验所采用的铝合金管体直径为50 mm,长度为133 mm,铝合金的牌号及热处理状态为7075-T6。管体两端加工了锥度为1:32的T形锥螺纹,螺纹段的长度为50 mm。铝合金管体两端和钢接头螺纹的结构参数如图1所示。



(a) 铝合金管体螺纹结构参数

(b) 钢接头螺纹结构参数

注:以公扣为加工基准,0.10、0.15、0.20 mm过盈量的公母接头对应的手拧紧密距分别为3.2、4.8、6.4 mm

图1 螺纹结构参数

为实现铝合金管体与钢接头的可靠连接,需确定两者之间合理的过盈量。根据前人研究成果<sup>[23]</sup>对铝合金钻杆的过盈量进行了计算,确定了 $\phi 50$  mm铝合金管体的有效过盈量(铝螺纹的齿底和钢螺纹的齿顶处过盈,加工时以公接头为准,手拧紧密距分别为3.2、4.8、6.4 mm。)范围应为0.0960~0.3214 mm。考虑加工精度因素,在铝合金管体半径方向上分别设计了0.10、0.15、0.20 mm 3种不同的过盈量。以液氮作为冷却源,将铝合金管体放入

深冷处理箱中冷却一定时间,使其遇冷收缩,随后立即取出与钢接头进行装配,待恢复室温后,实现二者过盈装配。连接后的铝合金钻杆如图2所示。

采用WEW-1000型微机屏显液压力式万能试验机对冷组装的铝合金钻杆试样进行了室温抗拉试验(如图3所示),匀速缓慢拉伸至其断裂,并记录拉力及断裂位置。室温扭转试验(如图4所示)采用静扭试验机,通过法兰将铝合金钻杆试样固定到静扭试验机的电机端和支架端,缓慢匀速施加扭矩



图2 “冷组装”铝合金钻杆试样



图3 铝合金钻杆拉伸试验

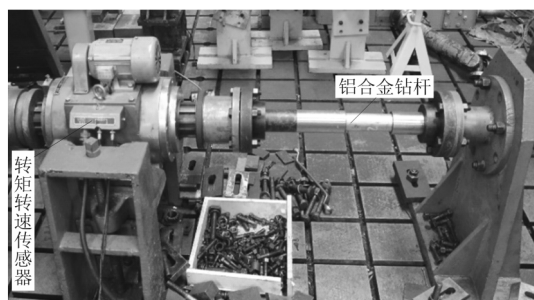


图4 铝合金钻杆抗扭试验

至其断裂,并记录其断裂扭矩。使用 Hitachi S - 4800 型场发射扫描电子显微镜对拉伸和扭转断裂的断口进行微观分析。

## 2 结果与讨论

铝合金钻杆的抗拉及抗扭试验结果如表1所示。从表1可以看出,在该试验研究范围内,以不同过盈量装配的铝合金钻杆,其抗拉伸和抗扭转性能

不同。随着过盈量的增大,铝合金钻杆的极限抗拉强度及极限扭矩先增加后降低。当铝合金管体与钢接头之间的过盈量为0.15 mm时,通过“冷组装”方法装配的铝合金钻杆所能承受的极限抗拉强度和极限扭矩均最大,断裂位置均为铝合金杆体公螺纹最后一扣的根部。

表1  $\varnothing 50$  mm 铝合金钻杆抗拉与抗扭试验数据

过盈量/mm	平均极限抗拉强度/MPa	极限扭矩/(N·m)	断裂位置
0.10	484.42	4032	铝合金杆体公螺纹最后一扣根部
0.15	491.66	4162	同上
0.20	488.35	3970	同上

注:拉伸试验每个过盈量均做了3次拉伸,即9个试样,表中数据为3个数据的平均值;扭转试验每个过盈量做了1次扭转,即3个试样。

将钻杆螺纹连接部位剖开进行观察及测量(如图5所示),可以看到铝合金钻杆其余螺纹部位没有产生任何变形和脱扣的迹象。在车削螺纹的过程中,铝合金管体螺纹的根部成为应力最集中的位置<sup>[24-25]</sup>,因此,在本试验中,所有的铝合金钻杆均在该位置发生断裂。

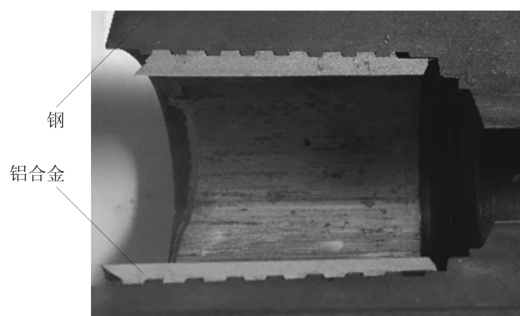


图5 断裂后铝合金钻杆螺纹部位剖面照片

不同过盈量装配的螺纹局部放大20倍照片如图6所示。对比图6(a)和图6(b)可以看出,后者的齿间啮合较好(钢接头螺纹的齿顶与铝合金螺纹的齿底间隙适中),因此,这样装配的螺纹各齿间的应力分配更均匀,所能承受的极限应力也更大一些。从图6(c)中可以看到,铝合金管体的螺纹被压缩变形较为明显。而且从表1中的试验结果可以看出,以0.20 mm过盈量装配的铝合金钻杆,其所能承受的抗拉极限强度和极限扭矩已经低于以0.15 mm过盈量装配的铝合金钻杆,这说明以0.20 mm过盈量进行装配可能会使铝合金材料超过可承受的最大弹性变形范围,即此时螺纹部位的铝合金材料已经处于塑性变形状态且屈服强度已经降低。虽然0.20

mm 过盈量会使得铝合金管体螺纹与钢接头螺纹各齿间的啮合更好,但是螺纹部位铝合金材料屈服强度的降低反而会使铝合金钻杆的抗拉极限强度和极限扭矩降低。因此,随着过盈量的增大,铝合金钻杆的抗拉与抗扭性能均是先增大后降低的,在本文中,以 0.15 mm 过盈量装配的铝合金钻杆的极限拉伸强度和极限扭矩最高。

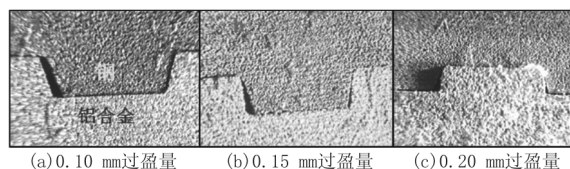


图6 铝合金钻杆螺纹局部20倍放大照片

对铝合金钻杆的拉伸断口和扭转断口分别进行了宏观、微观观察和分析,如图7和图8所示。

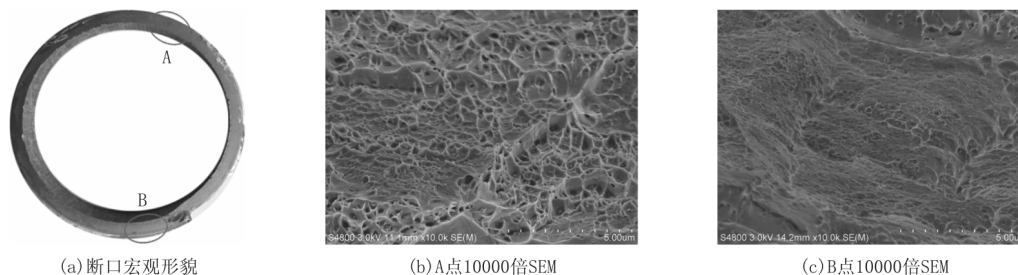


图7 铝合金钻杆拉伸断口宏观及微观照片

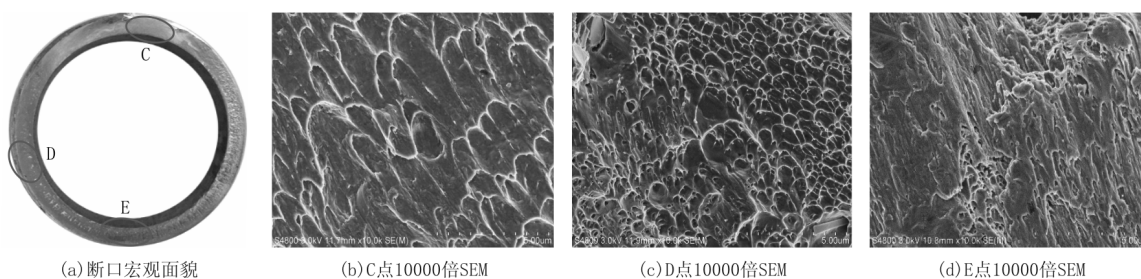


图8 铝合金钻杆扭转断口宏观及微观照片

从图7(a)可以看出,铝合金钻杆的拉伸断口宏观上较齐平、塑性变形较小且无明显颈缩,无剪切唇。微观上,从图7(b)中可以看到大量无金属光泽的直径约为 $5\ \mu\text{m}$ 的圆形或椭圆形的韧窝(微坑),且在有的韧窝内可以看到尺寸较小的夹杂物或粒子,断口中的韧窝被拉长的较短(韧窝的尺寸较小),这样形貌的韧窝说明在断裂时应力的分布较为均匀,即在拉伸过程中整个铝合金钻杆截面受到均匀的拉力。在图7(b)中A点附近可能先产生裂纹(裂纹源区),随后裂纹逐渐向两侧扩展(裂纹快速扩展区);在图7(c)中,则韧窝数量少且特征不明显,且部分位置表面光滑有金属光泽,河流状花纹相对比较明显,为脆性解理,表明在该位置铝合金钻杆无法继续承受这样的极限拉伸应力,在B点区域(失稳区)迅速断裂。

一般情况下,过载断裂的钢钻杆断口宏观上塑性变形较大、颈缩较明显,微观上以韧窝为主<sup>[26]</sup>。与钢钻杆相比,7075 铝合金钻杆断裂形貌差异很

大,即塑性变形较小、颈缩现象不明显,微观上裂纹源区以韧窝为主,断裂区以脆性解理为主,断裂方式为脆性断裂。

从图8(a)可以看出,铝合金钻杆的扭转断口表面一部分光滑、一部分粗糙。从图8(b)中可以清晰的看到沿着单一方向被拉长的卵形韧窝,说明在扭转过程中不断增加的剪切应力使得裂纹沿单一方向生长和扩展,这可能是由于扭矩加载初期时间较长,扭矩的不断缓慢增加导致裂纹的产生,较缓慢的生长速度导致裂纹处形成了较为明显的卵形韧窝,因此,该点区域是裂纹初始生长位置。从图8(c)可清晰观察到大量近似为卵形的韧窝,与C点相比其尺寸较小且与C点具有相同的方向,生长速度较快,形成了较小的卵形韧窝。从图8(d)可以清晰地看到被极度拉长的卵形韧窝,且趋势与C、D处相同,表明此处裂纹的扩展速度较快,来不及长成规则的卵形韧窝,因此,该处为极速扩展区域。D处则是介于C与E之间的断裂过渡区。

### 3 结论

(1) 铝合金管体与钢接头可以通过“冷组装”实现可靠的过盈连接,在拉伸和扭转的过程中铝合金管体的螺纹部位均未被破坏,达到极限应力后在应力最集中的螺纹根部产生裂纹,并迅速扩展,最后失稳断裂。

(2) 铝合金管体与钢接头之间的过盈量是影响装配后铝合金钻杆连接强度的重要因素。对于本文研究的 $\varnothing 50$  mm 铝合金管体而言,当过盈量为 0.15 mm 时,带钢接头的铝合金钻杆综合性能较优,可承受较大的抗拉强度极限和抗扭极限,抗拉强度极限为 491.66 MPa,极限扭矩为 4162 N·m。

(3) 7075 铝合金钻杆断裂方式为脆性断裂,拉伸与扭转断口宏观上均塑性变形较小、颈缩现象不明显,微观上裂纹源区均以小韧窝为主,断裂方式为脆性断裂。

### 参考文献:

- [1] 李世忠. 钻探工艺学[M]. 北京:地质出版社,1992:62-76.
- [2] 鄢泰宁. 岩土钻掘工艺学[M]. 湖南长沙:中南大学出版社,2014:39-51.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Santus C. Fretting fatigue of aluminum alloy in contact with steel in oil drill pipe connections, modeling to interpret test results[J]. International Journal of Fatigue,2008,30(4):677-688.
- [6] Gelfgat M Y, Basovich V S, Tikhonov V S. Drillstring with aluminum alloy pipes design and practices [C]//SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers,2003.
- [7] Gelfgat M Y, Podrazhansky A M, Geise J, et al. Stratigraphy drilling in deep water with aluminum drill pipes application [C]//SPE/IADC drilling conference. Society of Petroleum Engineers,1997.
- [8] Gelfgat M, Grebtsov N, Podrazhansky A, et al. High-Strength Aluminum Alloys for Deepwater Riser Applications [C]//Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference,2004.
- [9] Gelfgat M Y, Basovich V S, Adelman A J. Aluminium Alloy Tubulars for Oil and Gas Industry [J]. World Oil,2006,227(7):45-51.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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.
- [13] Mao J S, Sun Y H, Liu B C. Research on One-Shot Process of Hot Extrusion Forming Technology for Aluminum Alloy Drill Pipe [J]. Applied Mechanics & Materials,2013,415:623-626.
- [14] 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.
- [15] Liang J, Sun J, Li X, et al. Development and Application of Aluminum Alloy Drill Rod in Geologic Drilling [J]. Procedia Engineering,2014,73(4):84-90.
- [16] 孙永辉. 铝合金钻杆与钢接头冷组装试验研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2016.
- [17] Tikhonov V S, Gelfgat M, Cheatham C, et al. Comprehensive Studies of Aluminium Drillpipe [J]. IADC/SPE, 2010, No. 128328:1-11.
- [18] Tikhonov V, Kultsep A, Alikin R, et al. Application, Calculation and Experimental Evaluation of SCF for Aluminum Drill Pipe With Steel Connector [C]// ASME 2010, International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2010:130-134.
- [19] 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实验研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2014.
- [20] Wang X, Liu B, Gao K, et al. Analysis of thermal deformation and influencing factors in shrink-fitting assembly of aluminum alloy drill pipe [J]. Advances in Mechanical Engineering,2016,8(10):1-15.
- [21] Lourenço M I, Netto T A, Plácido J C R. Aluminum Drill Pipes: Material and Design Developments [C]// ASME 2008, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008:265-276.
- [22] Santus C, Bertini L, Beghini M, et al. Torsional strength comparison between two assembling techniques for aluminium drill pipe to steel tool joint connection [J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping,2009,86(2-3):177-186.
- [23] 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.
- [24] Plácido J C R, Miranda P E V D, Netto T A, et al. Fatigue analysis of aluminum drill pipes [J]. Materials Research,2005,8(4):409-415.
- [25] Den Hartog, J. P., The Mechanics of Plate Rotors for Turbo-Generators [J]. Trans. A. S. M. E., Applied Mechanics Section, 1929,51:1-10.
- [26] 李鹤林. 石油钻柱失效分析及预防 [M]. 北京:石油工业出版社,1999:214-218.