

极地钻探用铝合金双壁钻杆结构强度的有限元分析及试验研究

白皓亮^{1,2}, 刘宝昌^{*1,2}, 王如生¹, 彭莉³, 蔡继雄³

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 中地装(无锡)钻探工具厂有限公司, 江苏 无锡 214100)

摘要:为了实现钻穿冰盖、直接获取冰下基岩样品的科研目标,本文设计了一种极地钻探用铝合金双壁钻杆,使钻杆可以满足极地上覆积雪层、冰层、冰岩夹层和冰下基岩等不同地层的空气反循环、水力反循环、绳索取心钻进相配合等钻进需求。依据铝合金双壁钻杆在极限拉伸、极限拉扭组合工况下的受力情况,开展了双壁钻杆的有限元分析,并对双壁钻杆外管与钢接头连接试样进行了拉伸试验与扭转试验。双壁钻杆有限元分析结果表明:在极限拉伸和极限拉扭组合工况下铝合金双壁钻杆中产生的最大应力分别为183.8 MPa与161.9 MPa,均小于铝合金材料的屈服强度489.99 MPa。双壁钻杆外管与钢接头连接试样强度试验结果也表明:拉伸试样破坏时的极限可承载拉力为399.5 kN,远大于提升1000 m双壁钻杆所需的拉力(208.11 kN);扭转试样破坏时的极限可承载扭矩为8264.7 N·m,同样大于钻杆在正常钻进过程中所承受的最大扭矩(1990.56 N·m)。上述结果表明,极地钻探用铝合金双壁钻杆设计方案可以满足极地钻探使用要求。

关键词:极地钻探;铝合金双壁钻杆;结构设计;有限元分析;强度试验

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)01-0075-08

Finite element analysis and experimental study of aluminum alloy double-wall drill pipe for polar multi-process drilling

BAI Haoliang^{1,2}, LIU Baochang^{*1,2}, WANG Rusheng¹, PENG Li³, CAI Jixiong³

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
2. Key Laboratory of Drilling and Production Technology in Complex Conditions, MNR, Changchun Jilin 130026, China;
3. CGE Group Wuxi Drilling Tools Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214100, China)

Abstract: In order to achieve the scientific research goal of drilling through the ice sheet and directly obtaining subglacial bedrock samples, this paper designs an aluminum alloy double-wall drill pipe for polar drilling, which can meet the drilling requirements of air reverse circulation, hydraulic reverse circulation, and matching with wire-line core drilling in different formations such as overlying snow layer, ice layer, ice-rock interlayer and subglacial bedrock on the polar region. According to the stress of aluminum alloy double-wall drill pipe under the condition of ultimate tensile and ultimate tensile torsion, the finite element analysis of double-wall drill pipe was carried out, and the tensile test and torsion test of the connection specimen between the outer pipe of the double-wall drill pipe and the steel joint were

收稿日期:2023-06-07; 修回日期:2023-11-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.01.010

基金项目:国家重点研发计划“南极冰下复杂地质环境多工艺钻探理论与方法”(编号:SQ2021YFA070410)

第一作者:白皓亮,男,汉族,1998年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为高性能钻杆,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, baihl20@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:刘宝昌,男,汉族,1975年生,吉林大学建设工程学院勘察工程系主任,自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室副主任,教授,博士生导师,长期从事钻探用超硬复合材料及工具、轻质高强铝合金钻杆、地下资源钻采、科学钻探等方面的研究工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, liubc@jlu.edu.cn。

引用格式:白皓亮,刘宝昌,王如生,等.极地钻探用铝合金双壁钻杆结构强度的有限元分析及试验研究[J].钻探工程,2024,51(1):75-82.

BAI Haoliang, LIU Baochang, WANG Rusheng, et al. Finite element analysis and experimental study of aluminum alloy double-wall drill pipe for polar multi-process drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 75-82.

carried out. The finite element analysis results show that the maximum stresses generated in the aluminum alloy double-wall drill pipe under the combination of ultimate tensile and extreme tensile torsion conditions are 183.8MPa and 161.9MPa, respectively, which are less than the yield strength of 489.99MPa of aluminum alloy material. The test results of the specimen strength test of the connection between the outer pipe of the double-wall drill pipe and the steel joint also show that the ultimate bearing tensile force of the tensile specimen during failure is 399.5kN, which is much greater than the tensile force required to lift the 1000m double-wall drill pipe (208.11kN); the limit bearable torque during torsional specimen failure is 8264.7N·m, which is also greater than the maximum torque of the drill pipe in the normal drilling process (1990.56N·m). The above results show that the design scheme of aluminum alloy double-wall drill pipe for polar drilling can meet the requirements of polar drilling.

Key words: polar drilling; aluminum alloy double-wall drill pipe; structural design; finite element analysis; strength test

0 引言

南极大陆常年被巨厚的冰层覆盖,人类对冰下地质环境的认识十分有限。排除南极地区上覆雪层、冰层、冰岩夹层干扰,直接获取冰下基岩样品,对了解全球气候变化的规律和机制,研究地层演变规律、地震活动与板块活动历史,揭露地球早期生命特征和生活环境等具有重要意义^[1-6]。

南极冰层力学性质差异大,常规钻进时孔壁稳定性差、冰屑返排困难、钻具易卡堵、钻进效率低^[7-9]。设计极地钻探用铝合金双壁钻杆,采用空气反循环与水力反循环钻进技术来开展南极复杂冰层的钻进工作,可以大幅度降低井下复杂事故发生率,减少非钻进时间,实现复杂冰层安全高效钻进。

当遇可钻性较高粒雪层、冰层等地层,需要以较高的机械钻速钻进时,可以利用极地钻探用铝合金双壁钻杆实现空气反循环钻进;当遇可钻性较低的深层冰、冰岩夹层和冰下基岩等地层,需要利用低温钻井液冷却和润滑孔内钻具、高效排出孔底冰岩碎屑时,可以利用极地钻探用铝合金双壁钻杆实现水力反循环钻进;当遇到需要提取岩心的冰岩夹层和冰下基岩地层时,也可以将极地钻探用铝合金双壁钻杆的内管拆出,将外管单独作为绳索取心钻杆使用,在其中下入绳索取心钻具,便可以快速地直接获取岩心,既可以减少起下钻的辅助时间、提高钻进效率、降低钻进成本,又能提高岩心采取率、保证岩心质量^[10-11]。

目前,利用双壁钻杆进行反循环钻进的技术多用于地矿系统、水文水井钻探、工程勘察、基础工程施工、油气钻井工程等领域^[12],而用于极地钻探工程的双壁钻杆尚处于研究与试验阶段^[13-14]。为使双壁钻杆可以满足极地上覆粒雪层、冰层、冰岩夹层和

冰下基岩等不同地层的空气反循环、水力反循环、与绳索取心钻进相配合等钻进需求,需要对双壁钻杆内、外管材料进行甄选,以满足极地低温适应性的技术需求。

使用铝合金作为钻杆管体材料,可有效降低地上钻机的负荷,减少运输钻杆所带来的能源损耗;铝合金还是良好的低温材料,相比于钢材明显的低温脆性,铝合金在低温环境下的抗拉强度、屈服强度和材料韧性等物理力学性能均有不同程度的提高,使其可以更好的服役于极地钻探工作;同时,由于铝合金暴露在空气中会迅速与氧气反应形成致密的氧化层,可使铝合金钻杆更好地抵御酸性气体的侵蚀^[15-19]。

1 铝合金双壁钻杆材料选择与结构设计方案

1.1 材料选择

为了实现极地钻具的轻量化,保证钻具的安全和寿命,选定7075铝合金为双壁钻杆内、外管材料、40CrMn合金结构钢为双壁钻杆钢接头材料。利用LE5105型万能试验机配合ETE-GDW-20L型高温环境箱进行铝合金材料低温拉伸试验,分别测量7075铝合金在25、0、-25、-50℃下的抗拉强度与屈服强度,试样的抗拉强度、屈服强度与断后伸长率等数据如表1所示。

试验结果表明:随着温度的降低,7075铝合金材料在-50℃环境下的抗拉强度较25℃环境下提升4.3%,屈服强度提升5.3%。从材料屈服强度、抗拉强度的角度出发,7075铝合金可以适应极地钻探低温环境,可以作为极地钻探用铝合金双壁钻杆内、外管材料使用。

表1 7075 铝合金材料拉伸试验结果

Table 1 7075 aluminum alloy material tensile test results

编号	温度/ ℃	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长 率/%
1	25	489.99	397.75	9.77
2	0	496.96	403.29	7.04
3	-25	499.03	401.46	6.09
4	-50	510.97	418.95	7.45

1.2 结构设计

根据在钻进粒雪层、冰层、冰岩夹层与冰下基岩等不同地层时,对双壁钻杆的尺寸与性能要求,以及钻进深度为1000 m、取心直径为38 mm的项目要求,确定双壁钻杆外管、内管及其连接形式的结构设计。极地钻探用铝合金双壁钻杆结构示意如图1所示,钻杆单根有效长度为3 m,双壁钻杆外管规格为 $\Phi 102\text{ mm} \times 11\text{ mm}$,与其相适配的内管规格为 $\Phi 50\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 。

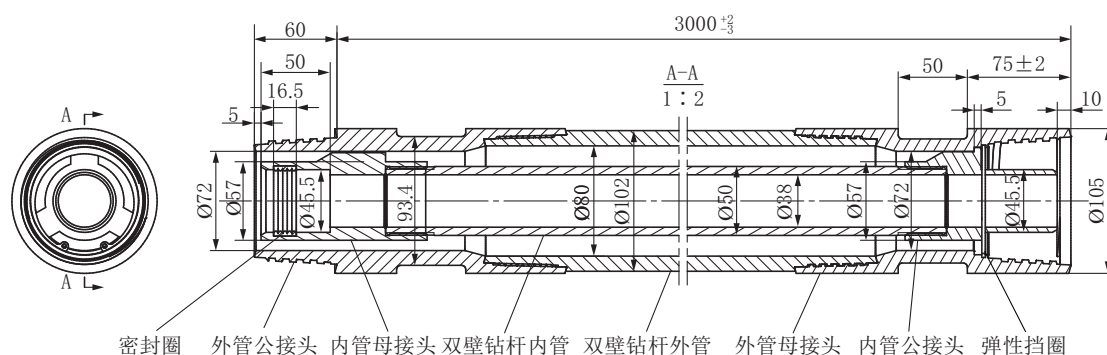


图1 双壁钻杆结构示意

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the double-wall drill pipe

双壁钻杆外管与外管公、母接头之间采用圆锥螺纹连接,并使用螺纹胶辅助粘接,以保证螺纹连接的可靠性,连接方式如图2所示。

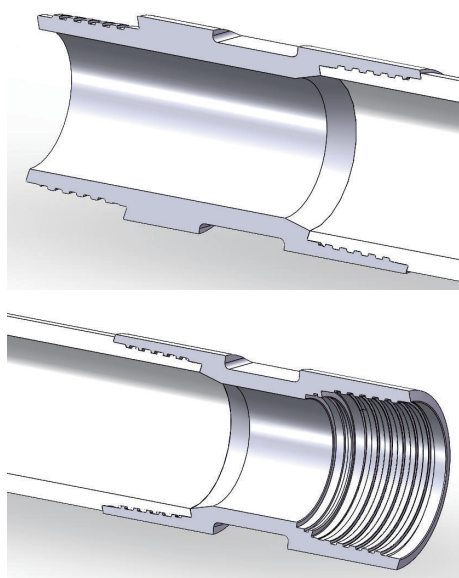


图2 双壁钻杆外管与外管公、母接头间的连接

Fig.2 The connection between the outer pipe of the double-wall drill pipe with the male and female joints of the outer pipe

双壁钻杆内管与内管公、母接头之间采用圆柱螺纹连接,连接方式如图3所示。

连接同一根双壁钻杆的内、外管时,将内管公接

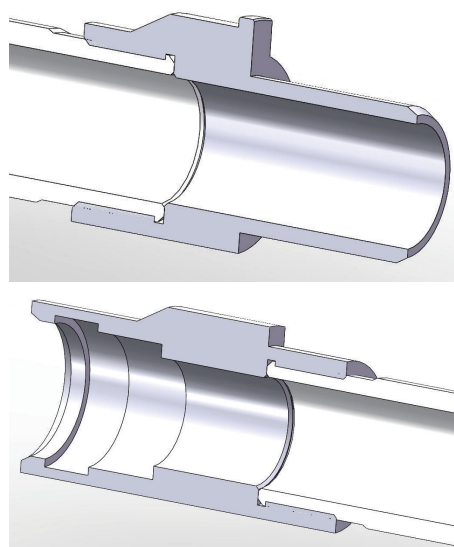


图3 双壁钻杆内管与内管公、母接头间的连接

Fig.3 The connection between the inner pipe of the double-wall drill pipe with the male and female joints of the inner pipe

头导正键推至外管母接头凸台处,再利用弹性挡圈限位,便可以阻止内、外管间的相对轴向运动,连接方式如图4所示。

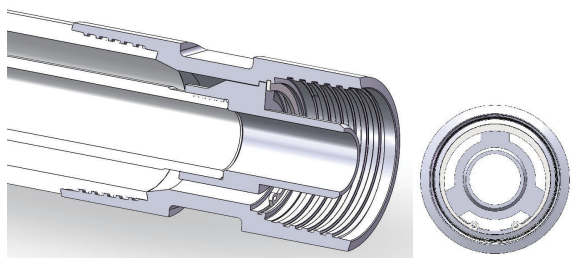


图4 同一根双壁钻杆内、外管间的连接

Fig.4 The connection between the inner and outer pipes of the same double-walled drill pipe

连接两根独立的双壁钻杆总成时,两根独立外管之间依靠圆锥螺纹连接在一起;两根独立内管之间则依靠插接的方式进行连接,二者之间的密封圈可以防止钻井液在内、外管之间渗漏,连接方式如图5所示。

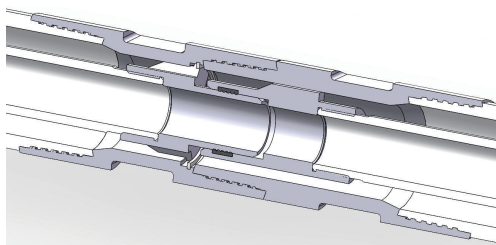


图5 两根独立的双壁钻杆总成间的连接

Fig.5 The connection between two independent double-wall drill pipe assemblies

2 铝合金双壁钻杆不同钻进工况静力学计算

在提钻过程当中,极地钻探用铝合金双壁钻杆孔口断面所承受的拉力最大;而在正常钻进过程当中,双壁钻杆孔口断面同时受到拉力和扭矩的作用,随着钻进深度的增加,孔口断面处所承受的拉力和扭矩也不断增大。针对双壁钻杆孔口断面拉伸工况、拉扭组合工况两种极限工况,开展静力学计算与有限元分析工作,探究极地钻探用铝合金双壁钻杆设计方案是否满足极地冰下基岩钻进使用要求。

由铝合金双壁钻杆外管与外管公、母接头组成的铝合金双壁钻杆外管总成是承受高强度拉力、压力、扭矩和弯矩的主要部分,故对不同钻进工况下铝合金双壁钻杆的有限元分析也主要针对外管总成

展开。

2.1 极限拉伸工况

在提钻过程中,钻杆孔口断面所受到的拉力最大,引起拉应力的主要载荷是钻杆的重力。当钻进深度为1000 m时,考虑到摩擦力影响的最大拉力值由下式确定^[20-21]:

$$G_{\text{II}} = K_{\text{IIp}} G \cos \theta_{\text{cp}} (1 + f \tan \theta_{\text{cp}}) \quad (1)$$

式中: G_{II} ——提升钻杆的重力,N; K_{IIp} ——考虑提升时附加阻力的系数,与钻孔弯曲率和钻进地质技术条件有关; G ——钻杆重力,N; θ_{cp} ——顶角平均值,°; f ——摩擦系数。

$$G = \alpha L g q \quad (2)$$

式中: α ——考虑连接件后钻杆质量增加的系数; L ——钻杆长度,m; g ——重力加速度, m/s^2 ; q ——钻杆每米加权平均质量, kg/m 。

当考虑连接件后钻杆质量增加的系数 α 取1.05、钻杆长度 L 取1000 m、钻杆每米加权平均质量 q 为13.64 kg/m 、重力加速度 g 取9.83 m/s^2 时,将数据代入式(2)可得钻杆重力 $G=140813.90$ N。

当考虑提升时附加阻力的系数 K_{IIp} 取1.2、顶角平均值 θ_{cp} 取3°、摩擦系数 f 取0.3时,将钻杆重力计算结果代入式(1)可得考虑到摩擦力影响的钻杆拉力值 $G_{\text{II}}=171398.17$ N。

2.2 极限拉扭组合工况

2.2.1 拉力

在正常钻进过程当中,钻杆孔口断面所受最大拉力可由下式确定:

$$G_{\text{I}} = G \cos \theta_{\text{cp}} (1 + f \tan \theta_{\text{cp}}) - P_{\text{II}} \quad (3)$$

式中: G_{I} ——钻杆孔口断面所受拉力,N; G ——钻杆重力,N; θ_{cp} ——顶角平均值,°; f ——摩擦系数; P_{II} ——钻压,N。

当钻压 P_{II} 取5000 N时,将数据代入式(2)、(3)可得钻杆孔口断面所受拉力 $G_{\text{I}}=137831.80$ N。

2.2.2 扭矩

在正常钻进过程当中,钻杆孔口断面所受最大扭矩可由下式确定:

$$M = \frac{N}{\omega} \quad (4)$$

式中: N ——消耗的总功率,W; ω ——钻杆回转的角速度, s^{-1} 。

$$N = N_{\text{x-B}} + N_{\text{eod}} + N_{\text{Holl}} \quad (5)$$

式中: N_{x-B} ——钻杆旋转产生的空转功率, W; N_{eao} ——钻头钻进时破碎孔底岩石时所消耗的功率, W; N_{Holl} ——附加功率, W。

钻杆旋转产生的空转功率可由下式确定:

$$N_{x-B} = 0.64Ln^2\sqrt{n} \quad (6)$$

式中: N_{x-B} ——钻杆旋转产生的空转功率, W; n ——钻杆转速, r/s; L ——钻杆长度, m。

当钻杆转速 n 取 500 r/min、钻杆长度 L 取 1000 m 时, 将数据代入式(6)可得钻杆旋转产生的空转功率 $N_{x-B} = 90100.90$ W。

硬质合金和金刚石取心钻头钻进时破碎孔底岩石时所消耗的功率可由下式确定:

$$N_{\text{eao}} = N_y F_3 \quad (7)$$

式中: N_{eao} ——硬质合金和金刚石取心钻头破碎孔底岩石时所消耗的功率, W; N_y ——钻头钻进时单位面积消耗的功率, W/m²; F_3 ——孔底面积, m²。

当钻头钻进时单位面积消耗的功率 N_y 取 150×10^4 W/m²、孔底面积 F_3 取 8.37×10^{-3} m² 时, 将数据代入式(7)可得合金和金刚石取心钻头破碎孔底岩石时所消耗的功率 $N_{\text{eao}} = 12555.00$ W。

附加功率所消耗的功率可由下式确定:

$$N_{\text{Holl}} = aP_{\text{H}}n \quad (8)$$

式中: N_{Holl} ——附加功率, W; a ——经验系数, 对于实际钻进工况中近似于垂直且直径 > 93 mm 的钻孔, $a = 4.56 \times 10^{-2}$; P_{H} ——钻压, N。

当钻压 P_{H} 取 5000 N 时, 将数据代入式(8)可得附加功率 $N_{\text{Holl}} = 1900.00$ W。

将所有计算结果重新代入式(5)可得, 钻进过程中消耗的最大总功率为 104555.9 W, 继续代入式(4)可得, 正常钻进过程中钻杆所受的最大扭矩为 1990.56 N·m。

综上所述, 在极限拉扭工况下钻杆孔口断面所受拉力 G_1 为 137831.80 N, 扭矩 M 为 1990.56 N·m。

以上两种钻进工况下双壁钻杆静力学计算结果如表2所示。

表2 不同钻进工况下双壁钻杆静力学计算结果
Table 2 Static calculation results of double-wall drill pipe under different drilling conditions

钻进工况	拉力/N	扭矩/(N·m)
极限拉伸工况	171398.17	—
极限拉扭组合工况	137831.80	1990.56

3 铝合金双壁钻杆的有限元分析

3.1 铝合金双壁钻杆的有限元分析过程

(1)创建模型。首先, 采用 SolidWorks 建立极地钻探用铝合金双壁钻杆外管总成的模型。同时, 为了提高工作效率, 对双壁钻杆外管总成中圆角、倒角与弹性挡圈槽等部位进行了简化。并将模型导入 ABAQUS 当中。

(2)定义材料属性。分别为双壁钻杆外管与外管公、母接头定义材料属性, 铝合金材料在室温 25℃ 下的弹性模量为 70 GPa、泊松比为 0.33、密度为 2.85 g/cm³; 钢材弹性模量为 200 GPa、泊松比为 0.25、密度为 7.85 g/cm³。

(3)定义相互作用。将双壁钻杆外管与外管公、母接头间螺纹连接处的接触定义为面-面接触, 摩擦系数设置为 0.17。并在双壁钻杆外管公接头端面新建参考点, 将参考点与该端面耦合。

(4)划分网格。所采用的网格类型为四面体网格, 外管最小网格单元尺寸为 4 mm, 网格数量为 841730 个; 公接头最小网格单元尺寸同样为 4 mm, 网格数量为 79086 个; 母接头最小网格单元尺寸为 4 mm, 网格数量为 66520 个。

3.2 铝合金双壁钻杆的有限元分析结果

3.2.1 极限拉伸工况

将外管母接头端面固定, 在外管公接头端面为铝合金双壁钻杆外管总成设置极限拉伸工况下的荷载边界条件: 承受的拉力为 171398.17 N。创建模拟作业并提交运行。

该工况下的应力云图如图6所示。

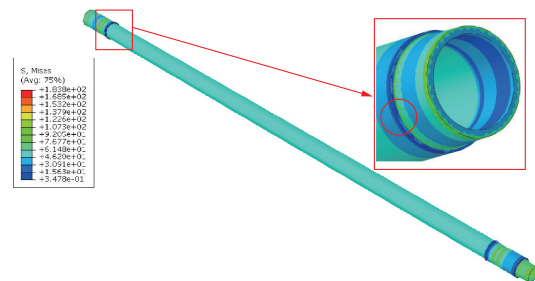


图6 极限拉伸工况下双壁钻杆外管总成应力云图
Fig.6 Stress cloud diagram of double-wall drill pipe outer pipe assembly under extreme tensile conditions

最大应力点位于铝合金双壁钻杆外管与钢接头连接处螺纹根部, 其值为 183.8 MPa。

3.2.2 极限拉扭组合工况

将外管母接头端面固定,在外管公接头端面为铝合金双壁钻杆外管总成设置弯扭组合工况下的荷载边界条件:承受的拉力为137831.80 N,扭矩为1990.56 N·m。创建模拟作业并提交运行。

该工况下的应力云图如图7所示。

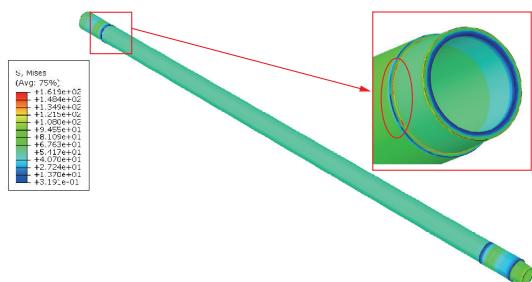


图7 拉扭组合工况下双壁钻杆外管总成应力云图

Fig.7 Stress cloud diagram of the outer pipe assembly of double-wall drill pipe under tensile-torsional combined working conditions

综上所述,针对双壁钻杆外管总成在极限拉伸工况、拉扭组合工况下的有限元分析结果表明:钻杆孔口断面在提钻时产生的最大应力为183.8 MPa、在正常钻进过程当中产生的最大应力为161.9 MPa,均远小于铝合金双壁钻杆外管材料的屈服强度489.99 MPa。故认为,极地钻探用铝合金双壁钻杆设计方案满足极地钻探强度方面的使用要求。

4 铝合金双壁钻杆与钢接头连接试样强度试验

为了探究7075铝合金材料制得的铝合金钻杆与40CrMn合金钢材料制得的钢接头间的连接强度,制备了铝合金钻杆外管与钢接头连接试样,并利用WA-1000C型万能试验机完成铝合金钻杆外管与钢接头连接试样的拉伸试验、利用扭转试验机完成铝合金钻杆外管与钢接头连接试样的扭转试验^[16]。

铝合金钻杆外管与钢接头连接试样中包含双壁钻杆外管公、母接头各1支,以及铝合金双壁钻杆外管截取段2支。连接后的试样总长为400 mm,如图8所示。

4.1 铝合金双壁钻杆与钢接头连接试样拉伸试验

制得试样后,利用WA-1000C型万能试验机完成铝合金钻杆外管与钢接头连接试样拉伸试验。图9展示的是断裂后的铝合金钻杆与钢接头连接试



图8 铝合金钻杆与钢接头连接试样

Fig.8 Sample of aluminum alloy drill pipe connected with steel joint

样,图10展示的是铝合金钻杆与钢接头连接试样断口。



图9 断裂的铝合金钻杆与钢接头连接试样

Fig.9 Fractured sample connecting aluminum drill pipe to steel joints



图10 铝合金钻杆与钢接头连接试样断口

Fig.10 Fracture of sample connecting aluminum drill pipe to steel joints

试样断裂位置为铝合金钻杆外管公螺纹根部第一、第二螺纹牙之间;试样破坏时的极限可承载拉力为399.5 kN,根据断裂位置的横截面积计算试样的极限抗拉强度为477.73 MPa,略小于材料抗拉强度。由式(1)的计算结果可知,提升1000 m长度的铝合金双壁钻杆所需的最大拉力为208.11 kN,远小于试验中试样破坏时可承载的极限拉力,表明极地钻探用铝合金双壁钻杆的设计方案可以满足正常的起下钻工作要求,如遇卡钻、埋钻需要进行强力起拔,则要控制起拔力不可超过399.5 kN。

4.2 铝合金双壁钻杆与钢接头连接试样扭转试验

利用扭矩试验仪完成铝合金钻杆外管与钢接头连接试样扭转试验,从零开始逐渐增大施加在试样上的扭矩值,直至试样发生破坏。增大扭矩至

8264.7 N·m 时,钻杆公螺纹密封面部分脱落,如图 11 所示,此时认为该状态下钻杆已发生破坏且无法正常完成钻进工作。

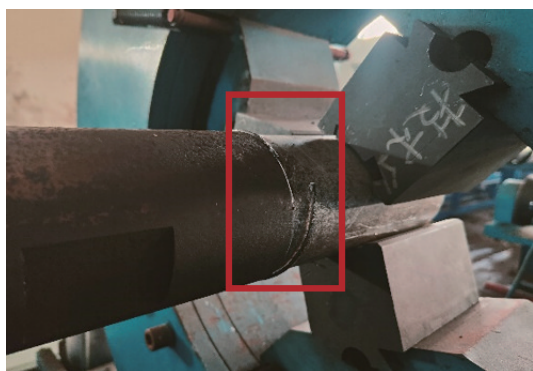


图 11 钻杆公螺纹密封面部分脱落

Fig.11 Drill pipe male thread sealing surface partially detached

由式(4)的计算结果可知,在正常钻进过程当中钻杆所承受的最大扭矩为 1990.56 N·m,小于试验中试样破坏时的极限扭矩值,同样表明极地钻探用双壁钻杆的设计方案可以满足正常钻进过程中的扭矩使用需求。

5 结论

铝合金双壁钻杆的有限元分析结果表明:在极限拉伸工况下 $\Phi 102$ mm 铝合金双壁钻杆中的最大应力为 183.8 MPa,在拉扭组合工况下最大应力为 161.9 MPa,在以上两种工况下铝合金双壁钻杆中产生的最大应力均小于铝合金材料的屈服强度 489.99 MPa。

铝合金双壁钻杆外管与钢接头连接试样拉伸试验与扭转试验表明:拉伸试样破坏时的极限可承载拉力为 399.5 kN,而提升 1000 m 长度的铝合金双壁钻杆所需的最大拉力为 208.11 kN,远小于试验中试样破坏时可承载的极限拉力;扭转试样破坏时的极限可承载扭矩为 8264.7 N·m,而钻杆在正常钻进过程中所需承受的最大扭矩为 1990.56 N·m,同样小于试验中试样破坏时的极限扭矩值。

上述铝合金双壁钻杆的有限元分析与双壁钻杆外管与钢接头连接试样强度试验均表明,极地钻探用铝合金双壁钻杆设计方案可以满足极地钻探使用要求。

参考文献(References):

- [1] 刘小汉. 南极大陆的演化与科学探索[J]. 人与生物圈, 2017(S1):8-11.
LIU Xiaohan. The evolution and scientific exploration of the Antarctic continent[J]. Man and the Biosphere, 2017(S1):8-11.
- [2] 雷子炎,葛倩,陈东,等. 中全新世以来西南极阿蒙森海沉积物来源和古气候意义[J]. 地学前缘, 2022, 29(4):179-190.
LEI Ziyang, GE Qian, CHEN Dong, et al. Provenance of sediments in the Amundsen Sea, West Antarctic since the mid-Holocene and paleoclimate reconstruction[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(4):179-190.
- [3] Edward G. W. Gasson, Benjamin A. Keisling. The Antarctic ice sheet: A paleoclimate modeling perspective[J]. Oceanography, 2020, 33(2):90-100.
- [4] J. M. Palais, M. S. Germani, G. A. Zielinski. Inter-hemispheric transport of volcanic ash from a 1259 A.D. volcanic eruption to the Greenland and Antarctic ice sheets[J]. Geophysical Research Letters, 1992, 19(8):801-804.
- [5] Anthony J. Gow, Terrence Williamson. Volcanic ash in the Antarctic ice sheet and its possible climatic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 13(1):210-218.
- [6] 陈廷愚. 南极洲主要矿产资源[J]. 地球学报(中国地质科学院院报), 1996(1):65-77.
CHEN Tingyu. Main mineral resources of Antarctica[J]. Acta Geoscientia Sinica (Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences), 1996(1):65-77.
- [7] 张楠,王亮, Pavel Talalay, 等. 极地冰钻关键技术研究进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2):1-16.
ZHANG Nan, WANG Liang, Pavel Talalay, et al. Advances in research on key technology for ice drilling in the polar regions[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2):1-16.
- [8] 李冰,韩丽丽,李亚洲,等. 美国极地钻探科学目标分析与钻探技术进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(9):10-25.
LI Bing, HAN Lili, LI Yazhou, et al. Science goals analysis and technological progress of U.S. ice drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9):10-25.
- [9] 范晓鹏,张楠,胡正毅,等. 中国南极昆仑站深冰芯科学钻探工程进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(9):1-8.
FAN Xiaopeng, ZHANG Nan, HU Zhengyi, et al. Progress of the deep ice core scientific drilling project of China at Kunlun Station in Antarctica[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(9):1-8.
- [10] 牛金山. 浅谈绳索取心钻具结构及优点[J]. 中国集体经济, 2011(28):186-187.
NIU Jinshan. Introduction to the structure and advantages of rope coring drilling tools[J]. China Collective Economy, 2011(28):186-187.
- [11] 李鑫森,李宽,孙建华,等. 国内外绳索取心钻具研发应用概况及特深孔钻进问题分析[J]. 钻探工程, 2020, 47(4):15-23, 39.

- LI Xinmiao, LI Kuan, SUN Jianhua, et al. Development and application of wireline coring tool and diagnosis of ultra-deep hole drilling problems[J]. *Drilling Engineering*, 2020, 47(4): 15-23, 39.
- [12] 伍晓龙, 冯钰琦, 杜垚森, 等. 气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J]. *钻探工程*, 2022, 49(3): 83-91.
- WU Xiaolong, FENG Yuqi, DU Yaosen, et al. Simulation analysis of the flow field of the air lift reverse circulation dual wall drill tool[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(3): 83-91.
- [13] 赵长亮, 王勇军, 聂德久, 等. 雄安新区D19井破碎热储层气举反循环钻进技术[J]. *钻探工程*, 2022, 49(4): 137-143.
- ZHAO Changliang, WANG Yongjun, NIE Dejiu, et al. Gas lift reverse circulation drilling technology for D19 well in broken thermal reservoir in Xiong'an New Area[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(4): 137-143.
- [14] 董硕, 贺文博, 曹金娥, 等. 冰层空气反循环快速钻进方法及冰屑运移研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(1): 49-56.
- DONG Shuo, HE Wenbo, CAO Jine, et al. Study on transportation of ice chips in ice drilling with air reverse circulation[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(1): 49-56.
- [15] 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.
- LIANG Jian, LIU Xiumei, WANG Hanbao. Application analysis of aluminum alloy drilling rods in geologic drilling[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2010(3): 62-64.
- [16] 梁健, 张金昌, 尹浩, 等. 钻井利器之“铝合金钻杆”[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(5): 1-3.
- LIANG Jian, ZHANG Jinchang, YIN Hao, et al. An efficient drilling tool aluminum alloy drill pipe[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(5): 1-3.
- [17] 孙澜江, 张抒夏, 杨睿, 等. 铝合金钻杆在国内外的研究及现场应用[J]. *西部探矿工程*, 2020, 32(10): 49-52.
- SUN Lanjiang, ZHANG Shuxia, YANG Rui, et al. Research and field application of aluminum alloy drill pipe at home and abroad [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2020, 32(10): 49-52.
- [18] 冯春, 杨尚谕. 铝合金钻杆的特点及发展应用[J]. *石油管材与仪器*, 2017(4): 1-7.
- FENG Chun, YANG Shangyu. Feature and progress in aluminum alloy drill pipe [J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2017(4): 1-7.
- [19] 王小红, 郭俊, 郭晓华, 等. 铝合金钻杆材料、特点及其磨损研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(1): 431-434, 437.
- WANG Xiaohong, GUO Jun, GUO Xiaohua, et al. Research progress on the material, characteristics and wear of aluminum alloy drilling rods [J]. *Materials Reports*, 2014, 28(1): 431-434, 437.
- [20] 普·甘朱编. 岩心钻探实用计算[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- R. A. Ganjumjun. *Practical Calculations for Core Drilling* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980.
- [21] 梁健. 科学超深井铝合金钻杆优化设计与腐蚀防护工艺[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- LIANG Jian. *Optimum design and corrosion protection of aluminum alloy drill pipe in scientific ultra-deep drilling* [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

(编辑 荐华)