

# 铝合金钻杆与钢接头可靠连接过盈量的 计算及组装工艺

毛建设, 孙友宏, 刘宝昌, 薛军, 马少明, 时元玲

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 铝合金钻杆具有密度小、比强度高、耐腐蚀性强等优点,但其耐磨性较低。实际使用时,将铝合金钻杆杆体与钢接头组装在一起形成钻杆柱,由钢接头来承受拧卸操作。由于铝合金与钢在弹性模量、热膨胀系数、屈服强度等方面的差异,经常出现连接不可靠的情况。针对  $\text{Ø}147\text{ mm} \times 13\text{ mm}$  的内加厚铝合金钻杆进行过盈量的理论计算,得出满足传递载荷及材料不产生塑性变形的过盈量范围是  $0.712 \sim 1.009\text{ mm}$ 。同时对钻杆杆体及钢接头的组装工艺进行介绍。

**关键词:** 铝合金钻杆;钢接头;过盈量;冷组装

**中图分类号:** P634.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2013)12-0028-04

**Calculation of Interference in the Reliable Connection of Aluminum Drill Pipe and Steel Tool Joint/MAO Jian-she, SUN You-hong, LIU Bao-chang, XUE Jun, MA Shao-ming, SHI Yuan-ling (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)**

**Abstract:** Aluminum drill pipe has the advantages of low density, high specific strength and strong corrosion resistance, but the wear resistance is low. In the practical application, the aluminum drill pipe body and steel tool joints are assembled together to form a drill string, the steel tool joints are used to withstand the screwing and unloading operation. Because of the differences of aluminum and steel in the elastic modulus, thermal expansion coefficient and the yield strength, the unreliable connections often happen. The theoretical calculations of interference are made on aluminum drill pipe with internal upset, which has the diameter of 147mm and wall thickness of 13mm, the interference range should be  $0.712 \sim 1.009\text{ mm}$  to meet transfer load without plastic deformation. The paper also introduces the assembly process of drill rod and steel joint.

**Key words:** aluminum drill pipe; steel tool joint; interference; cold assembling technique

## 0 引言

石油和天然气工业及地质勘探业的发展,对钻探(井)提出了越来越高的技术要求。不仅钻探工作量增加,深度也大大增加。随着钻探(井)深度的增加,钻探的工艺难题更加复杂化。不仅要全面改进钻探设备和破碎岩石的工具,而且要提高钻杆的工作性能<sup>[1]</sup>。

铝合金钻杆与钢钻杆相比,在钻探(井)中具有低重度,在各种恶劣环境下的耐腐蚀性、无磁性以及稳定的力学性能,还具有钻进能耗低、易搬运及回收等优点<sup>[2~4]</sup>。但其耐磨性较低,在钻进操作中,接头需要经常地拧卸,因此实际使用时一般将铝合金钻杆管体与钢接头组装在一起形成钻杆柱,由钢接

头来承受拧卸操作。图1为铝合金钻杆和钢接头连接示意图。

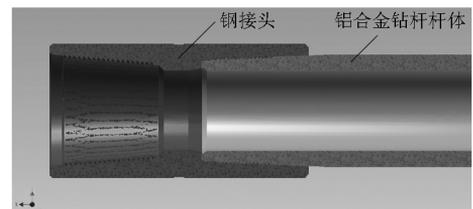


图1 铝合金钻杆杆体和钢接头连接剖视图

由于铝合金与钢在材料性能等方面的差异,经常出现连接不可靠的情况。为解决连接问题,俄罗斯研发了热组装工艺技术,通过加热钢接头,使钢接头膨胀,然后快速旋入铝合金管体,待其冷却后产生一定的预紧力,实现过盈配合。在俄罗斯多年的实

收稿日期:2013-12-01; 修回日期:2013-12-08

**基金项目:** 国家国际科技合作专项资助“深部油气钻探用高性能钻具系统关键技术合作研究”(2013DFR70490)、吉林省科技发展计划资助项目“深井油气钻探用铝合金钻杆关键制造技术”(20130206023GX)

**作者简介:** 毛建设(1986-),男(汉族),河南新乡人,吉林大学博士研究生在读,地质工程专业,从事岩土钻凿工艺及机具的研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,maojs09@mails.jlu.edu.cn。

实践证明,此连接方法取得了很好的效果。而在国内,铝合金钻杆还没开始大范围的使用,关于铝合金杆体和钢接头连接的研究比较少,杆体和钢接头的连接属于过盈连接,在径向产生过盈,通过热胀(冷缩)来连接,承受较大的载荷;而铝合金杆体和钢接头的过盈量,是实现可靠连接的关键参数之一,所以本文针对  $\varnothing 147 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  的内加厚铝合金钻杆,对其过盈量进行理论计算,为实现可靠连接提供参数。

### 1 铝合金钻杆杆体与钢接头的过盈连接形式

铝合金钻杆杆体与钢接头采用过盈连接,即钢接头内表面连接处的最大极限尺寸小于钻杆杆体外表面的最小极限尺寸,通过热组装或冷组装方法使得杆体与钢接头配合达到最紧状态,产生足够的预紧力及连接强度<sup>[5]</sup>。ISO15546:2007 Petroleum and natural gas industries-Aluminium alloy drill pipe 标准推荐的  $\varnothing 147 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  内加厚铝合金钻杆,其尺寸见表 1,材料参数见表 2,采用梯形锥螺纹连接<sup>[6]</sup>。铝合金钻杆与钢接头过盈配合存在于 3 个接触面,这 3 个表面均存在过盈,分为 2 种形式<sup>[5]</sup>,如图 2 所示。

表 1  $\varnothing 147 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  铝合金钻杆与钢接头配合尺寸参数 /mm

| 名称 | 参 数     |        |         |         |       |       |
|----|---------|--------|---------|---------|-------|-------|
| 钻杆 | $D_2$   | $D_3$  | $D_4$   | $D_5$   | $D_6$ | $L_5$ |
|    | 138.6   | 134.5  | 139.656 | 141.5   | 144.5 | 160   |
| 接头 | $d_3$   | $d_4$  | $d_5$   | $d_6$   | $l$   |       |
|    | 145.495 | 144.12 | 138.22  | 140.251 | 140   |       |

注: $D_2$ —钻杆端面处的螺纹端部外倒角直径; $D_3$ —管端外径; $D_4$ —端面处管子螺纹外径; $D_5$ —测量点的管螺纹小径; $D_6$ —测量点的管子锥面密封直径; $L_5$ —管端和稳定槽的加工锥形表面末端之间的距离; $d_3$ —钻杆接头端面处锥面密封直径; $d_4$ —钻杆接头端面处的螺纹内径; $d_5$ —测量点钻杆接头螺纹小径; $d_6$ —测量点钻杆接头锥面密封直径; $l$ —钻杆接头端面到内台肩面的距离。

表 2 铝合金钻杆与钢接头的基本参数

| 名称    | 密度 /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 最小屈服极限 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | 最小抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$ | 弹性模量 $E/\text{MPa}$ | 泊松比 $\nu$ | 线膨胀系数 $\alpha/(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})^{-1}$ |
|-------|---|----------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------|---|
| 铝合金钻杆 | 2.78                                    | 480                              | 530                          | 71000               | 0.30      | 22.6  |
| 钢接头   | 7.85                                    | 735                              | 880                          | 210000              | 0.27      | 11.4  |

(1) 径向过盈: 梯形锥螺纹部位过盈  $I_r$ ; 圆锥面接触部位过盈  $I_c$ 。

(2) 轴向过盈: 钻杆杆体与接头内部台肩接触面处的过盈  $I_s$ 。

其中,径向过盈量受铝合金钻杆杆体与钢接头

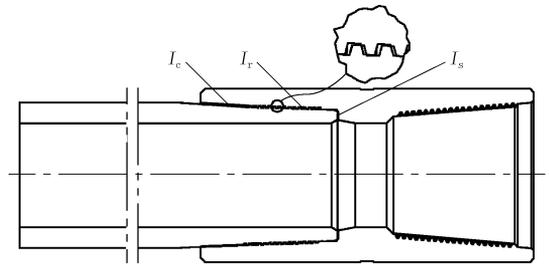


图 2 铝合金钻杆—钢接头过盈配合示意图

的几何参数控制,而轴向过盈则是在装配终止面初始接触时,通过施加额外的扭矩而获得。本文主要考虑扭矩等外载荷在径向产生的过盈量。

### 2 过盈量的计算

铝合金钻杆杆体与钢接头过盈配合的参数根据机械设计手册过盈连接进行<sup>[7]</sup>。由于铝合金钻杆杆体与钢接头配合不同于一般圆柱面、圆锥面的配合,既有带螺纹段,又有无螺纹段,杆体和钢接头采用特殊的梯形螺纹连接,在螺纹侧面及根部产生过盈,相对于锥面非螺纹连接,增大了接触面积,使得螺纹连接可以承受更大的载荷,在此将螺纹区域简化,考虑无螺纹圆锥面连接的情形,对其计算。

根据表 1 及图 3、图 4 中尺寸,按照《圆锥过盈配合的计算和选用》(GB/T 15755 - 1995),进行铝合金钻杆与钢接头配合参数的计算<sup>[8]</sup>。圆锥面过盈配合时,锥度较小,一般折算成圆柱面来求计算所

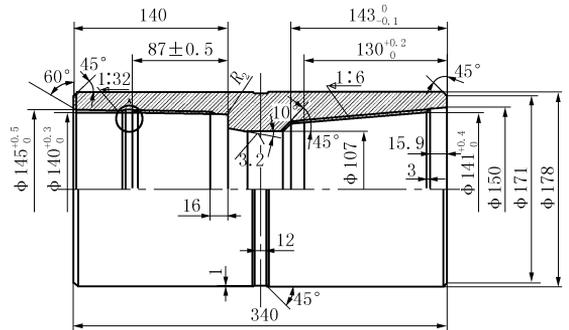


图 3 与  $\varnothing 147 \text{ mm}$  内加厚铝合金钻杆连接的钢接头尺寸图

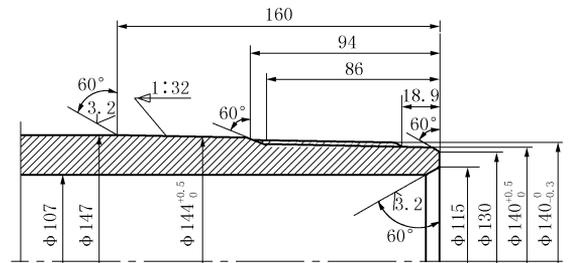


图 4  $\varnothing 147 \text{ mm}$  内加厚铝合金钻杆杆体尺寸图

需要的过盈量。计算时假设:(1)各个部件的应变在弹性范围之内;(2)其配合面间的压力是均匀分布的;(3)包容件为钢接头,被包容件为铝合金钻杆杆体。

### 2.1 圆锥过盈连接传递载荷所需的最小过盈量

(1)传递扭矩所需的最小结合压强

$$P_{f_{\min}} = 2MK / (\pi d_m^2 l_f \mu)$$

根据铝合金钻杆在塔里木某勘探井的应用数据。该井井深 7600 m,水平位移达 1000 m,钻进时钻杆需要传递的扭矩  $12.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{[2]}$ ,由于使用铝合金钻杆主要是为了进行超深井钻探,故取扭矩  $15 \text{ kN} \cdot \text{m}$  进行过盈连接的计算。

圆锥结合面大端直径  $d_1 = 145.45 \text{ mm}$ ,小端直径  $d_2 = 139.656 \text{ mm}$ ,结合长度  $l_f = 124 \text{ mm}$ ;平均直径  $d_m = (d_1 + d_2) / 2 = (145.495 + 139.656) / 2 = 142.5755 \text{ mm}$ 。

取安全系数  $K = 1.5$ ,摩擦系数  $\mu = 0.12$ ,则有

$$\begin{aligned} P_{f_{\min}} &= 2MK / (\pi d_m^2 l_f \mu) \\ &= \frac{2 \times 15 \times 1.5 \times 1000 \text{ N} \cdot \text{m}}{3.14 \times 142.5755^2 \times 124 \times 0.12 \text{ mm}^2} \\ &= 47.3794 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(2)包容件直径比

钢接头为包容件,其外径  $d_a = 178 \text{ mm}$ ,直径比  $q_a = d_m / d_a = 142.5755 / 178 = 0.80098$ 。

(3)被包容件直径比

铝合金钻杆杆体为被包容件,其内径  $d_i = 121 \text{ mm}$ ,直径比  $q_i = d_i / d_m = 121 / 142.5755 = 0.84867$ 。

(4)包容件传递载荷所需的最小直径变化量

$$\begin{aligned} e_{a_{\min}} &= P_{f_{\min}} \cdot (d_m / E_a) \cdot C_a \\ &= 47.3794 \times (142.5755 / 210000) \times 4.84988 \\ &= 0.15601 \text{ mm} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} C_a &= [(1 + q_a^2) / (1 - q_a^2)] + v_a \\ &= [(1 + 0.80098^2) / (1 - 0.80098^2)] + 0.27 \\ &= 4.84988 \end{aligned}$$

(5)被包容件传递载荷所需的最小直径变化量

$$\begin{aligned} e_{i_{\min}} &= P_{f_{\min}} \cdot (d_m / E_i) \cdot C_i \\ &= 47.3794 \times (142.5755 / 71000) \times 5.8446 \\ &= 0.55607 \text{ mm} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} C_i &= [(1 + q_i^2) / (1 - q_i^2)] - v_i \\ &= [(1 + 0.84867^2) / (1 - 0.84867^2)] - 0.30 \\ &= 5.8446 \end{aligned}$$

(6)传递载荷所需的最小有效过盈量

$$\delta_{\min} = e_{a_{\min}} + e_{i_{\min}} = 0.15601 + 0.55607 = 0.71208 \text{ mm}$$

2.2 圆锥过盈连接件不产生塑性变形所容许的最大有效过盈量

(1)包容件不产生塑性变形所允许的最大结合压力

钢为塑性材料,故有

$$P_{f_{a_{\max}}} = a\sigma_{sa} = 0.19023 \times 735 = 139.8197 \text{ MPa}$$

其中

$$a = \frac{1 - q_a^2}{\sqrt{3 + q_a^4}} = \frac{1 - 0.80098^2}{\sqrt{3 + 0.80098^4}} = 0.19023$$

(2)被包容件不产生塑性变形所允许的最大结合压力

铝合金为塑性材料,故有

$$P_{f_{i_{\max}}} = c\sigma_{si} = 0.13987 \times 480 = 67.1376 \text{ MPa}$$

其中

$$c = \frac{1 - q_i^2}{2} = \frac{1 - 0.84867^2}{2} = 0.13987$$

(3)连接件不产生塑性变形的最大结合压力,取上述  $P_{f_{a_{\max}}}$  与  $P_{f_{i_{\max}}}$  两者之间的较小值,其值为:

$$P_{f_{\max}} = 67.1376 \text{ MPa}$$

(4)钢接头(包容件)不产生塑性变形所允许的最大直径变化量

$$\begin{aligned} e_{a_{\max}} &= (P_{f_{\max}} d_m / E_a) C_a \\ &= (67.1376 \times 142.5755 / 210000) \times 4.84988 \\ &= 0.22106 \text{ mm} \end{aligned}$$

(5)铝合金钻杆杆体(被包容件)不产生塑性变形所允许的最大直径变化量

$$\begin{aligned} e_{i_{\max}} &= (P_{f_{\max}} d_m / E_i) C_i \\ &= (67.1376 \times 142.5755 / 71000) \times 5.8446 \\ &= 0.78796 \text{ mm} \end{aligned}$$

(6)连接件不产生塑性变形所允许的最大有效过盈量:

$$\delta_{e_{\max}} = e_{a_{\max}} + e_{i_{\max}} = 0.22106 + 0.78796 = 1.00902 \text{ mm}$$

因此,对于直径 147 mm、壁厚 13 mm 的内加厚铝合金钻杆杆体和钢接头的可靠连接的过盈量应满足下式:

$$\delta_{\min} < \delta \leq \delta_{e_{\max}}$$

一般可取

$$\delta \approx \frac{\delta_{\min} + \delta_{e_{\max}}}{2} = \frac{0.71208 + 1.00902}{2} = 0.86005 \text{ mm}$$

### 3 组装工艺

对于铝合金钻杆杆体与钢接头的连接,目前世界上实施的主要有俄罗斯巴索维奇博士研发的热组装技术。组装前,先把钢接头加热到一定温度使其

膨胀,随后在膨胀状态下快速拧到铝合金钻杆杆体上,同时在铝合金杆体内部对铝合金进行冷却,使其温度不能超过其材料允许使用温度的上限<sup>[6]</sup>,防止因温升导致的铝合金强度降低,组装完成后,在外部对钢接头进行冷却,待冷却后螺纹连接处获得一定的预紧力,达到组装要求。

而随着温度的降低,铝合金屈服强度和抗拉强度有所增加,并且拉伸强度增加比较明显,塑性和韧性有所提高,疲劳特性得到改善<sup>[9,10]</sup>,根据铝合金低温下强度增加的特点,可采用冷组装方法来进行杆体和钢接头的组装,具体为:将铝合金钻杆杆体冷却,使其收缩,然后将钢接头快速拧入,目前此方法尚处于研究阶段,进行冷却介质及冷却参数的确定与优选,未进行大规模生产。

#### 4 结论

(1)针对大直径铝合金钻杆杆体与钢接头的组装,对其过盈量进行理论计算,得出可以满足超深井钻探扭矩的钻杆,同时铝合金杆体和钢接头的变形都在弹性范围内,没有引起塑性变形。

(2)通过过盈量的计算,为后续钻杆的设计和组装工艺的研究提供参数,针对 $\varnothing 147\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ 的内加厚铝合金钻杆,可以采用 $0.712 \sim 1.009\text{ mm}$ 之间的过盈量进行测试,结合热组装的温度,选择合适的过盈量。

(上接第27页)

#### 6 结语

(1)通过总结泥浆制冷系统在祁连山木里盆地、东北漠河盆地应用的成功经验,研制出一套更完善的天然气水合物钻探泥浆制冷系统,并应用于西藏羌塘盆地;

(2)通过在西藏羌塘盆地、祁连山木里盆地和东北漠河盆地的应用试验,证明了该套泥浆制冷系统应用范围广,能在高海拔、高纬度恶劣环境下正常工作,达到了设计要求,满足天然气水合物钻探要求。

#### 参考文献:

[1] 刘广志. 天然气水合物——未来新能源及其勘探开发难度[J]. 自然杂志, 2005, 27(5): 258-263.  
 [2] 张永勤. 国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 1-8.  
 [3] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合物的勘探与开发[M].

(3)由于采用简化的模型进行计算,没有考虑螺纹的过盈和轴向内支撑端面的过盈,还需在此过盈量上进行多次试验,才能得出最优的过盈量。

(4)对铝合金杆体和钢接头的组装方法,热组装和冷组装进行了简单的介绍,过盈量的选择应和采用的组装工艺相配合,以达到最优的连接效果。

#### 参考文献:

[1] 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, 40(6): 7-10.  
 [2] 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.  
 [3] 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.  
 [4] 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.  
 [5] C. Santus, L. Bertini, M. Beghini, et al. 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.  
 [6] ISO 15546-2011, Petroleum and Natural Gas Industries—Aluminum Alloy Drill Pipe[S].  
 [7] 成大先, 等. 机械设计手册[M]. 北京: 化工工业出版社, 2002.  
 [8] GB/T 15755-1995, 圆锥过盈配合的计算和选用[S].  
 [9] 陈鼎, 陈振华. 铝合金在低温下的力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2000, (4): 1-7.  
 [10] 任彦, 孙金菊. 铝合金的低温机械性能评估[J]. 低温工程, 2009, (2): 56-60.

湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2002. 66-67.

[4] 赵江鹏, 孙友宏, 郭威. 钻井泥浆冷却技术发展现状与新型泥浆冷却系统的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(9): 1-5.  
 [5] 陈大勇, 陈晨, 冯雪威. 漠河盆地天然气水合物钻探施工中的泥浆冷却系统及其应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 705-709.  
 [6] Ali G. Kadaster, Keith K. Millheim, Tommy W. Thompson. The Planning and Drilling of Hot Ice#1 - Gas Hydrate Exploration Well in the Alaskan Arctic [A]. IADC/SPE Drilling Conference [C]. Amsterdam, Netherlands, 2005.  
 [7] Robert B. Hunter, Scott A. Digert, Ray Boswel, et al. Alaska Gas Hydrate Research and Stratigraphic Test Preliminary Results [R]. 2008.  
 [8] 李国圣, 孙友宏, 郭威. 天然气水合物钻井泥浆冷却系统的设计及现场应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(2): 8-11.  
 [9] 赵江鹏. 天然气水合物钻探泥浆制冷系统及孔底冷冻机构传热数值模拟[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2011.  
 [10] 于磊, 赵大军, 孙友宏, 等. 漠河冻土地区天然气水合物钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(6): 13-16.  
 [11] 张强. 漠河盆地 MK-1 与 MK-2 井天然气水合物钻探施工关键技术[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2012.