

# 南极冰层钻进铠装钻具升降运动特性分析与试验

宋佳宇<sup>1</sup>, 徐会文<sup>1</sup>, 韩丽丽<sup>2</sup>, 刘宁<sup>1</sup>, Pavel Talalay<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**极地冰层取心钻具的升降运动特性对提高钻进效率、减少孔内事故具有重要影响。在总结极地冰钻特点的基础上,分析了钻孔直径、钻具质量和钻井液的流变特性对钻具在升降过程中的影响,钻具在钻孔过程中运动的两阶段特性、滞流层的存在与影响因素,确定了因钻具的运动所引起的流体扰动量与扰动范围。研制了用于测试铠装电缆悬挂式钻具升降测试试验台和测试的方法,通过对3个不同直径与3个不同质量的钻具在其下落过程的实际测试,得出了钻具下落速度与直径呈二次方关系,与钻具的质量成线性关系的结论。

**关键词:**南极冰钻;铠装电缆钻具;钻井液;升降运动

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)07-0012-04

**Analysis and Experimental Study on Motion Characteristics of Armored Cable Drilling Tool Lifting in Antarctic Ice Drilling/SONG Jia-yu<sup>1</sup>, XU Hui-wen<sup>1</sup>, HAN Li-li<sup>2</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, Pavel Talalay<sup>1</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** The motion characteristics and control in hole make a big difference in improving the efficiency of drilling and reducing the hole accident in the process of lifting tool during polar ice core drilling. Depending on the summarization of the characteristics of polar ice drilling, analysis is made on the impact to the borehole structure, drilling tool structure, the quality of the drilling tool and rheological behavior of drilling fluid. The characteristics of two stages of tool motion in drilling process, the existence of stagnant layer and the influence factors determine the quantity and range of the fluid disturbance. A lifting test-bed and test method are developed for armored cable hanging tool testing, by the real testing of the falling process of drilling tools with three different diameters and three different weights, the conclusion is drawn that the drilling down speed presents quadratic relationship with the diameter of drilling tool and linear relationship with the quality of drilling tool. The result has a vital theoretical and practical significance in improving the drilling efficiency in Antarctic, saving the service auxiliary working time and guiding the actual work.

**Key words:** Antarctic ice drilling; armored cable drilling tools; drilling fluid; lifting and lowering movement

钻具升降过程中的动力学问题,对孔壁稳定与提高钻进效率,减少孔内事故具有研究意义。钻具的孔内运动问题国外研究得比较深入,其中美国在石油钻井过程中,就特别注重升降钻具对于井壁稳定与漏失问题的影响。前苏联也在极地冰层钻探过程中,提出了升降钻具对于冰孔稳定的影响问题。为此,笔者通过理论分析,建立了冰钻升降钻具试验台,旨在通过试验获得钻具在冰孔内升降过程中的规律,进一步提高我国在南极冰层钻探的钻进效率,缩短辅助工作时间,减少孔内事故的发生、节约消耗,减少环境污染。

## 1 钻具在孔内下放时的运动特性分析

冰层取心钻探采用铠装电缆悬挂式电动钻具,钻具的提升与下放都由电缆绞车来完成。钻具在钻

井液中升降时的运动特性与传统有钻杆钻具之间有着一定的相似性,也会存在瞬时的压力波动,这对于钻孔的稳定性是不利的。由于这种铠装电缆悬挂钻具的长度是固定的,在相同的升降速度条件下,所产生的压力波动范围相对要小,压力的变化数值也要小得多,对孔壁的破坏作用也小。为更好地确定这种压力波动的特性,有必要对钻具在孔内的运动特性进行研究。

根据钻具的结构特点,将钻具在孔内的运动作如下的假设:(1)钻具与钻孔的同轴度好;(2)钻孔为直径已知的规则圆孔;(3)忽略因钻具的扭转所带来的影响;(4)由于钻具的长度相对于钻孔来说较小,在钻具的两端钻井液的温度、密度、粘度相同;(5)由于使用的钻井液为低分子量的酯类,可认为属于无结构的牛顿流体,粘度仅受温度的影响;(6)

收稿日期:2014-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目“极地钻探钻井液及其对环境的影响的研究”(41276189)

作者简介:宋佳宇(1991-),男(汉族),吉林长春人,吉林大学在读硕士研究生,地质工程专业,从事极地钻探方面的研究工作,吉林省长春市西民主大街938号, songjy@jlu.edu.cn.com。

忽略钻头端部的影响,且钻具在孔内属于在液体中的自由下落,不受电缆的拉力的影响,如图 1 所示。

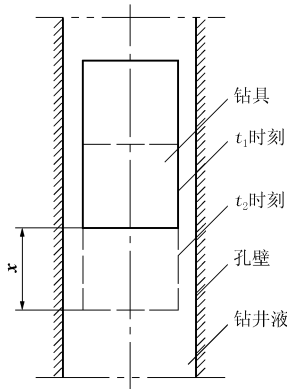


图 1 钻具下落运动示意图

根据上述几点假设与图 1 所示的运动状态,分析钻具在钻孔内的运动特点如下。

(1) 钻具的下落过程分为加速运动和匀速运动 2 个阶段。由于钻孔内充满着钻井液,钻具所受到的阻力将随着其运动速度的增加而增大,因此在钻具加速运动阶段其速度是一个加速度不断减小的变加速运动过程,其持续的时间非常短。经过理论分析与推导,钻具的加速度可以用式(1)表示。

$$a = g \cdot \frac{4\eta}{D(\rho_s \rho_f)} \cdot \frac{dv}{dx} \quad (1)$$

式中: $a$ ——钻具下落加速度,  $m/s^2$ ;  $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$ ;  $\eta$ ——钻井液粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $D$ ——钻具直径,  $m$ ;  $\rho_s$ ——钻具的密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_f$ ——钻井液密度,  $kg/m^3$ ;  $dv/dx$ ——因钻具的运动而引起钻井液流动的剪切速率,  $s^{-1}$ 。

由式(1)可以看出,钻具的加速度受到钻具初始下落速度、钻孔直径、钻具的密度、钻井液的粘度与密度及因钻具下落所引起的孔内钻井液流动速度的影响,且与钻具的长度无关。当  $a = 0$  时,钻具将以匀速运动。钻具匀速运动时,其速度大小主要取决于钻具的质量、环空的大小、滞流层的厚度、钻具的长度和钻井液的密度与粘度的大小。

(2) 钻具的提升或下降过程中,因钻具的运动而引起的钻井液流动仅作用在钻具的长度范围内。从图 1 可以看出,钻具无论是加速运动还是匀速运动,受到扰动的钻井液流量均等于钻具的运动速度与钻具横截面积之积,见式(2)。

$$Q = \frac{v_p}{t_2 - t_1} = \frac{\pi}{4} d^2 \bar{V}_p \quad (2)$$

式中: $Q$ ——钻井液的环空流量,  $m^3/s$ ;  $D$ ——钻具直径,  $mm$ ;  $\bar{V}_p$ ——钻具下落时的平均速度,  $m/s$ 。

(3) 在钻具的表面存在着滞流层。钻具在孔内运动时,由于受到钻井液的粘滞性作用,在钻具的表面上都会存在着一个滞流层,如图 2 所示。经过理论推导,滞流层厚度与钻孔直径、钻具的直径、钻具的运动速度、环空钻井液的流速及钻井液的粘度有关,可用式(3)表示。

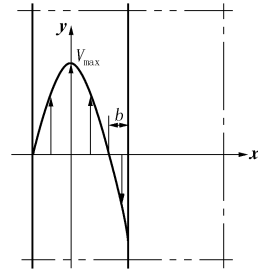


图 2 钻具下落时滞流层示意图

$$b = \frac{1}{2}(R_H - R_p) - \sqrt{\frac{1}{4}(R_H - R_p)^2 - \frac{2L\eta \bar{V}_F}{P}} \quad (3)$$

式中: $b$ ——钻井液的滞流层厚度,  $mm$ ;  $R_H$ ——钻孔半径,  $mm$ ;  $R_p$ ——钻具半径,  $mm$ ;  $L$ ——钻具长度,  $mm$ ;  $\eta$ ——钻井液粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $\bar{V}_F$ ——因钻具下落引起的环空钻井液平均流速,  $mm/s$ ;  $P$ ——钻孔内压力波动值,  $0.1 Pa$ 。

$\bar{V}_F$ 的计算可按式(4)计算:

$$\bar{V}_F = 1.5 \left( 0.45 + \frac{D_p^2}{D_H^2 - D_p^2} \right) v_p \quad (4)$$

当选定钻孔的直径、钻井液粘度和钻具长度后,从式(3)可以看出,滞流层的厚度与环空大小的关系比较大。经计算,滞流层的厚度与环空尺寸之间的关系见表 1。

表 1 滞留层厚度与环空间隙关系

$R_p/mm$	$R_H - R_p/mm$	$b/mm$	$b/(R_H - R_p)/\%$
57.5	9.5	0.409014	4.3054
58.5	8.5	0.330641	3.8899
59.5	7.5	0.259942	3.4659
60.5	6.5	0.192425	2.9604
61.5	5.5	0.14255	2.5918
62.5	4.5	0.0963663	2.1415
63.5	3.5	0.0588714	1.6820
64.5	2.5	0.0303338	1.2134
65.5	1.5	0.0110286	0.7352
66.5	0.5	0.00123761	0.2475

(4) 升降钻具的压力波动小。由于采用的铠装电缆悬挂钻具,其长度是固定不变的,因此由于升降钻具在孔内产生的压力波动主要取决于钻孔的直径与钻具的运动速度。由于钻具在下降过程中是自由下落,并且是匀速,可以预见其压力波动只作用在钻

具的长度范围内,且压力的波动也比较小。钻具提升时,因钻具取心管内充满了冰(岩)心,钻具质量要大于下降时的质量,如果在提升时利用电缆绞车准确控制提升速度与下降速度相同,那么在孔内产生的抽吸压力与下降产生的“激动”压力的数值相同。

## 2 钻具下落速度测试方法

钻具在孔内的运动过程是非常复杂的,影响因素也很多,在理论分析的过程中,为简化分析,做了一些假设条件,为了验证理论分析的正确性,发现新的问题,建立了钻具下落试验台,并完成了相应的试验。

### 2.1 试验台的组成

整个试验台由测试桅杆、模拟井筒、模拟钻具、数据采集和提升装置等组成。

#### 2.1.1 测试桅杆

主要包括试验台底座、桅杆、顶端滑轮3部分组成,见图3。桅杆总高4.5365 m,有效高度4.0 m,直径0.1 m。桅杆由2段组成,用法兰盘连接便于拆卸。桅杆顶端座有直径345 mm滑轮便于钻具的提升。桅杆安放在长1.21 m长的硬质合金底座上,用六脚螺栓连接固定。

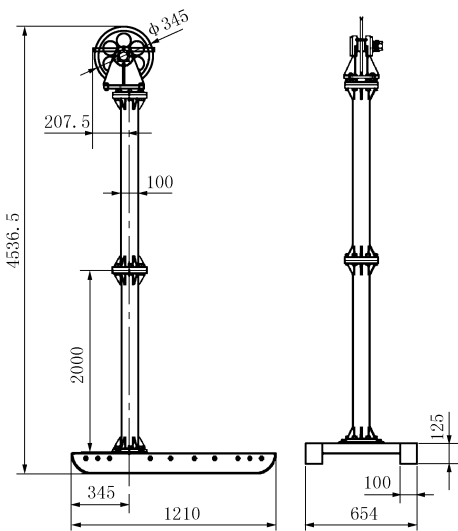


图3 钻塔桅杆底座和滑轮示意图

#### 2.1.2 模拟井筒

模拟井筒用透明的有机玻璃管制成。管子外径150 mm,内径134 mm,壁厚8 mm。下端设有直径为4 mm的排放孔。为减小钻具下落时的冲击力,底部设置有减震弹簧。模拟井筒用夹扣与桅杆固定在一起,并保证其垂直度。

#### 2.1.3 模拟钻具

试验共设计了外径分别为123、125、127 mm三种规格的钻具,对应的环空间隙分别为5.5、4.5、3.5 mm,总长均为400 mm。为调整钻具质量,钻具为中空结构,顶部设置有可供打开的封盖。封盖上部设置有可供提拉升降的提拉环。

### 2.1.4 数据采集系统

采用视频记录钻具的下落过程,之后,用Video-Studio Pro播放器打开,逐帧播放,在1 s内一共有25段,即每一段时间为0.04 s。观察录像中记录的时间与位置,再计算出钻具的下落速度。

### 2.1.5 钻具提升系统

提升系统采用人力提起,自由下放的方法完成钻具的提升与下放。

## 2.2 试验测试方法

(1) 桅杆的安装与校正:将桅杆牢固安装在底座上,并保证其垂直度。

(2) 模拟井筒的检查与安装:安装前检查模拟井筒的同轴度与密封性;检查合格后,将其固定于桅杆之上。安装完后,检查模拟井筒与桅杆的平行度,同时重新检查其垂直度,以保证钻具在下落过程中自由下落,提高测试结果的准确性。

(3) 调整滑轮位置:使滑轮与模拟井筒中心线重合,必要时要将模拟钻具放入模拟井筒内,保证各方向上的环状空间大小的一致性。

(4) 灌注钻井液:按所要求的钻井液配方,准确称量每一组分的钻井液,并混合均匀。按计算好体积的钻井液灌注到模拟井筒之中,直至合适的位置。

(5) 称量钻具的质量:准确称量钻具的质量,并做好记录。

(6) 下入模拟钻具:将试验钻具缓慢下入到钻井液之中,防止钻井液外溢。缓慢下放钻具至孔底,进行测试前的检查工作。

(7) 安放摄像机:将摄像机放置在所选定的位置,保证摄像机能清楚的读取模拟井筒上预先制作的刻度线,并能摄录玻璃管所需要的全部位置。在摄像时应避免摄像的角度过大,以免影响后期的数据处理,造成过大的计算误差。

(8) 试验测试:将钻具底部与所定刻度线对齐,记录位置,摄像机开录放松粗绳,使钻具在玻璃管内自由下落,直至达到玻璃管底部位置,停止摄录。如此反复多次,直至试验完成。

## 3 钻具下放速度测试

试验测试了直径分别为123、125、127 mm的3

个不同直径的模拟钻具的下落速度,为了获得仅由直径变化对下落速度的影响,将3种钻具的质量均设为13.2 kg,其测试结果如图4所示。同时,为了获得钻具质量对钻具下落速度的影响,采用同样的方法,对直径为125 mm的模拟钻具设置了3个不同的质量级别,钻具的质量分别为11.7、13.2和16 kg,测试的结果见图5。

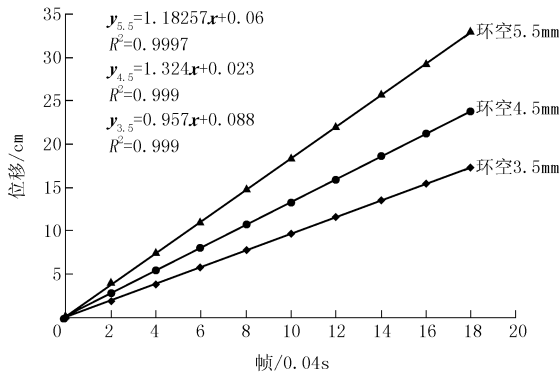


图4 钻具直径与钻具运动速度的关系图

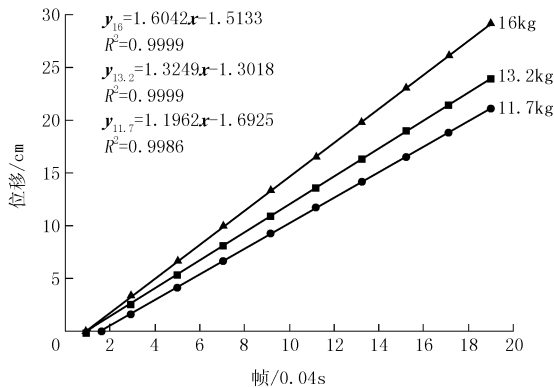


图5 钻具质量与钻具运动速度的关系图

#### 4 试验数据分析

由图4可以看出,随着钻具直径的减小,环空间隙的增加,钻具的下落速度均有规律地增加。直径大小与下落速度同时也可以看出,钻具下落的位移与时间成线性关系,说明钻具是以匀速下降的。直径分别为127、125和123 mm时,相对应的钻具下落平均速度分别为0.250、0.338和0.462 m/s,呈二次方程的关系,如式(5)所示。

$$V_p = 0.0045D_p^2 - 1.178D_p + 77.276 \quad (5)$$

由图5也可以看出,钻具的下落速度与质量也是呈线性变化,钻具的质量越大,下落的速度也越快。在直径为125 mm,质量分别为11.7、13.2和16 kg时,相对应的钻具下放速度分别为0.300、0.335和0.400 m/s,钻具的质量与钻具的下落速度呈线性关系,如式(6)所示。

$$V_p = 0.0233M_p + 0.028 \quad (6)$$

在上述2个关系的基础上,经过进一步的试验研究,根据钻井液粘度、钻孔直径、钻具直径、钻具质量和钻具长度等参数,建立起相应的计算公式,便可以准确地预测出钻具在孔内自由下落的速度,这对于实际工作具有重要的理论指导意义。

#### 5 结论

(1)通过试验测试,初步证明了钻具的下落速度是分两2个阶段完成的,加速运动段很小,主要以匀速度下落,由于采用了低粘度的脂肪酸酯钻井液,滞流层的作用不明显。

(2)在试验的条件下,钻具的下落速度受环空间隙的影响比较大,与钻具的直径呈二次方程的关系。当钻具直径固定后,钻具的下落速度与钻具的质量呈线性增加关系。

(3)经过试验证明,所设计的试验台可满足钻具下落速度的测试要求,数据记录系统可靠。

由于影响钻具下落速度的因素比较多,如钻具的结构、钻具长度及环境温度等,尚需进行深入的试验研究,建立起真正的可用于指导实际工作的理论公式。

#### 参考文献:

- [1] P. G. Talalay, N. S. Gundestrup. Hole fluids for deep ice core drilling[J]. National Institute of Polar Research, 2002, 56: 148 - 170.
- [2] P. G. Talalay, N. S. Gundestrup. Hole fluids for deep ice core drilling a review[D]. Copenhagen. 1999.
- [3] 王莉莉,徐会文,赵大军,等. 南极冰层取心钻探钻井液对雪层影响的模拟研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 1 - 4.
- [4] 韩俊杰,韩丽丽,徐会文,等. 极地冰层取心钻进超低温钻井液理论与试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(6): 23 - 26.
- [5] 张凌,蒋国盛,蔡记华,等. 低温地层钻进特点及其钻井液技术现状综述[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 69 - 73.
- [6] 朱恒银,蔡正水. 深部钻探技术方法的研究与应用[J]. 地质装备, 2013, 14(6).
- [7] 张杰,鄢泰宁. 小井眼钻具升降产生的孔内波动压力[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4).
- [8] HAN Lili, XU Huiwen, CAO Pinlu, YU Dahui and P. G. Talalay. Viscosity testing method of ultralow temperature drilling fluids for Polar glacier drilling[J]. Global geology, 2012, 15(4): 276 - 280.
- [9] 韩丽丽. 南极冰钻超低温钻井液技术研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2013.
- [10] 徐会文,韩丽丽,韩俊杰,等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液的理论与试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 279 - 282.
- [11] 王莉莉,赵大军,徐会文,等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液抗低温性能试验[J]. 世界地质, 2013, 32(4): 862 - 866.