

冰层空气反循环快速钻进方法及冰屑运移研究

董 硕, 贺文博, 曹金娥, 王孟克, 陈宝义, 曹品鲁*

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:空气反循环钻进技术具有钻速快、能耗低、可不提钻连续取心取样、能有效避免积雪层漏失等优点,在冰层钻探中极具应用潜力。本文针对冰层钻探技术特点,提出了双壁钻杆式、双通道高压胶管式和寄生高压胶管式等3种空气反循环冰层钻探技术,分别介绍了其工作原理及特点。基于气力输送和气体钻井基本理论,对冰屑颗粒气体介质中的悬浮速度进行了分析,建立了单颗粒冰屑悬浮、运移方程和冰屑颗粒群悬浮方程,并设计了冰屑悬浮实验台,对冰屑悬浮所需的风速进行了实验测试。理论计算值与实验实测值吻合较好,最大误差约10.91%,结果表明冰屑粒径、冰屑密度和风量是影响其悬浮和上返速度的关键因素。可用本文建立的冰屑运动方程来计算实际钻进时携带冰屑所需的风量,为后续在极地实施冰层空气反循环钻进技术提供了依据。

关键词:极地钻探;冰层钻探;空气反循环;冰屑运移;气力输送

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)01-0049-08

Study on transportation of ice chips in ice drilling with air reverse circulation

DONG Shuo, HE Wenbo, CAO Jine, WANG Mengke, CHEN Baoyi, CAO Pinlu*

(College of construction engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Air reverse circulation drilling technology, which has advantages of fast drilling speed, low energy consumption, continuous core sampling without tripping and effective prevention of circulation loss in snow cover, sees great potential application in ice drilling. In view of the characteristics of ice drilling technology, this paper proposes three kinds of air reverse circulation ice drilling techniques, including dual-wall drill pipe, double channel high pressure hose and parasitic high pressure hose; and describes their working principles and characteristics respectively. Analysis is made of the suspension velocity of ice particles in air medium with the suspension and transport equations for both the single ice particle and the particle group established under the guidance of pneumatic transportation and gas drilling theory. Meanwhile, the experimental bench was designed to test the air speed required for ice chips suspension. The calculated values are in good agreement with the measured values with the maximum difference at about 10.91%. The results showed that the ice particle size, ice particle density and air volume are the key factors affecting the suspension and up-hole velocity. The equation for ice chips movement established in this paper can be used to calculate the air volume required to carry ice chips during actual drilling, providing a basis for the subsequent implementation of air reverse circulation ice drilling technology in the polar regions.

Key words: polar drilling; ice drilling; air reverse circulation; ice chips transportation; pneumatic transportation

收稿日期:2020-10-06; 修回日期:2020-11-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.01.007

基金项目:国家自然科学基金项目“冰层空气反循环钻进冰芯冰屑运移特性及反循环形成机制研究”(编号:41976213)

作者简介:董硕,男,汉族,1994年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事极地钻探方面的研究,吉林省长春市西民主大街938号, dongshuo18@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:曹品鲁,男,汉族,1979年生,教授,博士生导师,地质工程专业,主要从事复杂条件钻探技术方面的科研与教学工作,吉林省长春市西民主大街938号, jlucpl@jlu.edu.cn。

引用格式: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.

0 引言

极地冰层钻探技术是开展极地科学研究的重要手段之一,对研究全球气候变化、寻找古生物生命形式、分析极地冰川运动及变化过程、研究冰盖形成及演化机制、探知冰下环境及冰下矿产资源等具有重要意义^[1-5]。然而,受地表环境和极端气候的影响,冰层钻探极为复杂,不但面临超低温、后勤运输不便、环境保护要求高等问题,而且经常钻遇脆冰层、暖冰层、基底融水层或冰岩夹层等复杂地层,尤其是每年短暂的工作时间,为钻探作业带来极大挑战^[6-9]。研发新型快速钻探技术,提高钻探效率已成为极地钻探的重要研究方向之一。空气反循环钻进以其钻进效率高、不提钻连续取心取样、不采用钻井液、可防止地层漏失、耗气量低等优点,在地质岩心钻探、水文水井钻凿和基础工程施工等领域得到了广泛的应用,取得了良好效果^[10-13]。如能将其应用于冰层钻探,不但可以解决上部积雪和雪冰层的漏失问题,而且可实现不提钻连续取心、取样。因此,能大幅提高钻进效率,缩短施工周期,且有利于保护极地自然环境^[14-16]。本文针对冰层钻探技术特点,探讨了适用于极地冰层钻探用空气反循环取心、取样技术,对携带冰屑上返所需的风量进行了分析与实验测试^[17-20]。

1 冰层空气反循环钻进技术

1.1 双壁钻杆空气反循环钻进

双壁钻杆空气反循环钻进系统主要由钻机及钻塔、空压机、空气冷却装置、空气干燥装置、双通道水龙头、双壁钻杆、空气反循环钻头、排砂管和冰屑、冰心收集分离装置等组成,如图1所示^[21]。该装置的主要技术特点是采用成熟的地质岩心钻机系统和双壁钻杆进行钻进作业。空气冷却装置主要对压缩空气进行冷却,防止空气温度过高而融化冰屑,否则融化产生的水可能会在低温孔内或钻具内冻结,产生钻孔复杂事故。干燥装置进一步除却压缩空气中的水蒸气,然后将压缩空气经由双通道水龙头和双壁钻杆环形间隙送至孔底。在反循环钻头的引射导流作用下,压缩空气进入钻头中心通道,携带冰心、冰屑沿双壁钻杆的中心通道上返至地表收集分离装置。在收集分离装置内实现冰心、冰屑和空气的分离。冰心到达设计长度后即被卡断上行,无需提钻取心。压缩空气始终在钻具内部

循环,不会发生循环漏失,亦不会冲刷孔壁。钻进时无需钻井液,通过更换钻头即可实现冰下其它地质样品的取心作业。因此,极具应用潜力。

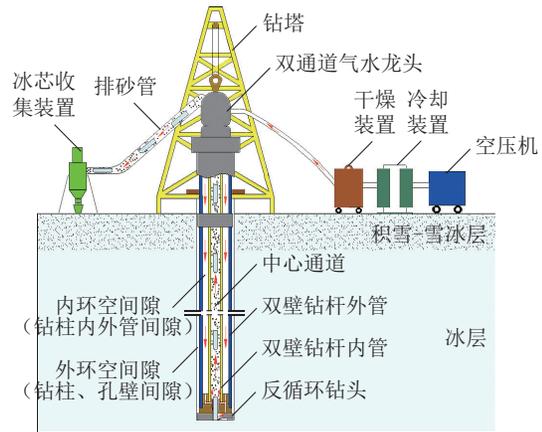


图1 冰层空气反循环钻进示意

Fig.1 Schematic diagram of air reverse circulation ice drilling

如前所述,该方法的主要技术优势在于:钻机驱动钻杆和钻头切削地层,对地层适应性强,可用于冰层、冰岩夹层和冰下岩层的钻进;由于采用钻机系统,钻进速度快、效率高;采用钢钻杆,即使遇到冰下较大的融水层,发生钻孔事故的几率也比较低;取心或取样不需要提钻,与现有铠装电缆式电动机械取心钻具相比,可节省一定的辅助时间;不会发生循环漏失,且不采用钻井液,对极地环境无污染。

需要指出的是,该方法需要对现有钻机系统进行改造(尤其是液压系统、密封件等)或设计专用钻机系统,以满足极地低温条件(-50°C)。此外,该方法的缺点也比较明显:辅助设备较多,除钻机、钻塔、空压机及干燥、冷却设备外,还需配备双通道水龙头、双壁钻杆及拧管机等。设备总质量大,即使采用轻便的铝合金钻杆,其质量仍远超现有铠装电缆式电动机械钻具系统;劳动强度大,钻机辅助时间长,即使采用拧管机等辅助设备,加接双壁钻杆对极地现场操作而言,仍是较大的挑战。

1.2 高压胶管式空气反循环钻进

1.2.1 双通道高压胶管式空气反循环钻进

鉴于采用钻机和双壁钻杆进行作业时,设备和能量消耗大,需不断加接钻杆,劳动强度大、辅助时间长等缺点,提出了一种新型的采用双通道高压胶

管式空气反循环冰层钻进技术,如图2所示。该钻进系统主要由雪地车、雪橇、发电机、空压机、气体冷却装置、气体干燥装置、双通道高压胶管和绞车、孔口导向架、反循环孔底动力钻具等组成。钻进时,高压空气分别经过气体冷却装置、气体干燥装置进行冷却和干燥,然后经绞车轴心通道进入高压胶管环形间隙,再进入孔内反循环双管钻具内的空气马达,空气马达回转驱动反循环冰钻钻头切削冰层,实现钻进,产生的冰屑经钻头和双通道高压胶管中心通道上返至地表。

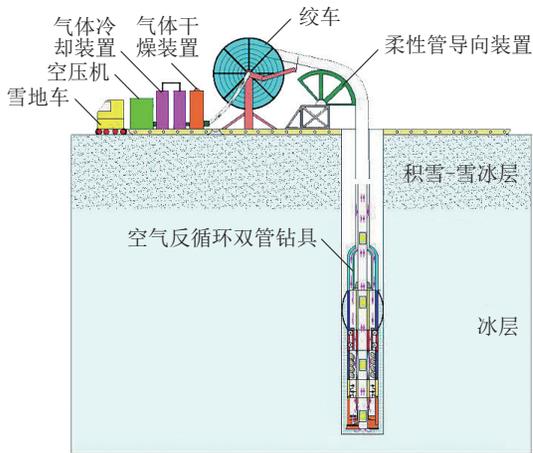


图2 双通道高压胶管式反循环钻进示意

Fig.2 Schematic diagram of double-channel high pressure hose reverse circulation drilling

与双壁钻杆式空气反循环钻进技术相比,该系统的技术优势较为明显:所有设备均安装在雪橇上,方便极地快速移动运输;采用绞车和柔性管代替传统的钻机和双壁钻杆,钻探装备质量、尺寸和功率消耗大幅度降低,减轻了极地后勤保障负担;采用绞车提升和下放钻具,无需经常加接钻杆,大幅降低了劳动强度;利用空压机提供的高压气体直接驱动空气马达工作,带动孔内钻具回转切削冰层,孔内无需额外动力,使得钻具结构极为简单且可靠性大幅增加;更为重要的是,冰屑可连续不断地上返至地表,无需经常提放钻具,可大幅降低钻进辅助时间,极大地提高了钻进效率。

该钻进方法的主要问题在于长圆柱形冰心无法有效通过缠绕在绞车上的高压胶管,因此只能用于全面钻进。此外,由于高压胶管设计为双通道,直径和质量大,缠绕困难。当钻孔较深时,绞车尺

寸和质量增大。

1.2.2 寄生高压胶管式空气反循环钻进

为满足冰层连续取心的需要,可采用寄生高压胶管式空气反循环冰层钻进技术,即采用2根胶管为孔底钻具提供循环通道,如图3所示。小直径寄生胶管缠绕在绞车上,用于提升和下放钻具,并向孔内注入压缩空气。直径相对较大的胶管设计成若干段,通过快速接头在地表连接,为冰心提供上返通道。由于冰心上返用胶管无需缠绕在绞车上,因此绞车尺寸和质量较双通道胶管钻进方式大幅降低。

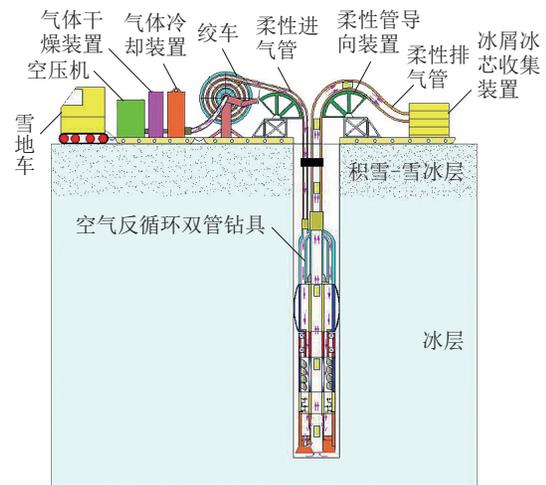


图3 寄生高压胶管式反循环钻进示意

Fig.3 Schematic diagram of parasitic high pressure hose reverse circulation drilling

2 冰屑悬浮速度理论研究

2.1 单个冰屑颗粒悬浮速度理论分析

无论采用何种钻进方式,无论取心钻进还是全面钻进,都必须保证冰屑能够连续不断地返至地表。由于冰屑密度及尺寸与岩屑不同,需对冰屑的悬浮及上返风速进行分析^[22-24]。

根据气力输送基本原理,作如下假设:(1)冰屑为规则球形颗粒;(2)冰屑密度均匀。

对单个冰屑受力进行分析可知,冰屑在气体介质中主要受重力、绕流阻力和气体的浮力,如图4所示。

当冰屑受力平衡时,其在气体中悬浮,即:

$$F_r + F_f - W = 0 \quad (1)$$

式中: F_r ——冰屑颗粒的绕流阻力,N; W ——冰屑的重力,N; F_f ——冰屑在气体中所受的浮力,N。

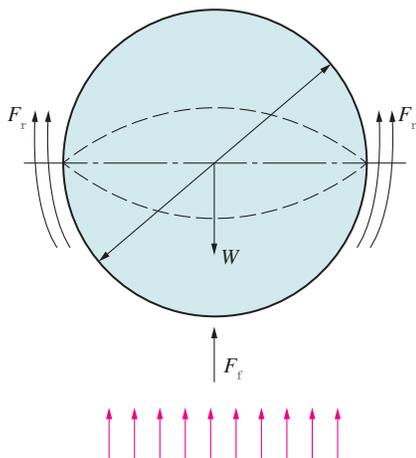


图4 冰屑受力分析

Fig. 4 Force analysis for ice chips

根据气力输送理论,冰屑颗粒的绕流阻力可计算为:

$$F_r = \frac{\pi}{8} C \rho v_0 d_s^2 \quad (2)$$

式中: C ——阻力系数; ρ ——气体的密度, kg/m^3 ; v_0 ——冰屑的自由悬浮速度, m/s ; d_s ——冰屑的当量直径。

冰屑的重力和浮力可分别按下式计算:

$$W = \frac{\pi}{6} g \rho_s d_s^3 \quad (3)$$

$$F_f = \frac{\pi}{6} g d_s^3 \rho \quad (4)$$

式中: ρ_s ——冰屑的密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)可得:

$$v_0 = \sqrt{\frac{4g d_s (\rho_s - \rho)}{3 C \rho}} \quad (5)$$

由式(5)可知,冰屑悬浮速度与冰屑的颗粒粒径、密度、气体密度及阻力系数等参数有关。

2.2 阻力系数 C

根据气力输送基本原理,阻力系数 C 是雷诺数的函数,可按粘性阻力区、过渡区和涡流压差阻力区分别计算^[22-24]。

(1)粘性阻力区: $Re \leq 5.8$, 即

$$Re = \frac{v_0 d_s \rho}{\mu} \leq 5.8 \quad (6)$$

此时,阻力系数按下式计算:

$$C = \frac{24}{Re} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)可得:

$$v_0 = \frac{d_s^2 (\rho_s - \rho) g}{18 \mu} \quad (8)$$

则由式(6)和式(8)可得适用于粘性摩擦阻力区的粒径范围为:

$$d_s \leq 2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho (\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

(2)过渡区: $5.8 \leq Re \leq 500$, 即

$$5.8 \leq Re = \frac{v_0 d_s \rho}{\mu} \leq 500 \quad (10)$$

此时,阻力系数按下式计算:

$$C = \sqrt{\frac{10}{Re}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5)可得:

$$v_0 = 1.195 d_s \left[\frac{(\rho_s - \rho)^2}{\rho \mu} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

由式(10)和式(12)可得适用于过渡区的粒径范围为:

$$2.2 \left[\frac{\mu^2}{\rho (\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \leq d_s \leq 20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho (\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

(3)压差阻力区: $500 \leq Re \leq 2 \times 10^5$, 即

$$500 \leq Re = \frac{v_0 d_s \rho}{\mu} \leq 2 \times 10^5 \quad (14)$$

此时,阻力系数 C 为定值: $C = 0.44$ 。

则

$$v_0 = 5.45 \sqrt{\frac{d_s (\rho_s - \rho)}{\rho}} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可得适用于过渡区的粒径范围为:

$$20.4 \left[\frac{\mu^2}{\rho (\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \leq d_s \leq 1100 \left[\frac{\mu^2}{\rho (\rho_s - \rho)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

计算冰屑的悬浮速度时,首先根据冰屑的当量直径判断所在区域,然后选择相应的公式进行计算。

2.3 冰屑颗粒群悬浮速度理论分析

冰屑颗粒群悬浮、运动时,存在颗粒与颗粒之间、颗粒与钻杆之间的互相碰撞。同时,冰屑颗粒群的总体积相对于流体体积无法忽略,会对流体的

流态造成一定影响,而流体的流态变化又会影响颗粒的悬浮。因此,需对冰屑颗粒群的悬浮速度进行分析。根据气力输送理论,冰屑颗粒体积分数越大,颗粒群的悬浮速度越小,当体积分数相同时,冰屑颗粒直径越小,冰屑颗粒数目越多,冰屑颗粒表面积越大,受到的绕流阻力也就越大,相应悬浮速度就越小。同时,由于颗粒数目增多,颗粒之间的碰撞、摩擦、动量交换及损失发生的就越为频繁,使悬浮速度进一步减小。因此,冰屑群的悬浮速度比单颗粒的自由沉降速度小。

冰屑颗粒群的悬浮速度可由下式计算:

$$v_n = v_0(1 - \Phi_0)^\beta \quad (17)$$

式中: v_n ——颗粒群悬浮速度, m/s; v_0 ——单颗粒悬浮速度, m/s; Φ_0 ——颗粒群体积分数; β ——实验指数。

实验指数与颗粒绕流雷诺数 Re 的关系如表 1 所示。随着雷诺数的增加,实验指数 β 逐渐降低,对应的冰屑颗粒群悬浮速度也就越大。

表 1 实验指数 β 与颗粒绕流雷诺数 Re 的关系

Table 1 Relationship between experimental index β and Reynolds number Re of particle detour flow								
v_0 公式	斯托克斯公式		阿连公式			牛顿公式		
Re	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5
β	4.6	4.5	4.2	3.6	3.1	2.5	2.3	2.3

2.4 冰屑上返风速理论分析

钻进产生的冰屑单位体积流量与钻进速度、钻头直径等参数有关:

$$Q_p = \frac{\pi D_{bit}^2}{4} \frac{v_{pr}}{3600} \quad (18)$$

冰屑颗粒在井筒内上返体积流量可表示为:

$$Q_{tr} = v_{ig} C_p A_1 = \frac{\pi D_c^2}{4} v_{ig} C_p \quad (19)$$

式中: Q_p 和 Q_{tr} ——分别为单位时间内冰屑的产生体积流量和上返体积流量, m^3/s ; D_{bit} 和 D_c ——分别为钻头直径和冰屑上返通道直径, m; v_{pr} 和 v_{ig} ——分别为机械钻速和冰屑上返速度, m/s; C_p ——冰屑在上返通道内的体积分数。根据气体钻井理论,钻进时冰屑在流动通道内的体积浓度应小于 0.04, 否则冰屑颗粒之间的相互干扰会增大堵塞的机率, 本文取 $C_p=0.04$ 。

根据固体颗粒体积平衡理论,单位时间内冰屑的上返量应等于其产生量,即:

$$Q_{tr} = Q_p \quad (20)$$

将式(18)和式(19)代入式(20)可得:

$$v_{ig} = \frac{D_{bit}^2}{C_p \cdot D_c^2} \frac{v_{pr}}{3600} \quad (21)$$

为确保孔底冰屑净化干净,冰屑上返所需的最低风速 $v_{i\min}$ 可表示为:

$$v_{i\min} = v_{ig} + v_0 \quad (22)$$

根据该式可计算冰层空气反循环钻进时,携带冰屑上返所需的最小风量^[25-27]。

3 冰屑悬浮实验研究

3.1 实验台的设计

冰屑悬浮实验台主要由空压机、支撑钢架、竖直有机玻璃管(模拟钻杆通道)、压力传感器、流量计和数据采集系统组成,其原理如图 5 所示,实物照片如图 6 所示。空气压缩机规格为风量 $3 m^3/min$,最大风压 1 MPa;有机玻璃井筒内径 64 mm,高度 1 m;压力传感器量程 10 kPa,测量精度为 0.2%;流量计量程 $380 m^3/h$,测量精度为 1.5% FS。采用球形聚丙烯颗粒代替冰屑进行实验,聚丙烯颗粒的密度为 $900 kg/m^3$,与冰的密度相当。

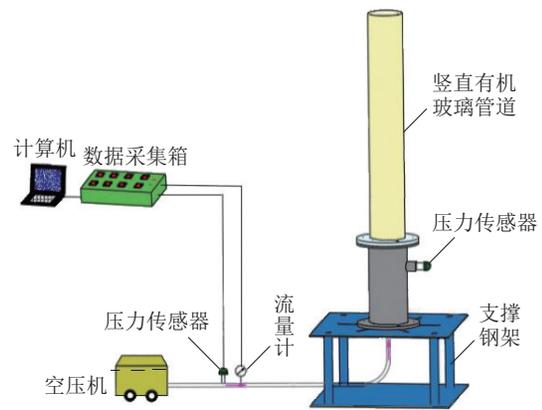


图 5 冰屑悬浮实验台

Fig.5 Ice chips suspension test bench

3.2 实验结果分析

图 7 为单个冰屑悬浮风速理论计算结果与实验结果对比曲线。从图中可以看出,随着冰屑直径的增加,其悬浮所需的风速逐渐增大。当冰屑尺寸由 2 mm 增大到 5 mm 时,其悬浮需要的风速理论计算值由 6.61 m/s 增大到 10.40 m/s,而实验值则由



(a) 实验装置 (b) 不同粒径的聚丙烯颗粒
图6 实验台实物

Fig.6 Actual laboratory bench and test materials

5.96 m/s增加到9.86 m/s。理论计算结果与实验测试结果最大误差为10.91%，最小误差为5.19%，理论计算值与实验结果比较吻合。

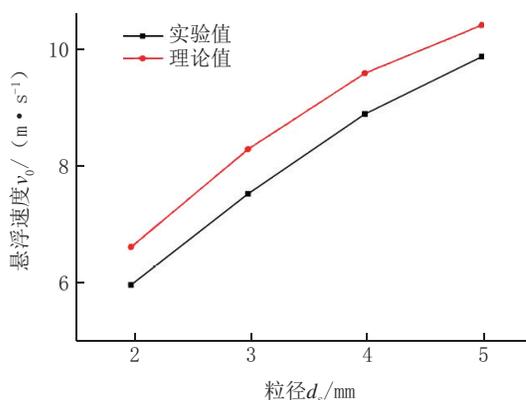


图7 单个冰屑颗粒悬浮结果曲线

Fig.7 Result for single ice particle suspension

在颗粒群悬浮实验中,控制冰屑颗粒群的体积分数为0.04,根据有机玻璃管内径尺寸及冰屑颗粒尺寸,分别算出颗粒群的质量,将其投入有机玻璃管内进行悬浮实验,结果如图8所示。随着冰屑颗粒当量直径的增加,冰屑颗粒群悬浮所需的风速逐渐增大。当冰屑颗粒尺寸由2 mm增大到5 mm时,其悬浮风速理论计算值由6.02 m/s增大到9.47 m/s,而实验实测值由5.54 m/s增大到9.94 m/s,最大误差约7.97%。此外,与单个颗粒相比,冰屑颗粒群悬浮所需的风速稍有降低。

图9为单个冰屑的悬浮速度理论计算结果随密度的变化曲线,此时冰屑颗粒尺寸选择5 mm。从图中可以看出,随着冰屑密度的增加,其悬浮所需的风速逐渐增大。当冰屑密度由800 kg/m³增大到

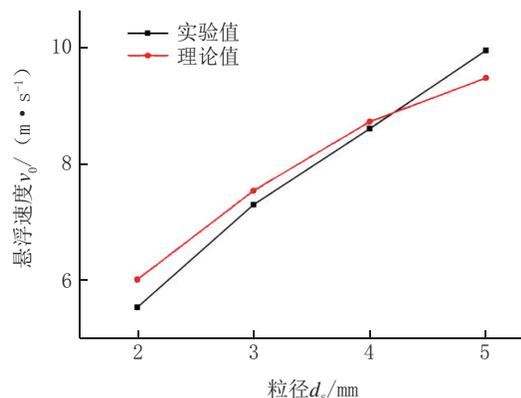


图8 冰屑颗粒群悬浮结果曲线

Fig.8 Result for ice particle group suspension

900 kg/m³时,其悬浮需要的风速理论计算值由9.84 m/s增大到10.44 m/s;图10为冰屑颗粒群的悬浮速度理论计算结果随密度的变化曲线,当冰屑密度由800 kg/m³增大到900 kg/m³时,其悬浮需要的风速理论计算值由8.96 m/s增大到9.50 m/s。

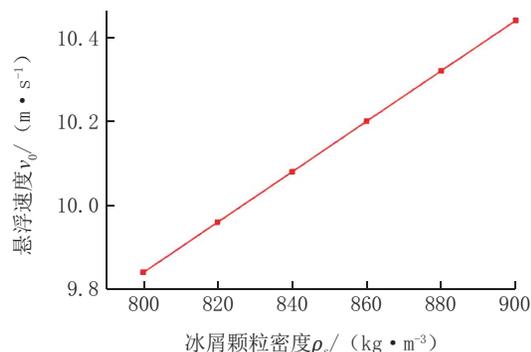


图9 单个冰屑颗粒悬浮结果曲线

Fig.9 Result for single ice particle suspension

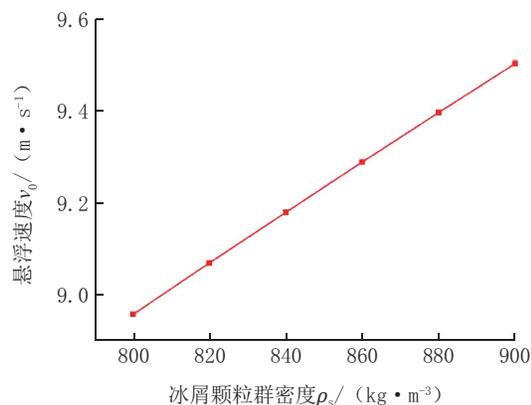


图10 冰屑颗粒群悬浮结果曲线

Fig.10 Result for ice particle group suspension

将聚丙烯颗粒染成红色,然后观察颗粒群悬浮现象,如图11所示。将颗粒投入到井筒内,逐渐增大风量到一定值时,颗粒群集体被裹挟上升,颗粒与颗粒、颗粒与井筒内壁之间激烈碰撞。然后略微减小风量,可以观察到,大量颗粒会在某一高度区间内相互碰撞,颗粒群整体不会流出井筒,也不会落至孔底,颗粒群冰屑完全处于悬浮状态。



图11 冰屑颗粒群悬浮实验现象

Fig.11 Observations in ice particle group suspension experiment

4 结论

(1)针对极地环境及冰层钻进技术特点,提出了双壁钻杆式、双通道高压胶管式和寄生管高压胶管式等3种空气反循环钻进技术,通过对其工作原理及特点进行分析可知,寄生管式空气反循环钻进技术具有重力轻、整体尺寸小、能耗低、可连续取心取屑、无需加接钻杆等优点,在极地冰层钻探中极具推广应用潜力。

(2)借鉴气力输送基本原理,对单个冰屑及冰屑颗粒群的悬浮风速进行了理论分析,建立了冰屑颗粒悬浮及上返运动方程,确定了冰屑粒径、冰屑密度和风量是影响其悬浮和上返速度的关键因素。

(3)设计了冰屑悬浮实验台,对冰屑悬浮风速进行了实验测试。结果表明,冰屑颗粒悬浮所需的风速随其当量直径的增大而增大;理论计算值与实验实测值吻合较好,最大误差约10.91%,可用本文建立的冰屑运动方程来计算实际钻进时携带冰屑所需的风量。

参考文献(References):

[1] 姚檀栋,王宁练.冰芯研究的过去、现在和未来[J].科学通报,1977,42(3):225-230.

YAO Tandong, WANG Ninglian. Past, present and future of ice core research[J]. Chinese Science Bulletin, 1977, 42(3): 225-230.

- [2] 王宁练,姚檀栋.冰芯对于过去全球变化研究的贡献[J].冰川冻土,2003,25(3):275-287.
WANG Ninglian, YAO Tandong. The contribution of ice cores to the study of past global changes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003,25(3):275-287.
- [3] 张向培.基于冰雷达探测技术的南极冰盖冰层厚度和冰下地形特征研究[D].长春:吉林大学,2007.
ZHANG Xiangpei. The study of ice thickness and bed topography in the Antarctic ice sheet detected by ice penetrating radar [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [4] 姚檀栋,王宁练.冰芯:研究过去环境变化的重要手段[J].科学,1996,48(6):45-47,3.
YAO Tandong, WANG Ninglian. Ice core: An important means of studying past environmental changes [J]. Science, 1996,48(6):45-47,3.
- [5] 高登义.地球有过四个高温期,全球变暖并非温室效应[J].生态经济,2004(5):40-41.
GAO Dengyi. The earth has had four periods of high temperature, global warming is not a greenhouse effect [J]. Ecological Economy, 2004(5):40-41.
- [6] 曹品鲁,陈宝义,刘春朋,等.极地深冰心钻探“暖冰”层钻进技术难点及对策[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):58-62.
CAO Pinlu, CHEN Baoyi, LIU Chunpeng, et al. Analysis of the technology difficulties and countermeasures in warm ice deep core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(9):58-62.
- [7] 刘春朋.冰层回转钻进切削热分析与实验研究[D].长春:吉林大学,2014.
LIU Chunpeng. Thermal analysis and experimental study on ice core drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [8] 曹品鲁,陈卓,曹宏宇,等.冰层回转钻进钻头切削具温度理论计算分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):5-12.
CAO Pinlu, CHEN Zhuo, CAO Hongyu, et al. Theoretical calculation and analysis on cutting heat with drilling fluid in ice core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):5-12.
- [9] 杨成.极地冰岩夹层钻进碎岩机理分析及试验研究[D].长春:吉林大学,2016.
YANG Cheng. Theoretical and experimental study on fragmentation mechanism during polar debris-rich ice drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [10] 陈云望.螺旋流引射式反循环钻头设计与实验研究[D].长春:吉林大学,2018.
CHEN Yunwang. Structure design and experimental research on a reverse circulation drill bit with a spiral slot[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

- [11] 胡正毅. 空气孔底部局部反循环电动机械冰层取心钻具研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
HU Zhengyi. The study of the armored cable suspended electromechanical ice coring drill with near-bottom air reverse circulation[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [12] 赵齐. 冰层空气反循环钻进旋流式钻头设计及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
ZHAO Qi. Structure design and experimental research on ice drill bit with air reverse circulation[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [13] CAO Pinlu, ZHAO Qi, CHEN Zhuo, et al. Orthogonal experimental research on the structural parameters of a novel drill bit used for ice core drilling with air reverse circulation[J]. *Journal of Glaciology*, 2020, 65(254):1011-1022.
- [14] Johnsen S.J., Hansen S.B., Sheldon S.G., et al. The Hans Tausen drill: design, performance, further developments and some lessons learned [J]. *Ann. of Glaciology*, 2007, 47:89-98.
- [15] Whelsky A.N., Albert M.R. Firn permeability impacts on pressure loss associated with rapid air movement drilling[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 123:149-154.
- [16] 郭建华, 李黔, 王锦, 等. 气体钻井岩屑运移机理研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(6):66-67.
GUO Jianhua, LI Qian, WANG Jin, et al. Study on cuttings migration mechanism during gas drilling[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(6):66-67.
- [17] 胡正毅, 曹品鲁, 薛军, 等. 气体局部反循环电动机械冰钻技术[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(3):374-378.
HU Zhengyi, CAO Pinlu, XUE Jun, et al. Investigations of near-bottom air reverse circulation in non-pipe electromechanical ice drill technology [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(3):374-378.
- [18] CAO Pinlu, CAO Hongyu, CAO Jine, et al. Studies on pneumatic transport of ice cores in reverse circulation air drilling[J]. *Powder Technology*, 2019, 356:50-59.
- [19] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于EDEM-Fluent耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3):69-77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM-Fluent coupling [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2020, 51(3):69-77.
- [20] 范大友. 空气反循环冰层取芯钻具设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
FAN Dayou. Structure design and research on ice-coring drill with air reverse circulation for ice layer[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [21] CAO Pinlu, LIU Miaomiao, CHEN Zhuo, et al. Theory calculation and testing of air injection parameters in ice core drilling with air reverse circulation [J]. *Polar Science*, 2018, 17:23-32.
- [22] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
YANG Lun, XIE Yihua. *Pneumatic conveying engineering* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [23] *Pneumatic Conveying Design Guide*[M]. Elsevier Ltd: 2016.
- [24] Talalay P.G. Drill heads of the deep ice electromechanical drills [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 97: 41-56.
- [25] 胥思平. 欠平衡钻井气体体积流量的计算[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
XU Siping. Gas volume requirements for underbalanced drilling [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [26] 周英操, 翟洪军. 欠平衡钻井技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
ZHOU Yingcao, ZHAI Hongjun. *Underbalanced drilling technology and application* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [27] 郭文才, 刘绘新. 空气钻井计算方法及应用软件[J]. *钻采工艺*, 2001, 24(1):8-9.
GUO Wencai, LIU Huixin. Calculation method of air drilling and its application software[J]. *Drilling & Production Technology*, 2001, 24(1):8-9.

(编辑 韩丽丽)