

# 超声波冰层钻进方法的可行性试验研究

王 晨, 赵大军, 王美艳, 张书磊, 王 雨, 李政阳

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**人类对极地资源的开采和科学研究需要高效、环保的冰层钻探技术, 热熔钻进是常用方法之一。为解决热熔钻进技术能量利用率低的问题, 本文提出了一种以超声波频率振动进行冰层钻进的方法, 分析了超声波振动钻进冰层的机理, 通过超声波振动冰层钻进效率的计算及室内试验, 得出了超声波振动冰层钻进速度大、热效率高的结论, 可用于极地冰盖、冰架等冰层的钻进。

**关键词:**冰层; 超声波; 钻进机理; 室内试验

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0123-04

**Feasibility Study on Sonic Ice Drilling Method/WANG Chen, ZHAO Da-jun, WANG Mei-yan, ZHANG Shu-lei, WANG Yu, LI Zheng-yang** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Human beings needs ice drilling technology with high efficiency and environmental protection for exploitation of research on polar resources, and thermal drilling is one of the commonly used methods. In order to improve the energy utilization of thermal drilling technology, a method of ice drilling with sonic frequency vibration is proposed in this paper. The mechanism of ice drilling by ultrasonic vibration is analyzed. Calculation of the efficiency of ultrasonic vibration ice drilling and lab tests prove that ultrasonic drilling can provide high ROP and high thermal efficiency, and be used for drilling polar ice sheets and ice shelves.

**Key words:** ice layer; sonic; drilling mechanism; laboratory tests

## 0 引言

极地冰层淡水储量巨大、海洋生物资源丰富, 蕴含着煤、石油、天然气及铁矿等优质丰富的矿产资源, 是人类世界的巨大宝库, 同时也是研究世界气候问题、冰下湖生命和冰盖运动规律的重要场所<sup>[1-2]</sup>。进行极地资源开采和科学研究需要采用高效、环保的冰层钻探技术。但是极地恶劣的气候条件给冰层钻探带来了巨大的挑战, 钻探系统需要克服海拔高、温度低、风速大等问题, 钻具必须满足耐低温、能耗少、轻便、环保等要求<sup>[3]</sup>。

经过世界各国不断的完善与改进, 目前极地冰层的钻探方法主要有机械法、热水钻与热熔钻。机械钻进是极地勘探最早使用的方法, 已由拆装繁琐的常规回转钻具逐渐发展到电动机械钻具, 存在孔底电机功率小, 钻压、转速较低的问题, 并且在钻进冰岩夹层与暖冰层时会严重磨损钻头, 难以进行深部钻进<sup>[4-5]</sup>。热水钻是目前最有效的冰架探测技术, 该技术利用钻头喷嘴喷射出的高速热水射流冲

击并融化冰雪层进行钻进, 具有钻进速度快、无污染的特点, 但是在回次结束后残留在软管中的热水易结冰膨胀、破坏软管, 并且钻进过程中存在热水漏失的问题<sup>[6-7]</sup>, 都会造成巨大的经济损失。热熔法能够有效解决热水漏失问题。该方法将特制加热钻头直接接触冰层, 通过钻头与冰层之间的融水将热量传递给周围的冰层进行融化钻进<sup>[8]</sup>。由于热熔法钻进时钻头与冰层之间存在薄膜水层, 钻头的一部分热量横向传递, 在水平方向扩宽孔径, 加之与周围环境的热交换损失, 导致热熔钻进方法的实际热效率较低。为解决上述问题, 本文提出对冰层施加超声波频率振动进行钻进的方法, 通过钻进机理分析、室内试验及效率分析验证其可行性。

## 1 超声波冰层钻进机理

在广义上, 超声波是指振动频率在 20kHz 以上的机械波。超声波冰层钻进是通过压电陶瓷转换器的逆压电作用将高频电流转换为弹性机械振动能,

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目“超声波振动碎岩机理的研究”(编号: 41572356)

作者简介: 王晨, 女, 汉族, 1994 年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事硬岩钻探新技术、岩石断裂力学方面的研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, w Wangcc2017@163.com。

通过变幅杆与工具头输出,作用在冰层上的方法。冰具有低密度、低强度的开放架构,可看作为一种低熔点的特殊“岩石”。

目前,超声波已被应用在覆冰高压输电线路除冰、道路除冰等方面<sup>[9]</sup>,其除冰原理是超声波的机械效应、热效应和空化效应,故以此三个方面为理论基础,研究超声波冰层钻进机理。

(1)机械效应引起的疲劳破坏。微观上,冰层内部微裂纹在超声波振动作用下会逐渐扩展、贯通,裂纹数量增加、尺寸变大<sup>[10]</sup>。这种不断积累的内部损伤使冰层强度降低,当达到疲劳破坏极限时,宏观上表现为冰层快速发生大面积的不可逆变形与破碎,其过程分为三个发展阶段<sup>[11]</sup>:第一阶段为起裂阶段,在超声波振动初期,冰层内部原始的稳定微裂纹在交变应力作用下延伸发展,部分冰层发生弹性变形,此时若卸载则部分裂纹会闭合;第二阶段为裂纹稳定发展阶段,此时由于应变累积,冰层内部出现新裂纹,并会随着交变载荷稳定扩展;第三阶段为裂纹不稳定发展阶段,此时应变积累达到一定程度,裂纹开始发生快速延伸、连接、贯通,直至冰层发生宏观大面积断裂、破碎。

(2)热效应熔冰。由超声波焊接原理可知,工具头发出的高频机械振动波在冰介质中传播时能够引起冰内水分子剧烈振动,此物理振动弹性能量转换为水分子之间的内摩擦功和形变能<sup>[12]</sup>,超声波的能量会部分转化为分子内热能,并随工作载荷的增加而增大<sup>[13]</sup>。这种热量转化过程能够使冰温度上升,热运动体系混乱程度大,连接水分子的氢键会逐渐减少,分子之间晶格能升高并累积。当能量累积到一定程度时会破坏水分子之间作用力,进而让有序排列的水分子向无序化转变,宏观表现为固体冰向液态水转变。高频机械振动使得工具头除以上述方式使水分子内部摩擦生热外,还会与周围冰层发生接触摩擦,产生的热能会加速冰的融化。

(3)空化作用引起的破坏。冰在超声波振动作用下会部分转化为液态水,这部分液态水在超声波振动作用下产生空化现象。空化现象是指液体中存在的微气核空化泡在外界作用下发生振动,并在气压达到一定值时崩溃的动力学过程。空化效应产生的空穴现象会在液体中产生暂时负压区,导致气压不平衡,液态水内产生非线性振动的气泡,这些气泡破灭时会产生瞬时的高温( $>5000\text{ K}$ )与高压( $>$

$500\text{ GPa}$ ),对周围的冰层造成破坏<sup>[14]</sup>。同时,在振动过程中,空化气泡使液体产生环流,使振动着的气泡表面具有较高的速度梯度和粘滞应力<sup>[15]</sup>,加速对周围冰层的侵蚀与剥离。因此,空化效应能够辅助冰层的破碎,进一步提高了冰层钻进速度。

## 2 超声波冰层钻进试验

### 2.1 试验仪器

试验采用压电陶瓷式超声波振动发生器,主要由驱动电源、换能器、变幅杆与工具头等组成,见图1。

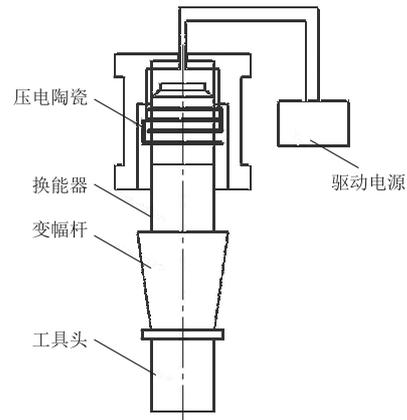


图1 超声波振动发生器示意图

驱动电源把220V、50Hz的交流电信号转换为超声波频率电振荡信号,为换能器提供电能<sup>[16]</sup>;压电陶瓷换能器将电能转变为超声频机械振动<sup>[17]</sup>;变幅杆放大机械振幅、位移或速度以聚集能量;工具头上部与变幅杆连接,下部通过熔冰的方法钻进冰层。试验使用的超声波发生器如图2所示,可自动追踪频率,在30kHz下换能器自动追踪频率范围在29.75~30.10kHz,发生器额定功率为1200W。工具头直径为27mm,振动头质量为2.56kg(即为施加在样品上的压力)。



图2 超声波发生器(30 kHz)

## 2.2 制取冰样

使用 TN/GDW-010D 型高低温试验箱冻制冰样。该试验箱温度范围为  $-70 \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$ , 总功率为 12 kW。设定试验箱内为  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 用圆台状模具灌入自来水制取冰样品。样品上端直径为 52 mm, 下端直径为 70 mm, 高度为 70 mm, 体积约为 180 mL。冻制完成的冰样内部存在少量气泡, 温度为  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 抗压强度为  $3 \text{ MPa}$ <sup>[18]</sup>。

## 2.3 试验数据

试验前测量冰样的质量  $m_1$ , 将冰样下端固定在底座上, 工具头压在冰样表面上后开始进行无回转振动钻进, 钻压为钻头自重 ( $0.0256 \text{ kN}$ ), 见图 3。在全部钻进冰样后停止试验, 由录像机从侧面拍摄记录, 全过程在试验箱里进行。



图 3 超声波钻进试验

在钻进过程中, 工具头在冰样中稳定下降, 停振后冰样形成规则的圆形孔。振动钻进后, 测量冰样的质量  $m_2$  以及钻孔直径  $d$ 、深度  $h$ , 读取钻进时间  $T$ , 试验数据见表 1。

表 1 超声波钻进试验数据

试验序号	试验前冰样品质量 $m_1/\text{g}$	工作间 $T/\text{s}$	钻进后冰样品质量 $m_2/\text{g}$	钻孔直径 $d/\text{mm}$	钻进深度 $h/\text{mm}$
1	161.113	58	141.758	29	36.06
2	158.945	59	137.984	29	37.50
3	175.509	57	156.547	28	37.06

## 3 数学模型建立及试验数据分析

由上述试验现象可知, 钻孔直径与钻头直径几乎相同, 钻孔周围有液态水流出, 说明超声波振动主要是在空化效应和热效应作用下熔化钻进。

### 3.1 超声波熔冰效率分析

超声波换能器振子的输入功率为变量, 在工作时间段  $T$  内, 总功率的计算如公式(1)所示, 平均功率为总功率除此段时间, 如公式(2)所示:

$$P_a = \int_0^T P_t dt \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{T} P_a = \int_0^T P_t dt \quad (2)$$

式中:  $P_a$ ——超声波振动系统的电能输入总功, J; 由超声波发生器驱动电源显示屏每一秒读取的数值绘制曲线进行计算;  $P_t$ ——超声波振动系统的瞬时功率, W;  $\bar{P}$ ——超声波换能器的平均电能输入功率, W;  $T$ ——超声波换能器工作时间, s。

设在时间  $T$  内熔冰有效功为  $Q$ , 包括了冰升温到熔点所吸收的热量  $Q_1$  和处于熔点的冰融化为同温度水所吸收的热量  $Q_2$ , 可得到如下公式:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 \\ &= (m_1 - m_2)L \times 10^{-3} + \\ &\quad (m_1 - m_2)C\Delta T \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $Q$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  单位均为 J;  $m_1$ 、 $m_2$ ——钻进前、钻进后冰的质量, g;  $L$ ——冰的液化潜热, 取  $3.36 \times 10^5 \text{ J/kg}$ ;  $C$ ——冰的比热容, 取  $2100 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ;  $\Delta T$ ——冰融化前后的温度差, 在本试验中为 10 K, 即冰的融化温度  $273.15 \text{ K}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 与冻制冰样温度  $263.15 \text{ K}$  ( $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的差值。

根据以上推导, 得出超声波钻进熔冰效率  $\eta$  计算公式:

$$\eta = \frac{Q}{P_a} = \frac{(m_1 - m_2)(L + C\Delta T) \times 10^{-3}}{\int_0^T P_t dt} \quad (4)$$

### 3.2 超声波熔冰平均功率密度与钻进速度

平均功率密度是钻进时间内的平均输入功率与钻孔横截面积之比:

$$I = \frac{\bar{P}}{A} = \frac{400 \int_0^T P_t dt}{\pi T d^2} \quad (5)$$

式中:  $A$ ——钻孔横截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $d$ ——钻孔直径, mm;  $I$ ——平均功率密度,  $\text{W/cm}^2$ 。

钻进速度是钻进深度与钻进时间之比:

$$V = 3.6h/T \quad (6)$$

式中:  $V$ ——钻进速度, m/h;  $h$ ——钻进深度, mm。

### 3.3 试验数据处理及分析

根据以上计算公式的推导, 得到在 30 kHz 的频率下超声波冰层钻进试验数据如表 2 所示。输入

功  $P_a$  由 origin 软件通过积分计算得到。

表2 超声波冰层钻进试验数据计算

试验 序号	平均输入功率 $\bar{P}/W$	平均功率密度 $I/(W \cdot cm^{-2})$	钻进速度 $V/(m \cdot h^{-1})$	冰样品 融化质 量/g	融化所需 最小热量 $Q/J$	输入功 $P_a/J$	熔冰 效率 $\eta/\%$
1	161.38	24.40	2.24	19.355	6909.735	9360	73.8
2	160.00	24.20	2.29	20.961	7483.077	9440	79.3
3	165.65	28.92	2.34	18.962	6769.434	9442	71.7

将以上3组数据计算平均值可知,频率为30 kHz的超声波振动钻进方法在平均功率密度为  $25.85 W/cm^2$  时,钻进速度可达到  $2.29 m/h$ ,熔冰效率  $\eta$  可达到  $74.9\%$ 。其熔冰效率高于热水钻热效率( $58.9\% \sim 72.4\%$ )及热熔钻热效率( $59\%$ ),钻进速度高于热熔钻(相同功率密度下钻进速度为  $2.18 m/h$ ),说明超声波钻进方法在理论上具有可行性,能够有效改进热熔钻与热水钻效率较低的问题并提升热熔钻的钻进速度。

#### 4 结论

(1)在对超声波冰层钻进机理进行了理论分析的基础上,提出采用超声波振动钻进冰层的方法。该方法在超声波振动作用下,主要通过热效应产生的熔冰作用、空化作用与机械效应引起的疲劳破坏钻进冰层。

(2)建立了超声波振动钻进冰层的试验装置,进行了超声波冰层钻进试验,并对超声波振动钻进冰层的效率进行了理论分析与计算公式的推导。通过室内试验数据分析可知,在纯冰层条件下,超声波钻进方法的热效率高于热水钻与热熔钻,钻进速度高于热熔钻。

(3)由理论分析以及试验验证可知,超声波振动钻进冰层具有可行性,建议进一步深入研究其钻进

机理,为钻具的研制及应用奠定理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Motoyama H..The Second Deep Ice Coring Project at Dome Fuji, Antarctica[J]. Scientific Drilling,2007,(5):41-43.
- [3] 李国民,刘宝林,毛志新.冰冻取样技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(2):44-46.
- [4] 杨成.极地冰岩夹层钻进碎岩机理分析及试验研究[D].吉林长春:吉林大学,2016.
- [5] 陈云望,曹品鲁,龙翔,等.冰层取心回转钻进模拟实验台的设计与测试[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(5):31-36.
- [6] 杨阳,范晓鹏,达拉拉伊,等.南极冰下基岩热水驱动快速取心钻具研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(7):48-51.
- [7] 同懿.极地冰架热水钻测控系统研制[D].浙江杭州:杭州电子科技大学,2017.
- [8] 陈晨,温继伟,赵嵩颖.热熔钻进过程中的温度场[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(S3):322-328.
- [9] 韩龙伸.超声波除冰方法与试验研究[D].浙江杭州:杭州电子科技大学,2013.
- [10] 翟国兵.压力对超声波振动碎岩效果影响规律的研究[D].吉林长春:吉林大学,2016.
- [11] 吴献强,丁德馨.周期荷载作用下岩石疲劳损伤性能的分析研究[J].国外建材科技,2006,(2):42-44,47.
- [12] 邓海兵,朱琦,叶明友,等.超声波在电镀金刚石钻头工艺中的应用与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(5):69-71.
- [13] 罗斯,Rose J L,何存富,等.固体中的超声波[M].北京:科学出版社,2004.
- [14] 黄继汤.空化与空蚀的原理及应用[M].北京:清华大学出版社,1991.
- [15] 赵大军,孙梓航,赵研,等.利用液体空化效应的辅助碎岩装置及方法:中国,CN104653107A[P].2015-05-27.
- [16] 陈振伟.超声波发生器的研究[D].浙江杭州:浙江大学,2007.
- [17] 梁彩红,韦旌坤,史立京,等.超声波取样钻机电耦合特性研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):46-49.
- [18] 常泽.输电线路覆冰力学性能试验与超声波除冰技术研究[D].北京:华北电力大学,2014.