

# 极地深部冰层取心钻探孔壁水压致裂研究

张 晗<sup>1,2,3</sup>, 陈 晨<sup>1,2,3</sup>, Pavel Talalay<sup>1,2,3</sup>, 毛建设<sup>4</sup>, 刘书源<sup>1,2</sup>, 靳成才<sup>1,2</sup>, 宛 召<sup>5</sup>  
(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. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026; 4. 中石化中原石油工程有限公司管具公司, 河南 濮阳 457300; 5. 中国葛洲坝集团三峡建设工程有限公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为了维护极地深部冰层取心钻探工作中钻孔的稳定,避免孔内事故的发生,冰层孔壁的水压致裂问题是亟待解决的重要科学问题之一。本文在深入分析国内外冰层钻探资料的基础上,结合冰盖动力学相关理论,计算得出了钻孔所在区域冰层的密度、温度及内部应力随深度的变化规律。在此基础上,结合油气资源勘探水力压裂技术与冰层钻进钻井液等相关理论,建立了合理的孔壁压差计算方法,深入探讨了适用于深部冰层钻探孔壁水压致裂机理。研制了冰层钻孔水压致裂模拟实验装置,可分析研究不同围压条件下冰样的脆性变形机理。结合我国 Dome A 深冰心钻探工程实际,提出钻孔可能发生水压致裂的深度区域及孔壁所需的起始裂纹长度判定,以期为后续的安全高效冰层钻进提供重要的理论依据。

**关键词:**水压致裂;冰层钻探;钻井液;水压致裂模拟实验;脆性变形

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)11-0005-07

**Research on Hydraulic Fracturing in Deep Ice Core Drilling Borehole Wall/ZHANG Han<sup>1,2,3</sup>, CHEN Chen<sup>1,2,3</sup>, Pavel Talalay<sup>1,2,3</sup>, MAO Jian-she<sup>4</sup>, LIU Shu-yuan<sup>1,2</sup>, JIN Cheng-cai<sup>1,2</sup>, WAN Zhao<sup>5</sup>**(1.College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2.Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China; 3.Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 4.The Company of Drilling Tubes & Tools Service, Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Sinopec, Puyang Henan 457300, China; 5.Chinese Gezhouba Group Three Gorges Construction Engineering Co., Ltd., Yichang Hubei 443002, China)

**Abstract:** In order to maintain the stability of deep ice core drilling borehole wall and avoid the occurrence of in-hole accidents, the hydraulic fracture become one of the important scientific problem which need to be solved urgently. On the basis of deep analysis of the ice drilling data, and combining the ice sheet dynamics related theory, we calculated the change rules of ice density, temperature and internal stress with depth. Then, combining the hydraulic fracturing technology in oil and gas resources exploration drilling and ice drilling fluid theory, we established a reasonable differential pressure calculation method of ice borehole wall and discusses the mechanism of hydraulic fracturing for deep ice drilling deeply. By developing a true-triaxial hydraulic fracturing equipment, we obtained the brittle deformation mechanism of ice borehole under different confining pressures. Combining the actual deep ice core drilling in Dome A, we obtained the depth interval and necessary initial fracture length of occurring potential hydraulic fracture in this borehole. This method provides an important theoretical basis for subsequent safe and efficient in future ice drilling engineering.

**Key words:** hydraulic fracturing; ice drilling; drilling fluid; hydraulic fracturing simulation experiment; brittle deformation

## 0 引言

当固体材料内部的流体压力超过地层最小主应

力与岩石抗拉强度之和时,材料会产生拉伸破坏发生水力破裂现象<sup>[1]</sup>。自然界中关于这种水压致裂的

收稿日期:2018-07-05

基金项目:国土资源部公益性项目(编号:201311041)与省校共建新能源专项(编号: SXGJSF2017-5)提供压裂设备经费支持;国家自然科学基金项目(编号:41327804 与 41672361)与吉林大学科学与技术创新团队(编号:2017TD-24)提供材料、人员及其他支持

作者简介:张晗,男,汉族,1992年生,博士研究生在读,地质工程专业,从事极地冰钻科学与技术研究工作,吉林省长春市西民主大街 938 号, hanz16@mails.jlu.edu.cn.

通信作者:陈晨,男,汉族,1965年生,教授,博士生导师,主要从事非常规能源开发技术、极地施工技术、岩土工程施工技术等方面的研究及教学工作,吉林省长春市西民主大街 938 号, chenchen@jlu.edu.cn.

现象十分常见,例如,在南北极,海洋漂浮的冰山甚至是冰川边缘的冰架大规模的裂解,从力学机理方面来说,这些冰川的裂解行为很大程度上都是由水压致裂所致:冰川融水流入到它本身存在的裂缝中,在水压的作用下,裂缝扩展、延伸,最终导致大规模的冰山裂解、崩塌<sup>[2-4]</sup>。

在油气资源勘探开发领域内,水力压裂技术自20世纪50年代初期以来在石油工业的增产技术中得到广泛地应用<sup>[5]</sup>。该技术的核心便是增加钻孔内的液柱压力使其超过井周围岩本身的强度而发生不同类型的破坏,随着压裂液及支撑剂的持续泵入,井周产生的裂缝不断向外延伸,以达到增大接触面积进而增产的目的<sup>[6-8]</sup>。这种水力压裂产生的裂缝有的时候甚至能够延伸至相距钻孔位置的几百米之外。在冰层钻探领域,作用机理相同的水压致裂的问题一直充满争议<sup>[9]</sup>。

南极冰层领域的研究人员普遍认为,由于冰的粘塑性,当冰孔内的钻井液压力过大时,钻孔随着时间的推移会逐渐扩大。冰层钻孔扩大的例子也时常发生,例如:格陵兰岛的Dye-3孔,钻孔底部的钻井液压力预计超过冰层压力0.25 MPa<sup>[10]</sup>。1983年该钻孔的调查显示,孔底已出现巨大的扩张;格陵兰岛的GISP2孔,钻孔底部压差预估达到0.1 MPa,2年后的测量表明钻孔底部大约产生1~1.5 mm的扩孔<sup>[11]</sup>。

俄罗斯科学家在南极进行钻探工作时,最早观测到冰孔这种水压致裂现象。他们进行东方站5G钻孔作业时,发现孔内液面突然下降,同时在相距20 m之外的4G钻孔中出现了原本应位于5G孔中的钻井液<sup>[12]</sup>。这种钻井液的“迁移”说明5G钻孔内产生水压致裂的现象。为了深入探索钻孔内的这种“异常行为”,俄罗斯科学家进行了相关现场实验,验证了钻孔水压致裂现象的存在<sup>[13]</sup>。2016—2017年,西南极钻探ASIG孔在冰岩交界之上90 m处同样出现了钻井液漏失的钻孔水压致裂现象,此次钻进采用钻井液循环的方式,泵入的压力为0.41 MPa,流量30~34 L/min。发生以上钻孔水压致裂的现象会导致钻井液的漏失,冰层的污染,钻头的破坏甚至严重的钻探事故,而深入了解这种水压致裂现象能够为冰钻的工程师们提供合理调节钻井液密度、合理控制泵压、合理控制钻井液面高度等的相关理论依据<sup>[9]</sup>。

本文将油气资源勘探开发水力压裂技术的内部作用机理与冰层钻探钻孔的实际情况相结合,提出极地深部冰层取心钻探孔壁水压致裂理论。同时,通过真三轴水力压裂实验验证所提理论的正确性。在此基础上,结合南极Dome A的环境地质条件,对我国正在实施的深冰心钻探孔进行潜在水压致裂现象的评估预测。该方法的提出将为南极钻探工作者维持钻孔稳定采取的各项措施提供相应的理论依据。

## 1 冰盖密度、温度及内部应力随深度的变化规律

深冰心钻探工作大都位于冰盖上,冰盖的密度、温度及内部应力对钻孔的稳定有着极其重要的影响。具体来说,冰层的温度不仅仅影响着冰的物理力学性质,同样也决定着钻孔内钻井液的温度分布,进而影响孔内液柱压力;不同深度处的上覆地层压力取决于冰的密度分布;冰盖内部的应力场主导了钻孔周边的应力场。以上这些因素相互作用,共同决定了钻孔孔壁的稳定状态。

### 1.1 冰盖温度随深度分布规律

Budd通过冰层与底部基岩的相互热传递为基础,提出了冰川温度随深度的变化规律<sup>[14]</sup>:

$$T(h) = T_s - (\beta_0 / \zeta) [\operatorname{erf}(\zeta H) - \operatorname{erf}(\zeta h)] \quad (1)$$

$$2\zeta^2 = b_n / \kappa H \quad (2)$$

式中:  $T_s$ ——某一厚度为  $H$  的冰川的表层温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\beta_0$ ——冰川基底的温度梯度(表1中列出了极地各个区域的基底温度梯度取值),  $\text{K}/\text{m}$ ;  $b_n$ ——该冰川的雪层积累率,  $\text{m}/\text{a}$ ;  $\kappa$ ——冰层中的热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{a}$ ;  $h$ ——基底往上的冰层厚度,  $\text{m}$ 。

表1 极地各区域基底温度梯度建议值

地点	基底温度梯度/( $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ )
East Antarctica	0.0226
West Antarctica	0.0264
Dome C	0.0224
Kohnen Station	0.0304
Dome F	0.0250
Vostok Station	0.0222
World average	0.0226

### 1.2 冰盖密度随深度分布规律

雪层经过长期的压实、融化、重结晶等内部作用逐渐形成冰层,依据冰盖上覆冰雪层的分布特性,可以大致将冰层分为3个阶段,即:雪层、粒雪层及冰层。Schytt V通过工程实际经验给出了冰川上部

(雪层及粒雪层)的密度分布规律<sup>[15]</sup>:

$$\rho_{\text{ice}}(z) = \rho_i - [\rho_i - \rho_s] e^{(-z/z_p)} \quad (3)$$

式中:  $\rho_{\text{ice}}(z)$ ——深度  $z$  米处冰的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_i$ ——在大气压及  $0^\circ\text{C}$  条件下, 纯净冰的密度 ( $916.8 \text{ kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_s$ ——表层积雪的密度 ( $300 \sim 400 \text{ kg}/\text{m}^3$ );  $z_p$ ——引入的参数值, 其大小与该地区粒雪层的深度有关,  $\text{m}$ 。

随着深度的增加, 冰层中的气泡逐渐被压缩, 冰的密度逐渐达到纯净冰的密度, 此后随着温压的增加而略有变化。Talalay 给出了温度、压力作用下, 冰的密度变化规律<sup>[9]</sup>:

$$\rho_{\text{ice}}^{T,P} = 916.8(1 - 1.53 \times 10^{-4} T) / [1 - 11.94 \times 10^{-11} (1 + 1.653 \times 10^{-3} T + 3.12 \times 10^{-6} T^2)(P - P_0)] \quad (4)$$

式中:  $T$ ——表示温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $P$ ——当前压力,  $\text{Pa}$ ;  $P_0$ ——大气压 ( $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ )。

### 1.3 冰盖内部应力随深度分布规律

假定冰盖模型所在的坐标轴如图 1 所示。

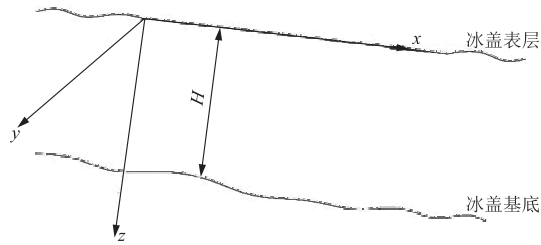


图 1 计算冰层内部应力选取的坐标系

Hooke 最早给出了理想冰盖内部某一点的各个应力分量<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = -\rho g_z z + 2\sqrt{\sigma^2 - (\rho g_x z)^2} \\ \sigma_{yy} = -\rho g_z z + \sqrt{\sigma^2 - (\rho g_x z)^2} \\ \sigma_{zz} = -\rho g_z z \\ \sigma_{xy} = 0 \\ \sigma_{zy} = 0 \\ \sigma_{zx} = -\rho g_x z \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\sigma$ ——平面应变的有效应力;  $g_x$ 、 $g_z$ ——分别表示沿着  $x$ 、 $z$  轴的重力加速度分量 (其大小取决于此处冰川的倾斜角)。

通过该处冰川的流动速度监测数据, 结合冰川流动模型 (公式 6) 与 Hooke 提出的深度与应力之间的关系 (公式 7), 可以得出冰层内部一点的有效应力的大小。

$$\dot{\epsilon} = (\sigma/B)^n \quad (6)$$

$$z = \frac{\sqrt{\sigma^{2n} - r_e^2 B^{2n}}}{\rho g_x \sigma^{n-1}} \quad (7)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$ ——冰盖流动有效应变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $B$ ——冰的粘度系数,  $\text{MPa} \cdot \text{a}^{1/n}$ ;  $r_e$ ——有效应变速率,  $\text{a}^{-1}$ 。

假定进行深冰心钻探区域冰川的倾斜角以及偏应力很小, 忽略不计, 求解应力状态方程, 最后得出冰盖内部某一点的三主应力近似求解值:

$$\sigma_z = g \int_0^H \rho_{\text{ice}}(z) dz \quad (8)$$

$$\sigma_H = \sigma_z - \sqrt{\sigma^2 - (\rho g_x z)^2} \quad (9)$$

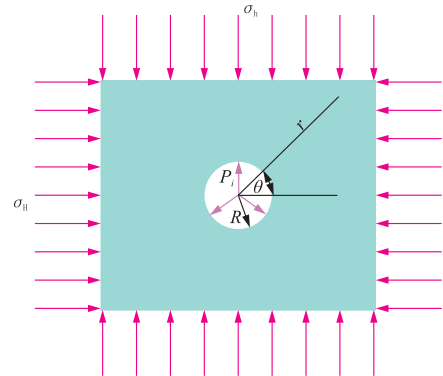
$$\sigma_h = \sigma_z - 2\sqrt{\sigma^2 - (\rho g_x z)^2} \quad (10)$$

式中:  $\sigma_z$ ——上覆冰层压力;  $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ ——分别表示最大、最小水平主应力。

## 2 冰层钻探孔壁水压致裂理论及模拟实验系统

### 2.1 冰层钻探孔壁水压致裂理论

冰层钻探的水压致裂与油气资源勘探开发中利用水力压裂技术扩展裂缝本质机理相同。为了获取维持钻孔孔壁稳定的力学临界条件, 必须建立各个深度处钻孔孔壁的应力分布规律 (参见图 2)。



R—钻孔半径;  $r$ —坐标系中的该点距离中心点的距离;  $\theta$ —极坐标方位角;  $P_i$ —钻井液液柱压力

图 2 冰孔孔壁横截面受力示意图

#### 2.1.1 钻井液液柱压力变化规律

钻井液的液柱压力是由孔内的钻井液自重产生, 但由于极地钻井液的特殊性, 一定深度处的钻井液液柱压力同时受到温度、压力的影响。根据 Talalay 的研究, 首先计算钻井液密度随着温度变化的关系<sup>[9]</sup>:

$$\rho_{\text{fl}}^T(z) = a_1 T + \rho_0 \quad (11)$$

然后通过迭代法, 同时考虑压力作用的影响可得钻井液密度在温压作用下的变化规律:

$$\rho_{\text{fl}}^{\text{P,T}}(z) = \frac{\rho_{\text{fl}}^{\text{P}}(z)}{1 - \alpha P_{\text{fl}}(z)} \quad (12)$$

最后得到钻井液在深度  $z$  处的静液柱压力:

$$P_{\text{fl}}(z) = \begin{cases} 0 & 0 < z < H_0 \\ -g \int_{H_0}^z \rho_{\text{fl}}(z) dz & H_0 < z < H \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\rho_{\text{fl}}^{\text{T}}(z)$ ——考虑温度作用下钻井液的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $a_{\text{t}}$ ——钻井液的导热系数,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho_0$ ——钻井液在  $0^\circ\text{C}$  时的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{\text{fl}}^{\text{P,T}}(z)$ ——考虑温压作用下钻井液的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\alpha$ ——钻井液的压缩系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;  $P_{\text{fl}}(z)$ ——深度  $z$  米处的钻井液液柱压力,  $\text{Pa}$ ;  $H_0$ ——钻井液在孔内的高度(距孔口的距离, Dome A 孔为 100 m),  $\text{m}$ 。

### 2.1.2 钻孔截面孔壁应力分布规律

根据王维、高帅及洪建俊等人关于钻孔水力压裂方面的相关研究,将钻孔周边的各应力转换成极坐标系<sup>[17-20]</sup>,可得:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\text{H}} + \sigma_{\text{h}} - 2\cos(2\theta)(\sigma_{\text{H}} - \sigma_{\text{h}}) - P_{\text{i}} \quad (14)$$

$$\sigma_{\text{rr}} = P_{\text{i}} \quad (15)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z \quad (16)$$

式中:  $\sigma_{zz}$ ——垂向应力;  $\sigma_{\theta\theta}$ ——周向应力;  $\sigma_{\text{rr}}$ ——径向应力。

### 2.1.3 钻孔孔壁水压致裂机理

冰层取心钻探,其钻井液不进行循环,孔壁不涉及较大的压力波动。但是,由于冰盖内部冰的特性,冰孔孔壁时常会产生一定的破裂等不完整特性。在这些不确定因素的影响下,孔壁可能产生破裂,钻井液沿着裂缝漏失。本文从两个方面分析研究孔壁水压致裂机理:(1)孔壁的起裂及扩展;(2)引起裂缝扩展的裂纹初始临界长度的界定。必须同时满足这两种条件,裂缝才能持续扩展。

#### 2.1.3.1 基于最大拉应力准则判定的水压致裂条件

当钻孔孔壁处受到的拉力超过冰层本身的抗拉强度,孔壁产生破裂,即:

$$\sigma_{\theta\theta} - P_{\text{i}} \leq -S_{\text{i}} \quad (17)$$

式中:  $S_{\text{i}}$ ——冰的抗拉强度,  $\text{Pa}$ ;  $P_{\text{i}}$ ——裂缝形成处的压力,  $\text{Pa}$ 。

张洪彪在其进行的黄河冰劈裂实验中提出冰层抗拉强度与温度的关系<sup>[21]</sup>:

$$S_{\text{i}} = 0.0629 \ln(-T) + 0.397 \quad (18)$$

通过公式(9)、(10)、(14)、(17)和(18),可以得到孔壁水压致裂的临界表达式:

$$P_{\text{i}} = \sigma_{\text{H}} + \sigma_{\text{h}} - 2\cos(2\theta)(\sigma_{\text{H}} - \sigma_{\text{h}}) - P_{\text{i}} + S_{\text{i}} \quad (19)$$

当  $\theta = 0^\circ$  或  $180^\circ$  时,此值达到最小,为:

$$P_{\text{i}} = 3\sigma_{\text{h}} - \sigma_{\text{H}} - P_{\text{i}} + S_{\text{i}} \quad (20)$$

当冰层钻孔孔壁光滑无破裂时,孔壁无前期破坏,即  $P_{\text{i}} = 0$ ,则此时钻孔孔壁的水压致裂临界压力为:

$$P_{\text{ic}} = 2\sigma_z - 5\sqrt{\sigma^2 - (\rho g_x z)^2} + S_{\text{i}} \quad (21)$$

而当钻孔穿越冰层中破碎区域,孔壁本身存在破裂,钻井液渗入到孔壁的破裂区域内。这样的情况会导致水压致裂的临界压力大幅度减小,此时  $P_{\text{i}} = P_{\text{i}}$ ,换算得到破裂压力为:

$$P_{\text{ii}} = \sigma_z - 2.5\sqrt{\sigma^2 - (\rho g_x z)^2} + 0.5S_{\text{i}} \quad (22)$$

#### 2.1.3.2 考虑断裂韧性的裂纹扩展起始条件

本文认为,当满足条件(1)的情况下,钻孔孔壁产生的裂缝长度还需达到一定的数值才能保证孔壁裂纹的后续扩展(水力压裂实验表明裂纹的扩展会沿着最大水平主应力的方向)。结合 C.J. van der Veen 最早在研究冰川上部裂缝在水力作用下裂缝扩展理论,得出在冰孔中钻井液作用下,裂缝持续扩展所需的临界长度<sup>[22]</sup>:

$$K_{\text{IC}} = 1.12(P_{\text{i}} - \sigma_{\text{h}})\sqrt{\pi d} \quad (23)$$

式中:  $K_{\text{IC}}$ ——冰的应力强度因子,大量的冰样实验表明,取值  $0.1 \sim 0.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $d$ ——裂缝的初始临界长度,  $\text{m}$ 。

在冰层钻探工作中,当孔内的钻井液同时达到条件(1)、(2),可认定此钻孔存在水压致裂的潜在危险,需要采取相关的监测及调节措施来保持钻孔的稳定性。

## 2.2 冰层钻探孔壁水压致裂模拟实验

### 2.2.1 模拟实验系统的实现

该实验系统基于前期研制的真三轴水力压裂系统,拟增加温度控制系统及慢速率围压加载系统,可用于冰层孔壁水压致裂的研究。其中温度控制系统维持  $-10^\circ\text{C}$ ,保证实验过程中冰样的稳定;慢速率围压加载系统最低加载速率达  $0.005 \text{ mm}/\text{min}$ ,保证加载过程中冰样围压的顺利施加。实验系统的原理图如图 3 所示。



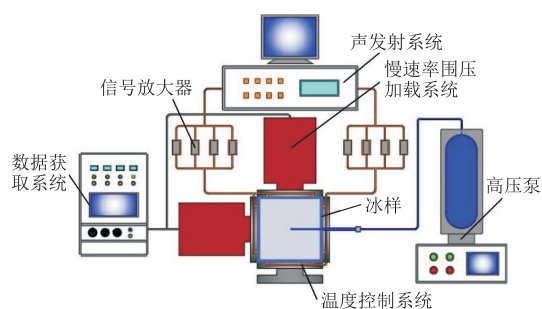


图 3 冰层钻探孔壁水压致裂模拟实验装置原理图

### 2.2.2 水压致裂验证性实验

为了初步验证上述水压致裂理论的正确性与已存在真三轴水力压裂实验台的可行性,本文在已有真三轴水力压裂实验台上进行了 3 组冰样水力压裂验证性实验。

(1)冰样的准备:将冰样置于  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温箱内一次性冻结完成,冻制样品的尺寸为  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。

(2)实验参数选取:将样品置于实验台上进行水压致裂实验。实验中,选取常用的冰层钻井液航空煤油(Jet A-1)作为压裂液,压裂液的泵入速度为  $2\text{ mL/min}$ 。改变不同的围压,得到冰样的起裂压力  $P_0$ 。与裂纹的扩展压力  $P_{ic}$ (为裂纹后续扩展的平均值)。查阅相关资料,选取此温度下冰样的抗拉强度为  $1.245\text{ MPa}$ 。

(3)验证性实验结果及分析:表 2 为 3 次实验的结果与理论计算结果对比情况,实验的水平差应力系数( $\Delta\sigma=\sigma_H-\sigma_h$ )统一为  $2\text{ MPa}$ 。

表 2 冰样水压致裂理论及实验起裂压力及裂纹扩展压力对比

样品编号	$\sigma_z/\text{MPa}$	$\sigma_H/\text{MPa}$	$\sigma_h/\text{MPa}$	$P_0/\text{MPa}$	$P_{ic}/\text{MPa}$	$P_{ie}/\text{MPa}$	$P_{ii}/\text{MPa}$
1-1	10	10	8	16.25	15.245	9.65	8.245
2-1	10	9	7	14.06	13.245	8.95	7.245
3-1	10	8	6	12.32	11.245	7.69	6.245

实验结果表明,3 组实验对于孔壁处于完整状态下,起裂压力的理论计算值与实验值相差不大(最大差值为 3-1 实验组,差值为  $1.075\text{ MPa}$ ,误差为  $9.55\%$ )。而对于裂纹扩展压力,理论普遍偏大,分析认为:在进行理论计算时,并没有考虑裂纹产生的方向性,计算过程中考虑到了最大主应力对于裂纹后续扩展的影响。而对于实验,当裂纹形成后(沿着最大主应力方向),压裂液的压力只需克服最小水平主应力以及冰的抗拉强度后即可继续扩展,最大主

应力不起主导性作用,因此实验的扩展压力偏小。

通过实验可得,当考虑冰层水压致裂后裂纹的后续扩展时,由于裂纹会逐渐转向沿着最大主应力方向,因此其持续扩展的临界压力应该修正为:

$$P'_{ii}=\sigma_h+S_t \quad (24)$$

上述实验主要是基于对最大拉应力准则判定的水压致裂条件的验证,而关于考虑断裂韧性的裂纹扩展起始条件的实验验证,将在后续研究中实施。

综上所述,冰层钻探孔壁水压致裂理论计算与模拟实验相互佐证,可为冰层钻探领域安全、有效钻进提供理论依据,同时为可能发生的冰钻钻孔事故提供相应的防护手段。

## 3 南极 Dome A 区域中国深冰心钻探孔潜在水压致裂风险理论研究

### 3.1 理论计算参数的选取与赋值

我国南极 Dome A 深冰心钻探工程是我国第一口深冰心钻孔,拟获取超过 100 万年的古老冰心,具有重要的科学意义。目前钻深突破  $800\text{ m}$ ,未发生孔壁稳定问题。本文结合上述的水压致裂理论,对孔内可能发生的孔壁破裂事故进行分析。

通过历次的中国南极内陆科学考察,科学家已通过雷达数据分析、物理化学实验等方式获取了 Dome A 区域的若干环境地质信息<sup>[23-25]</sup>。表 3 为进行此次 Dome A 深冰心钻探孔潜在水压致裂理论计算过程中所涉及的参数以及取值。

表 3 理论计算参数及其取值

参数	参数描述	取值
$\rho_{ice}$	纯净冰的密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	916.8
$\rho_s$	Dome A 区域表层积雪密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	350
$z_p$	粒雪层修正深度/m	34
$\mu$	冰的泊松比	0.331
$n$	冰川流动模型参数	3
$B$	冰的粘度系数/ $(\text{MPa}\cdot\text{a}^{1/n})$	0.14
$r_e$	Dome A 区域有效应变速率/ $\text{a}^{-1}$	0.1
$T_s$	Dome A 区域深度 $10\text{ m}$ 处温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-58.3$
$\beta_0$	Dome A 区域基底温度梯度/ $(\text{K}\cdot\text{m}^{-1})$	0.0226
$b_n$	Dome A 区域积累率/ $(\text{m}\cdot\text{a}^{-1})$	0.023
$\kappa$	冰的热扩散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$	37.2
$Q$	冰的蠕变活化能/ $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	60
$R$	气体常量/ $(\text{J}\cdot(\text{kmol})^{-1})$	8.314
$\rho_0$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 一个大气压下钻井液密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	901.2

### 3.2 理论计算结果及分析

(1)通过公式(1)、(2)、(3)、(4)的计算,将

Dome A 区域的选取参数值带入可得该区域冰层的密度及温度随深度的分布规律。将温度的分布规律与公式(11)、(12)相结合,同样能够得到钻井液的密度随着孔深的变化规律。

由图4可知,温度随着深度的增加逐渐升高,在预计3100 m深的孔底处达到约 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;冰层的密度在冰盖上部由于温压的作用在前300 m区间内迅速增大至约 $920\text{ kg/m}^3$ ,而后基本保持稳定(缓慢的增加后略有减小);钻井液的密度随着深度的变化逐渐减小,由表层的 $955\text{ kg/m}^3$ 逐渐减小至(孔深3100 m) $930\text{ kg/m}^3$ 。

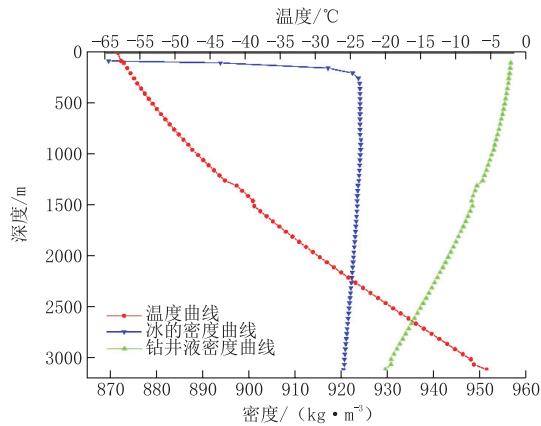


图4 Dome A 区域冰层密度、温度及钻井液密度随深度的分布规律

(2)分析基于最大拉应力准则判定的水压致裂条件,选取参数值进行计算,可得此条件下钻孔水压致裂情况(参见图5)。

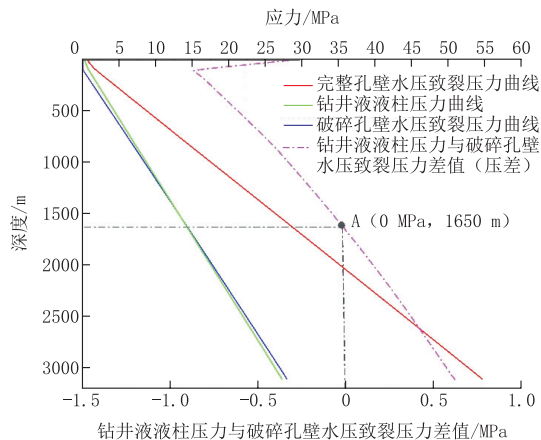


图5 基于最大拉应力准则的钻孔水压致裂预测图

图5中红线表示孔壁完整条件下,水压致裂所需的钻井液液柱压力;绿线表示孔壁有破碎时造成孔壁裂纹后续扩展所需的钻井液液柱压力;蓝线表示实际深冰心钻孔钻井液产生的液柱压力;粉色虚

线表示蓝绿之间的差值。由图5可知,当深度超过1650 m后,实际的钻井液液柱压力超过了孔壁存在破裂情况的水压致裂压力临界值,此时会产生水压致裂情况。

(3)由理论分析可知,钻孔产生水压致裂时还需要考虑裂纹扩展延伸所需的起始长度,计算得到的裂纹起始长度如图6所示。

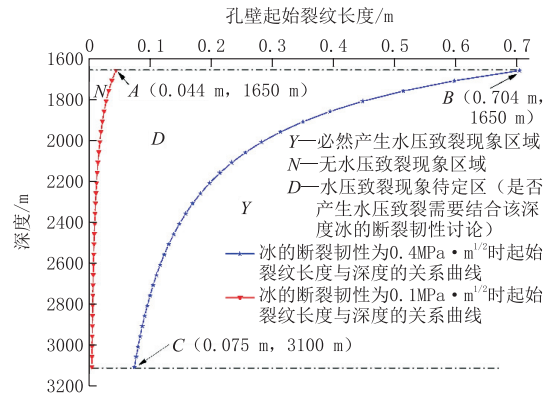


图6 考虑最大拉应力准则及断裂韧性的裂纹扩展起始条件图

图6中红线与蓝线分别表示冰的断裂韧性取值0.1与 $0.4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时,孔壁产生水压致裂所需的裂纹长度随深度的变化趋势(深度区间为1650~3100 m)。图中的N、D与Y区域表示不同的水压致裂情况:在初始裂纹长度与深度的双重条件下,若该点落在N区域,则孔壁不产生水压致裂现场;若落在Y区域,孔壁必然产生水压致裂现象;处于D区域内的点,需要结合该深度处冰的实际断裂韧性进行评判。图中的A(0.044 m,1650 m)、B(0.704 m,1650 m)及C(0.075 m,3100 m)三点为该区域角点,即判定水压致裂的临界点条件。

#### 4 结论

(1)冰层钻孔孔壁水压致裂理论表明,冰层的密度、温度、内部应力,钻孔内的钻井液液柱压力以及钻孔孔壁的完整状态共同决定着冰钻钻孔是否会发生水压致裂。完整的冰层孔壁仅在钻井液液柱压力的作用下不会产生水压致裂;非完整、有破裂的冰层孔壁产生水压致裂需满足足够的拉应力以及足够的初始裂纹长度条件。

(2)水压致裂模拟实验表明,当钻孔孔壁产生裂纹后,破碎的孔壁状态会降低裂纹扩展所需的液柱压力。由于裂纹会沿着最大主应力方向扩展,若在孔内某一位置处发生水压致裂现象,此时的扩展压

力受该状态下冰层的最小主应力以及该点处冰层的抗拉强度共同主导, 与其他主应力大小无关。

(3) 对南极 Dome A 区域中国深冰心钻探孔潜在水压致裂进行分析研究, 结果表明: 当钻孔的深度超过 1650 m 且孔壁存在破裂面的情况下, 可能会产生水压致裂作用。若要出现孔壁裂纹长距离扩展的现象, 孔壁初始的临界裂纹长度需达到 0.704 m (钻孔深度 1650 m), 该临界长度随着孔深的增加逐渐变短至 0.075 m (钻孔深度 3100 m)。没有满足临界水压致裂条件的钻孔孔壁, 其孔壁的状态需要通过该深度处冰的实际断裂韧性进行准确的评判。

#### 参考文献:

- [1] Fjær E., Holt R.M., Horsrud P., et al. Mechanics of hydraulic fracturing[M]. Elsevier Science & Technology, 2008; 369—390.
- [2] Colgan W., Steffen K., Mclamb W.S., et al. An increase in crevasse extent, West Greenland; Hydrologic implications[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): 113—120.
- [3] Colgan W., Rajaram H., Abdalati W., et al. Glacier crevasses; Observations, models, and mass balance implications[J]. Reviews of Geophysics, 2016, 54(1): 119—161.
- [4] Duddu R., Bassis J.N., Waisman H. A numerical investigation of surface crevasse propagation in glaciers using nonlocal continuum damage mechanics[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(12): 3064—3068.
- [5] 黄荣樽. 水力压裂裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发, 1981, (5): 62—74.
- [6] 陈勉, 陈治喜, 黄荣樽. 大斜度井水压裂起裂研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1995, (2): 30—35.
- [7] 金衍, 张旭东, 陈勉. 天然裂缝地层中垂直井水力裂缝起裂压力模型研究[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 113—114.
- [8] 李兆敏, 蔡文斌, 张琪, 等. 水平井压裂裂缝起裂及裂缝延伸规律研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, (5): 46—48.
- [9] Talalay P., Fan X., Xu H., et al. Drilling fluid technology in ice sheets; Hydrostatic pressure and borehole closure considerations[J]. Cold Regions Science & Technology, 2014, 98(3): 47—54.
- [10] Gundestrup N.S., Hansen B.L. Bore—Hole Survey at Dye 3, South Greenland[J]. Journal of Glaciology, 1984, 30(106): 282—288.
- [11] Hansen B.L., Gundestrup N.S. Resurvey of bore hole at Dye 3, South Greenland [J]. Journal of Glaciology, 1988, 34(117): 178—182.
- [12] Kudryashov B.B., Vasiliev N.I., Vostretsov R.N., et al. Deep ice coring at Vostok Station (East Antarctica) by an electromechanical drill[J]. Memoirs of National Institute of Polar Research Special Issue, 2002, 56: 91—102.
- [13] Vasilev N.I., Dmitriev A.N., Podoliak A.V., et al. Maintaining differential pressure in boreholes drilled in ice and the effect of ice hydrofracturing[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11: 9740—9747.
- [14] Budd W. F., Jensen D., Radok U. Derived physical characteristics of the Antarctic Ice Sheet[R]. Australian National Antarctic Expeditions Interim Reports, Series A (IV) Glaciology, 1971, Publication No.120.
- [15] SCHYTT V. Snow studies at Maudheim. Nor. Brit. Swed. Antarct. Exped. Sci. Res., 4A[R]: 1958, 690: 1949—52.
- [16] Hooke R.L., Mellor M., Budd W.F., et al. Mechanical properties of polycrystalline ice: An assessment of current knowledge and priorities for research; Report prepared for the International Commission on Snow and Ice, with support from the U.S. National Science Foundation[J]. Cold Regions Science & Technology, 1980, 3(4): 263—275.
- [17] 王维. 油页岩水力压裂数值模拟及实验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2014.
- [18] 高帅, 陈晨, 王维, 等. 桦甸地区油页岩水力压裂模拟实验研究[C]// 中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京: 地质出版社, 2015: 572—578.
- [19] 高帅. 油页岩水平井水力压裂裂缝起裂与延伸机理研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2017.
- [20] 洪建俊. 冰层钻探孔壁水力压裂数值模拟与实验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2016.
- [21] 张洪彪. 黄河冰抗拉强度及断裂韧性的劈裂试验研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2016.
- [22] CJVD Veen. Fracture mechanics approach to penetration of surface crevasses on glaciers[J]. Cold Regions Science & Technology, 1998, 27(1): 31—47.
- [23] Zhang N., An C., Fan X., et al. Chinese First Deep Ice—Core Drilling Project DK—1 at Dome A, Antarctica (2011—2013); progress and performance[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(68): 88—98.
- [24] Wang Y., Sodemann H., Hou S., et al. Snow accumulation and its moisture origin over Dome Argus, Antarctica[J]. Climate Dynamics, 2013, 40(3—4): 731—742.
- [25] Wang B., Tian G., Cui X., et al. The internal COF features in Dome A of Antarctica revealed by multi-polarization-plane RES[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(3): 230—237.