

# 冰层空气反循环连续取心钻具结构设计与 冰心卡断数值模拟

陈宝义<sup>1</sup>, 范大友<sup>1,2</sup>, 王如生<sup>1,2</sup>, Pavel Talalay<sup>1,2</sup>, 陈艳吉<sup>2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学极地研究中心, 吉林 长春 130026)

**摘要:**冰心包含大量的古气候资料和古生物学信息, 这些信息对于从远古到现代的气候变化和生物进化都很重要。如何高效快速地获取无污染的冰心是极地科学家的一个重要课题。冰层空气反循环钻具采用双壁钻杆形成反循环通道, 内管提供了从钻头底部到表面的冰屑和冰心的连续通道。钻具通过卡断机构卡断冰心, 通过反循环通道不断运移冰心, 从而实现连续钻具连续取心。本文采用 ABAQUS 软件对冰心卡断过程进行分析, 运用 XFEM 断裂准则以及 Explicit 显式方法求解, 选出适宜的卡断器尺寸和中心通道尺寸, 从而得到更好的反循环钻进效果。

**关键词:**冰钻; 结构设计; 数值模拟; 冰心卡断; 反循环

**中图分类号:** P634    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2018)09-0046-05

**Structure Design and Ice Core Breaking Simulation of Continual Air-reverse-circulation Ice Coring Drill/CHEN Bao-yi<sup>1</sup>, FAN Da-you<sup>1,2</sup>, WANG Ru-sheng<sup>1,2</sup>, Pavel Talalay<sup>1,2</sup>, CHEN Yan-ji<sup>2</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Polar Research Center, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Ice cores contain vast amounts of paleoclimate and paleontological information. These are important for climate change and biological evolution from ancient times to modern times. How to acquire clean ice cores efficiently and quickly is an important issue for polar scientists. The continual air-reverse-circulation ice coring drill use a double-wall drill pipe to form a reverse circulation channel. The inner pipe provides a continuous channel for transporting the ice chips and cores from the bottom of the hole to the ice sheet surface. The drill can break the ice core by its breaker, and move the ice core continuously through the reverse circulation channel, so as to realize the continual coring. By using ABAQUS software, this paper analyzes the process of ice core breaking, use of XFEM fracture criterion and Explicit method, choose appropriate breaker size and center channel size, so as to get better effect of reverse circulation drilling.

**Key words:** ice drilling; structure design; numerical simulation; ice core breaking; reverse circulation

## 0 引言

冰川(含冰盖和冰帽)、冰架是自然界在特殊环境下的特殊创造物, 蕴含着过去气候环境变化的重要信息, 是过去环境变化最可靠、最宝贵的天然档案馆之一<sup>[1-3]</sup>。冰心是在冰川或冰架上自上而下连续逐段取出的圆柱状冰雪样品, 它不仅记录了过去气温的变化, 而且还记录了过去气候环境变化、包括火山活动、太阳活动以及人类活动对于环境的影响等各种信息。目前, 在南极获取的深冰心已帮助人们恢复了地球 80 万年来的气候变化情况, 发现了全新

世以来的以 10 万年为主导周期的冰期—间冰期旋回。不过, 对于之前以 4 万年为主导周期冰期—间冰期旋回的了解还非常有限, 因此世界各国都在竞相寻找包含更长时间尺度的深冰心, 计划开展新的深冰心钻探项目<sup>[4]</sup>。冰钻是获取冰心的主要途径, 同样长度的冰心, 直径越大, 可获取的气候变化信息越多。为了快速获取冰心, 各个国家研究设计了各种冰层取心钻具。本文设计采用压缩空气作为循环介质的反循环连续取心钻具, 通过冰心卡断器的卡断与空气气流的动力作用完成钻进取心工作。

收稿日期: 2018-07-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“热水钻热流场对钻速及钻孔空间结构影响研究”(编号: 41476160)

作者简介: 陈宝义, 男, 汉族, 1964 年生, 建设工程学院执行院长, 教授, 博士, 吉林省长春市西民主大街 938 号, chenby@jlu.edu.cn。

通信作者: 王如生, 男, 汉族, 1973 年生, 勘察工程系副主任, 副教授, 博士, 长期从事极地钻探技术研究及教学工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, wangrs@jlu.edu.cn。

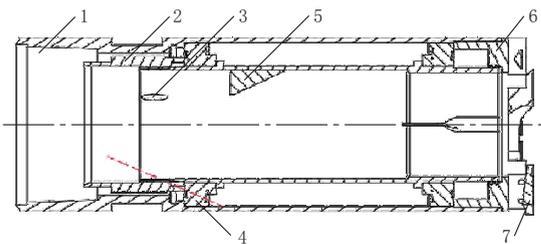
近年来,国内外一些学者开始采用数值模拟技术进行结构断裂破坏模式与破坏行为预测的研究,其中离散单元法和有限单元法最为常用<sup>[5-6]</sup>。相对于离散单元法,有限单元法发展较为成熟,在进行结构的非线性分析时计算结果准确度较高。一些学者曾采用传统的隐式有限单元法进行结构断裂分析<sup>[7-8]</sup>。Abaqus 软件是一种解决断裂力学问题的新的有限元方法,其理论最早于 1999 年,由美国西北大学的教授 Belyschko 和 Black 首次提出,主要是采用独立于网格剖分的思想解决有限元中的裂纹扩展问题,在保留传统有限元所有优点的同时,并不需要对结构内部存在的裂纹等缺陷进行网格划分。本文基于有限元软件 ABAQUS 的显式求解模块 Explicit 以及 XFEM 断裂准则,对于冰心卡断器卡断冰心的过程进行数值分析。

## 1 钻具结构设计

### 1.1 钻具设计

在岩心钻探中,常用的提取岩心样品的方法:一是提钻取心法,即在卡牢岩心后把所有孔内钻具提至地表;二是在不必换钻头,不用提升所有孔内钻具的方法,通过绳索打捞;三是全孔反循环连续取心,不提钻,利用循环介质把岩心或岩屑经钻杆的中心通道连续不断输送至地表<sup>[9]</sup>。在冰层回转钻进中,冰心的获取通常采用将钻具全部提升至地面的方式,在地面上将冰心从冰心管中取出。冰层空气反循环连续取心钻具采用反循环钻进取心方式,通过卡断机构将冰心从冰层中卡断,通过空气吹送至地面获取冰心。钻进过程中钻具不需要全部提离孔底,即可获取冰心,减少了起下钻时间和钻具拆卸等时间。

钻具主要结构如图 1、图 2 所示,有:钻具外管、钻具内管、内喷孔、止推轴承、卡断器、刀架、切削刃。在冰层回转钻进中,钻头通常采用 3 或 2 个切削刃



1—钻具外管;2—钻具内管;3—内喷孔;4—止推轴承;5—卡断器;6—刀架;7—切削刃

图 1 钻具结构剖面图

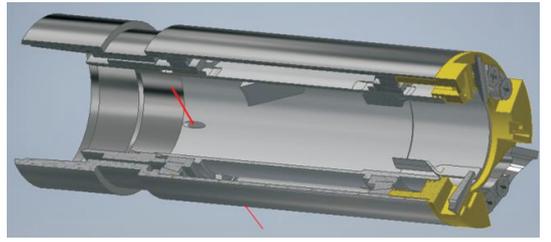
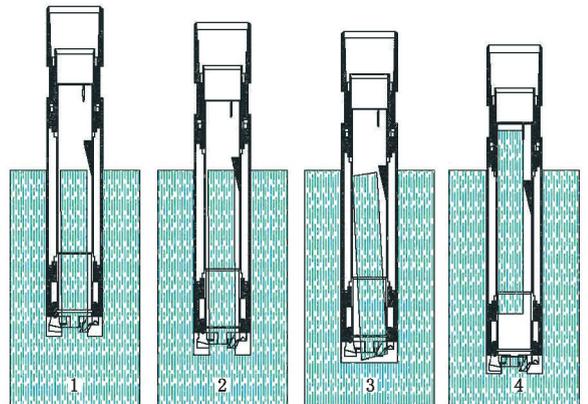


图 2 钻具结构模型图

结构,本文设计采用 3 切削刃结构,钻具的钻进速度可以达到 24 h 连续钻进 400 m。刀架的设计作用是可以将切削刃固定住,同时与钻具外管连接。钻进过程采用空气作为循环介质,钻头底部的刀架也设计有空气向钻孔底部喷射的喷嘴。钻头设计的钻冰孔孔径为 127 mm。钻头上部与双壁钻杆连接,形成反循环通道。

### 1.2 钻具卡断器设计

钻进过程中,钻具切削冰层形成冰柱,通过卡断器进行卡断,形成直径 60 mm,高 200 mm 的冰心。卡断器的工作原理是钻具下降过程中,冰心与冰层连接保持不动,卡断器随着钻具向下运动,冰心与卡断器接触,卡断器的形状为三角形,卡断器提供作用力给冰心。冰心顶端受到弯矩的影响形成产生了强制位移,冰心弯曲,冰心与冰层接触地方容易产生应力集中,卡断器对冰心的底部产生剪力使冰心进行卡断,底部开始产生裂纹,裂纹发展达到全部的程度,冰心与冰层断裂。卡断器的设计与冰心的接触面为凹形,并有一定的弧度,增加了接触面积便于冰心顺利被卡断,保证了卡断器顺利下降。卡断过程如图 3 所示。冰心分离后受到空气的运移作用而向上运动(见图 4)。钻具继续钻进形成新的冰心。



1—正常钻进中;2—冰心达到一定长度,与卡断器接触;3—卡断器卡断冰心;4—冰心被卡断后,反循环上移

图 3 冰心卡断原理图

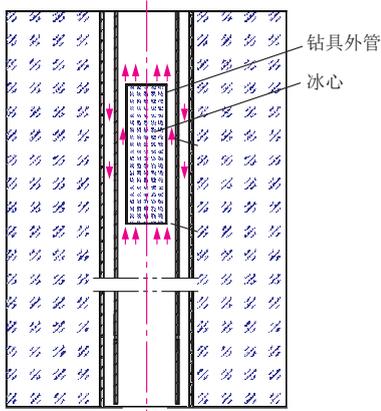


图4 冰心反循环运移图

钻具的中心通道是冰屑的运输通道,也是冰心运移的通道。中心通道如果较大会造成空气压力较小,并且冰心在运动过程中也会进行摆动,造成冰心的堵塞和断裂。因此,对于中心通道的尺寸也要进行研究。钻具的中心通道需要可以容纳冰心和冰屑,也要考虑实际加工技术的要求和卡断器的尺寸要求,通过对冰心卡断过程进行数值模拟分析得出卡断冰心所需要的最小直径。

## 2 冰心卡断数学计算模型

根据文献[10]查得,在不同温度时抗压强度和抗拉强度如表1所示。

表1 冰在不同温度下的抗拉强度和抗压强度

温度/℃	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
-15	2.1	2.9
-20	2.2	3.1
-25	2.3	3.5
-30	2.5	4.0

目前,较为常用的材料破坏准则主要有:Von Mises 准则<sup>[11]</sup>、极限强度准则<sup>[12]</sup>、极限变形准则<sup>[13]</sup>等。其中,Von Mises 准则适用于判断构件开裂,该准则认为材料的拉压破坏强度相等,这与冰的材料性能不符。极限强度准则,对于具有一定弹塑性的混凝土材料,该准则并不合适,但是,适用于普通脆性材料<sup>[14]</sup>。

相同环境下,冰心的抗压强度明显大于抗拉强度,冰心的断裂行为主要是冰心体的受拉伸强度超过了抗拉强度,产生了拉伸破坏。为了在极地-30℃的复杂环境中进行钻进,冰的最大许用应力设为4 MPa 进行计算,断裂计算采用极限强度准则。假

设冰心内部完整,没有裂隙。如图5所示,上部为未卡断冰心,下部为冰层。

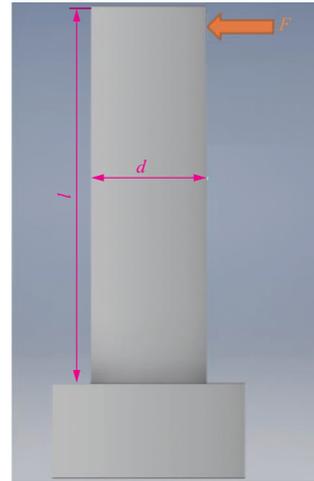


图5 冰心卡断模型

$M$  弯矩的计算公式:

$$M = Fl \quad (1)$$

式中: $M$ ——推力产生的弯矩; $F$ ——卡断器对冰心产生的推力; $l$ ——冰心的长度。

根据材料力学公式:

$$A = M/W \quad (2)$$

式中: $A$ ——许用拉应力; $W$ ——圆柱面弯曲截面系数。

$$W = \pi d^3 / 32 \quad (3)$$

$l$  为 200 mm,  $d$  为 60 mm。经过计算  $F = 410$  N。冰心底部边缘为应力集中区域,容易发生断裂破坏,卡断器需提供至少 410 N 的水平推力给冰心,才可以使冰心折断。

## 3 冰心卡断数值模拟

### 3.1 ABAQUS 显式求解

由于 ABAQUS/Explicit 显式求解模块计算能力强大,目前已被广泛用于求解高速动力、复杂接触、材料退化和失效等高度非线性问题<sup>[15]</sup>。

根据牛顿第二定律,结构中任一单元节点  $t$  时刻的加速度  $\ddot{u}_t$  可按式(4)确定:

$$Mu_t = P_t - I_t \quad (4)$$

式中: $M$ ——节点质量矩阵; $\ddot{u}_t$ 、 $P_t$ 、 $I_t$ ——分别为  $t$  时刻节点加速度、节点所受外力、节点内力,  $I_t$  由单元内力集成得到。

采用中心差分法对式(1)求解。 $t + \Delta t$  时刻的节点位移可由  $t$  时刻节点的节点位移和  $t + \Delta t/2$  时

刻的节点速度,按式(2)、式(3)显示得到。

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)} \dot{u}_{(t+\frac{\Delta t}{2})} \quad (5)$$

$$\dot{u}_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{u}_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)}}{2} \ddot{u}_t \quad (6)$$

由  $t + \Delta t$  时刻单元内的节点相对运动状态可得该时刻单元的变形,结合材料本构关系则可以得到单元的应力或内力<sup>[16]</sup>。

由于各节点运动方程为独立解耦的,显式求解方法对于结构中独立或相互连续单元受力、运动状态的计算总是有解的。因此,显式求解方法能够满足结构倒塌破坏过程中构件大变形、断裂与接触碰撞模拟的需求。

### 3.2 XFEM 断裂准则

传统有限元软件采用连续性准则进行模拟,采用生死单元法进行计算,不适宜模拟冰心的断裂分离。因此,运用 ABAQUS 软件对冰心模型进行数值模拟分析。ABAQUS 软件采用 XFEM 方法解决断裂问题首先需要确定模型中裂纹可能出现的区域,将其设置为具有扩展有限元性质的富集单元,然后选择适当的破坏准则,使单元达到破坏条件时,裂纹得以扩展。本文根据 XFEM 断裂准则要求,根据冰心卡断的实际情况,假设冰心底部有一条 0.5 mm 的裂纹,裂纹扩展区域为冰心与冰层连接的地方,断裂准则采用极限强度准则,最大拉伸应力值设置为不超过 4 MPa。

### 3.3 数值模拟分析边界条件及网格划分

钻具设计 1 d 钻进 400 m,钻具钻进速度为 4.6 mm/s。卡断器与水平线的夹角为 65°。计算过程如下(参见图 6):

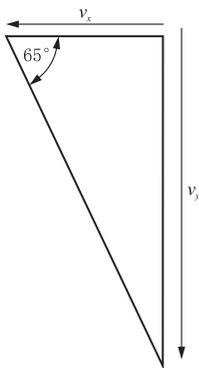


图 6 计算示意图

$$\tan 65^\circ = v_y / v_x \quad (7)$$

$$v_y = v_x \tan 65^\circ \quad (8)$$

式中： $v_x$ ——冰心上部的水平方向速度； $v_y$ ——钻具

钻进速度。

经过计算,对冰心上部的边界指定水平方向运动速度为 2.15 mm/s。

指定模型的材料属性为冰,冰的材料属性:杨氏模量 10400 MPa,泊松比 0.33,密度 900 kg/m<sup>3</sup>。冰心体下部为固定约束,指定冰心上部为速度边界。三维模型的运算量和运算时间相对较大,为了减少计算量和计算时间,模型采用二维模型进行计算(见图 7),模型为冰心中心内部截面。

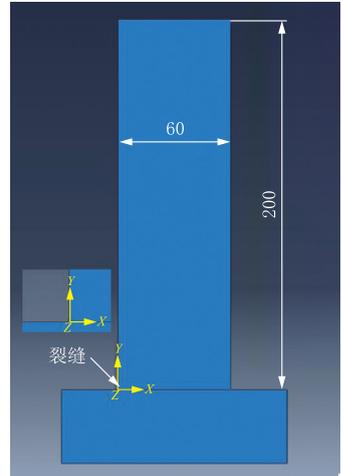


图 7 模型图

为了使计算结果更加准确,网格建立采用四边形结构化网格。将模型整体进行 partition 分割,分成冰心与冰层体两个部分进行网格划分(见图 8)。网格节点总数为 13300 个,结构化网格很大程度上减少了计算量,同时利于 XFEM 断裂准则进行模拟预测分析。

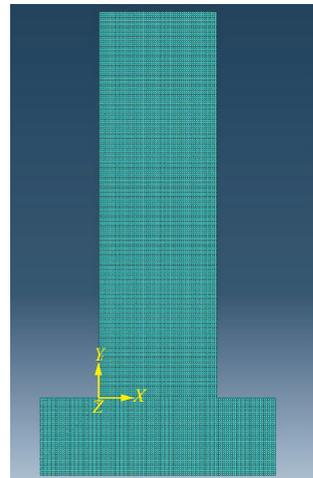


图 8 模型网格图

### 3.4 结果分析

如图9所示,数值模拟结果与理论猜想基本一致,符合实际情况。ABAQUS/Explicit显式求解模块与XFEM断裂准则模块数值模拟结果达到了计算模拟的要求。冰心断裂过程中,冰体的断裂面呈现波浪锯齿状,裂纹会随机上下浮动,浮动距离为0.2~1 mm。随着冰心位移的增加,冰心断裂的裂纹也在不断发展变大。发生较小位移时,裂纹的扩展较大,并且较为明显。从图10中可以看出,当冰心位移为2.5 mm时,冰心发生完全卡断分离。断裂时间为1.16 s,此时钻具下降了5.3 mm。断裂所需时间较短,符合冰层空气反循环钻具的设计要求。根据实际加工要求,卡断器的偏移能力至少为2.5 mm,中心通道的尺寸设计要大于62.5 mm,初步设计中心通道尺寸为65 mm。

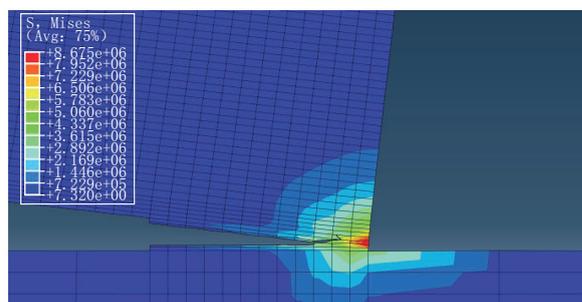


图9 数值模拟应力图

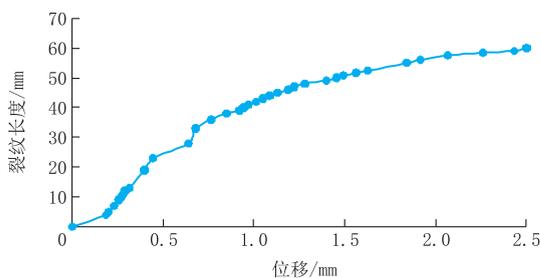


图10 冰心位移与裂纹关系图

## 4 结论

(1)冰层空气反循环连续取心钻具对于冰层有很大的帮助作用,减少了起下钻的时间,增加了工作效率。

(2)通过计算得出了卡断200 mm长,直径60 mm的冰心所需的最小作用力。

(3)基于ABAQUS软件对于冰心断裂过程进行数值模拟,合理的描述了卡断器卡断冰心的过程,

证明了冰心卡断对于钻进过程的干扰不大,钻进依然能继续进行。

(4)冰心卡断器应该可以使冰心偏移2.5 mm,确认了中心通道的最小尺寸。中心通道尺寸设计为65 mm较为合理。

目前,该钻具处于设计阶段。下一步将在此基础上,将钻具进行加工,设计反循环钻进实验台,为钻具优化设计提供更为真实有效的数据参数,为冰层钻进提供更适宜的钻进参数。

## 参考文献:

- [1] 秦大河,姚檀栋,丁永建,等.冰冻圈科学概论[M].北京:科学出版社,2016.
- [2] 杨佼,效存德,丁明虎,等.东南极冰盖 Princess Elizabeth 地区 LGB69 冰心化学记录反映的南印度洋过去 300 a 大气环流变化[J].冰川冻土,2015,37(2):286-296.
- [3] 苏勃,李忠勤,张明军,等.大陆型冰川与海洋性冰川物质平衡对比研究:以天山和阿尔卑斯山典型冰川为例[J].冰川冻土,2015,37(5):1131-1140.
- [4] 任贾文,效存德,侯书贵,等.极地冰心研究的新焦点:NEEM 与 Dome A[J].科学通报,2009,54(4):399-401.
- [5] 秦东,范立础.钢筋混凝土结构倒塌全过程数值模拟[J].同济大学学报,2001,(1):80-83.
- [6] zhang L M, Liu X L. Collapse analysis of reinforced concrete frame structures considering collision effects [C]// WCEE. Proceedings of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering. Auckland: WCEE,2000:1-8.
- [7] Isobe D, Toi Y. Analysis of structurally discontinuous reinforced concrete building frames using the ASI technique [J]. Computer & Structures,2000,76(4):471-481.
- [8] 卢啸,陆新征,张万开,等.特大地震下超高层建筑的倒塌模拟[J].中国科学:技术科学,2011,41(11):1405-1416.
- [9] 鄢泰宁.岩土钻掘工艺学[M].湖南长沙:中南大学出版社,2014.
- [10] 郭颖奎,孟闻远.冰的力学性能试验研究.[J]华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,(3):41-43.
- [11] 邢纪波.梁-颗粒模型导论[M].北京:地震出版社,1999.
- [12] 周或,金伟良.基于离散单元法的框架填充墙裂缝数值模拟[J].建筑砌块与砌块建筑,2008,(6):3-6.
- [13] 顾祥林,印小晶,等.建筑结构倒塌过程模拟与防倒塌设计[J].建筑结构学报,2010,31(6):179-187.
- [14] 王卓琳,林峰,顾祥林.基于离散单元法的混凝土细观力学模型研究进展[J].结构工程师,2007,23(5):79-85.
- [15] 庄茁,由小川,廖剑辉,等.基于 ABAQUS 有限元分析和应用[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [16] 王强,宋雪迪,郝中华,等.基于 ABAQUS 纤维梁单元的钢筋混凝土柱受破坏全过程数值模拟[J].土木工程学报,2014,47(12):16-17.