

基于河冰细观结构的超声辅助切削仿真分析及验证实验

董国军* 赖睿达 代勇 郭志清 吴孟为

哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨, 150001

摘要:以松花江河冰为研究对象,从河冰细观结构研究入手,结合超声辅助切削验证实验,对超声辅助切割冰块的效果以及提高生产效率的可行性进行分析。仿真结果表明,对于晶体复杂的天然河冰,超声辅助切割能减小约38%的切削力。验证实验表明,超声辅助切割在提高进给速度的同时能保证冰体切割质量,不易发生崩边和裂纹,相较于传统切割,对河冰生产质量和效率的提高效果显著,超声辅助切割用于大规模制备标准冰块是可行的。

关键词:超声辅助切割;松花江河冰;细观结构;切削优化

中图分类号: TB559

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.030

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Ultrasonic Assisted Cutting Simulation and Validation Experimental Research Based on River Ice Mesostructure

DONG Guojun* LAI Ruida DAI Yong GUO Zhiqing WU Mengwei

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

Abstract: Taking the Songhua River ices as the research objects, starting with the study of the meso-structure of river ices and combined with ultrasonic assisted cutting validation experiments, the effectiveness of ultrasonic-assisted ice cutting and the feasibility of improving production efficiency were analyzed. The simulation results indicate that ultrasonic assisted cutting may reduce the cutting force by approximately 38% when applied to the complex crystalline structure of natural river ices. Validation experiments demonstrates that this method enhances the feed rate and maintains the cutting quality of the ices, effectively preventing edge collapse and crack formation. In comparison to traditional cutting techniques, there is a significant improvement in both production quality and efficiency for river ices, thereby confirming the feasibility of employing ultrasonic assisted cutting for large-scale preparation of standard ice blocks.

Key words: ultrasonic assisted cutting; Songhua River ice; mesostructure; cutting optimization

0 引言

天然冰一般由冰晶体、气泡、杂质等成分组成,是一种内部结构驳杂的离散性复合材料^[1-2]。在极地冰川科考和冰建景观制作领域中,对于天然冰的冰芯钻取和冰柱切割过程,如何完整地保留冰体结构,避免出现裂纹和崩边是难点问题。我国哈尔滨“冰雪大世界”总用冰达25万立方米,对冰砌块生产效率和表面质量的需求是空前的。营建所需的标准冰砌块由松花江天然河冰通过传统油锯切割制成,存在诸多弊端,如:产生裂纹和崩边破坏冰体;切割时产生较大切缝,降低冰材料利用率等。目前国内外普遍采用的传统机械切冰法^[3]、热熔法^[4]、激光切割法^[5]的加工效率和质量

均无法满足“冰雪大世界”巨大的用冰需求。

冰的破坏与晶体结构的复杂性有关,国内外学者在冰体细观结构观测方面开展了深入研究。WANG等^[6]研究了冰晶的微观结构和机械性能,通过泛函分析确定微观结构、表面能和断裂韧性方面的性能。DIPRINZIO等^[7]对南极洲西普尔穹顶的冰芯进行钻取并分析冰微观结构及纹理,揭示了冰流过程和历史演变。王国志等^[8]提供了一套冰晶结构观测方法并结合图像识别测定大庆红旗泡水库冰的晶体类型、气泡尺寸等参数。王娟等^[9]应用数字图像方法分析了黄河流域内蒙古河段河冰晶体结构的变化特征。

实际生产中的环境温度低于-30℃,此低温下天然冰的塑性降低,呈现硬脆特性^[10],使得为提高生产效率而采用的快速进给加工方式易出现裂纹、崩边等加工破损,导致废冰率急剧上升。对于

收稿日期:2024-09-23

基金项目:国家自然科学基金(52475440);2023年黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2023ZXJ03C01)

难切取的硬脆材料,国内外学者普遍采用高频超声振动辅助加工的方法,它具有切削力小、热效应低、加工质量高等优点^[11-12]。LI等^[13]对石英玻璃进行了超声制孔实验,结合磨粒运动轨迹分析了旋转超声的工艺优势,对比实验表明,与纵向旋转超声相比,纵扭复合超声加工可以明显减小切削力。张俊杰等^[14]对刀具施加纵弯复合超声振动加工TC4钛合金,与普通加工相比,超声振动加工有效减小了切削力、毛刺生成和刀具磨损,并提高了表面加工质量。王福吉等^[15]对碳纤维采用超声振动辅助加工,使切削力和表面粗糙度值分别减小了4%~54.1%和15.8%~66.9%,对延长刀具寿命、降低累计温度和抑制损伤缺陷具有显著作用。

从相关研究中看出,冰的生长受环境因素(温度、风速、水文条件等)影响较大^[16],冰在不同地理条件下其细观结构差异较大,而针对低温下冰体结构的硬脆性和复杂性,采用超声辅助切削加工在减小切削力、减少材料损伤以及提高加工质量等方面具有良好的效果。本文以松花江天然河冰为研究对象,开展冰体细观结构观测分析,在ABAQUS中对冰体进行超声辅助切削单锯齿仿真分析,并通过验证实验对比检验超声与非超声辅助切削对冰体切削质量的影响。

1 松花江河冰细观结构观测

河冰的物理力学性能是其细观结构的外在表现,受不同地域的大气条件和水文因素的影响,河冰的晶体类型和尺寸及气泡分布规律大不相同,而冰晶体的类型尺寸和气泡分布等显著影响河冰的物理力学性能。为了掌握松花江河冰的结构分布和生长规律,有必要开展细晶结构观测。

实验所用的天然河冰材料均于2023年12月在松花江公路桥西侧沙滩部落(45°N,126°E)采出,毛冰尺寸约为1800 mm×800 mm×550 mm,如图1所示。

将取出的冰坯保留好生长厚度并使用油锯分割成尺寸约200 mm×200 mm×550 mm的冰柱,再通过切割机沿河冰生长方向分割成0~100 mm、100~200 mm、200~300 mm、300~400 mm、400~500 mm共5个深度区间层,如图2所示。

根据图3所示切片要求,从分层好的冰块表层分别切取制作水平切片,一个冰柱可制作6个水平切片,用于观测河冰晶体的水平剖面形貌和分析河冰晶体与内部气泡指标。取新的冰柱制作沿河冰生长方向的竖直切片,利用分层好的冰块正方形侧面,沿着河冰生长方向分别制作出5个



(a) 松花江采冰地点



(b) 开采出的毛冰

图1 松花江河冰开采

Fig.1 Ice mining in Songhua River



(a) 保留生长厚度的冰柱



(b) 按深度分割的冰柱

图2 河冰切割分层

Fig.2 River ice cutting and layering

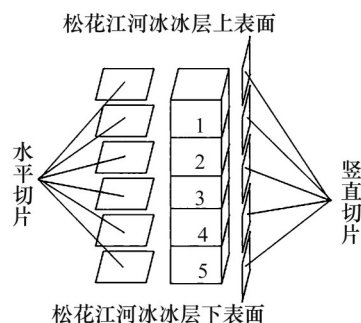


图3 河冰观测切片制作

Fig.3 Making river ice observation slices

不同深度处的竖直切片,用于观测河冰晶体的竖直剖面形貌和冻结发育过程。切取冰片尺寸为100 mm×100 mm×5 mm,使用角磨机、手持抛光机等将厚度尽量减小至1 mm左右,并贴合到载玻片上,抛光过程中保证冰片厚薄均匀、透光度优良。用便签标明冰切片的类型和取样位置,便于后续与观测结果对应。

如图4所示,费氏台偏光显微镜恒温观测系统是基于一冰晶体的双折射性以及光的偏振现象和干涉现象原理来观测晶体结构的一种仪器。使用费氏台偏光显微镜恒温观测系统,制冷约20 min,待观测箱内部温度稳定在设定温度时,从冰箱中取出制作合格的河冰切片迅速放入恒温箱中的显微镜载物台上,关闭观测箱,进行观测。使用显微镜自带的工业相机分别在正交偏光镜下以及自然光状态下对冰晶体图像进行拍摄、保存。

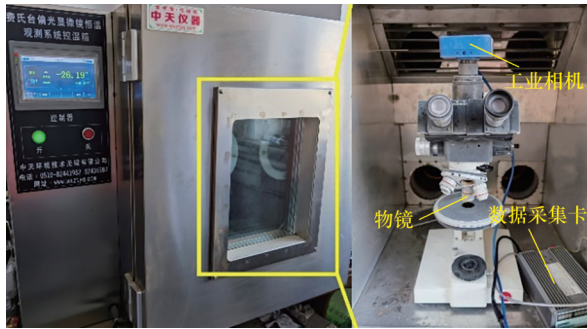


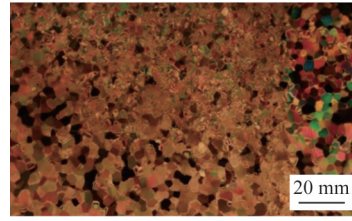
图4 河冰细观结构观测设备

Fig.4 Observation equipment for river ice microstructure

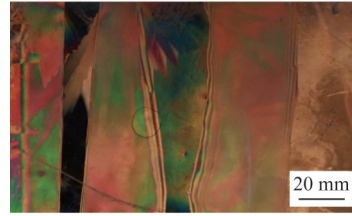
通过对冰切片进行观测,初步获得松花江河冰的晶体结构,结果如图5所示。如图5a和图5b所示,松花江河冰整体透光性良好,冰晶类型仅由粒状冰和柱状冰组成。天然河冰晶体即使在冰晶较为均匀的柱状冰区域也并非规则有序,容易出现图5b所示的柱状冰粗细不均、倾斜生长的现象,柱状冰的生长条件复杂,导致其形态并不均匀,各向异性显著。此外,在深度0~100 mm区间观测到由气温、气流、水文条件等因素影响形成的粒状冰与柱状冰的过渡区域(图5c)并伴随较多气泡(图5d)的情况。由此可见,天然河冰晶体结构总体上具有多元性、复杂性、各向异性。

图6和图7所示为观测河冰试样水平切片与竖直切片所得典型晶体结构。河冰晶体水平剖面上一般呈现不规则的泰森多边形(又叫 Voronoi 图),河冰的晶体粒径与深度成正相关,不同深度处冰晶形态差别很大。由图7可以看出,表层以粒状冰为主,厚度较小,约20~30 mm,在过渡区间往下深度处冰晶体呈柱状冰形态生长发育,但生长形态不均匀,随着深度增加,柱状冰的晶体直径增大,数量减少,这说明冰盖下水文条件引起的动力学使得冰晶体在生长中互相挤压,导致部分柱状冰在一定深度后停止生长。

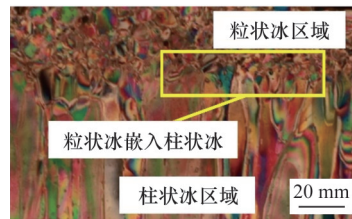
松花江河冰由粒状冰和柱状冰构成,冰晶结构均匀稳定。河冰生长原理为:在冬季河流开始结冰时,由于河水流速在靠近河岸处较慢,利于冰



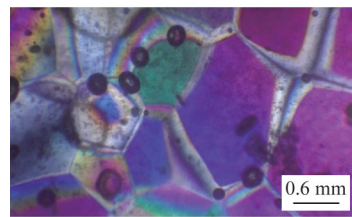
(a) 粒状冰结构



(b) 柱状冰结构



(c) 冰晶形态过渡区域



(d) 冰晶夹杂气泡

图5 河冰细观结构观测结果

Fig.5 Observation results of microscopic structure of river ice

晶体生长,因此河流封冻一般从两岸逐渐冻结延伸至中心,河流在表层冻结出整片冰盖后,河冰开始向下生长发育;冰盖表层的冰晶体由于直接与空气进行热交换,生长速度快,其C轴随机分布,生长的冰晶体多是粒状冰结构;当冰盖达到一定厚度时,新生冰晶体的热交换需要从下方河水经过上方已有的冰盖与空气进行,生长速度降低,同时受周围晶体的束缚影响,C轴方向一般沿松花江深度方向,呈柱状冰结构。松花江河冰由于其气温、水文稳定,形成的河冰结构连续,类型简单,不会出现多种冰晶体结构交错的情况,与典型的由雪冰、粒状冰、柱状冰、过渡冰、冰花冰交错出现的黄河河冰情况显著不同^[11]。

2 超声辅助切削有限元仿真及实验验证

2.1 河冰超声辅助切削有限元仿真

为了模拟超声振动的加入对河冰切削的影

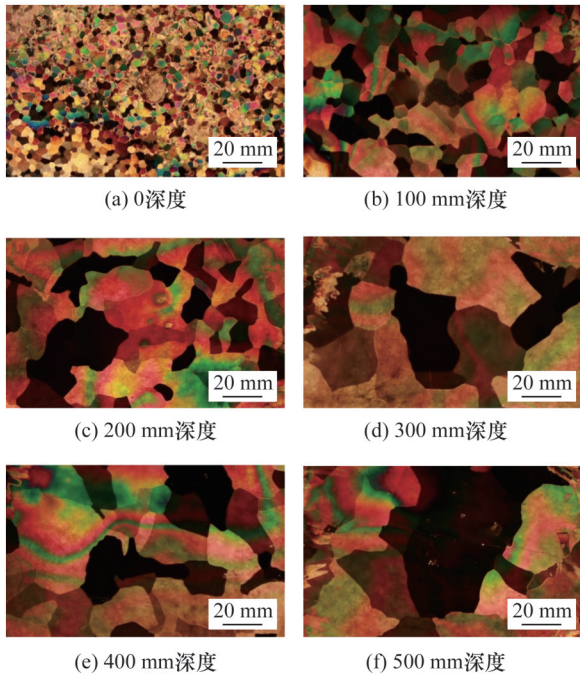


图6 河冰水平切片晶体结构

Fig.6 Crystal structure of river ice horizontal slices

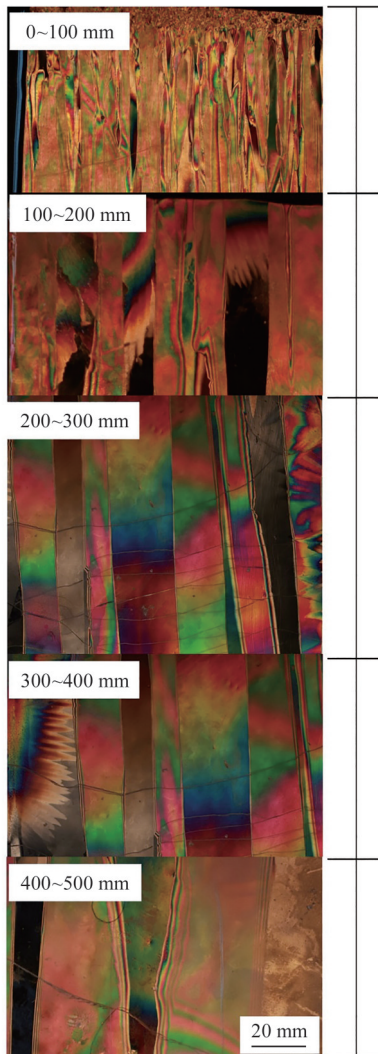


图7 河冰竖直切片晶体结构

Fig.7 Vertical slicing crystal structure of river ice

响,采用有限元仿真软件ABAQUS来还原河冰的切削破坏过程。依据前文中观测得到的河冰晶体结构,采用粘聚单元法建立对应的河冰有限元模型,还原河冰在切削破坏时受晶界的影响,并在后续实验中验证超声振动加入后对河冰的切削效果,即能否在提高进给速度的前提下有效缓解裂纹产生和冰体崩边的情况,减少废冰的产生。

图8为锯条切削运动图,锯条相对于切削工件做直线运动。其中, v_s 为锯条相对于切削工件的切削线速度, v_a 为工件的进给速度, v_c 为锯条切削过程中的合成速度。设置两锯齿间的距离为 D 。

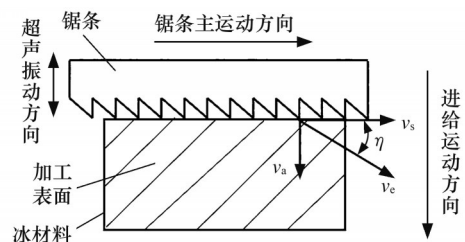


图8 河冰切削运动分解

Fig.8 Decomposition of river ice cutting motion

由于锯条的主运动速度 v_s 远大于进给方向运动的速度 v_a ,所以切削深度近似等于进给量,进给量跟两齿间距离有关,在有限元分析时可简化为单齿切削仿真,即转化为沿主运动方向的匀速直线运动。进给量 f (即单锯齿的切削厚度)的计算公式如下:

$$f = \frac{v_a D}{1000 v_s} \quad (1)$$

金属带锯条的基本参数有:锯条宽度 b 、锯条厚度 s 、前角 γ 、后角 α 、偏齿量 L 、分齿角度 V 、齿槽深 h 、齿距 d ,如图9a所示。在实际切削加工过程中,锯条中刀尖部分与冰体接触,起主要切削作用。根据相关研究,前角 γ 、后角 α 、偏齿量 L 、分齿角度 V 这4个参数对切削力影响显著,由于本文主要研究超声辅助切削的影响情况,因此对上述锯齿尖参数按照市面上常见的参数取值,避免多因素干扰仿真效果的准确度。同时在锯齿尖上选取4个参考点来提取切削力用于后续分析,避免单个参考点存在偶然性因素,锯齿参考点选取如图9b所示。

根据细观结构观测结果,冰晶体间存在不规则的晶界,而在实际加工中,裂纹和崩边都极易沿着晶界生长和扩展^[10],因此在有限元软件中应用粘聚单元法,其本质是在有限元之间插入一种零厚度(或厚度极小)的单元,被叫做粘聚单元。研

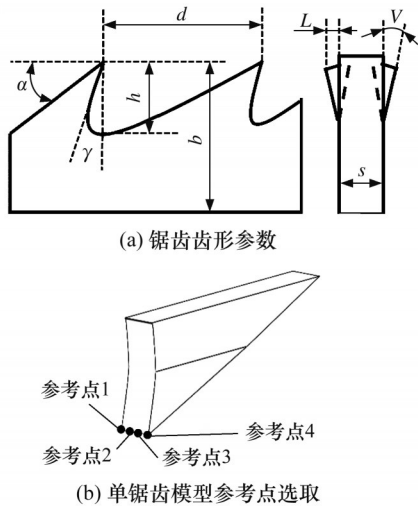


图9 锯齿各参数及建模

Fig.9 Sawtooth parameters and modeling diagram

究发现,在上表层区域的河冰在切割过程中更容易崩边和破损,同时考虑到粒状冰能够降低建模难度并提高计算效率,因此本文主要对粒状冰进行仿真分析。为了还原实际河冰晶体呈现的不规则性,采用Voronoi算法生成随机的三维Voronoi多面体来还原晶体C轴随机分布的粒状冰,建立松花江河冰的微观结构模型。同时,将河冰视为由冰晶体、冰晶界组成的复合材料进行后续有限元分析,并对应划分相应的网格,将锯齿与冰体按照要求装配,仿真过程如图10所示。之后根据冰体尺寸对其进行切削,在每个三维Voronoi多面体的界面插入cohesive单元,模拟细观观测实验所看到的冰晶体间存在的晶界。仿真参数设置如表1所示,其中,河冰晶体基体材料属性根据单轴

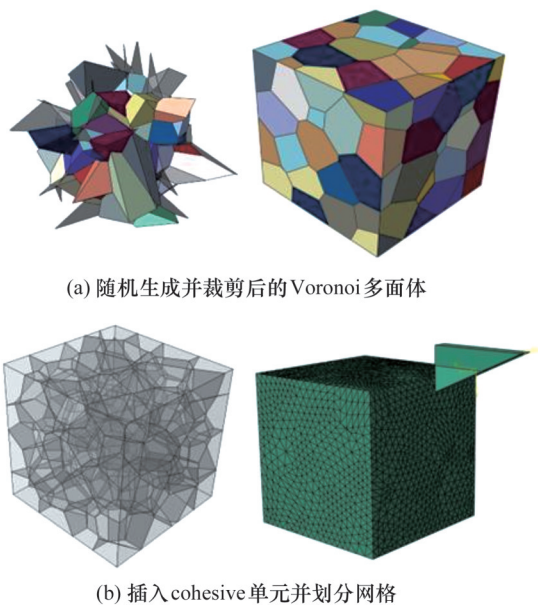


图10 河冰单锯齿切削仿真设置

Fig.10 Simulation settings for single sawtooth cutting of river ice

表1 仿真参数设置总表

Tab.1 Summary table of simulation parameter settings

项目名称	材料属性	数值
冰材料	密度	930 kg/m ³
	弹性模量	1 GPa
	泊松比	0.3
	压缩强度	2 MPa
	塑性应力	2.1 MPa
	塑性应变	0.15
粘聚单元	失效应变	0.12
	密度	930 kg/m ³
	弹性模量	1 GPa
	法向应力	1.04 MPa
单锯齿	断裂能	52 J
	密度	8100 kg/m ³
	弹性模量	225 GPa
	泊松比	0.33
	前角	10°
	后角	30°
	偏齿量	0.3 mm
	偏齿角	5°

压缩强度实验结合相关研究的数据,以-30℃时冰的力学特性^[17-18]为参考得到,粘聚单元的材料参数参考相关冰的实验研究数据取值^[19-20],单锯齿材料参数按照M42钢赋予,并根据使用的锯条规格规定其角度和偏齿量。

为了分析超声辅助对河冰材料切削力的影响,使用相同的切削参数,分别仿真模拟在添加超声振动和无超声振动情况下冰体材料的切削力,在超声辅助切削中,单锯齿上添加的超声振动频率为20 kHz,超声振幅为0.01 mm。其余加工参数设置如下:切削厚度为0.5 mm,切削时间为1.00 s,切削速度为1000 mm/s。装配好的切削仿真模型如图10b所示。

设置好对应参数后,启动仿真分析,待仿真结束后,分别无超声辅助切削和超声辅助切削的单锯齿上各选取4个参考点导出切削力曲线,结果如图11所示。

分别对4个参考点的切削力取平均值来代表该点处完整切削过程中的切削力情况,统计结果如图12所示。从图12中可以看出,冰材料在超声辅助切削下的切削力较非超声减小了约38%。且从切削力曲线中可以明显看出,超声辅助切削下切削力变化更均匀,不会像无超声辅助切削下出现明显波峰。波峰的产生推测是由于粘聚单元的加入,模拟了实际加工过程中冰晶界对切削力的影响,导致冰体并非是均匀连续材料,在锯齿切

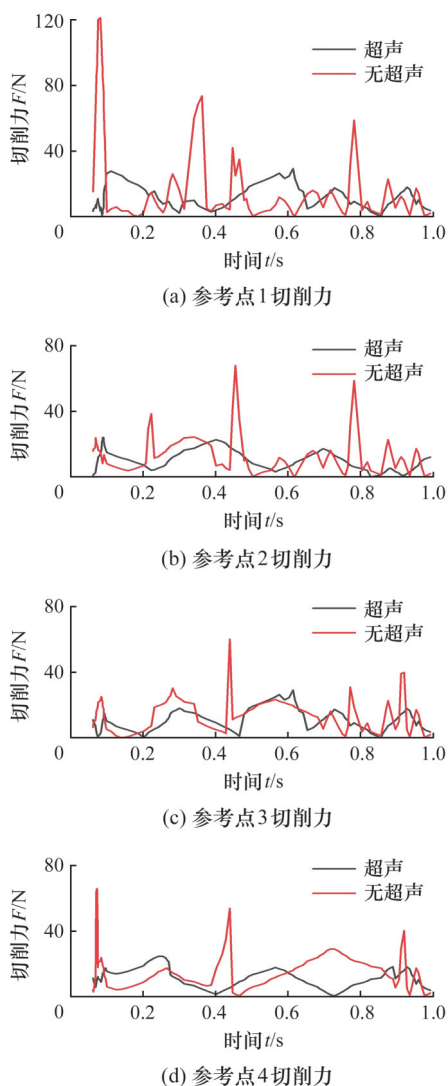


图 11 河冰有无超声辅助切削力对比

Fig.11 Comparison of ultrasonic assisted cutting force in river ice

削到交界处时切削力易发生突变。相较于普通切削时锯齿切过晶界导致切削力突变,超声辅助切削由于施加了微小振动,有助于减少锯齿与晶界的直接接触,同时能够帮助均匀分布切削力,减少了冰晶界处的应力集中和突变,从而使得切削力变化更加平稳。切削力的突变是导致冰材料在钻

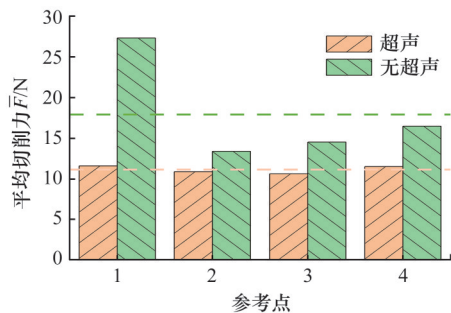


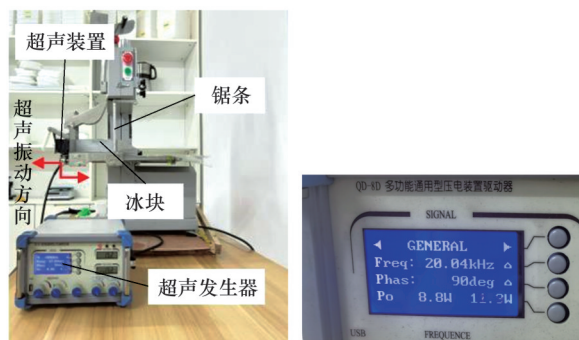
图 12 有无超声河冰平均切削力对比

Fig.12 Comparison of average cutting force of river ice with and without ultrasound

采和切削时产生裂纹和崩边的重要原因,超声辅助切削下切削力变化更加均匀,推测实际加工过程中冰体质量会得到显著提高。

2.2 超声辅助切削验证实验

在低温状态下研究超声辅助切削冰材料的目的是在提高冰材料加工效率的同时得到更好的表面质量,因此,需要在仿真分析的基础上,对比有无超声辅助切削对河冰加工质量和生产效率的影响。为了探究超声辅助切削对河冰加工质量的影响规律,设计单因素实验,探究锯条切削速度、河冰进给速度对河冰加工质量的影响。实验使用的重甲切削机附带超声装置,锯条转速恒定,三齿锯条长 1650 mm、宽 16 mm、厚 0.56 mm。实验开始前,使用控制精度在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的低温恒温箱将实验用冰在 -30°C 冷冻至少 48 h,确保冰块内外温度都达到设定温度再进行相关实验。实验装置如图 13 所示,实验参数如表 2 所示。



(a) 实验平台组成

(b) 超声发生器参数

图 13 验证实验平台

Fig.13 Verification experimental platform

表 2 验证实验参数

Tab.2 Verification experimental parameters

工艺参数	数值
锯条转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1450
进给速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	20,30,40,50,60
超声频率/kHz	20
超声振幅/mm	0.01

将冰块切削完成之后,对比有无超声辅助切削的河冰加工质量。随着进给速度的提高,无超声辅助切削后的河冰易出现加工缺陷,主要表现为河冰出口边缘崩边、河冰产生裂纹、河冰切削表面崩块等,且加工表面质量较差。无超声辅助切削河冰质量情况如图 14 所示。

超声辅助切削状态下,河冰加工质量明显提高,即使在较高进给速度下边缘质量也能得到保证,不易发生上述缺陷,且在整个验证实验过程中均未产生裂纹,超声辅助切削效果如图 15 所示。

为量化河冰的切削表面质量,对于不同进给

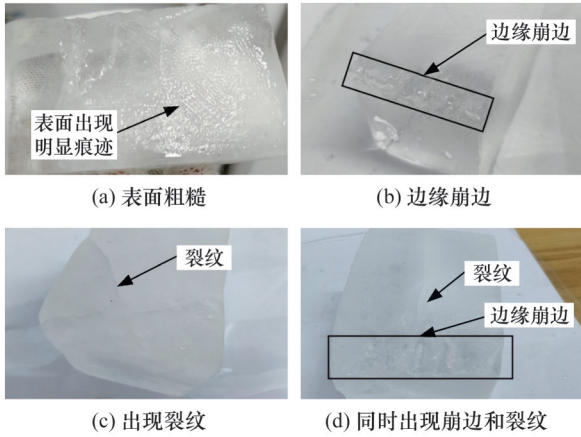


图 14 无超声辅助切削河冰质量
Fig.14 Assisted cutting of river ice quality without ultrasound

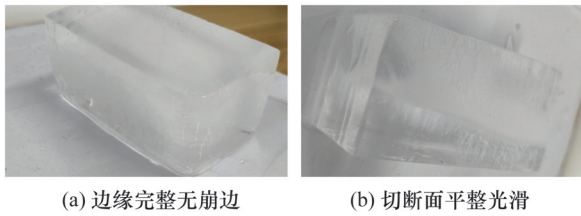


图 15 超声辅助切削河冰质量

Fig.15 Ultrasonic assisted cutting of river ice quality

速度条件下切削完成的河冰,采用游标卡尺测量每块河冰的边缘崩边长度和深度,并取平均值表示该块河冰的加工质量,同时,为了提高实验的准确性,在相同加工条件下重复3次实验并取平均值,结果如图 16 所示,反映了河冰边缘崩边长度

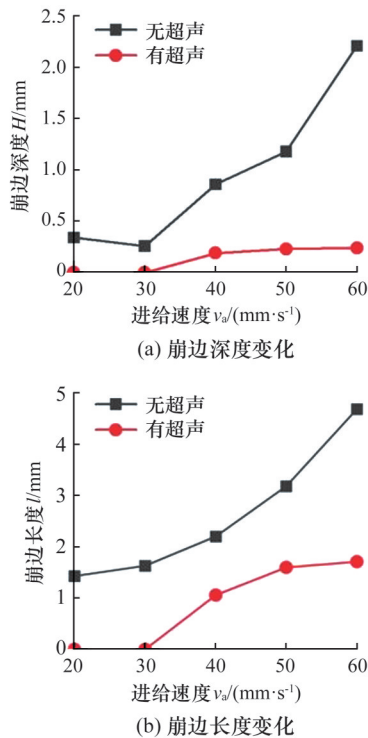


图 16 切削表面质量对比

Fig.16 Surface quality for river ice cutting

和深度随进给速度的变化趋势。

由图 16 可知,在锯条转速固定为 1450 r/min 时,随着进给速度的提高,无超声辅助切削情况下,崩边深度和崩边长度显著增大。这是由于进给速度提高会导致锯条法向切削力增大,当切削到冰晶晶界处时,晶界处易产生初始裂纹;同时,由于裂纹尖端在较大进给速度下未来得及钝化,裂纹扩展需要的应力小于成核应力,因此初始裂纹会沿解理面迅速发展,导致河冰发生脆性破坏出现崩边甚至产生较大裂纹,影响加工质量^[13]。

随着进给速度的提高,施加超声辅助切削的冰块表面质量稳定,变化幅度不大且崩边长度和崩边深度显著低于未施加超声辅助切削的冰块。这是由于超声辅助切削在冰块底部施加了垂直于锯条运动方向的超声振动,在切削河冰时,锯条能够周期性地与冰材料表面分离,属于间歇性切削,间歇性切削能缩短锯齿与晶界的接触时间,减少持续作用,抑制微裂纹沿晶界解理生长,且有利于冰屑的及时排出。

结合仿真分析和验证实验的结果来看,超声辅助切削能有效减小河冰切削过程中的平均切削力,也容易保持加工过程的稳定,河冰切削在施加超声辅助后切削表面的一致性较好,不易发生崩边、裂纹等加工缺陷。河冰加工受进给速度的影响较大,因此通过增大进给速度的方式提高产量的同时想要保证河冰的表面质量,加入超声辅助切削是一个可行的方案。

3 结论

1)松花江天然河冰晶体由粒状冰和柱状冰构成,冰晶体随生长厚度从粒状冰过渡为柱状冰。冰晶体之间存在明显的晶界,影响河冰切削加工时的表面质量。当进给速度提高时,晶界处易产生初始裂纹并沿着解理面迅速发展,导致出口崩边和裂纹等缺陷,影响河冰的生产效率和质量。

2)对于天然河冰的切削加工,仿真分析结果表明,施加超声振动后切削力在整个切削过程中更均匀,数值更稳定,切削力较无超声辅助切削减小约 38%。由于超声辅助切削是间断加工,故相较于普通切削方式,减少了锯齿在遇到冰晶体晶界处时切削力突变的情况,不易在切缝表面出现崩边、裂纹等加工缺陷,这在后续的验证实验中得到证实。

3)在冰块的实际生产中,超声辅助切削能在提高进给速度的同时保证加工质量、减少废冰,可

有效解决用冰需求较大的冰雪大世界营建过程中冰砌块生产效率与生产质量之间矛盾。超声辅助切削可为未来新型智能自动化标准冰砌块生产设备的研制提供技术支持,为冰建景观建筑材料制备技术革新提供参考。

参考文献:

- [1] 周姣. 黄河冰细观代表体尺寸定量分析及其力学性能数值模拟[D]. 郑州:郑州大学,2022.
ZHOU Jiao. Size Determination and Mechanical Properties Simulation of Representative Volume Element of Yellow River Ice[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.
- [2] PERVIER M A, PERVIER H, HAMMOND D W. Observation of Microstructures of Atmospheric Ice Using a New Replica Technique[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 140:54-57.
- [3] TALALAY P G. Exploration of Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica: Background and Plans for the Near Future[J]. Geography, Environment, Sustainability, 2014, 7(1):5-15.
- [4] NIZERY A. Electrothermic Rig for the Boring of Glaciers [J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 1951,32:66-72.
- [5] TALALAY P G. Subglacial Till and Bedrock Drilling [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86:142-166.
- [6] WANG Chunyang, XUE Yanzhou, WANG Chaoying, et al. Comparative Study of the ReaxFF and Potential Models with Density Functional Theory for Simulating Hexagonal Ice[J]. Computational Materials Science, 2020, 177:109546.
- [7] DIPRINZIO C L, WILEN L A, ALLEY R B, et al, Fabric and Texture at Siple Dome, Antarctica [J]. Journal of Glaciology, 2005, 51 (173):281-290.
- [8] 王国志, 黄文峰, 李志军, 等. 大庆红旗泡水库冰内部组构观测方法[J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(4):75-78.
WANG Guozhi, HUANG Wenfeng, LI Zhijun, et al. Observations on the Inner Structures of Hongqipao Reservoir Ice in Daqing[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2009, 36(4):75-78.
- [9] 王娟, 黄樾, 李志军, 等. 黄河内蒙古河段封冻期冰晶结构特征分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(6):41-45.
WANG Juan, HUANG Yue, LI Zhijun, et al. Analysis of Ice Crystal Structure Characteristics of the Yellow River in Inner Mongolia During Freezing Period[J]. Yellow River, 2021, 43(6):41-45.
- [10] 陈晓东, 王安良, 季顺迎. 海冰在单轴压缩下的脆-脆转化机理及破坏模式[J]. 中国科学:物理学、力学、天文学, 2018, 48:124601.
CHEN Xiaodong, WANG Anlang, JI Shunying. The Study on Brittle-ductile Transition Mechanism and Failure Mode of Sea Ice under Uniaxial Compression [J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 48:124601.
- [11] ZHENG Wen, ZHOU Ming, ZHOU Li. Influence of Process Parameters on Surface Topography in Ultrasonic Vibration-assisted End Grinding of SiCp/Al Composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91, 2347-2358.
- [12] 吴帮福, 丁文锋, 曹洋. 颗粒增强钛基复材轴向超声振动辅助磨削实验研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11):96-102.
WU Bangfu, DING Wenfeng, CAO Yang. Experimental Study on Axial Ultrasonic Vibration-assisted Grinding of Particle Reinforced Titanium Matrix Composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11):96-102.
- [13] LI Zheng, DING Wengfeng, et al. Grinding Performance and Surface Integrity of Particulate-reinforced Titanium Matrix Composites in Creep-feed Grinding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9):3917-3928.
- [14] 张俊杰, 刘英想, 胡王杰, 等. TC4钛合金纵弯超声振动铣削装置及其加工性能研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(8):14-21.
ZHANG Junjie, LIU Yingxiang, HU Wangjie, et al. Study on Longitudinal-bending Hybrid Ultrasonic Vibration Milling Device and Machining Performance of TC4 Titanium Alloy [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8):14-21.
- [15] 王福吉, 葛连恒, 胡晓杭, 等. CF/PEEK单向板纵-扭超声振动辅助铣削性能及工艺优化[J]. 复合材料学报, 2024, 8(17):1-14.
WANG Fuji, GE Lianheng, HU Xiaohang, et al. Longitudinal-torsional Ultrasonic Vibration-assisted Milling Performance and Process Optimization of CF/PEEK Unidirectional Plates [J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2024, 8(17):1-14.
- [16] 郭颖奎, 孟闻远. 冰的力学性能实验研究[J]. 华北水利水电大学学报:自然科学版, 2015, 36(3):40-43.
GUO Yinkui, MENG Wenyuan. Experimental Investigations on Mechanical Properties of Ice [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(3):40-43.