

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0145

LI Long, ZHOU Qin, ZHANG Kai, et al. Research progress on mechanical cutting fracture mechanism of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 638-649. [李龙, 周琴, 张凯, 等. 冻土机械切削破碎机理的研究进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 638-649.]

冻土机械切削破碎机理的研究进展

李 龙^{1,2}, 周 琴^{1,2}, 张 凯^{1,2}, 凌 雪^{1,2}, 张在兴^{1,2}, 李 耀^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 冻土开挖困难、破碎效率低是高寒地区工程建设、地基施工等面临的技术难题。冻土机械切削破碎是冻土开挖的主要方法, 其机理研究是提高冻土破碎效率的前提和基础。首先总结了温度、含水率、围压等对冻土复杂力学特性的影响, 进而调研分析了冻土机械切削破碎的典型切削力学模型, 发现冻土切削机械破碎模式不仅与冻土力学特性密切相关, 也与切削参数和刀具结构直接相关, 冻土切削过程中存在着最优的切削前角($30^{\circ}\sim 60^{\circ}$), 且深切削和浅切削时冻土内部受力方式存在差异也会导致破坏形式的不同; 温度、含水率、围压所造成的冻土力学性能变化会直接导致冻土破坏过程和切削破碎机理的改变, 冻土强度随着温度降低表现出先升高然后保持稳定的特性, 随着含水率升高呈现出先升高后降低的趋势, 冻土破碎存在脆性、塑脆过渡及塑性等不同破坏形式。通过系统总结冻土切削破碎机理研究进展, 进一步明确了冻土力学性质主要影响因素、变化特点及其切削破坏损伤特征, 为冻土机械切削破碎的切削参数和切削具结构优化提供了设计依据。

关键词: 冻土力学特性; 机械切削破碎; 切削模型; 破碎机理

中图分类号: P642.14; TG501.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0638-12

0 引言

随着西部大开发建设的蓬勃发展以及“一带一路”倡议的战略驱动, “十三五”规划重点项目的川藏铁路将会在保障国防安全、促进社会进步、带动沿线经济发展等方面具有重大战略意义。而在我国西部高寒地区这种特殊地域、特殊环境下进行道路地基建设、桥梁桩基施工时不可避免地要进行冻土开挖, 冻土破碎时由于冻土强度高, 破碎速度慢, 且破碎过程中温度、含水率、冻融变化使得冻土的力学特性更复杂、破碎难度更大, 极大地影响了冻土开挖效率和工程施工成本。

目前典型的冻土破碎方式有融化法、爆破法及机械法^[1-2]。融化法是利用加热原理降低冻土强度, 达到开挖目的的方法, 主要适用于出土量小、开挖深度浅的工程条件。爆破法是将炸药放入爆破孔中, 利用爆破瞬间能量崩破冻土的破碎方法, 适于

冻结层较厚的坚硬土层和场地宽阔的区域。机械法常见的有机械切削和机械冲击破坏, 机械冲击破坏在材料脆性越明显时破碎效率越高, 广泛应用于岩石破碎及煤矿开采, 而切削破碎相较于冲击破碎有更好的适应性, 而且国内外对于切削破碎机械、刀具的研究较少, 鉴于切削破碎在冻土施工的普遍性和典型性, 因此有必要对冻土机械切削破碎展开深入系统的研究^[1]。机械切削破碎岩土是刀具在直线或回转过程中对冻土切削破碎的方法, 可以同时完成破碎和挖土作业, 机械切削法地基稳定性好、工作效率高、适用范围广。因此机械切削法在高寒区域的冻土施工中得到广泛应用。

冻土机械切削破碎中由于冻土强度高、力学特性复杂, 存在破碎效率低、刀具磨损快、寿命短等问题。这主要是由对于切削破碎机理的认识不足引起的, 表现为三方面: (1) 冻土的力学特性受温度、

收稿日期: 2020-07-16; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672365); 国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(2018YFC0603405)资助

作者简介: 李龙, 硕士研究生, 主要从事冻土及岩石破碎机理研究. E-mail: 2297834281@qq.com

通信作者: 周琴, 副教授, 主要从事机械设计和工程图学研究. E-mail: zhqgt@cugb.edu.cn

含水率、围压等多因素的影响,造成其力学特性复杂,导致冻土切削破碎机理研究难度增大;(2)机械切削破碎过程中不同刀具结构和参数等对冻土的作用不同,破碎过程和破碎结果也存在明显差异,目前对这部分的研究还没有统一和深入的认识;(3)机械破碎的力载和工艺参数选择直接影响冻土的破碎过程和破碎效率,如何优化力载实现高效破碎仍是寒区工程建设急需解决的重要问题。

本文通过调研冻土的抗压强度、剪切强度和应力-应变特点等主要力学特性以及冻土切削力学模型研究进展,综述了主要机械切削参数和刀具结构对冻土破碎模式影响的研究现状,分析了影响冻土机械破碎机理的主要因素及典型破坏形式,总结冻土破碎机理的研究进展为冻土机械破碎的刀具结构设计和工艺参数优化提供参考。同时也指出,冻土的复杂特性大大增加了机械破碎机理的研究难度,因此进一步探索冻土力学特性对冻土破碎机理的影响及规律,为提高冻土破碎效率和延长刀具寿命提供依据,对寒区工程建设具有重要意义。

1 冻土的主要特性

冻土是指在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,由土体、液态水、黏塑性冰包裹体、孔隙气体组成的四相体^[3]。冻土受不同地域、自然条件等影响,在含冰量、冻土层厚度、稳定性等方面有强烈差异^[4]。青藏铁路施工段位冻土主要由多年冻土和季节性高温粗颗粒冻土组成^[5]。多年冻土区冻土的抗压强度、剪切强度等都比季节性高温冻土高,而高温冻土的应力-应变过程更复杂,这些力学特性的不同都使得研究冻土机械破碎过程更加复杂。受温度、含水量、围压的影响,冻土的抗压强度、剪切强度和应力-应变特点对冻土切削破碎的影响最为直接和显著。

1.1 抗压强度

抗压强度的大小直接反映土体的承载能力,土体稳定性的好坏,也决定机械破坏的难易程度。冻土抗压强度与温度、含水量、围压等因素相关。李洪升等通过试验探究了抗压强度与温度的关系,并发现冻土抗压强度随着温度线性变化^[6-9]。随着温度的降低,冻土强度增加,脆性越来越强,塑性及应变硬化性能减弱^[10-11],冻土中的冰含量对冻土的强度产生较大影响:冻土的强度首先随着含冰量的增大而增大,达到最大值后随着含冰量的继续增大,强度会出现降低的趋势,最后趋向冰的强度^[12-14]。

这是因为随着含冰量的增加,胶结的土颗粒和冰相互作用,共同受力,使冻土的强度增加;随着含冰量的持续增加,土颗粒变成冰包裹体,在抵抗变形中发挥的作用逐渐减小,导致土体的抗压强度呈现降低的趋势;随着含冰量继续增加,当土颗粒呈悬浮状态存在于冰中,冻土的抗压强度基本上就等于冰的抗压强度值,破碎变成完全脆性破坏。冻土的强度随加载速率的增加而增大,基本上呈指数关系变化^[15]。

围压也对冻土的抗压强度有较大影响,一方面会使土颗粒压密,增大颗粒之间的摩擦力,使强度增加;另一方面随着围压作用时间的增长,冻土中的冰被压融使含水率增加,或土颗粒被压碎,矿物颗粒细化和微裂隙的发育,使得冻土强度降低,变形增大。这些过程不是独立存在的,而是共同影响和作用,从而导致了冻土强度的弱化^[16-17]。在冻土机械破碎过程中,抗压强度越大,脆性破坏越明显,抗压强度较小时,冻土存在较大的塑性变形。如图1所示,含水量小于20%时,冻土在不同负温下的瞬时单轴抗压强度绝大多数随含水量增加而增加;当含水量超过20%以后,其瞬时单轴抗压强度随含水量增加呈下降趋势,不同的含水率及温度对冻土抗压强度影响很大。

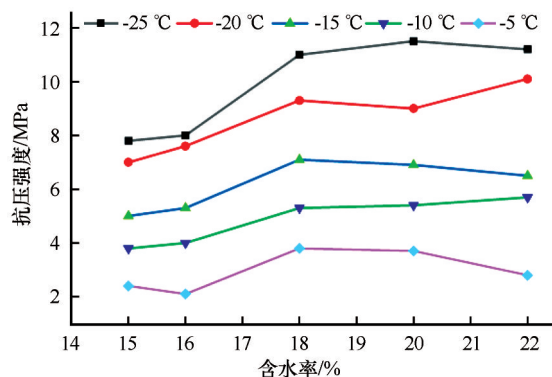


图1 不同温度下含水率对抗压强度的影响变化趋势
(根据文献[13]修改)

Fig. 1 Variation trend of moisture content under different temperatures under the influence of compressive strength (Modified from Ref. [13])

冻土的抗压强度与温度和含水率相关,抗压强度随温度的降低而增大,随含水率的增加先增加,到一定程度后随含水率增加而减小,说明冻土抗压强度随温度和含水率并不是线性变化,而是存在塑性与脆性的转化,不同的抗压强度会导致破碎形式的不同。

1.2 剪切强度

冻土的抗剪强度对冻土施工参数选择有着重要的指导意义。冻土抗剪强度的大小主要受黏聚力及内摩擦角影响,抗剪强度随着黏聚力及内摩擦角的增大而增大^[18]。国内外关于黏聚力和内摩擦角开展了很多研究。青藏冻土力学研究组对黏聚力做了试验研究^[19]:黏聚力与负温的关系可用指数方程描述。冻土黏聚力随着负温的降低先线性增加,温度降低到一定值以后不再变化,这种现象是由于温度的降低使得未冻水含量减少,土体与冰胶结作用增加引起。黏聚力随着含水量的增加而增加,然后随着含水量的继续增加而减小;黏聚力均随温度的降低有增大的趋势。内摩擦角随含水量的变化不大,随着温度的降低逐渐增大。土质不同,内摩擦角也表现出较大差异^[20-21]。围压对冻土的抗剪强度有明显影响,围压的增大明显增强了冻土的塑性,在一定围压范围内,冻土的抗剪强度随围压的增加而增加,呈明显的线性关系,当围压超过这一范围时,其抗剪强度随围压的增加而减小^[22-24]。冻土的剪切强度越大,机械破碎越困难,需要的剪切力也越大。

图2中剪切强度刚开始随着围压的增大缓慢增大,然后随围压继续增大而降低,这主要是由于冻土中的冰被压融或土颗粒被压碎,裂纹的发展,使得冻土剪切强度降低。而剪切强度随着温度的降

低明显增加,这是由于温度降低使得冰包裹体对冻土颗粒的连接力增大,剪切强度也增大。

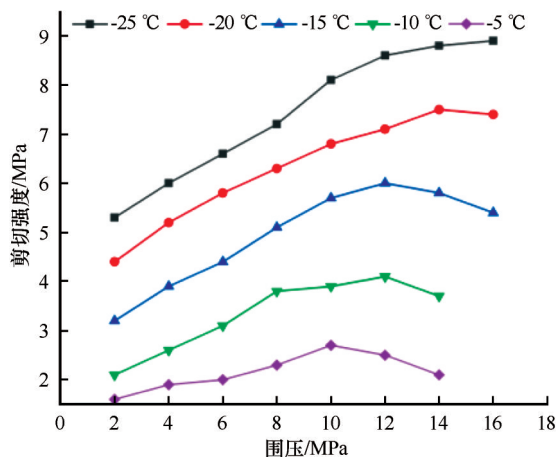


图2 不同温度下冻土的剪切强度随围压的变化趋势
(根据文献[25]修改)

Fig. 2 Variation trend of shear strength of frozen soil at different temperatures with confining pressures
(Modified from Ref. [25])

冻土的剪切强度与温度、含水率及围压相关,剪切强度随含水率的增加而减小,随温度的降低先增大,到一定程度后不再变化,这说明温度作用下土体的胶结状态达到上限,不会引起剪切强度的继续变化。随围压的增大先增大后减小,这是由于不同围压对冻土的塑性,以及内部裂纹的发展起作用引起的。

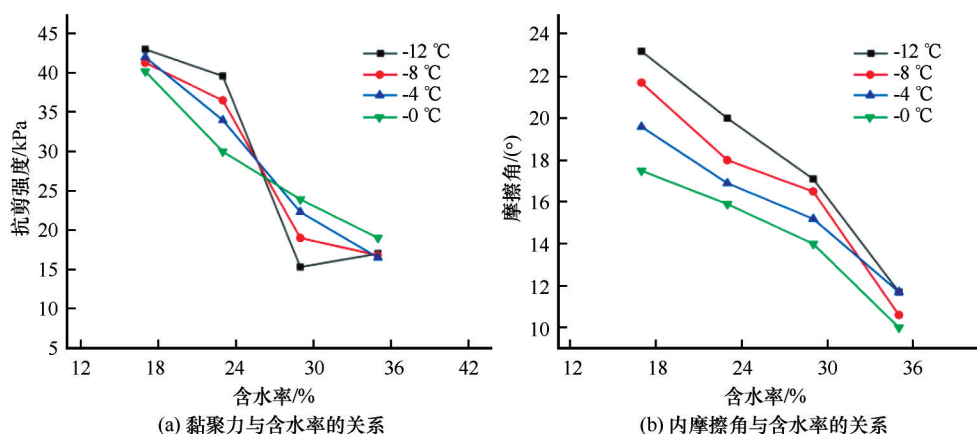


图3 不同温度下冻土的黏聚力(a)和内摩擦角(b)随含水率的变化(根据文献[26]修改)

Fig. 3 Change of cohesion and internal friction Angle of frozen soil with water content at different temperatures
(Modified from Ref. [26])

1.3 应力-应变

冻土的应力-应变曲线影响着冻土破碎过程中的弹性变形与塑性变形。当应变较小时,冻土原始

内部结构能够保持完整,其处于弹性变形阶段,应力与应变基本成线性关系;当应变大于一定值以后(应力达到峰值),冻土进入塑性阶段,其初始结构

被破坏,产生影响土体强度的持续性损伤^[27]。而且随着温度的降低越来越明显的呈现脆性特征,即温度越低,冻土的应变软化现象越明显。随着含水率的增加,相同应力状态下应变越大,冻土体间的位错就越大。

冻土的应力-应变关系主要受温度的影响。朱元林等学者通过大量实验发现冻土的应力-应变关系的复杂性,推翻了 Vialov 提出的用幂函数形式 $\sigma = A\epsilon^m$ 来描述所有的应力-应变关系的理论,得出冻土的应力-应变关系随着应变速率的增大呈现出由塑性-硬化-软化的变化趋势^[15,28-29]。国内学者对应力-应变随温度的关系展开试验,发现冻土的峰值应力随温度的降低而降低。然而在相同的应变率下不同温度冻土的应力-应变曲线具有汇聚的趋势^[30]。不同的应力-应变特性导致冻土机械破碎的塑性及脆性破碎过程。冻土的峰值应力随含水率降低而增加。随温度下降而降低^[31-32]。

如图4所示,随着温度的下降,冻土的峰值用力也降低,这主要是由于温度下降时冻土中的未冻水转换成冰,冰晶体体积的增大,将挤压土颗粒骨架,破坏效果相应的增大,损伤值也就增大,导致强度下降。随着含水率的增加,冻土的峰值应力下降,因为冻土的结构中随着水分的填充,水膜的楔入将直接破坏颗粒胶结作用强度,并使颗粒发生分解。水膜的进入相当于颗粒间填充了润滑剂,摩擦力接近零,致使结构性发生大幅度的下降,骨架颗粒间的胶结能力剧烈降低,含水率为14%和18%时,土体的破坏形式主要为脆性破坏,表现形式为拉裂并且呈现出突然性;含水率为22%时,土体强度到达峰值以后,强度下降速率较14%和18%明显要缓和很多,峰值对应的应变为低含水率应变的二倍左右;当含水率达到26%以后,应力-应变曲线近似于直线,表现为应变软化性,属塑性变形。

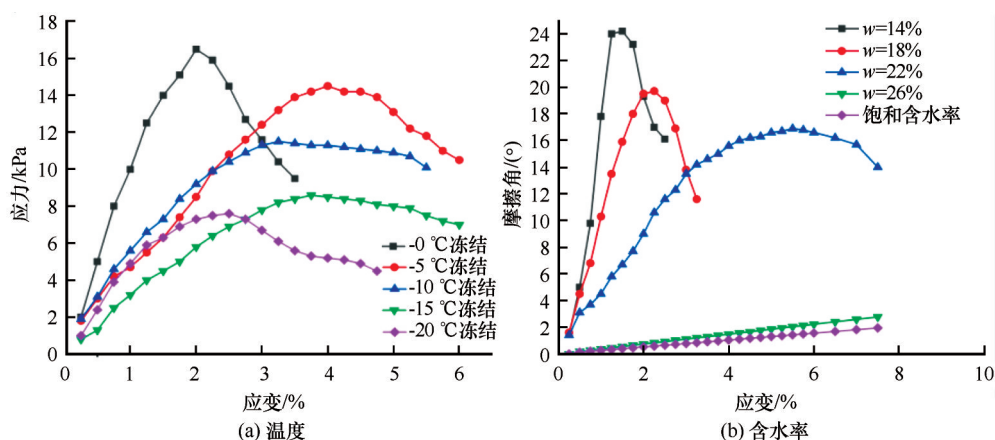


图4 冻土应力-应变随温度(a)与含水率(b)的变化关系(根据文献[33]修改)

Fig. 4 Relationship of stress and strain of frozen soil with temperature and water content (Modified from Ref. [33])

2 冻土切削力学模型与破碎模式

刀具与冻土的相互作用力学模型是冻土破碎的研究基础,不仅表达了冻土在刀具作用下的受力及力的分布特点,而且还反映了冻土的不同切削破碎模式^[15]。崔托维奇^[34]探究了冻土力学性质,切削阻力随切削深度和切削宽度的变化规律。学者尼卡尔斯和里德曾观察到宽切削齿在土壤中低速切削的过程,把形成小土块的过程解释为冻土由于剪切力反复失效的过程。Phukan等^[35]研究了温度从-3 °C至-14.5 °C时不同切削深度和刀具前角对切削力的影响。Evans^[36]通过对煤炭切削进行分析,得出拉剪破坏模型。煤炭岩石切削破坏过程中压实核、

裂隙,特别是层理、节理的失稳扩展对破碎过程起决定作用,而冻土在脆性状态下裂纹的产生、发展及脆性断裂与煤炭岩石切削具有相似性,由此冻土的切削力学模型通过煤炭岩石切削演化而来^[37-39]。余群、张召祥等学者将上述力学模型应用到冻土的切削破坏之中,并结合不同温度、含水量、围压、切削参数和刀具参数得出各因素对破坏模式的影响。冻土的三种力学模型如下:

(1)拉伸破坏力学模型如图5所示,冻土在切削力 F_c 侧面切入作用下,产生切削齿面作用力 F 及冻土土体间的拉力 F_t ,冻土内部产生拉应力 σ_t 沿着裂纹法线方向分布,当 σ_t 大于冻土的拉伸强度时由

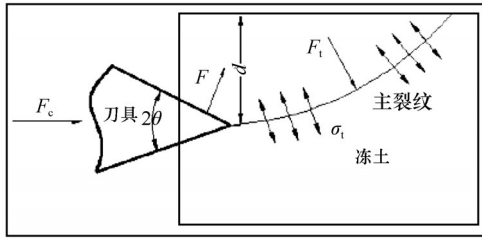


图5 拉伸破坏力学模型

Fig. 5 Mechanical model of tensile failure

于拉力 F_t 产生圆弧形裂纹。切屑在裂纹末端发生断裂,脱离土体。破坏形式是拉伸破坏,符合最大拉应力破坏模型。

根据力矩平衡和最低能耗原理得刀具的切削力(F_c)为:

$$F_c = \frac{2\sigma_t d \sin(\theta + \beta)}{1 - \sin(\theta + \beta)} \quad (1)$$

图5及式(1)中: F_t 为切削力; F 为合力; F_t 为冻土内部拉力; θ 为切削齿半刃角; β 为切削摩擦角; σ_t 为内部拉应力; d 为切削深度。由拉伸破坏力学模型可知,冻土的破坏过程主要受切削齿刃角以及切削深度的影响。刃角越小,越容易嵌入冻土,且产生的拉力更大,切削深度的不同也会影响切削过程能量的消耗。

拉伸破坏力学模型体现了冻土内部的应力分布与裂纹分布之间的相对关系,表现出了切削主力。而对于其他法向力,摩擦力等方面未做考虑,只对切削力进行分析,由力学模型可知此时的破坏模式主要以脆性破坏为主^[38],裂纹的产生与发展对破坏过程产生重要影响,刀具沿裂纹渐进式剥离冻土。而当冻土在发生脆性破坏时,冻土温度较低或含水率较高,冻土强度升高,抗压强度小于剪切强度。

(2)拉剪破坏力学模型如图6所示,切削力 F_0 沿水平和竖直方向产生分力 F_x 、 F_y ,其中 F_y 为竖直切削力,向下挤压冻土, F_x 为水平切削力,向前压实冻土,

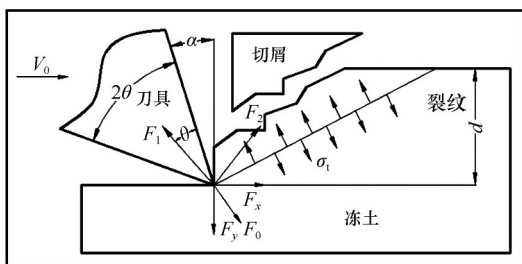


图6 拉剪破坏力学模型

Fig. 6 Mechanical model of tensile and shear failure

在冻土内部产生沿裂纹法向分布的拉应力,当刀具持续挤压冻土时,冻土内部拉应力大于冻土的抗拉强度,使得裂纹产生,在持续的挤压作用下,裂纹产生、扩展、贯通、产生切屑,同时冻土颗粒间存在位错变形现象,在这个过程中冻土发生拉剪破坏。

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 \sin(\theta + \alpha) + F_2 \cos(\theta + \alpha) \\ F_y &= F_1 \cos(\theta + \alpha) + F_2 \sin(\theta + \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

图6和式(2)中: F_0 为切削力; F_x 为水平切削力; F_y 为竖直切削力; F_1 为切入阻力; F_2 为拉伸阻力; α 为切削前角; V_0 为切削速度。由力学模型得知,冻土的受力状态主要由刀具前角 α 决定,随着刀具前角的增大,切屑增大,破碎比变小,破碎比功相应减小,需要破碎单位体积的冻土需要的能量也越小。从能量角度看,在一定程度上需要增加刀具前角。

拉剪破坏力学模型下冻土主要同时受脆性拉伸破坏和塑性挤压成核,塑脆过渡状态下的破坏模式,将裂纹简化为沿直线传播,不考虑复杂裂纹发展情况及裂纹沿能量最小路径破裂理论^[23]。引入了主切削力在切向及法向的分力,认为切削过程主要由刀具沿切向切削冻土,沿法向挤压冻土,并且形成压实区。拉剪破坏力学模型中较多的切削参数,对切削过程的研究较拉伸破坏更全面。

剪切破坏力学模型如图7所示,切削具较锋利,后刀面与冻土层的接触面小,因此后刀面的切削热忽略,研究单个刀具切削状态,把刀具与垫鞋看作整体,并且将回转切削简化为切削平面。前刀面受冻土作用力 F_{n1} ,刀具与切屑之间的摩擦力 F_{t1} ,垫鞋受的压力 F_{n2} 和与冻土的摩擦力 F_{t2} 。此时冻土体抵抗剪切破坏的极限能力小于冻土体受到荷载作用后产生的剪应力。在剪切面两侧的土体将产生相对位移而产生滑动破坏,这种滑动首先是从局部开始,随着荷载的继续增加土体中的剪应力达到抗剪强度的区域愈来愈大,最后各滑动面连成整体,土

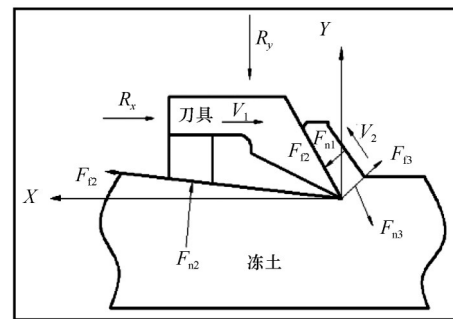


图7 剪切破坏力学模型

Fig. 7 Mechanical model of shear failure

体将发生整体剪切破坏而丧失稳定性,最后分离冻土体。这种模型下,冻土的强度低,主要受刀具的剪切力发生破碎,属于剪切破碎形式,符合摩尔库伦破坏模型。

根据力平衡列得 x 方向与 y 方向的合力分别为:

$$\begin{aligned} R_x &= F_{f1}\sin\alpha_0 + F_{N1}\cos\alpha_0 + F_{f2}\cos\gamma_0 - F_{N2}\sin\gamma_0 \\ R_y &= F_{f1}\cos\alpha_0 - F_{N1}\sin\alpha_0 + F_{f2}\sin\gamma_0 + F_{N2}\cos\gamma_0 \end{aligned} \quad (3)$$

图7及式(3)中: R_x 为水平方向合力; R_y 为水平方向合力; α_0 为刀具前角; γ_0 为后角; F_{f1} 为刀具与切屑之间的摩擦力; F_{N1} 为前刀面受冻土作用力; F_{N2} 为垫鞋受的力; F_{f2} 为垫鞋与冻土的摩擦力; V_1 为切削速度。由力学模型得知,冻土的受力状态主要由刀具前角、后角及刃角决定,不同的前角、后角会影响冻土受垂直挤压还是水平压缩的状态。刃角的不同导致了切入的难易,刃角越小,切入越容易。

剪切破坏力学模型下冻土以塑性状态的破坏模式为主。通过对后刀面的简化,忽略了右后刀面产生的摩擦力,引入了刀具刃角,刀具安装前角,对切削力进行了切向及法向分解,对刀具前刀面的受力状态进行了分析,得出切削分力与刃角和前角的关系。由于以剪切破坏为主,所以对裂纹的产生与发展及挤压破碎过程没有涉及。而当冻土发生塑性破坏时,温度较高或含水率较低,冻土强度降低,流塑性增强,剪切强度小于抗压强度。

通过对冻土机械破碎的典型切削力学模型和破坏模式的分析,发现冻土切削机械破碎模式不仅与冻土力学特性密切相关,同时也受切削参数和刀具结构的影响;由式(1)~(3)可以看出,冻土受力状态受切削参数、刀具参数以及冻土特性的影响。温度、含水率、围压所造成的冻土力学性能变化会导致冻土破坏过程和破碎机理的改变^[40],因此我们需要从切削参数、刀具参数以及冻土特性三个方面出发探究各因素对切削破坏机理的影响过程。

3 冻土破碎机理研究现状

冻土切削破碎力学模型表明冻土破碎主要受切削工艺参数和刀具结构及冻土特性等的综合影响,这些参数不仅影响冻土破碎过程,同时影响破碎模式。

3.1 切削参数的影响

切削参数对破碎过程的影响从下面几个方面展开:

(1) 切削深度对破碎过程的影响

在拉伸破坏、拉剪破坏、剪切破坏三种力学模

型中,都表明冻土的切削深度 d (图5~7)对破碎过程有较大的影响。冻土的切削过程可以描述为在刀具的刀刃及前刀面的推挤下,切屑被从小到大反复地被剥落的过程^[41~43]。图7中,刀具向前运动时,刀刃处的冻土被挤压,在挤压力不超过冻土的剪切应力时,在刀尖处形成压实核。未冻水被压入孔隙,密度变大,随着刀具继续移动,压实核被刀尖推动向前,未切削区域由于挤压作用产生裂纹,根据库伦-摩尔破坏准则,当剪应力大于黏聚力与内摩擦力之和时,冻土发生破坏。当切削深度小于钝角半径时($D_p < T_a$)刀具挤压土壤,使其屈服变形压力超过抗压强度时失效破坏。当切削深度大于钝角半径时($D_p > T_a$)由于冻土的剪切强度及抗拉强度远小于抗压强度,所以冻土被剪切或拉伸破坏。拉伸破坏、拉剪破坏中,由于不同切削深度对冻土的破坏形式不同,存在一个临界切削深度 D_0 , $D_p < D_0$ 时裂纹体已经与自由界面贯通,因而产生微裂纹作用下的细小切屑。 $D_p > D_0$ 时,裂纹体才能与自由界面贯通。研究表明:存在一个临界深度 D_0 ,破坏模式从塑性切削转变为脆性切削,塑性切削时切削力与切削深度成正比,脆性切削时切削力与切削深度成非线性关系^[44]。

从能量的角度来说,深切削比浅切削消耗更少的能量^[45~46],这可由切削比阻和比能耗定义得出:切削单位体积土体所消耗的能量,工程实际中应尽可能选用深切削。Phukan等^[35]在温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内探究了切削深度对切削力的影响。余群等^[41]学者认为,当进行浅切削时,切削深度小于刀具钝角半径,此时冻土主要受刀具的挤压变形,当挤压力超过冻土的挤压强度时,冻土失效破坏;深切削时,冻土主要受到切削力的剪切及撕裂破坏,这与Evans^[36]的观点一致。

(2) 切削速度对破碎过程的影响

切削速度对切削过程的影响表现为随着切削

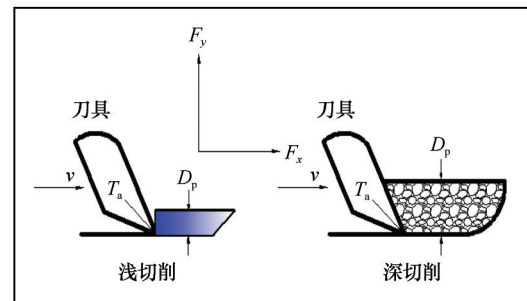


图8 不同切削深度下冻土破碎形式

Fig. 8 Broken forms of frozen soil at different cutting depths

速度的增大,切削力快速增大,当速度增大到一定后切削力增加变缓^[41,47-48]。切削过程中,不同的切削速度导致冻土变形快慢的不同,在高速切削下,由于刀具的挤压力,冻土来不及产生挤压应变,短时高压应力大于冻土的剪应力,冻土发生脆性破坏。在低切削速度下,冻土破坏由刀具前刀面及刀刃挤压先产生塑性变形,切削区域被压实,当切应力小于冻土的抗压强度时,冻土由塑性变形过渡到脆性破坏。余群等^[41]学者提出假设:在切削速度较低时,胶结冰在压力作用下产生弱化(冰体的挤压变形势能转换为热能,使得冰体强度降低)而在速度较高时,冰体来不及变形就被剪切、撕裂,此时的切削强度主要是冰体的强度。在选择切削速度时,应该考虑到高速和低速切削会导致切削机理的不同^[49],所以综合含水量的不同合理选择切削速度,含水量较高时高速切削,低含水量下采用低速切削。图9所示在30°、45°、60°三种切削前角下,随着切削速度的增大切削力先增大,后趋于平缓,而且在30°、45°、60°三种前角状态下,45°前角切削时切削力最小。

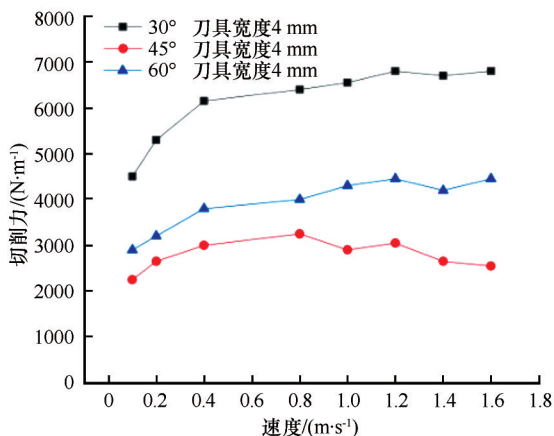


图9 切削速度对切削力的影响(根据文献[47]修改)

Fig. 9 Influence of cutting speed on cutting force
(Modified from Ref. [47])

3.2 刀具参数对破碎过程的影响

刀具参数对破碎过程的影响从刀具前角、刀具刃角、刀具形状几个方面展开:

(1) 刀具前角的影响

首先刀具前角不同,切屑形状不同,前角为15°时,产生的切削屑粒度很小,数量也比较少;当刀具前角为30°时,切削屑的大小和数量相应的增加;当刀具前角增加到45°时,切削屑多为大碎块,冻土破碎形式为块状破碎^[50-51]。随着刀具前角的增大,破

碎冻土碎块粒度增大、破碎比变小、破碎比功相应减小,需要破碎单位体积的冻土需要的能量也越小(图10)。因为,从能量角度来看,块状破碎产生新的表面积较小,所需要的能量较少,冻土块状破碎是有利的。这也说明应该在刀具设计时,在合理范围内增大刀具前角。对于不同的刀具前角,切削过程中在刀尖处的力可以分解为沿速度方向 F_1 的切削力和垂直于速度方向 F_2 的切削力[式(2)]。

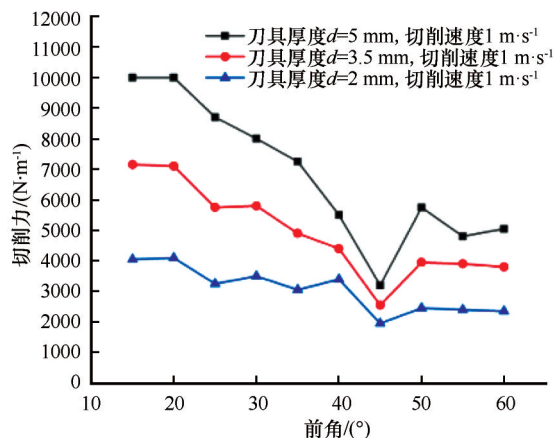


图10 切削具前角对切削力的影响(根据文献[47]修改)

Fig. 10 Influence of cutting tool rake on cutting force
(Modified from Ref. [47])

由拉剪破坏,剪切破坏力学模型分析可得,当切削前角较小时切削力的分力主要沿竖直方向压入冻土,随着前角增大,水平方向的分力增大,刀具沿切削方向挤压冻土的能力增强,使得冻土更易于剪切破碎。当切削前角继续增大时不同的切削前角下刀具的切削阻力也不同,存在一个最优的切削前角使得切削阻力最小,余群等^[45]通过试验得出刀具的最佳前角在30°~60°之间。

(2) 刀具刃角的影响

在拉伸破坏、拉剪破坏、剪切破坏三种力学模型中,破碎过程会受刀具刃角影响,刀具不同的刃角在对切削能力的大小也有不同,当切削脆性材料时,小刃角刀具易切入,刀尖处应力集中利于冻土的贯入和撕裂。当切削塑性材料时,刀具往往承受较大的压应力,此时增大刀具刃角有助于刀具强度的提高,提高刀具使用寿命^[50]。 $F_1 = F_2 = \frac{1}{d}F$,即刀具越尖锐,刀具宽度 d 越小,水平力 F_1 和 F_2 越大,切削分力也越大(图11)。

(3) 刀具齿型及分布的影响

不同的刀具齿型和分布形式对于切削效果也

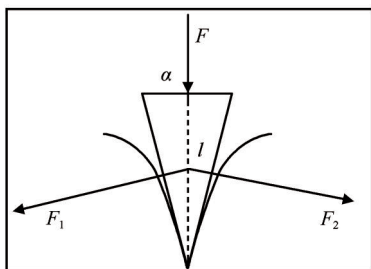


图 11 刀具刃角与切削力的关系

Fig. 11 Relationship between tool edge Angle and cutting force

不同,研究表明窄型刀具切削冻土相较于宽刀具存在自磨刃现象,能够提高机械效率、延长刀具寿命,而且不同的齿高分布对于切削效率也有影响,根据Timofeev等的研究,线性分布的切削齿以不同高度分布时切削效率最高,使得待切削表面的材料的破坏程度越大^[52-53]。结构形状在改变冰的破坏行为中起着重要的作用,这种行为上的变化最明显的是冰压碎负荷的大小。为了更全面地了解冰的影响,需要对冰的特性变化和冰荷载的大小进行更深入的研究,考虑不同的结构形状,形状对冰接触载荷的影

响对切削刀具的设计可能是很重要的^[53]。

3.3 冻土特性的影响

冻土的力学特性受地域条件、土质组成、形成环境等的影响明显,造成不同地区冻土力学特性的显著差异。冻土含水量较低时,冻土的抗剪强度及抗拉强度都较低,而且冻土的塑性变形能力较强,当温度较低时,冻土的抗压强度、抗剪强度都会随之增大。而且在切削过程中,冻土宏观破碎以土粒剥落为主。从微观来看,低含水量时,土中冰体较少、胶结力小且较为松散。当含水量增大时,冰晶体将土质胶结在一起,产生较大的内聚力,所以切削强度迅速增大。而当含水量达到极限时,刀具主要进行冰体切削,切削强度较之前降低。所以随含水量的增加,切削力先增大后减小。由此我们推测含水量较高时,切削过程接近于冰层切削,破坏方式主要以脆性破坏为主^[54-57]。围压的增大明显增强了冻土的塑性,在一定围压范围内,冻土的抗剪强度随围压的增加而增加,呈明显的线性关系,当围压超过这一范围时,其抗剪强度随围压增加而减小。破坏模式随温度、含水率、围压的变化如图12。

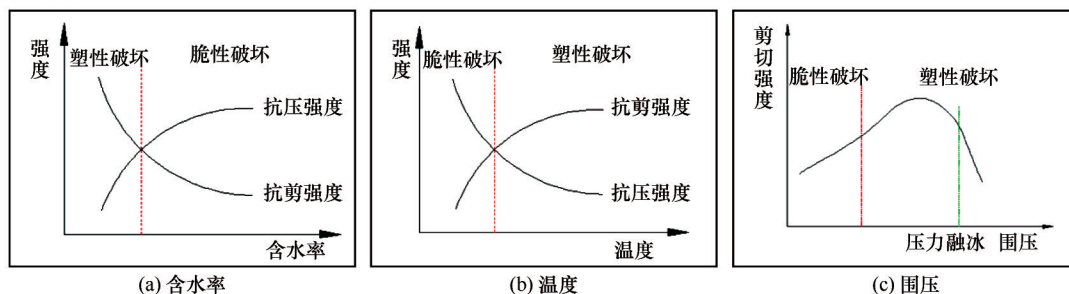


图 12 破碎模式随含水率(a)、温度(b)及围压(c)的变化

Fig. 12 Changes of crushing mode with water content, temperature and confining pressure

随含水率的增加抗压强度上升,抗剪强度下降,冻土的破坏模式由塑性破坏转变为脆性破坏。随着温度的上升,抗剪强度上升,抗压强度下降,冻土从脆性破坏转变为塑性破坏。随着围压的增加,冻土的抗剪强度先增加然后降低,这是由于围压的增加将冻土的结构破坏,而且围压上升到一定程度后会出现压力融冰现象,造成孔隙水流动,导致冻土从脆性破坏变为塑性压缩破坏。

破碎机理分析:冻土机械破碎模式与冻土的力学特性直接影响冻土机械破碎模式,不同的力学特性决定冻土破碎过程中的脆性,塑性及塑脆过渡的变形特点,使冻土内部的受力状态发生变化。随着切削参数的变化,在不同温度、含水率、切削速度,

切削深度及刀具参数的影响下,冻土的破碎方式会有所不同,其中主要包括冻土的塑性流动、脆性破坏、塑脆过渡方式。当拉压强度较高时,在受力过程中应力集中处形成压实核,进而挤压使裂纹产生,延展,最终冻土脆性断裂。当冻土剪切强度较高时,冻土流塑性高,受到剪切破坏。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)目前对冻土的力学模型认识主要有拉伸破坏、拉剪破坏、剪切破坏三种,不同力学模型表现了冻土切削破坏过程中受切削深度、切削速度、刀具参数的影响,而且反映了不同力学特性下的冻土脆

性破坏、脆塑过渡破坏、塑性破坏的破坏模式。

(2)切削破碎机理在冻土机械破碎过程中是非常重要的,不同切削参数、刀具参数、冻土特性都对破碎机理产生很大影响,破碎机理不仅揭示了冻土内部土体间的受力形式,变形过程,而且宏观力学行为对工程实际参数的选择,工艺制定具有指导意义。在一定程度上深切削比浅切削效率更高,切削前角存在一个优化范围,在这个范围内刀具有利于切削。

(3)冻土受温度、含水率、围压、地域条件等影响,有不同的抗压强度、剪切强度、应力-应变特性,因此其力学特性十分复杂,对我们研究冻土的破碎机理带来困难,冻土力学特性直接导致了冻土破碎过程中不同的破碎模式,对我们研究冻土破碎机理意义重大。

4.2 展望

(1)冻土复杂特性造成冻土切削力学模型及破碎机理的认识不足。冻土受不同温度、含水率、围压的影响导致其力学特性复杂,使破碎机理的研究难度增大。主要表现为冻土的力学特性和破碎模式受各个因素的影响关系认识比较模糊,一方面,近期Zhang等^[32]通过对一种微观力学模型的假设来描述冻土的非线性弹塑性行为。主要通过微观冰晶相互作用,胶结损失和破碎过程的微观模型建立来再现宏观力学行为,还引入了破碎比状态变量来描述土体在外加载荷作用下的损伤过程或裂纹扩展过程,希望对冻土的切削破碎机理有新的认识。另一方面,在工程实际中,在开挖前能否通过增加围压来减小冻土强度,从而影响内部裂纹的发展,破坏冻土强度,减小开挖难度方面研究较少。

(2)破碎机理的研究不足导致最直观的问题就是刀具磨损快、寿命短。这是由于刀具的结构、安装角度等方面也对冻土的破碎机理及破碎过程产生影响,而破碎机理认识不足使得刀具的结构、角度等方面的优化设计存在缺陷,导致刀具磨损快、寿命短。例如30°、45°、60°三种切削前角对比时45°前角切削的切削力最小的,且破碎粒度较大,却很少从理论方面给出解释,因此还需进一步找出理论依据来完善刀具参数的影响。另外需要与岩石切削作对比,考虑刀具与冻土体摩擦力大引起的刀具磨损的问题,以提高切削效率,减少刀具磨损,获取刀具最优化的结构和关联参数,从而为性能最佳的机械式切削破碎刀具设计提供科学依据。

(3)破碎机理认识不足使得刀具力载及其优化方面存在技术瓶颈,造成冻土破碎效率低。在冻土开挖过程中,切削速度、切削深度、刀具所受压力等施工参数对冻土破坏过程和破碎机理有重要影响。通过进一步对土体和刀具的力学分析研究,探索不同切削速度、切削深度、力载对切削效率的影响来优化工程设计中刀具的承载力和寿命,选取刀具最优切削参数,达到提高破碎效率,指导工程实际的目的。

参考文献(References):

- [1] Li Mengmeng, Niu Yonghong, Jiang Cong, et al. Recent progress of excavation and breaking methods for frozen soil[J]. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(2): 126-133. [李蒙蒙, 牛永红, 江聪, 等. 冻土开挖破碎方法研究现状与展望[J]. 力学与实践, 2016, 38(2): 126-133.]
- [2] Sun Jiantao, Li Bing, Wang Xiaolong. Analysis of permafrost excavation Technology[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2003, 30(3): 112. [孙剑涛, 李冰, 王晓龙. 浅析冻土开挖技术[J]. 黑龙江水利科技, 2003, 30(3): 112.]
- [3] Yin Xiaowen, Fu Qiang, Ma Kunlin. Study of the nonlinear mathematical model for triaxial creep of frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(1): 171-176. [尹晓文, 傅强, 马昆林. 冻土三轴蠕变非线性数学模型研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 171-176.]
- [4] Sun Liping. The construction of two-phase closed thermosyphon in Qinghai-Tibet Railway permafrost regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 39-44. [孙立平. 青藏铁路多年冻土区热棒的施工技术[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 39-44.]
- [5] Wei M, Guodong C, Qingbai W. Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 59(1): 3-11.
- [6] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi. The effect of length of specimen on the results in radial splitting test[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(4): 327-332. [沈忠言, 彭万巍, 刘永智. 径压法冻土抗拉强度测定中试样长度的影响[J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 327-332.]
- [7] Wu Ziwan, MaWei, Zhang Changqing, et al. Strength characteristics of frozen sandy soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(1): 15-20. [吴紫汪, 马巍, 张长庆, 等. 冻结砂土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 15-20.]
- [8] Shen Zhongyan, Peng Wanwei, Liu Yongzhi, et al. Preliminary research on axial method for determining tensile strength of frozen soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(1): 33-39. [沈忠言, 彭万巍, 刘永智, 等. 轴向压裂法测定冻土抗拉强度初步研究[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 33-39.]
- [9] Chen Youliang, Wang Peng, Wang Ming, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength of frozen clay in Shanghai[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2012, 33(2): 303-308. [陈有亮, 王鹏, 王明, 等. 上海冻结土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. 力学季刊, 2012, 33(2): 303-308.]
- [10] Ma Qinyong. Tensile strength, uniaxial compressive strength

- test on artificially frozen soil [J]. *Rock and Soil Mechanic*, 1996, 17(3): 76-81. [马芹永. 人工冻土单轴抗拉、抗压强度的试验研究[J]. *岩土力学*, 1996, 17(3): 76-81.]
- [11] Yu Haolin, Xu Xueyan, Dong Jianfeng, et al. Experimental study on uniaxial compressive strength in Mohe permafrost region [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2013, 35(1): 79-81. [于皓琳, 徐学燕, 董鉴峰, 等. 漠河多年冻土单轴抗压强度试验研究[J]. *黑龙江电力*, 2013, 35(1): 79-81.]
- [12] Xu X, Li Q, Lai Y, et al. Effect of moisture content on mechanical and damage behavior of frozen loess under triaxial condition along with different confining pressures [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 157: 110-118.
- [13] Li Jialing. Experimental analysis of uniaxial compressive strength of clay and basic geotechnical parameters [C]//2007 National Mining Construction Academic Conference: new progress in mine construction engineering. Xi'an: Xi'an Map Press, 2007: 255-258. [李嘉玲. 黏土单轴抗压强度与土工基本参数的试验分析[C]//矿山建设工程新进展——2007全国矿山建设学术会议文集. 西安: 西安地图出版社, 2007: 255-258.]
- [14] Zhao Jingfeng. An experimental study on the relationship between tensile strength and temperature and water ratio of frozen soil [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(6): 1158-1161. [赵景峰. 冻土抗拉强度与冻温及含水率关系的试验研究[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(6): 1158-1161.]
- [15] Zhu Yuanlin, Wu Ziwan, He Ping, et al. New progress and prospects of mechanical research on frozen soil mechanics of China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17 (Suppl 1): 6-14. [朱元林, 吴紫汪, 何平, 等. 我国冻土力学研究新进展及展望[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(增刊1): 6-14.]
- [16] Xu X, Dong Y, Fan C. Laboratory investigation on energy dissipation and damage characteristics of frozen loess during deformation process [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 109: 1-8.
- [17] Lei Lele, Xie Yanli, Wang Dayan, et al. Laboratory studies of frozen soil statics: recent progress and prospect [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(4): 802-811. [雷乐乐, 谢艳丽, 王大雁, 等. 冻土静力学室内试验研究进展[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(4): 802-811.]
- [18] Zhu Lei, Xie Qiang, Ren Xinhong, et al. Experimental study on shear strength of seasonal coarse-grained frozen soil along Sichuan-Tibet Railway [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2018, 40(3): 107-111. [朱磊, 谢强, 任新红, 等. 川藏线季节性粗颗粒冻土抗剪强度特性试验研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(3): 107-111.]
- [19] Research Group of Mechanics of Qinghai-Tibet Frozen Soil. Preliminary study on mechanical properties of frozen soil over Qinghai-Tibet Highway [C]// *Journal of Lanzhou Institute of Glacial-Permafrost Desert*, Chinese Academy of Sciences, 1976: 76-88. [青藏冻土力学研究组. 青藏公路冻土力学若干性质的初步研究[C]//中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所集刊, 1976: 76-88.]
- [20] Sun Huijing. Study on numerical regression model of shear strength of frozen soil with application to frozen ground engineering [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. [孙会敬. 冻土抗剪强度的数值回归模型研究及其在冻土工程中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.]
- [21] Dong Simeng, Zheng Haijun, Xu Qiang. Study on the effect of freezing on the shear strength of Chengdu clay [J]. *China Water Transport*, 2009, 9(4): 184-185. [董思萌, 郑海君, 许强. 冻结作用对成都黏土抗剪强度指标的影响研究[J]. *中国水运*, 2009, 9(4): 184-185.]
- [22] Ma Wei, Wu Ziwan, Zhang Lixin, et al. Mechanisms of strength weakening of frozen soils under high confining pressure [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(1): 27-32. [马巍, 吴紫汪, 张立新, 等. 高围压下冻土强度弱化的机理分析[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(1): 27-32.]
- [23] Chamberlain E, Groves C, Perham R. The mechanical behaviour of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions [J]. *Geotechnique*, 1972, 22(3): 469-483.
- [24] Liu Qinghe, Wang Yongtao, Xu Xiangtian, et al. Experimental study on shear characteristics of the interface between the frozen silty clay and the pipe foundation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 491-498. [刘庆贺, 王永涛, 徐湘田, 等. 冻结粉质黏土-桩基接触面剪切特性试验研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 491-498.]
- [25] Chen Xiangsheng. Experimental study on triaxial shear strength criterion of typical artificial frozen clay [J]. *Mine Construction Technology*, 1998, 19(4): 1-4. [陈湘生. 典型人工冻结黏土三轴剪切强度准则的试验研究[J]. *建井技术*, 1998, 19(4): 1-4.]
- [26] Wang Yongzhong, Liu Xiongjun, Ai Chuanjing, et al. Experimental investigation on shear strength parameters C and φ for a temporarily frozen soil in South China [J]. *Journal of Wuhan University (Engineering Science)*, 2010, 43(2): 198-202. [王永忠, 刘雄军, 艾传井, 等. 南方短时冻土抗剪强度指标 C 、 φ 值的试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2010, 43(2): 198-202.]
- [27] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao, et al. Study on resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(4): 418-421. [王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土抗变形特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(4): 418-421.]
- [28] Zhang Hong. Experimental research on mechanical characteristics of high-temperature frozen soils [J]. *Yellow River*, 2019, 41(8): 144-147. [张宏. 高温冻土力学特性试验研究[J]. *人民黄河*, 2019, 41(8): 144-147.]
- [29] Lai Yuanming, Yang Yugui, Chang Xiaoxiao, et al. Strength criterion and elastoplastic constitutive model of frozen silt in generalized plastic mechanics [J]. *International Journal of Plasticity*, 2010, 26(10): 1461-1484.
- [30] Wang Dayan, Ma Wei, Chang Xiaoxiao. Study on behavior of stress-strain for frozen soils subjected to K_0 consolidation by unloading triaxial shear tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(8): 1252-1256. [王大雁, 马巍, 常小晓. K_0 固结后卸载状态下冻土应力-应变特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(8): 1252-1256.]
- [31] Wang C, Li S, Zhang T, et al. Experimental study on mechanical characteristics and fracture patterns of unfrozen/freezing saturated coal and sandstone [J]. *Materials*, 2019, 12(6): 992.
- [32] Zhang D, Liu E, Yu D. A micromechanics-based elastoplastic constitutive model for frozen sands based on homogenization theory [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2020, 29(5): 689-714.
- [33] Wei Yao. Analysis of physical mechanics characteristics of high moisture content loess under the freeze-thaw condition [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. [魏尧. 冻融循环对高含水率黄土物理力学特性的影响分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.]
- [34] Tsytovich N A. The mechanics of frozen ground [M]. Zhang Changqing, Zhu Yuanlin, trans. Beijing: Science Press, 1985: 183-188. [崔托维奇 N A. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985: 183-188.]

- [35] Phukan A, Takasugi S. Excavation resistance of artification frozen soils[J]. Proceedings of 3rd International Symposium on Ground Freezing, USA, 1982: 35-39.
- [36] Evans I. The force required to cut coal with blunt wedges[C]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1965, 2(1): 1-12.
- [37] Niu Dongmin. Mechanical model of coal cutting[J]. Journal of Coal, 1994, 19(5): 526-530. [牛东民. 煤炭切削力学模型的研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(5): 526-530.]
- [38] Yu Qun, Zhang Zhaoxiang. Theoretical analysis on frozen soil cutting[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1994, 14(1): 105-110. [余群, 张召祥. 冻土切削理论分析[J]. 北京农业工程大学学报, 1994, 14(1): 105-110.]
- [39] Mi Bo. Experimental research and theoretical analysis of frozen soil cutting[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [米博. 冻土切削的试验研究及其理论分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [40] Zhao Xiaodong, Zhou Guoqing, Shang Xiangyu, et al. Deformation failure and energy properties for frozen soils with thermal gradients[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2350-2354. [赵晓东, 周国庆, 商翔宇, 等. 温度梯度冻土压缩变形破坏特征及能量规律[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2350-2354.]
- [41] Yu Qun, Zhang Zhaoxiang, Shen Zhenya, et al. Cutting mechanical properties of frozen soil[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1991, 11(3): 41-50. [余群, 张招祥, 沈震亚, 等. 冻土的切削力学特性[J]. 北京农业工程大学学报, 1991, 11(3): 41-50.]
- [42] Zhou Z, Ma W, Zhang S, et al. Damage evolution and recrystallization enhancement of frozen loess[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(8): 1131-1155.
- [43] Zhang Zhihong, Ma Qinyong, Guo Songlin. Theoretical analysis and characteristics of influence factors on drillability of frozen soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 259-262. [张志红, 马芹永, 郭松林. 冻土可钻性理论分析及影响因素探讨[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 259-262.]
- [44] Zhang Zaixing, Zhou Qin, Zhang Kai, et al. Analysis of the influence of rock cutting depth on the temperature distribution of cutter[J]. Journal of coal, 2019, 44(Suppl 2): 492-501. [张在兴, 周琴, 张凯, 等. 岩石切削深度对切削齿温度分布的影响分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊2): 492-501.]
- [45] Zhang Zhaoxiang, Yu Qun. An experimental and theoretical investigation on the cutting resistance of frozen soil, 1994, 16(2): 104-112. [张招祥, 余群. 冻土切削力学特性的试验和理论分析[J]. 冰川冻土, 1994, 16(2): 104-112.]
- [46] Zhang Hongchao, Kong Lulu, Li Tao, et al. SCE modeling and influencing trend analysis of cutting parameters[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(8): 1098-1104. [张洪潮, 孔露露, 李涛, 等. 切削比能模型的建立及参数影响分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(8): 1098-1104.]
- [47] Jiang Cong. Finite element simulation and analysis on hot-assisted cutting of frozen soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [江聪. 加热辅助冻土切削有限元模拟及分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [48] Liu Chunpeng. Thermal analysis and experimental study on ice core drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2014. [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.]
- [49] Herrnring H, Kubiczek J M, Ehlers S. The ice extrusion test: a novel test setup for the investigation of ice-structure interaction-results and validation [J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 15(1): 1-9.
- [50] Wang Qijia, Sun Wei, Liu Zhonghai. Force analysis and structure optimization of shearer pick-shaped cutter[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(4): 91-93. [王启佳, 孙维, 刘中海. 采煤机镐形截齿受力分析及结构优化[J]. 煤矿机械, 2012, 33(4): 91-93.]
- [51] Kim H, Colbourne B. A study of the effect of contact surface geometry and crushing rate on the behavior of the ice [J]. Ocean Engineering, 2016, 126: 240-253.
- [52] Li Mengmeng. Research on bucket structure optimization of impact excavator for frozen soil[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. [李蒙蒙. 冲击式冻土开挖机械斗齿结构优化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.]
- [53] Timofeev N G, Skryabin R M, Yakovlev B V. Enhancing efficiency of rock drilling tool in permafrost[J]. Journal of Mining Science, 2017, 53(6): 1065-1072.
- [54] Yang Cheng. Research on mechanical mechanism of permafrost cavern excavation[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. [杨成. 多年冻土区洞室开挖的力学机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.]
- [55] Kan X Y, Zhang A M, Yan J L, et al. Numerical investigation of ice breaking by a high-pressure bubble based on a coupled BEM-PD model[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 96: 103016.
- [56] Cui Honghuan, Wang Wentao, Yang Xingran, et al. Sensitivity analysis of the influencing factors on strength of silty clay in seasonally frozen regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 899-908. [崔宏环, 王文涛, 杨兴然, 等. 季节冻土区正融粉质黏土强度影响因素敏感性分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 899-908.]
- [57] Li Z, Hu F, Qi S, et al. Strain-softening failure mode after the post-peak as a unique mechanism of ruptures in a frozen soil-rock mixture[J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105725.

Research progress on mechanical cutting fracture mechanism of frozen soil

LI Long^{1,2}, ZHOU Qin^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, LING Xue^{1,2}, ZHANG Zaixing^{1,2}, LI Yao^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory on Deep Geological Drilling Technology of the Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The difficulty of permafrost excavation and low crushing efficiency are the technical problems faced by engineering construction and foundation construction in alpine region. Mechanical breakage of frozen soil is the main method of frozen soil excavation, and the research on the mechanism of frozen soil mechanical cutting and crushing is the prerequisite and basis for improving the efficiency of frozen soil crushing. In this paper, the influences of temperature, water content and confining pressure on the complex mechanical properties of permafrost are summarized. The typical cutting mechanical models of permafrost mechanical breakage are investigated and analyzed. It is found that the breaking mode of frozen soil cutting machine is not only closely related to the mechanical properties of frozen soil, is also directly related to the cutting parameters and tool structure. There is an optimal cutting rake angle ($30^{\circ}\sim 60^{\circ}$) during the cutting process of frozen soil, and the difference in the internal force mode of the frozen soil during deep cutting and shallow cutting will also cause different types of damage. Moreover, the mechanical properties of permafrost caused by temperature, moisture content and confining pressure will directly lead to the change of permafrost failure process and breaking mechanism, the strength of frozen soil will increase firstly and then remain stable as the temperature decreases. As the moisture content increases, it shows a trend of increasing firstly and then decreasing. Moreover, there are different failure forms such as brittleness, plastic brittle transition and plasticity. The research progress of permafrost fracture mechanism further clarifies the main influencing factors, variation characteristics and cutting damage characteristics of permafrost mechanical properties, which provides design basis for optimizing cutting parameters and cutting tool structure of permafrost mechanical fracture.

Key words: mechanical properties of frozen soil; mechanical cutting fracture; cutting model; fracture mechanism

(责任编辑: 马巍; 编辑: 周成林, 庞瑜)