

低压磨料空气射流切槽辅助 TBM 滚刀破岩规律

张宏图^{1,2}, 杨耀浦^{1,2}, 刘 勇^{1,2}, 魏建平^{1,2}, 李志平^{1,2}

(1. 河南理工大学 瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘 要: 全断面隧道掘进机 (TBM) 在矿井开采中应用逐渐推广, 坚硬围岩巷道与隧道施工过程中存在掘进困难、刀具损耗严重的问题, 如何实现高强度高磨蚀性地层安全掘进对于指导地下工程建设和能源开发等具有重要意义。为此, 提出低压磨料空气射流切槽辅助滚刀破硬岩技术思路。基于低压磨料空气射流辅助滚刀破岩综合实验平台, 研究不同切槽深度对滚刀破岩刀具受力和岩石破碎的影响。采用 PFC 数值分析不同切槽深度下刀具垂直载荷、裂纹扩展、比能耗和岩石应力场等变化规律, 进一步解释切槽辅助滚刀破岩过程中刀具受力减小原因。形成以下主要结论: 切槽底端是滚刀破岩过程应力集中区域, 主裂纹从滚刀与岩石作用位置到切槽底端扩展贯通, 当切槽深度大于 8 mm 后形成滚刀压痕处高、切槽底端低的“岩脊”状岩石破坏特征, 随着切槽深度增加, 岩脊高度逐渐变大。切槽后主裂纹与切槽边缘和岩石断面贯通, 呈现三角状岩石破碎体, 切槽深度越大, 岩石块状破碎体的体积越大, 同时滚刀最大垂直载荷越小, 数值模拟结果与相关实验结果具有一致性。低压磨料空气射流切槽为 20 mm 时, 滚刀最大垂直载荷为不切槽时的 68%。切槽过后滚刀破岩过程中刀具两侧岩石应力减小, 进一步使滚刀破岩过程刀具传递力的大小降低并朝着切槽底端传递, 切槽起到移除侧向约束的作用, 降低了刀具贯入的垂直载荷, 形成大块状的岩石破碎体, 从而减小破岩比能耗。

关键词: 滚刀破岩; 低压磨料空气射流; 辅助切槽; 破岩效率; 岩石应力场

中图分类号: TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)11-4429-12

Rock breaking law of TBM hob assisted by low pressure abrasive air jet grooving

ZHANG Hongtu^{1,2}, YANG Yaopu^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, WEI Jianping^{1,2}, LI Zhiping^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The application of full-face tunnel boring machine (TBM) in mine mining is gradually popularized. There are some problems in the construction of tunnels with hard surrounding rocks, such as difficulty in tunneling and serious tool loss. How to realize safe tunneling of high-strength and high-abrasion strata is of great significance for guiding underground engineering construction and energy development. Therefore, this paper puts forward a technical idea of low-pressure abrasive air jet grooving to assist hob to break hard rock. Based on the comprehensive experimental platform of low-pressure abrasive air jet assisted hob rock breaking, the effects of different cutting depths on the stress and rock breaking

收稿日期: 2023-06-25 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0770

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274192, 52374193); 河南省优秀青年科学基金资助项目 (232300421062)

作者简介: 张宏图 (1988—), 男, 河南驻马店人, 副教授, 博士。E-mail: zhanghongtu@hpu.edu.cn

通讯作者: 刘 勇 (1984—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士。E-mail: yoonliu@hpu.edu.cn

引用格式: 张宏图, 杨耀浦, 刘勇, 等. 低压磨料空气射流切槽辅助 TBM 滚刀破岩规律[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4429-4440.

ZHANG Hongtu, YANG Yaopu, LIU Yong, et al. Rock breaking law of TBM hob assisted by low pressure abrasive air jet grooving[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4429-4440.



移动阅读

of hob rock breaking tools are studied. The PFC is used to numerically analyze the variation laws of vertical load, crack propagation, specific energy consumption and rock stress field under different grooving depths. These can further explain the reasons for the reduction of cutter force during the rock breaking process of grooving auxiliary hob. The main conclusions are as follows: the bottom of the notch is the stress concentration area in the process of rock breaking by the hob, and the main crack extends from the position where the hob interacts with the rock to the bottom of the notch. When the notch depth is greater than 8 mm, the rock failure feature of “rock ridge” with high indentation of the hob and low bottom of the notch is formed. With the increase of the notch depth, the height of the rock ridge gradually increases. After grooving, the main crack runs through the grooving edge and rock section. It will present a triangular rock fragment, and the deeper the cutting depth, the larger the volume of the rock fragment and the smaller the maximum vertical load of the hob. The numerical simulation results are consistent with the related experimental results. When the notch of low-pressure abrasive air jet is 20 mm, the maximum vertical load of hob is 68% of that without notch. After grooving, the rock stress on both sides of the cutter is reduced during the rock breaking process of the hob, which further reduces the transmission force of the cutter during the rock breaking process of the hob and transmits it to the bottom of the grooving. The groove removes the lateral constraint and reduces the vertical load of the cutter penetration. Large rock fragments are formed to reduce the specific energy consumption of rock breaking.

Key words: hob breaking rock; low pressure abrasive air jet; auxiliary grooving; rock breaking efficiency; rock stress field

0 引 言

随着隧道和地下空间技术的快速发展,隧道掘进机(TBM)因其快速、安全、环保、高效等特点在岩石隧道掘进和矿井开采中扮演着越来越重要的作用^[1-2]。刀盘是TBM前端的关键结构,具有切削岩石、维持掘进工作面稳定等功能^[3],隧道掘进机主要依靠刀盘上的滚刀旋转推进将岩石断裂破碎。但是在掘进过程中,不可避免面临硬岩的情况,滚刀破硬岩将会导致滚刀磨损加快、隧道掘进机掘进困难等问题^[4]。滚刀磨损会直接影响施工效率,而开仓换刀耗费时间长,且容易引发开挖面失稳、隧道坍塌等工程事故^[5]。因此,如何提高滚刀的掘进能力和掘进效率已经引起了学术界的广泛关注。

滚刀下方岩石的围压是影响滚刀破岩效率的重要因素,压力越大,滚刀的法向力和掘进指数越大,岩体的可掘性越差,岩石越难破碎^[6]。破岩过程中滚刀正下方的岩石被挤压破碎为粉末状,形成连续的密实核区,围压起到了侧向约束的作用从而使密实核区岩石破坏产生裂纹时所需更大的应力。温森等^[7]针对不同侧压系数下TBM滚刀破岩过程分析,发现随着侧压系数的增大,对裂隙扩展抑制作用越明显,滚刀破岩所需要的力和破岩比能也随之增大。MA等^[8]认为随着围压的增大,裂纹倾向于向自由面发育。张旭辉等^[9]研究认为切槽形成临空面可以减小岩石的围压,临空面工况下的滚刀破岩载荷和破岩比能耗约较常规工况下显著降低。可见,减小滚刀下方岩石围压是

减小刀具受力、提高破岩效率的重要方法,而目前卸除围压的主要手段是利用高压水射流、磨料水射流和激光等在岩体上预先切槽。

韩伟锋^[10]进行了水射流辅助滚刀破岩试验研究,研究了刀盘推力、扭矩及破岩效能变化特性,并指出水射流等高能破岩能够有效地辅助隧道掘进机滚刀破岩,但是综合效能并不高。CHENG等^[11-12]进行了高压磨料水射流预制缝隙辅助TBM滚刀静态贯入试验,随着切槽深度的增加,滚刀平均峰值力显著降低,裂纹主要产生于切槽底端及以上的岩石区域。张魁等^[13]进行了激光辅助TBM滚刀压头侵岩缩尺试验研究,研究结果表明激光使岩石温度升高膨胀,出现破碎脱落形成裂缝,在激光辅助作用下,可促进岩石张拉裂纹的产生,减小滚刀受力。上述辅助破岩技术虽具备积极作用,但目前均存在能耗高、安全性差等问题,需要进一步降低能耗来提高工程适用性。采用低耗、高效的破岩切槽技术是能够有效推进辅助机械刀具破岩技术发展的关键方向。刘勇等^[14]进行了磨料空气射流破岩研究,相较于磨料水射流,磨料空气射流的能耗更低。磨料空气射流在2 MPa压力条件下经过合理的喷嘴加速后磨料速度能达到130 m/s,磨料的冲蚀能力强、安全性高,具备较好的切槽能力^[15]。不同切槽深度卸除岩石围压的能力不同,因此不同低压磨料空气射流切槽深度下滚刀破岩规律不同,因此仍需进一步探索有关低压磨料空气射流切槽辅助滚刀滚刀破岩机理,为低压磨料空气射流辅助破岩技术提供理论支撑。

为此, 笔者开展了低压磨料空气射流切槽辅助滚刀破岩实验研究, 分析了不同切槽深度对破岩效果和刀具受力的影响, 采用 PFC 研究了切槽深度对刀具垂直载荷、裂纹扩展、比能耗和岩石应力场等变化规律的影响, 揭示了低压磨料空气射流辅助滚刀破岩机理。

1 滚刀破岩实验

1.1 实验系统

低压磨料空气射流辅助滚刀破岩综合实验平台包括低压磨料空气射流切槽系统和滚刀破岩系统。低压磨料空气射流切槽系统设置在实验台前端, 主要

包括管路、喷嘴、滑轨电机 (移动速度 $0 \sim 500 \text{ mm/s}$), 部分管路连接室外空压机 (2.5 MPa , $11.3 \text{ m}^3/\text{min}$) 及磨料罐 (磨料质量流量 $0 \sim 256 \text{ g/s}$), 从而将磨料空气射流输送至喷嘴处加速喷射, 其中喷嘴采用矩形喷嘴结构, 喷嘴扩张段长度加长, 滑轨电机实现喷嘴线性移动切割。滚刀破岩系统设置在实验台后端, 对实验台前段低压磨料空气射流切槽过后的岩石进行滚刀破岩实验, 滚刀破岩系统包括滚刀 (17 寸盘形滚刀)、油缸 ($0 \sim 100 \text{ t}$)、三向力传感器 ($0 \sim 350 \text{ kN}$)、控制面板。系统通过控制面板控制滚刀进行滚动破岩, 压力传感器安装在滚刀上方, 可以精准读取滚刀破岩过程中受力变化, 实验装置如图 1 所示。

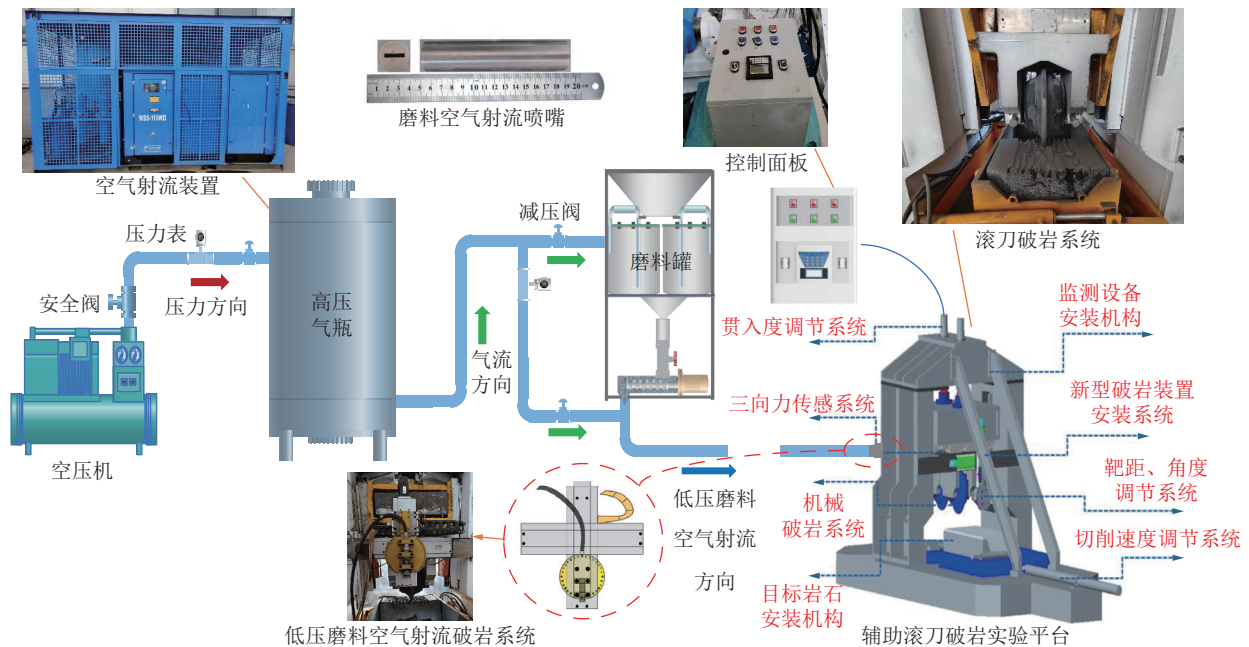


图 1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.2 实验方案

实验采用花岗岩岩样, 岩样尺寸为 $600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 其中花岗岩的抗压强度为 183 MPa , 抗拉强度为 18.7 MPa , 弹性模量为 42.3 GPa , 泊松比为 0.18 。结合工程实际情况, 在 TBM 掘进花岗岩工程中, 两滚刀的间距一般设置为 75 mm ^[16-17]。根据刘勇等^[18]的前期研究, 磨料空气射流系统选用直径 0.25 mm 石榴石, 靶距为 20 mm , 气体压力为 2.3 MPa , 磨料质量流量为 16 g/s , 冲蚀角度为 60° 。据此, 采用低压磨料空气射流预制间距为 75 mm 的切槽, 设置滚刀贯入度

为 6 mm , 然后在两槽中间进行滚刀破岩。为减小实验过程中因滚刀贯入度带来的误差, 因此先将一块石头从长边平均分成 3 段进行切槽实验, 通过改变喷嘴的移动速度来控制每段切槽深度分别为 0 、 4 、 8 、 12 、 16 、 20 mm , 重复切槽, 随后在有 2 条平行切槽的石头上进行滚刀破岩实验, 共在 2 块石头上共进行 4 组切槽实验和 2 组滚刀实验, 并记录单次滚刀破岩过程中刀具垂直载荷变化。其中喷嘴移动速度与切槽深度之间的关系见表 1, 低压磨料空气射流切槽辅助滚刀破岩如图 2 所示。

表 1 喷嘴移动速度与切槽深度关系

Table 1 Relationship between nozzle moving speed and grooving depth

喷嘴移动速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.007	0.012	0.018	0.035	0.100
切槽深度/mm	20	16	12	8	4

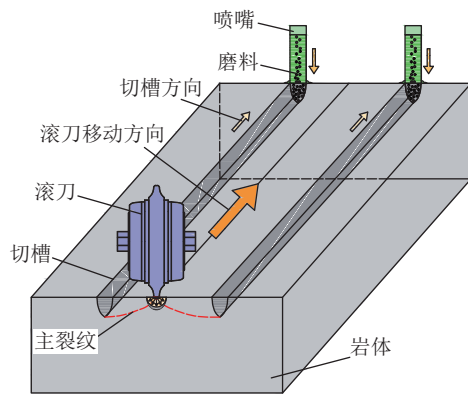


图2 低压磨料空气射流切槽辅助滚刀破岩示意

Fig.2 Low pressure abrasive air jet slotting assisted hob rock breaking diagram

1.3 实验结果分析

1.3.1 破坏形态

图3 为不同低压磨料空气射流切槽深度下滚刀破岩结果。裂纹扩展和破碎后形貌是反映破岩效果

和比能耗的关键因素。实验结果表明,切槽后裂纹扩展方向是由滚刀压痕区域朝着切槽边缘扩展贯通,切槽深度较浅(4 mm)时,裂纹无法全部贯通到两侧切槽,切槽深度较深(8、12、16、20 mm)时裂纹都朝着两侧切槽底端扩展。滚刀破岩过程中,位于滚刀正下方压痕处岩石破碎形态为片状岩石粉末,位于槽间的岩石破碎形态为块状岩石破碎体,岩石破碎形态呈现从滚刀下方作用位置到切槽底端三角形岩石破碎。随着切槽深度的增加,岩石块状破碎体的体积逐渐增大,当切槽深度达到8 mm后,滚刀压痕处呈现出“岩脊”形貌,且“岩脊”的高度随切槽深度增加增大。切槽使滚刀破岩过程中裂纹扩展方向发生明显变化,不切槽时裂纹主要在密实核周围生成,而切槽后裂纹可以扩展到切槽底端区域。切槽深度越大,破碎体的块状体积越大,而破碎体的体积越大对应滚刀破岩整体的能耗越小。因此,增加切槽深度能够形成更大的块状岩石破碎体,从而降低能耗,这正是工程实际所追

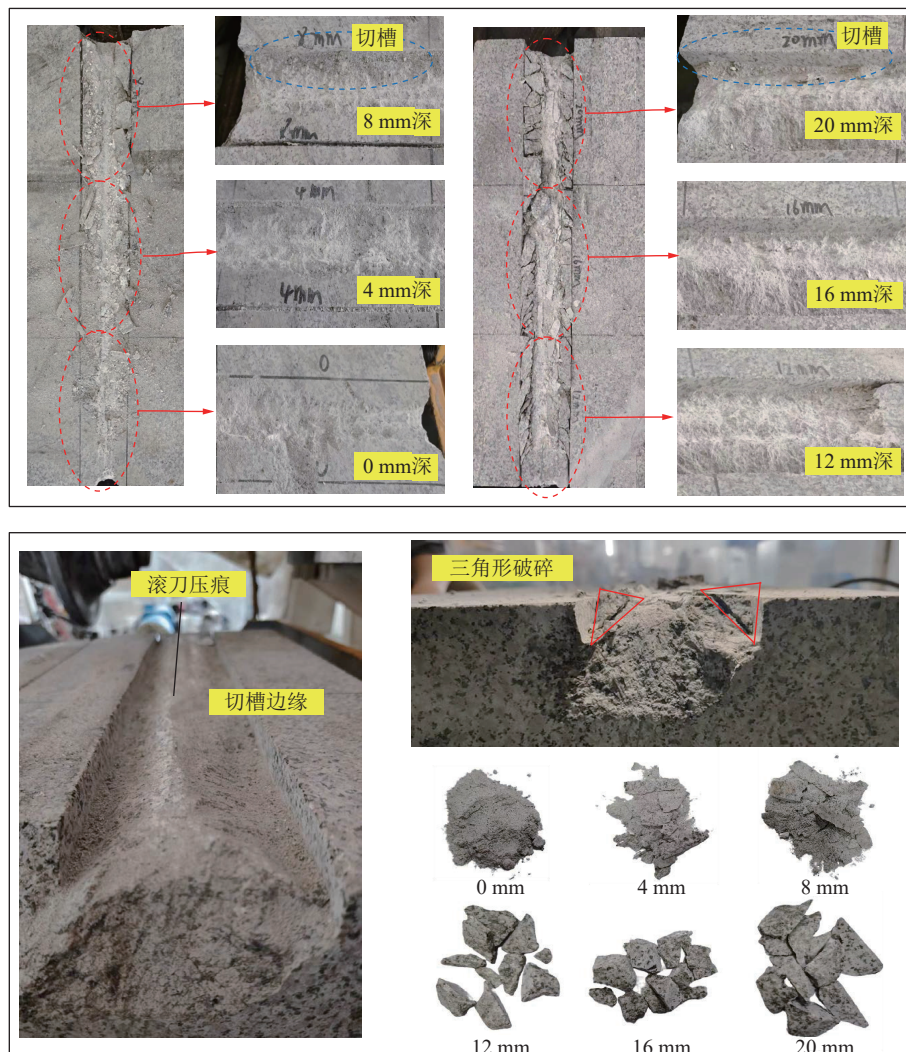


图3 不同低压磨料空气射流切槽深度下破坏形态

Fig.3 Failure pattern under different cutting depth of low pressure abrasive air jet

求的目标。

1.3.2 滚刀受力分析

对不同切槽深度条件下滚刀破岩受力进行监测, 如图 4 为不同切槽深度下滚刀最大垂直载荷。随着切槽深度的增加, 滚刀的最大垂直载荷不断降低, 当不切槽时滚刀最大垂直载荷为 249 kN, 当切槽深度为 20 mm 时, 滚刀最大垂直载荷为 169 kN, 约为不切槽的 68%。切槽移除了岩石侧向约束从而减小刀具受力, 切槽后改变了岩石应力场, 使滚刀破岩过程中裂纹扩展过程发生了改变, 切槽越深, 滚刀传递力的过程中更容易发生裂纹扩展, 因此受力越低。然而随着切槽深度的增加, 滚刀受力降低趋势不再显著, 在切槽深度为 0~12 mm, 滚刀最大垂直载荷减低 54.6 kN, 约为不切槽时的 22%; 在切槽深度为 12~20 mm, 滚刀的最大垂直载荷降低 25.301 kN, 约为不切槽时的 10%。可见低压磨料空气射流能够减小刀具受力从而提高刀具使用寿命, 但随着切槽深度的增大, 滚刀的最大垂直载荷虽然在不断增加, 但增加的速率开始降低。

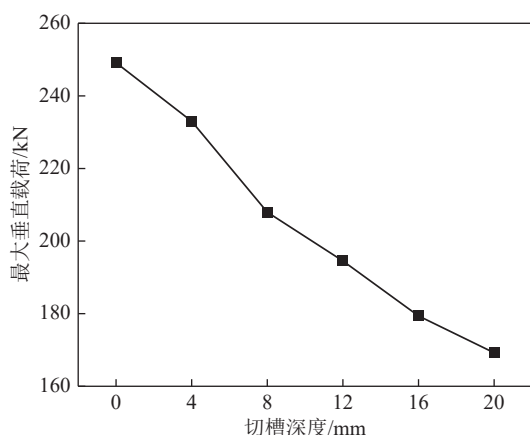


图 4 滚刀最大垂直载荷变化

Fig.4 Maximum vertical load variation of hob

2 切槽辅助滚刀数值模拟

2.1 数学模型

笔者基于 PFC 平台颗粒离散元模型进行分析, 选取平行黏结模型通过构建颗粒和墙体 2 种元素模拟出岩石模型的物理参数, 墙体主要构建模型结构并赋予岩石作用力, 颗粒通过胶结聚合在一起使其表现出一定的抗压和抗拉能力。当施加的局部应力超过黏结键的强度时, 这些键断裂形成一个微裂纹^[19]。平行黏结模型具备良好的剪切、张拉和抗扭转能力, 广泛应用于岩石颗粒接触模型^[20]。图 5 和图 6 分别为颗粒间接触刚度和平行黏结本构模型。

图 5、图 6 中, K^n 、 K^s 为颗粒的法向、切向接触刚

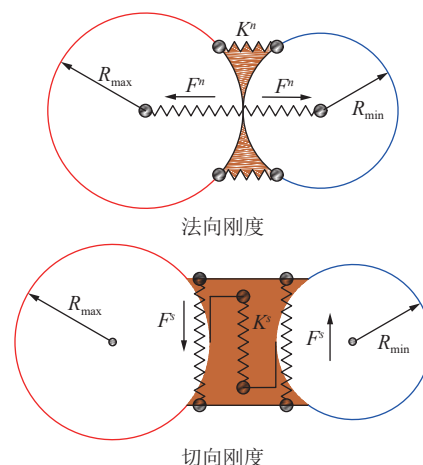


图 5 颗粒间接触刚度

Fig.5 Contact stiffness between particles

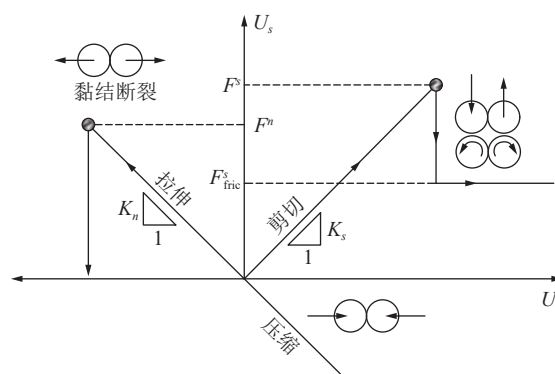


图 6 平行黏结本构模型

Fig.6 Parallel bond constitutive model

度; $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 为最大、最小颗粒半径; F^n 、 F^s 为颗粒之间的法向、切向接触力; K_n 、 K_s 为法向、切向平行黏结强度; F^s_{fric} 为切向摩擦因数; U_n 、 U_s 为颗粒法向、切向叠合量。

2.2 参数标定

使用颗粒流软件模拟时需要通过标定参数建立岩石宏观力学属性与模型细观参数之间的联系。对实验选取花岗岩试样进行基础力学测试。根据岩石试样的宏观力学参数对滚刀破岩模型进行细观参数标定, 选取合适的颗粒、接触等参数, 使建立的岩石模型与实验所用岩石的宏观力学特性基本吻合。具体的参数设定见表 2。

岩石模型尺寸为 0.4 m×0.16 m, 共 16 204 个颗粒。对所建立的岩石模型进行力学分析, 采用单轴压缩等测出岩石模型的基本力学参数见表 3。图 7 为岩石试样与岩石模型的对比情况, 实验和模拟的岩石力学性能及破坏模式差异较小, 确保岩石模型的可信度。

2.3 模拟方案

为分析不同切槽条件下的滚刀破岩情况, 固定切槽间距, 分别设置切槽深度为 0、4、8、12、16、20 mm,

表 2 岩石及滚刀模型参数
Table 2 Rock and hob model parameters

孔隙率	岩石模型									滚刀模型			
	颗粒半径/mm	阻尼系数	颗粒等效模量/GPa	岩石围压/MPa	平行黏结有效模量/GPa	黏结键刚度比	摩擦因数	法向黏结强度/MPa	切向黏结强度/MPa	滚刀底部宽度/mm	过度圆弧半径/mm	滚刀总高度/mm	滚刀贯入深度/mm
0.08	0.800~1.328	0.7	10	6	53.15	1.1	0.5	298	166	6	8	50	6

表 3 岩石力学参数
Table 3 Rock mechanics parameters

项目	天然密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
岩石试样	2 780	183	18.7	42.3	0.180
岩石模型	2 800	185	17.3	43.0	0.179

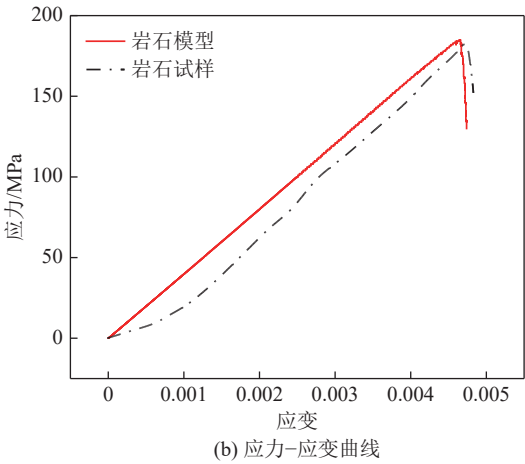
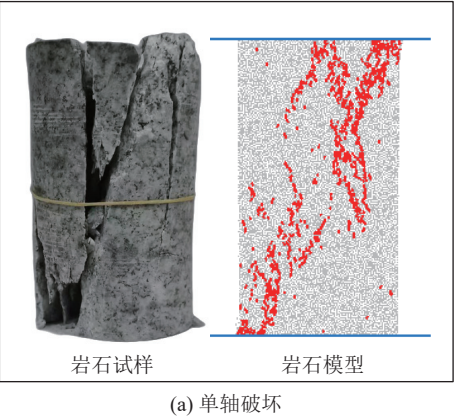


图 7 岩石试样与岩石模型对比

Fig.7 Comparison between rock samples and rock models

分析不同切槽深度下裂纹扩展趋势、滚刀载荷和破岩比能耗的变化规律。

2.4 数值模拟结果与分析

2.4.1 裂纹扩展特征

图 8 为不同切槽深度下裂纹扩展及岩石破碎区域。图中可以看出岩石裂纹主要从滚刀下方朝着切槽的底部扩展,最终贯通至切槽边缘,切槽使两滚刀间裂纹互相交会破岩变化为滚刀与切槽边缘裂纹贯

通破岩。切槽改变了岩石应力场,使滚刀传递力发生改变,切槽底端成为破岩过程岩石应力集中的位置,主裂纹的生成方向朝着切槽底端方向扩展,从而形成主裂纹与切槽边缘和岩石断面三角形破碎体,随着切槽深度的增加,裂纹始终朝着切槽底端扩展,岩石破碎体的块状体积变大。切槽深度大于 8 mm 后,破坏后的岩石呈现出岩脊形貌。切槽后滚刀下方密实核被部分移除,切槽深度越深,密实核的作用范围就越小,且随着切槽深度增加,主裂纹长度也逐渐增大,因此随着切槽深度的增加岩脊的高度逐渐增加。

切槽减弱了滚刀下方岩石围压,从而使滚刀侵入岩石时受力显著降低,不同切槽深度导致降低岩石围压程度不同,因此在不同切槽位置滚刀破岩时的受力有所不同。不同切槽深度下单滚刀受力情况如图 9 所示。可以看到,随着切槽深度增加,滚刀的受力逐渐变小。滚刀开始作用岩石时,岩石尚未发生破碎,此时滚刀受力较小,随着岩石逐渐变形,滚刀受力变大,在滚刀的垂直载荷达到峰值时,岩石出现跃进式破碎,滚刀载荷会迅速降低。之后随着滚刀侵入岩石,岩石破碎产物体积的增加和破碎产物之间的相互挤压碰撞导致滚刀载荷出现较小波动。

受滚刀材料强度和滚刀结构限制,一般来说,滚刀所受最大垂直载荷是决定滚刀破坏的主要因素^[21]。图 10 为不同切槽深度条件下滚刀破岩的最大垂直载荷变化情况,随切槽深度的增加,滚刀的垂直载荷出现下降的趋势。其中 20 mm 切槽条件下滚刀受力较小,最大受力为 330 kN。当切槽深度从 0 增加到 12 mm 时,滚刀的最大垂直载荷减小 217.5 kN;当切槽深度从 12 mm 增加到 20 mm 时,滚刀的最大垂直载荷减小 52 kN。表 4 为不同切槽深度岩石破碎面积。

破岩比能耗是反应刀具破岩效率的重要指标之一,鉴于本文滚刀只考虑二维破岩滚刀贯入岩石过程, L_x 为 0,只有滚刀的垂直载荷贯入岩石做功,因此滚刀破岩的比能耗的计算公式为

$$S_E = \frac{F_y L_y + F_x L_x}{V} = \frac{F_y L_y}{V} \quad (1)$$

式中: S_E 为破岩比能耗; F_y 为垂直载荷; L_y 为滚刀贯入深度; F_x 为水平载荷; L_x 为滚刀水平位移; V 为破碎岩石的面积。

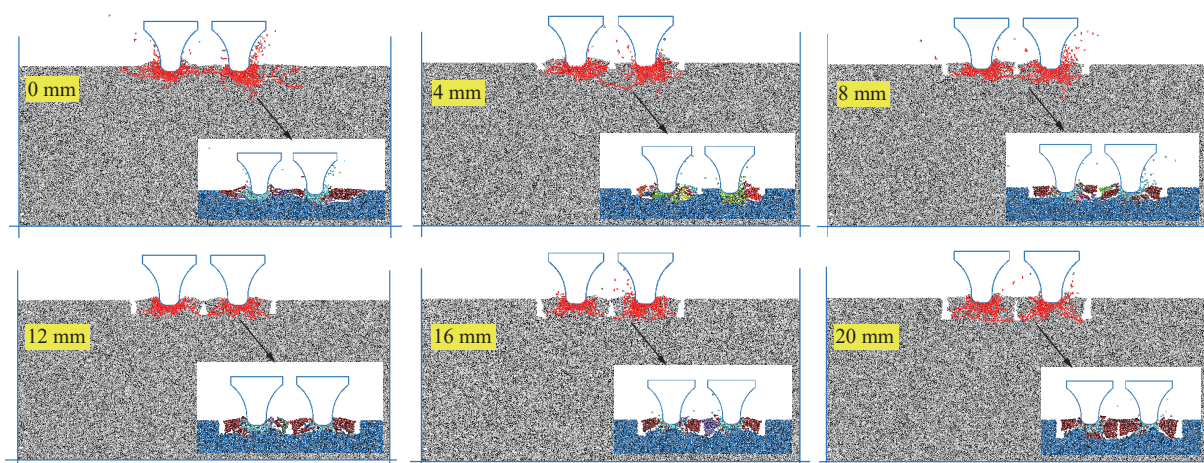


图 8 不同切槽深度岩石裂纹扩展

Fig.8 Rock crack propagation at different grooving depths

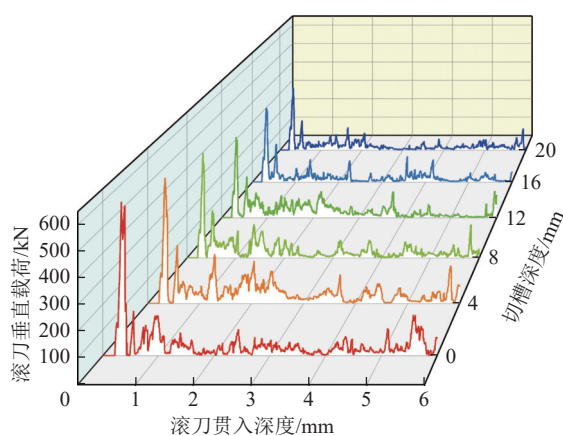


图 9 不同切槽深度滚刀垂直载荷变化

Fig.9 Variation of hob vertical load with different groove depth

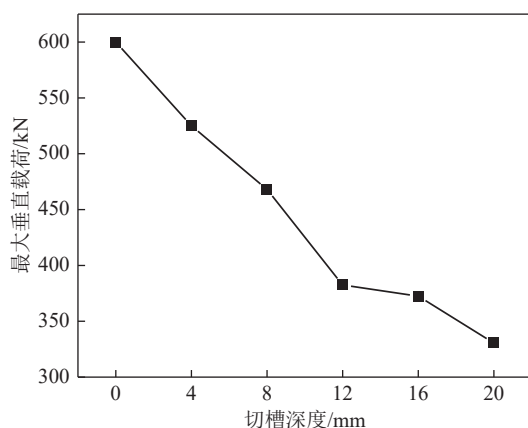


图 10 不同切槽深度滚刀破岩最大垂直载荷变化

Fig.10 Maximum vertical load variation of hob rock breaking at different groove depth

如图 11 为不同切槽深度下滚刀贯入的比能耗。可见随着切槽深度的增加, 滚刀破岩比能耗呈现出先上升后下降的趋势。不切槽时破岩比能耗为 0.28 J/mm^2 , 切槽深度为 4 mm 时破岩比能耗为 0.4 J/mm^2 , 切槽深

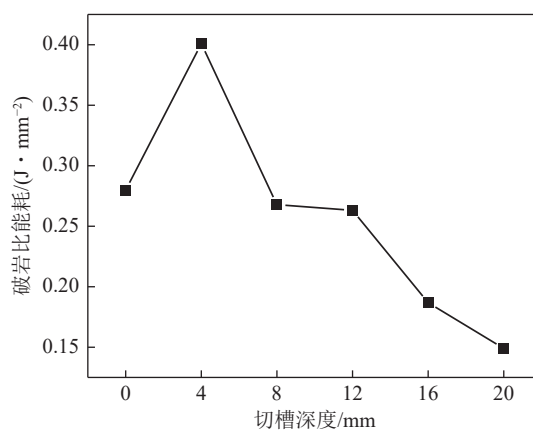


图 11 不同切槽深度滚刀破岩比能耗变化

Fig.11 Change of rock breaking ratio energy consumption of hob with different groove depth

表 4 不同切槽深度破碎岩石面积

Table 4 Area of broken rock at different depth of grooves

切槽深度/mm	0	4	8	12	16	20
破碎岩石面积/mm ²	1 908	1 469	1 650	1 635	1 670	2 097

度为 20 mm 时滚刀破岩比能耗为 0.15 J/mm^2 。根据实验和数值模拟中裂纹扩展结果可知, 切槽隔断了裂纹朝着切槽外侧扩展, 而切槽位置一般布置在两滚刀之间, 刀盘滚刀数量往往在数十把, 因此来说不切槽时裂纹扩展面积存在一定误差。切槽底端是岩石应力集中位置, 主裂纹扩展方向朝着切槽底端导致破碎岩石的体积随切槽深度增加而增加, 形成大块状的岩石破碎体, 进而减小比能耗。

2.4.2 岩石应力场分析

滚刀在垂直载荷的作用下贯入岩石, 滚刀作用岩石力链的主要沿着垂直载荷的方向, 并以扇形向四周扩散。

图12为滚刀贯入过程中岩石内部力链。滚刀与岩石接触区域的力最大,沿着力传递的方向逐渐降低,切槽底端是滚刀传递力集中区域。根据力的传递方向可以看出岩石受力集中的位置是裂纹生成的位置,力在传递的过程中逐渐减弱。在滚刀作用下,岩石颗粒间受力超过黏结力,黏结键断裂形成张拉和剪切裂纹,裂纹之间相互贯通形成大的裂隙,因此裂纹生成朝着滚刀力传递的方向。

图13为不切槽和20 mm切槽深度的应力云图变化过程。随着滚刀贯入岩石,滚刀下方岩石应力变大,应力波以圆形传递,岩石在应力增大过程中逐渐发生破碎。不切槽时应力主要集中在滚刀下方,应力波围绕密实核以圆形在岩石内传递,两滚刀间传递应力交汇位置为岩石破碎的主要区域;20 mm切槽时应力集中在密实核区域和切槽底端,滚刀下方与切槽底端是岩石破碎的主要区域。

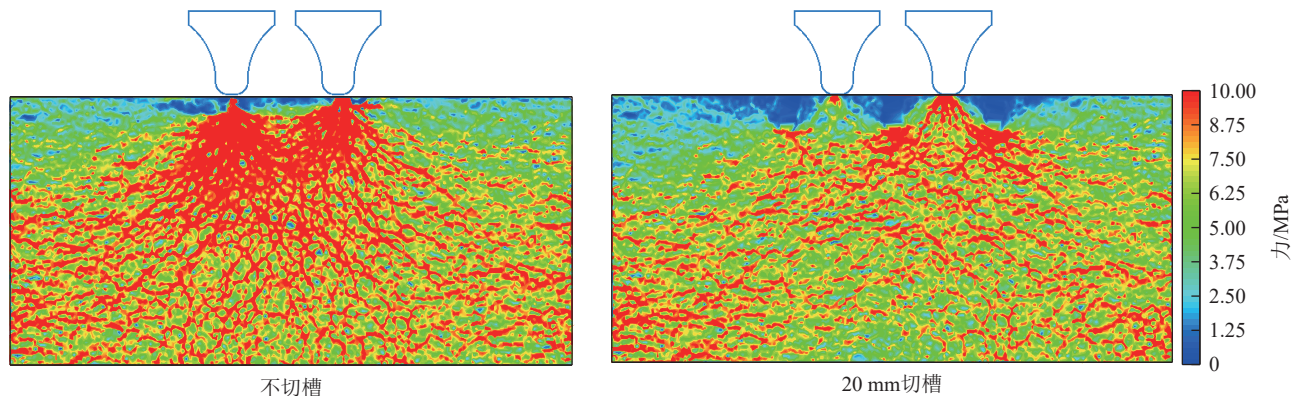


图12 岩石力链

Fig.12 Rock force chain

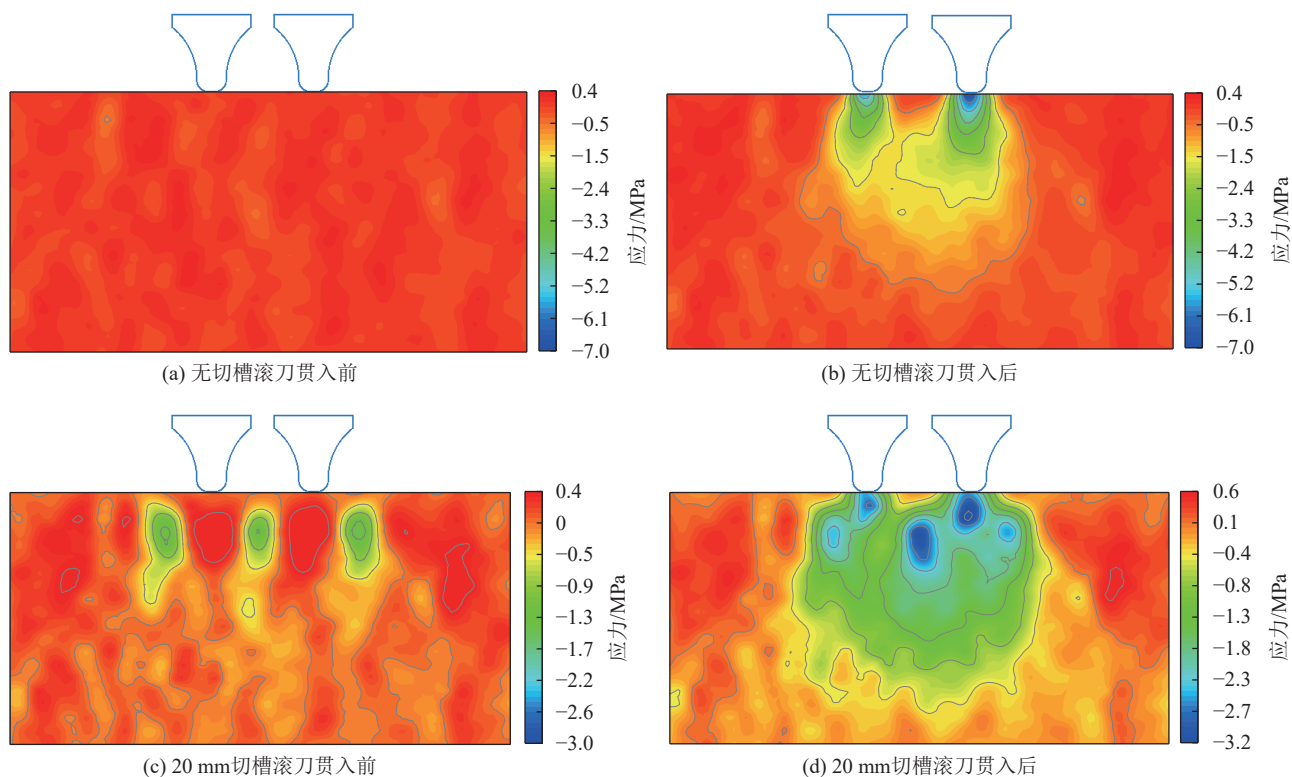


图13 应力云图变化过程

Fig.13 Stress nephogram variation process

综上,从裂纹角度扩展来看,图8中数值模拟结果与图3中实验结果相似,在切槽深度为0 mm时,岩石破碎区域主要在滚刀轨迹周围,形成较小范围内岩

石破碎。在切槽深度为4 mm时,岩石的裂纹不能都有效从滚刀与岩石接触位置扩展到切槽底端,切槽底端破坏形貌较“平缓”。在切槽深度为8~20 mm时,

随着切槽深度的增加, 主裂纹都是朝着底端扩展, 且“岩脊”的高度随着切槽深度的增加而增加。从滚刀受力角度来看, 图 10 中滚刀的最大垂直载荷与图 4 中实验结果相似, 切槽深度在 0~12 mm, 滚刀的最大垂直载荷降低较多, 切槽深度在 12~20 mm, 滚刀的最大垂直载荷降低较少。此外滚刀传递力的过程和图 3 中岩石破坏后的形貌相互照应, 力集中在滚刀与岩石接触部位、相邻滚刀传递力的交汇区域和切槽底端, 最终使主裂纹从滚刀下方扩展到切槽底端。因此来说, 从裂纹扩展和滚刀受力等角度说明了数值模拟与实验结果相似, 验证了模拟的可靠性。

切槽改变了岩石应力场, 使滚刀破岩过程应力波的传递过程发生变化, 为进一步分析岩石颗粒间的破坏趋势, 对比分析切槽后岩石内部的应力场变化情况, 在岩石内布置直径为 10 mm 测量圆监测岩石内部的应力变化过程, 记录应力波 X 向正应力 σ_{xx} 、Y 向正应力 σ_{yy} 及切应力 σ_{xy} 时程曲线图。测量圆 1 布置在右侧滚刀下方 30 mm 处, 测量圆 2 布置在右侧滚刀向左 20 mm 向下 10 mm 处, 如图 14 所示。

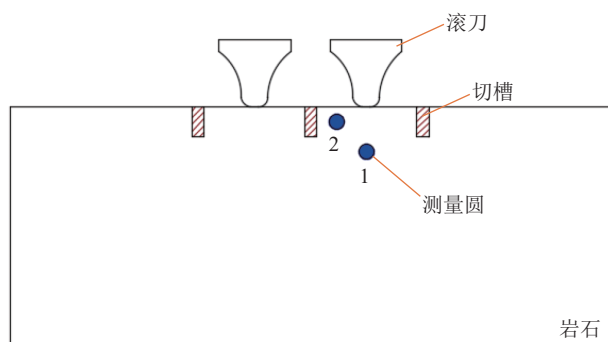


图 14 测量圆所在位置

Fig.14 Measure the position of the circle

由图 15 可知, 切槽后岩石测量圆 1 所在位置法向应力显著减小, 水平应力和切向应力基本不变, 法向应力峰值出现时间基本不变。不切槽时滚刀传递应力波到测量圆 1 所在区域, 岩石围压和两滚刀之间力的相互传递影响其应力变化过程, 而切槽起到了移除侧向约束弱化岩石围压的作用, 滚刀在侵入岩石力会朝着岩石应力集中区域发展, 因此切槽后滚刀传递应力波到测量圆 1 所在区域数值显著减小。

图 16 为滚刀作用岩石过程中测量圆 2 的应力变化过程。由图 16 可知岩石测量圆 2 所在位置岩石应力场中水平应力、切向应力、水平应力都减小, 应力峰值的出现时间基本不变。不切槽时滚刀传递力的过程需要克服岩石的侧向压力, 滚刀传递力的数值较大, 而应力波在岩石内以球形传递, 所以不切槽时测量圆 2 所在区域应力较大。切槽后侧向压力减小, 岩石容

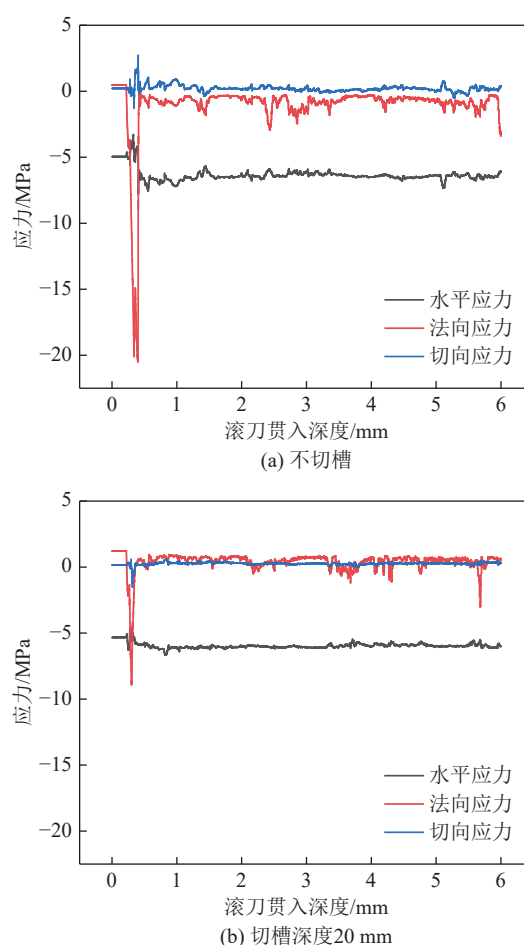


图 15 测量圆 1 处应力场变化情况

Fig.15 Change of rock stress field under hob

易发生大面积的块状破碎, 因此测量圆 2 所在位置应力减小, 且出现应力峰值后应力的变化趋势较小。

综上, 随着滚刀侵入岩石, 滚刀作用力在岩石接触位置, 应力以球形波的形式在岩石内部传递, 在滚刀作用下岩石颗粒会发生细小位移, 伴随着滚刀贯入深度增加, 岩石颗粒偏离位移的距离越来越远, 直至超过颗粒的黏结键范围发生岩石破碎。切槽减小了滚刀周围岩石应力场, 并使切槽底端区域应力增大, 切槽起到了移除侧向约束作用, 从而使滚刀力在传递过程中大小降低, 方向朝着切槽底端扩展, 进一步影响了岩石裂纹扩展和刀具受力。

3 讨 论

低压磨料空气射流较常见水射流辅助破岩技术不需要高压甚至超高压的工作环境, 安全性好且磨料射流系统不易发生损坏, 具备切槽辅助滚刀破岩潜力。滚刀侵入岩石过程中, 通过密实核将滚刀压力传递给周围岩石并产生径向裂纹, 其中有一条或多条裂纹向刀刃两侧延伸, 到达切槽边缘或与相邻裂纹交会, 形成岩石碎片^[22]。岩石切槽后改变了裂纹的扩展方向,

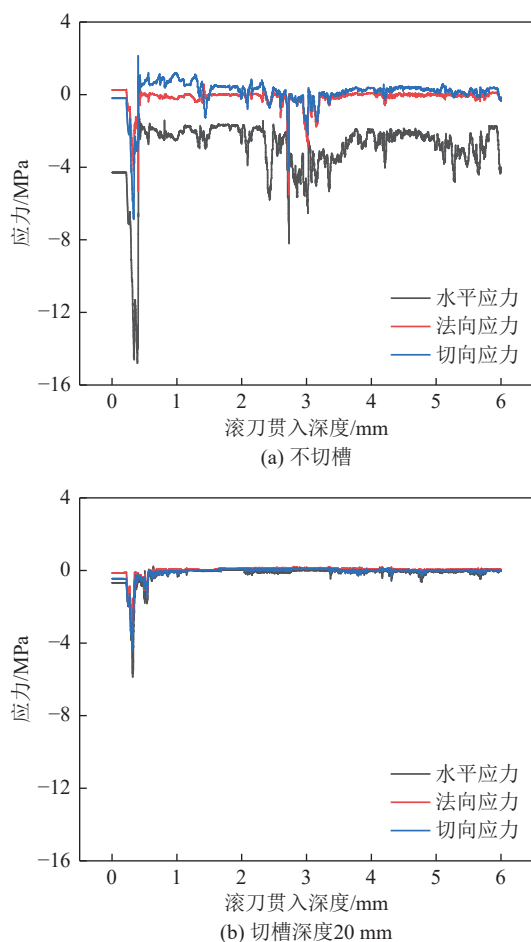


图 16 测量圆 2 处应力场变化情况

Fig.16 Change of rock stress field on the right side of hob

使主裂纹与切槽底端交会贯通形成体积较大的破碎体,有效减小了滚刀受力。

随着切槽深度的增加,滚刀下方的承载区强度减弱,相比完整岩石而言,滚刀下方密实核被部分移除,切槽深度越大,密实核的作用范围越小。切槽深度不同改变岩石应力场的程度不同,切槽越深其卸除岩石围压的能力就越强,使滚刀破岩过程传递力大小越低并朝着切槽底端,因此不同切槽深度下裂纹扩展不同。不同切槽深度下裂纹扩展如图 8 所示,切槽改变了岩石破坏形态,因此不同切槽深度在滚刀破岩实验中所影响滚刀受力的程度不同,切槽越深时滚刀受力越小。程建龙等^[23]和 CHENG 等^[24]研究了不同高压水射流切槽深度对滚刀贯入的破坏机制,其岩石破碎形态及滚刀受力变化过程与本文结果相似。说明了低压磨料空气射流切槽辅助滚刀破岩的可行性。

图 17 为切槽前后滚刀破岩示意。滚刀侵入岩石过程中,应力波呈球形向密实核四周传递载荷,不切槽时岩石的破坏形态是以 2 个滚刀之间的协同作用进行破岩,裂纹在密实核四周扩展,最终在岩石上形成较水平的破坏特征。切槽形成临空面降低了滚刀

下方岩石应力大小,使滚刀一侧传递力所受的阻碍减小,所以裂纹优先向切槽位置扩展,同时因为切槽改变了岩石应力场,切槽下方成为岩石应力集中的位置,裂纹沿着力链的主要位置生成,因此裂纹往往朝着切槽底端方向扩展,最终在岩石上形成岩脊状的破坏特征。

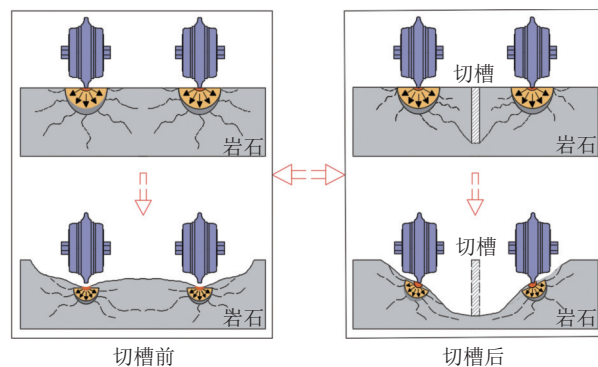


图 17 切槽辅助滚刀破岩过程

Fig.17 Slotting assisted hob rock breaking process

结合本文的试验结果可知,切槽使岩石内部的应力场发生改变,切槽后应力集中到了切槽底端,从而改变了滚刀传递力的过程,产生不同的裂纹扩展方式。合理的低压磨料射流切槽参数可以有效减小滚刀受力,增加破岩效率。本文实验结论与 LIU 等^[25-26]进行纯水射流辅助切削中硬岩、磨料水射流辅助切削硬岩的试验和数值模拟研究发现破岩载荷最大可降低 45% 研究结果相似,还与贺飞等^[27]建议提升水射流的切割能力提升切槽深度,从而发挥切槽临空辅助破岩作用一致。为提高隧道掘进机工作效率,增加射流的切割能力使其能够适用于滚刀刀盘的高线速度是完善辅助破岩手段的发展方向。

4 结 论

1) 通过低压磨料空气射流切槽辅助滚刀破岩实验,发现切槽深度达到 8 mm 后滚刀破坏区域出现岩脊形貌。切槽底端是滚刀破岩过程应力集中区域,因此主裂纹扩展方向从滚刀密实核朝切槽底端,形成滚刀压痕处高、切槽底端低的岩石破坏特征。随着切槽深度增加,岩脊高度逐渐变大。切槽后滚刀下方密实核被部分移除,切槽深度越大,密实核的作用范围越小,主裂纹扩展范围越大,因此岩脊的高度逐渐增加。

2) 切槽后主裂纹与切槽边缘和岩石断面贯通,形成三角状岩石破碎体,滚刀破岩过程中,压痕处以片状岩石粉末为主,切槽之间以块状岩石破碎体为主。随着切槽深度增加,岩石块状破碎体的体积变大,滚刀最大垂直载荷逐渐减小,低压磨料空气射流切槽为

20 mm 时, 滚刀最大垂直载荷为不切槽时的 68%。滚刀破岩过程中刀具两侧岩石应力减小, 切槽起到移除侧向约束的作用, 从而降低了刀具贯入的垂直载荷, 形成大块状的岩石破碎体, 减小破岩比能耗。

参考文献(References):

- [1] 洪开荣, 杜彦良, 陈馈, 等. 中国全断面隧道掘进机发展历程、成就及展望[J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(5): 739–756.
HONG Kairong, DU Yanliang, CHEN Kui, et al. Full-face tunnel boring machines(shields/TBMs) in China: history, achievements, and prospects[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 739–756.
- [2] 杜立杰. 中国 TBM 施工技术进展、挑战及对策[J]. 隧道建设, 2017, 37(9): 1063–1075.
DU Lijie. Progresses, challenges and countermeasures for TBM construction technology in China[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(9): 1063–1075.
- [3] 张照煌, 柴超群, 赵宏. 全断面硬岩 TBM 刀盘结构设计研究[J]. 重型机械, 2020(4): 69–76.
ZHANG Zhaohuang, CHAI Chaoqun, ZHAO Hong. Research on cutterhead structural design of TBM[J]. Heavy Machinery, 2020(4): 69–76.
- [4] 张旭辉, 潘家骥, 何森磊, 等. 缩尺寸 TBM 滚刀切割硬岩试样磨损性能研究[J]. 机械设计, 2022, 39(9): 30–35.
ZHANG Xuhui, PAN Jiaji, HE Miaolei, et al. Wear performance of reduced-size TBM hobs in cutting hard rock sample[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(9): 30–35.
- [5] 张厚美. 盾构盘形滚刀损坏机理的力学分析与应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 61–65, 74.
ZHANG Houmei. Mechanical analysis of TBM disc cutter damage mechanism and its application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 61–65, 74.
- [6] 翟淑芳, 曹世豪, 周小平, 等. 围压对 TBM 滚刀破岩影响的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 154–160.
ZHAI Shufang, CAO Shihao, ZHOU Xiaoping, et al. Numerical study on effects of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 154–160.
- [7] 温森, 吴斐, 李胜, 等. 不同侧压系数和岩石强度下 TBM 滚刀破岩效率的数值模拟[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(4): 9–19.
WEN Sen, WU Fei, LI Sheng, et al. Numerical simulation of rock fragmentation efficiency of TBM disc cutter under different lateral pressure coefficient and rock strength[J]. Hazard Control in Tunneling and Underground Engineering, 2021, 3(4): 9–19.
- [8] MA H S, YIN L J, JI H G. Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(6): 1021–1033.
- [9] 张旭辉, 胡定邦, 廖雅诗, 等. 临空面与常规工况下 TBM 滚刀切割红砂岩对比研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(6): 1575–1584.
ZHANG Xuhui, HU Dingbang, LIAO Yashi, et al. Comparative study on cutting red sandstone by TBM hob under free face and normal working conditions[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(6): 1575–1584.
- [10] 韩伟锋. 水射流辅助机械滚刀破岩试验研究[J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42(8): 1414–1419.
HAN Weifeng. Experimental study on rock-breaking using a water jet assisted mechanical disc cutter[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1414–1419.
- [11] CHENG J L, YANG S Q, HAN W F, et al. Experimental and numerical study on the indentation behavior of TBM disc cutter on hard-rock precutting kerfs by high-pressure abrasive water jet[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 22(1): 37.
- [12] CHENG J L, WANG Y X, WANG L G, et al. Penetration behaviour of TBM disc cutter assisted by vertical precutting free surfaces at various depths and confining pressures[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(1): 22.
- [13] 张魁, 杨长, 陈春雷, 等. 激光辅助 TBM 盘形滚刀压头侵岩缩尺试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 87–96.
ZHANG Kui, YANG Chang, CHEN Chunlei, et al. Scale model test on laser-assisted rock indentation by TBM disc cutter indenter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 87–96.
- [14] 刘勇, 陈长江, 魏建平, 等. 磨料水射流与磨料气体射流破岩压力对比分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2510–2517.
LIU Yong, CHEN Changjiang, WEI Jianping, et al. Comparison analysis on the rock breakage pressure induced by abrasive water jets and abrasive gas jets[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2510–2517.
- [15] 刘勇, 代硕, 魏建平, 等. 低压磨料空气射流破硬岩规律及特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1172–1182.
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Experimental study on hard rock breaking laws and characteristics by low-pressure abrasive air jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1172–1182.
- [16] 孟德鑫, 谭忠盛, 李涛. 大直径土压平衡盾构掘进参数对比试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 435–439.
MENG Dexin, TAN Zhongsheng, LI Tao. Comparative experimental study on driving parameters of large diameter earth pressure balance shield[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 435–439.
- [17] 徐琛, 刘晓丽, 王恩志, 等. 基于耦合 FDM-DEM 方法的 TBM 滚刀最优化研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 286–291, 299.
XU Chen, LIU Xiaoli, WANG Enzhi, et al. Optimal conditions for TBM disc cutter rock fragmentation based on FDM-DEM method[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 286–291, 299.
- [18] 刘勇, 李志飞, 魏建平, 等. 磨料空气射流破煤冲蚀模型研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1733–1742.
LIU Yong, LI Zhifei, WEI Jianping, et al. Erosion model of abrasive air jet used in coal breaking[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1733–1742.
- [19] 郝保钦, 张昌锁, 王晨龙, 等. 岩石 PFC^{2D} 模型细观参数确定方法

- 研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 132–141.
- HAO Baoqin, ZHANG Changsuo, WANG Chenlong, et al. Study on determination micro-parameters of rock PFC^{2D} model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 132–141.
- [20] 石磊. 弱胶结地层条件下工作面溃水溃砂规律模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 347–353.
- SHI Lei. Numerical simulation study on law of water and sand inrush in working face under condition of weakly cemented stratum[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 347–353.
- [21] 龚泽佳, 鱼志鸿, 章定文, 等. 复合地层中盾构滚刀磨损实用预测方法及应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(1): 133–141.
- GONG Zejia, YU Zhihong, ZHANG Dingwen, et al. Practical prediction method and application of shield disc cutter wear in complex formation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 133–141.
- [22] 刘亚迪, 齐文聪, 刘浩飞, 等. 多滚刀协同破岩过程数值模拟与滚刀布置规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 232–244.
- LIU Yadi, QI Wencong, LIU Haoifei, et al. Numerical simulation of cooperative breaking rock by multi-cutter and research on the layout law of disc cutter on cutterhead[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 232–244.
- [23] 程建龙, 邹清友, 杨圣奇, 等. 水力切缝上方 TBM 滚刀贯入破坏机制模拟研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2317–2326.
- CHENG Jianlong, ZOU Qingyou, YANG Shengqi, et al. Simulation of indentation behavior of TBM disc cutter and failure mechanism of hard rock assisted by hydraulic precutting kerfs[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2317–2326.
- [24] CHENG J L, JIANG Z H, HAN W F, et al. Breakage mechanism of hard-rock penetration by TBM disc cutter after high pressure water jet precutting[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 240: 107320.
- [25] LIU J, CAO P, HAN D Y. The influence of confining stress on optimum spacing of TBM cutters for cutting granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 165–174.
- [26] LIU Q S, PAN Y C, LIU J P, et al. Comparison and discussion on fragmentation behavior of soft rock in multi-indentation tests by a single TBM disc cutter[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 151–161.
- [27] 贺飞, 张金良, 鲁义强, 等. 滚刀-高移速水射流耦合切削极硬花岗岩试验与模拟研究[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54(3): 1187–1203.
- HE Fei, ZHANG Jinliang, LU Yiqiang, et al. Experimental and simulation study on cutting extremely hard granite by disc cutter-high velocity waterjet coupling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 1187–1203.