

不同岩性高压水射流切缝机理研究*

宋常杰¹, 许弘毅^{1, 2}, 龚秋明¹, 杨风威³, 曹智国³

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡 639798; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

【摘要】硬岩掘进机在高强度岩体中存在掘进速度低、滚刀磨损快等问题, 高压水射流可在掌子面切缝以降低岩体完整性, 从而提升滚刀破岩性能, 探究高压水射流切割岩石机理是研究高压水射流辅助TBM掘进的重要一环。运用高压水射流数控平台分别对砂岩、大理岩和花岗岩进行了高压水射流切割试验, 射流压力从150MPa增加到300MPa。通过观察岩石表面损伤、测量切缝的深度与宽度获得岩石宏观破坏特征, 发现在高压水射流作用下砂岩表面主要以笔直的切缝为主, 大理岩表面产生连续破碎带, 花岗岩表面则产生较大破碎坑, 但破碎坑数量明显较少。通过破岩碎屑的筛分试验及射流切槽周边荧光裂纹显现分析岩石的损伤特征, 发现砂岩切缝的形成主要以射流的侵蚀作用为主, 颗粒间的胶结物被冲刷剥落, 高压水射流的冲击作用不明显, 切缝横截面处未发现微裂纹。2种强度更高的结晶岩同时受到高压水射流的侵蚀作用与冲击作用影响, 大理岩主要发生穿晶破坏形成“长颈漏斗”形切槽, 花岗岩则在水楔作用影响下发生更多沿晶破坏, 最终形成较大破碎坑。

【关键词】室内破岩试验; 高压水射流; 切缝; 破岩机理

【中图分类号】 U455.3+1 **【文献标识码】** A **【文章编号】**

Mechanism of High-pressure Water Jet Cutting in Different Lithology

SONG Changjie¹, XU Hongyi^{1, 2}, GONG Qiuming¹, YANG Fengwei³, CAO Zhiguo³

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Tunnel boring machine (TBM) has the problems of low advance rate and severe cutter wear when tunnelling in the high-strength rock mass. High-pressure water jet (HPWJ) can create kerfs on the tunnelling face to reduce the integrity of the rock mass and improve the rock breaking performance of TBM cutters. Therefore, investigating the rock cutting mechanism of HPWJ is one of the key issues of studying HPWJ-assisted TBM tunnelling. A computer numerical control HPWJ platform was used to carry out cutting tests on the sandstone, marble, and granite specimens. The water jet pressure increased from 150MPa to 300MPa. By observing the apparent damage on the specimens and measuring the depth and width of the kerfs, it was found that the kerfs on the sandstone surface were mainly straight, whereas continuous craters were found on the marble surface. Although the craters on the granite surface were larger, but the number significantly reduced. Based on the sieving tests of rock breaking debris and the observation of cracks around the kerf cross-sections with fluorescent dyes, the damage characteristics of the rocks were analyzed. The results indicated that the formation of the kerfs on the sandstone was mainly due to the erosion of the HPWJ, the cementation between the grains was broken. The effect of HPWJ impact was not obvious, no cracks were

*水利部重大科技项目 (SKR-2022029)

【作者简介】宋常杰, 硕士研究生, E-mail: songchangjie1997@163.com

【通信作者】龚秋明, 教授, 博士生导师, E-mail: gongqiuming@bjut.edu.cn

【收稿时间】2023-05-30

observed around the kerf cross-sections. Two other crystalline rocks with higher strength were influenced by the erosion and impact of the HPWJ, trans-granular failures in the marble caused the necked-funnel shaped kerfs, while more inter-granular failures caused by the water wedge effect created large craters on the granite.

Keywords: rock experimental cutting test; high-pressure water jet; cutting seams; rock-breaking mechanism

0 引言

隧道掘进机(TBM)施工法是一种安全、快速、高效的隧道开挖方法^[1],在施工时要关注岩体的可掘性^[2]和磨蚀性。TBM 在高强度、高磨蚀性、完整性好的岩体中施工时,常常出现掘进速度低、滚刀磨损快等问题,导致成本增加^[3]。引入一些辅助破岩手段以提高TBM 在完整性好的高强度岩体中的施工效率是一种解决途径,如高压水射流、激光和微波等破岩技术。其中,高压水射流辅助破岩技术由于可行性高、相对成熟等优点而得以持续研究与发展^[4]。

高压水射流辅助破岩技术主要通过高压射流在掌子面辅助切割以降低岩石完整性,从而提升滚刀破岩性能,如图1所示^[5]。高压水射流切缝的形态是提升TBM 滚刀破岩性能的关键,探究射流之于不同类型岩石的切割机理与切割效果是研究射流辅助TBM 破岩的重要一环。然而高压水射流冲击下的岩石破碎是一个复杂的流固耦合过程^[6],目前有多种学说阐释高压射流的破岩机理。准静态弹性破碎理论将射流对岩石的冲击力看作准静态的集中力,在冲击区正下方某处产生的剪应力超过岩石的抗剪强度,导致岩石破坏^[7]。应力波破碎理论认为高压水射流作用下,岩石处于绝对受压状态,直到液滴向外作径向流动,形成强大的径向拉力,当拉力值超过岩石的抗拉强度时产生破坏^[8]。空化破碎理论认为液体内部或液固交界面会产生气泡,当气泡的破裂能量集中在一点上时,将瞬间产生巨大压力从而达到破坏岩石的目的^[9]。裂纹扩展破碎理论最早由Powell等^[10]提出,高压水射流能有效顺着裂纹传播,水侵入裂隙以后,使裂隙迅速发展扩大,致使岩石破碎;Rehbinder^[11]进一步指出,只有晶粒间的静水压力克服晶粒间的内聚力时才会导致岩石破坏。

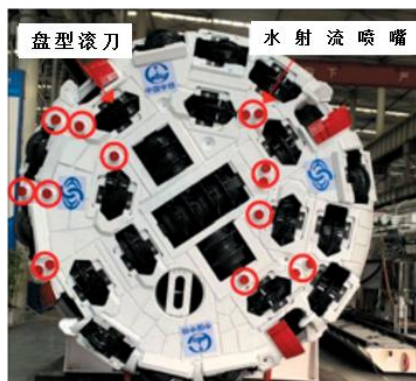


图1 高压水射流辅助TBM 破岩示意

Fig. 1 High-pressure water jet assisted TBM rock breaking

诸多高压水射流操作参数均会对最终切槽的形态产生影响,如水射流压力、靶距、射流切割速度、喷嘴直径、同一轨迹切割次数、射流入射角度等。通过室内高压射流破岩试验,可直观揭示不同岩性与射流参数下的岩石宏观损伤。Lu等^[12]对砂岩进行了射流冲击试验,得出了岩石的3种破坏形态:射流速度较低时,岩石表面产生中心破碎坑及环状裂纹;提高射流速度,岩石产生内部裂纹,包括径向裂纹、周向裂纹和锥形裂纹;进一步提高射流速度,岩石侧表面出现宏观裂纹。Summers等^[13]研究了相同射流参数对砂岩与石灰岩的切割效果,发现砂岩切缝深度主要受射流切割速度影响,而对于石灰岩则主要受射流压力影响,因为2种岩石的颗粒组成相差较大,切割机制可能存在差异。Momber^[14]设计了高速液滴冲击试验,试验选择4种岩石试样和2种混凝土材料,发现软质多孔类材料如粗粒混凝土的破坏主要是由于液体的冲刷导致骨架间的胶结物剥落造成,而对于密度较大的脆性材料如花岗岩的破坏主要是冲击产生的应力波使得岩石骨架产生裂纹。Forman等^[15]将薄铜片放置在连续射流和石灰岩之间,使用150MPa射流压力,发现岩石并未发生破坏,认为岩石本身孔隙率和渗透率会对破岩效果产生较大影响。Hood等^[16]基于对石灰岩的一系列高压水射流冲击试验的分析,认为射流压力主要作用在切口内岩石边缘上,产生类似于剥蚀的效果。

综上所述,学者们已对高压水射流破岩有较多的理论与试验研究,但采用的岩石与射流参数各异而难以相互印证比较。本文选用花岗岩、砂岩、大理岩3大类岩石各1种开展高压水射流线性切缝试验,测量不同射流压力下的切缝形态,并对破岩碎屑进行了收集与筛分分析。通过对高压水射流切槽岩样横向切分并施以荧光粉获得切缝横截面上的裂纹分布,揭示了裂纹开展模式。

1 试验方案

1.1 高压水射流切割试验设计

根据3大类岩石特点,分别选用常见的岩浆岩中的花岗岩、沉积岩中的砂岩和变质岩中的大理岩(见图2)进行室内高压水射流切割试验,岩体的物理力

学参数及射流切割参数设置如表 1 所示。试验制备的岩板尺寸为 500mm×500mm×100mm，根据前述既有试验结果，射流压力较其他射流参数对切缝效果影响更显著，在不同射流压力下，岩石破坏的主要形式可能发生变化。为揭示高压水射流的岩石切割机理，本研究设计了多级水射流压力，其大小从 150MPa 起以 30MPa 为间隔最高增加至 300MPa，其余切割参数固定。

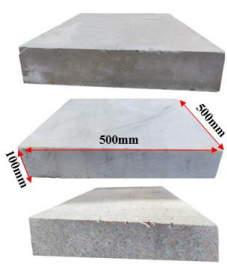


图 2 岩石试样



图 4 花岗岩切割示意

Fig. 2 Rock specimens Fig. 4 Granite cutting

1.2 试验流程

试验使用数控高压水射流切割平台，最大水压力可达 300MPa。切割时先于平台上放置 3 种岩石试样各 1 块，切缝间距选取 50mm，根据预试验结果，该间距设定下相邻切缝间不会发生相互作用。随后采用相同切割参数依次切割 3 种岩样，切割如图 3a 所示。同时，尝试收集不同岩石条件下的破岩碎屑，通过定制木质框架并外覆 300 目尼龙滤网作为收集工具，试验时将单块岩样置于框架之上（见图 3b），随后在框架顶面覆盖塑料板防止岩粉随水飞溅，切割完毕后取出岩石与框架，收拢滤网以收集破岩碎屑。由于高压水射流切缝的破岩碎屑较少，射流压力较低时更少，因此仅对射流压力为 300MPa 时产生的碎屑进行收集

分析。

切割结束后，采用数码测深计（精度 0.01mm）和游标卡尺（精度 0.01mm）分别对切槽深度和宽度进行测量，以 2cm 为测量间隔对每条切缝进行测量，并对切槽外轮廓进行拍照，记录切槽形态变化。对收集的破岩碎屑进行筛分试验，由于破岩碎屑粒径较小，试验筛选择标准土壤筛，选用孔径为 0.045, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5mm 的筛网进行筛分，称量各层筛网的筛余质量，得到最终筛分曲线。

为了进一步探究不同岩石在射流作用下的微观破坏机理，采用荧光法使岩石内部切缝横截面周围的裂纹显现。首先将岩样送至石材加工厂沿横截面切割（见图 4），然后依次使用 50, 100, 500, 1 000, 1 500 目的水磨片对加工后的断面进行打磨，直至消除表面切割锯划痕。随后在打磨完毕的岩样剖面上均匀涂抹荧光混合液，静置 12h 以保证荧光液充分渗入微观裂纹。最后在暗室中使用紫外光灯照射观察区域，获得荧光裂纹显现图。



a



b

图 3 高压水射流切割试验示意

Fig. 3 High-pressure water jet cutting test

2 岩石表面观损伤破坏

试验共选取 6 种射流压力进行射流切割试验，选取 150, 240, 300MPa 射流压力作用下的切缝形态进

表 1 岩体参数及射流切割参数设置

Tab1 Rock mass parameters and jet cutting parameter settings

岩体参数								射流切割参数				
岩石	密度	孔隙	颗粒	抗压	抗拉	弹性	泊松	射流	切割	靶距	喷嘴	切割
种类	/(kg·m ⁻³)	率	粒径	强度	强度	模量	比	压力	速度		直径	角度
		/%	/mm	/MPa	/MPa	/GPa		/MPa	/(mm·min ⁻¹)	/mm	/mm	/(°)
砂岩	2 268	10.61	0.25	60.70	2.70	45.44	0.26	150				
大理岩	2 359	0.74	1.20	80.61	2.09	70.20	0.25	180				
								210				
								240	500	10	1	90
花岗岩	2 596	0.71	钾长石: 3.60	126.10	2.70	47.70	0.27	270				
			钠长石: 1.90 石英: 2.20 黑云母: 0.90					300				

行观察分析。砂岩表观损伤如图 5 所示, 切缝笔直平整, 并且随着射流压力的增加切缝整体形态并未发生变化, 仅仅可观察到切缝宽度有略微增加。由于砂岩颗粒分布非常均匀, 试验所选砂岩可视为均质体, 且岩石强度在 3 种岩样中最低, 在高压水射流冲击下砂岩表现出明显的侵蚀破坏模式, 颗粒间黏结强度不高而产生持续的剪切破坏, 一方面骨架间胶结物被冲刷剥落, 另一方面岩石颗粒被击穿, 最终形成规则切缝。

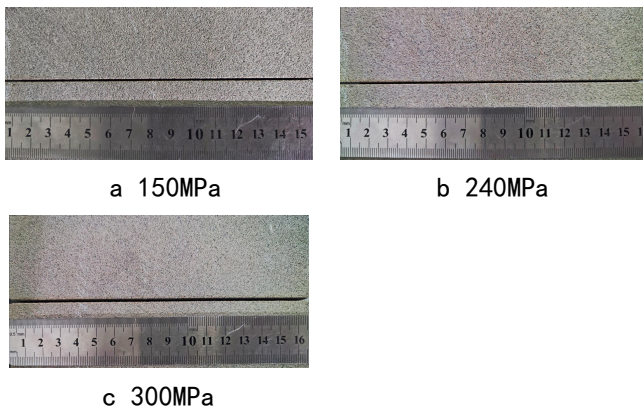


图 5 砂岩表观损伤

Fig.5 Apparent damage of sandstone

大理岩由方解石和白云石组成, 具有中粒变晶结构, 相较于砂岩, 大理岩孔隙率较小, 颗粒间连接更为紧密, 所以在高压水射流作用下发生沿晶破坏的难度加大, 射流的侵蚀作用减弱。大理岩的表观损伤如图 6 所示, 当射流压力为 150MPa 时, 大理岩表面仅出现 1 条浅缝, 未产生较明显破碎坑。当射流压力增加到 240MPa 时, 大理岩表面除形成 1 条明显的切缝外, 同时伴随有岩片的剥落在切缝两侧形成大小不一的破碎坑。当射流压力增大到 300MPa 时, 高压水射流切割轨迹上几乎未出现完整切缝, 而是出现了由破碎坑相连的现象, 说明大理岩破碎坑的形成频率随射流压力的增加而增加。同时, 发现切槽附近形成较多环形裂纹 (见图 7), 可能与应力波在岩石表面形成的拉伸作用力有关。

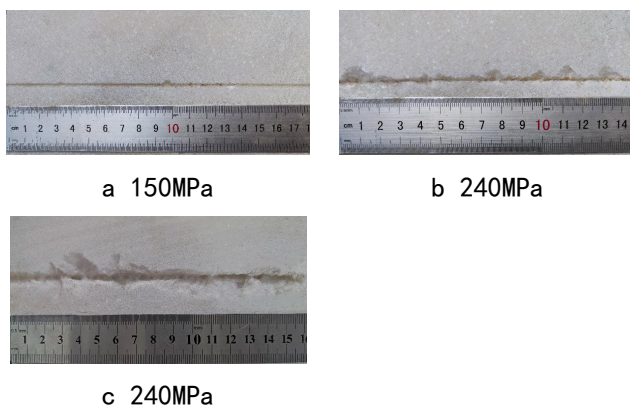


图 6 大理岩表观损伤

Fig.6 Apparent damage of marbled

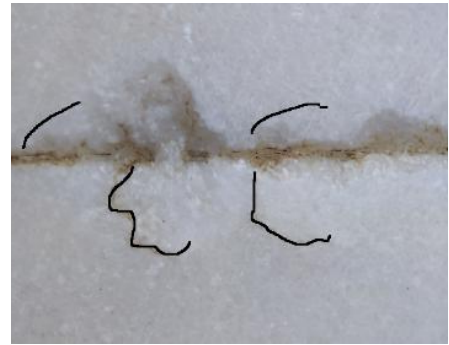


图 7 大理岩局部损伤区域放大

Fig.7 Enlarged view of the local damage area of marbled

在试验选取的岩石中花岗岩的强度和密度最高, 如图 8 所示, 当射流压力为 150MPa 时, 岩石表面切缝最不明显且切缝边缘平整, 无破碎坑出现。随着射流压力提升至 240MPa, 高压水射流本身的宽度增加, 且边缘的应力有所增长, 使得高压水射流整体的侵蚀作用加强, 致使沿晶破坏增多, 揭露的切缝侧壁粗糙不平, 晶体边界清晰。此外, 受高压射流冲击作用产生的裂纹明显增多, 局部偶有小型破碎坑产生。随着射流压力增至 300MPa, 由侵蚀作用形成的切缝明显, 同时切缝两侧的破碎坑显著增多, 意味着射流冲击作用增强, 冲击产生的裂纹在射流的水楔作用下迅速扩展, 最终形成破碎坑。

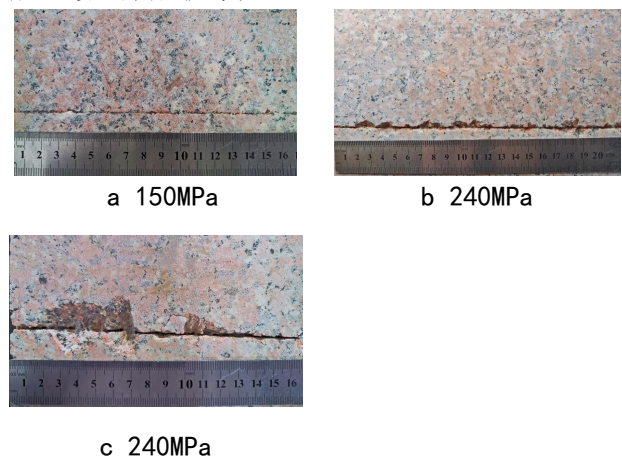
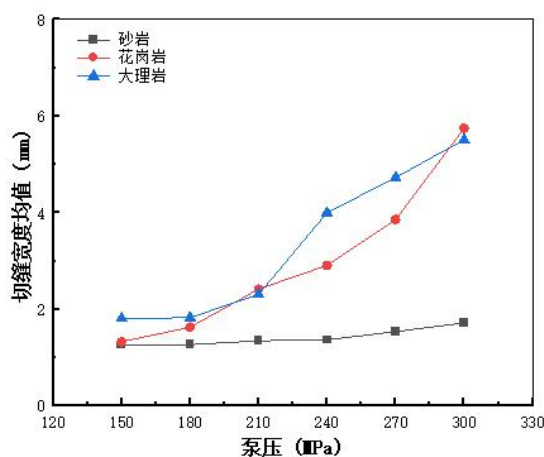


图 8 花岗岩表观损伤

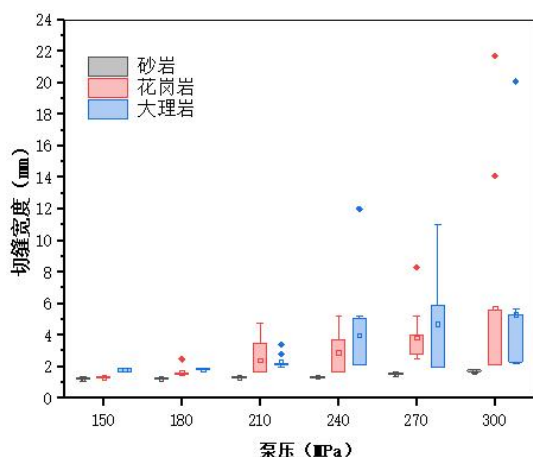
Fig.8 Apparent damage of granite

切缝宽度、深度统计结果如图 9, 10 所示, 由图可知, 随着射流压力增大, 切缝宽度与深度都有明显变化, 数据的均值与变异范围均有不同, 这表明切槽形态同时受到射流压力与岩性两方面影响。其中, 砂岩的切缝宽度均值最低, 随射流压力增加而略有增长, 切缝宽度分布极为集中。由图 10 可看出, 在 150~240MPa 压力区间, 切缝深度随射流压力呈线性增加。但随着射流压力进一步增长, 切缝深度的增加明显放缓, 说明对于孔隙率较高、强度较低的砂岩, 存在一

个临界射流压力, 超过该压力后切缝深度不再显著增加, 本试验中该临界值约为 240MPa。当射流压力为 150MPa 时, 大理岩表面切缝形态与花岗岩相似, 但深度略大。当射流压力达到 240MPa 时, 切缝深度增加的速度远大于砂岩且岩石表面破碎坑宽度的均值与极值在 3 类岩石中最大。当射流压力达到 300MPa 时, 大理岩表面破碎坑的宽度进一步增大, 且连续出现, 虽然单一破碎坑宽度比花岗岩中的小, 但宽度均值与花岗岩近似。对于花岗岩当射流压力仅有 150MPa 时, 切缝深度与宽度最低且均低于晶体直径, 意味着岩石表面在高压射流中心的局部范围内发生少量穿晶破坏, 切缝的边缘依旧平整, 无破碎坑出现。随着射流压力增至 300MPa, 花岗岩上的切缝宽度有着最大极值与变异, 由于岩石中的原生裂隙分布不均, 岩石表面局部强度存在差异, 在高压水射流作用下岩石破碎坑的分布存在较大随机性。整体而言, 花岗岩上的切缝深度与宽度均随射流压力增加而增长, 同时也存在一个射流压力临界值, 超过该值后切缝深度与宽度增幅变大, 缝宽分布范围显著变大, 本试验中该临界值约为 210MPa。



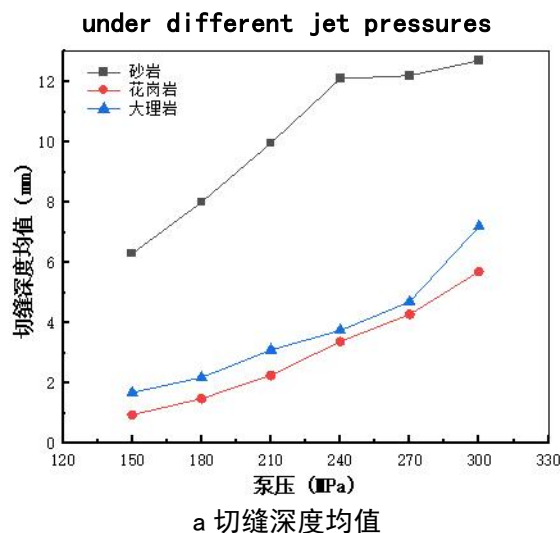
a 切缝宽度均值



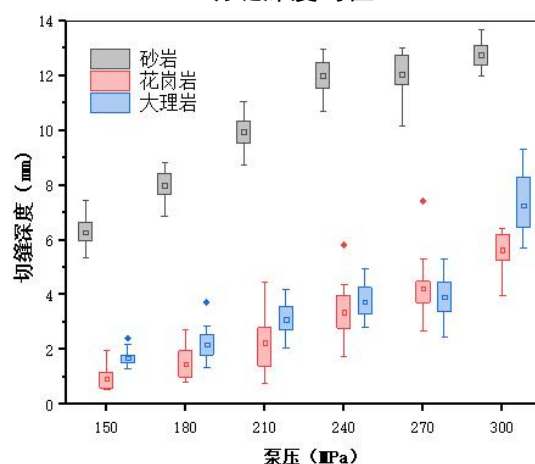
b 切缝宽度

图9 不同射流压力下切缝宽度均值与分布

Fig.9 Mean value and distribution of kerf width



a 切缝深度均值



b 切缝深度

图10 不同射流压力下切缝深度均值与分布

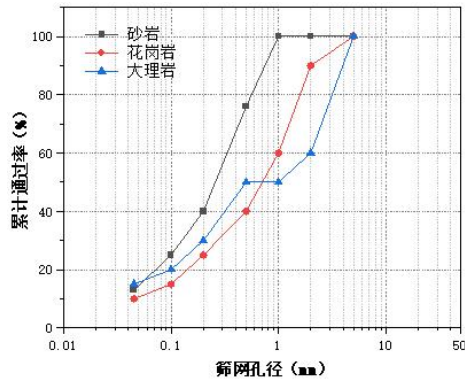
Fig.10 Mean value and distribution of kerf depth

under different jet pressures

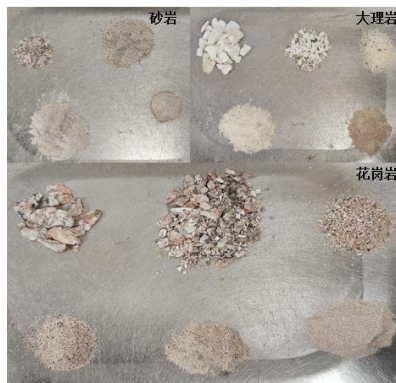
3 岩石微观损伤分析

3.1 破岩碎屑粒径分布

破岩碎屑的粒径分布有助于印证破岩机理, 如图 11 所示。试验选取的砂岩是一种典型的细粒碎屑沉积岩, 砂粒直径为 0.2mm, 由筛分曲线可知, 在高压水射流作用下破岩碎屑的粒径主要集中在 0.1~1mm, 未收集到粒径 >1mm 的砂岩碎片, 说明高压水射流作用到砂岩表面会直接将局部岩石粉碎侵入岩石中, 几乎不受应力冲击影响。大理岩和花岗岩均收集到较多岩片, 其中大理岩破岩碎屑的粒径主要集中在 >1mm 和 <0.5mm 范围, 中间范围出现缺失, 说明高压水射流作用于大理岩表面时的破岩碎屑以穿晶破坏产生的岩粉及应力冲击破坏产生的岩片为主。在 300MPa 的高压水射流作用下, 花岗岩主要的破岩碎屑包括穿晶破坏产生的颗粒较小的岩粉、沿晶破坏产生的长石与石英颗粒及应力冲击作用产生的较大岩屑, 所以花岗岩各粒径的岩屑分布较均匀。



a 筛分曲线



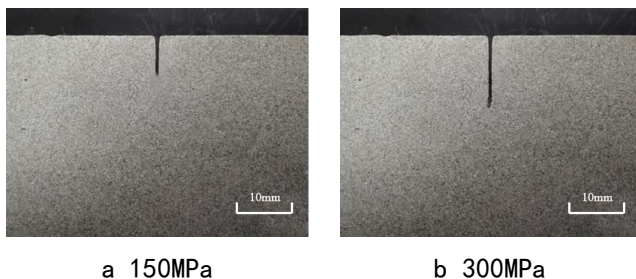
b 筛分产物

图 11 岩石产物筛分结果

Fig. 11 Screening results of rock products

3.2 岩石内部裂纹扩展

通过荧光法进一步观察试验过程中岩石的内部损伤结果,如图 12 所示。由于试验所选用砂岩孔隙度较大,涂抹的荧光液渗透性强,荧光法效果不佳。从切缝的横截面形态分析观察,当射流压力为 150MPa 时,出现约 6mm 切缝,切缝形态与 Cai 等^[17]描述的锥形孔相似,但切缝断口较为规则几乎无额外损伤;当射流压力升至 300MPa 时,产生约 12mm 深切缝,切缝形态未发生变化。



a 150MPa

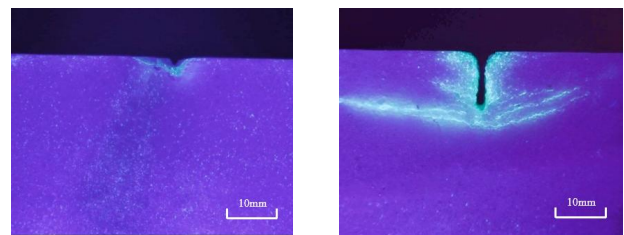
b 300MPa

图 12 不同射流压力下砂岩剖面

Fig. 12 Sandstone profile at different jet pressures

大理岩内部损伤如图 13 所示,当射流压力为 150 MPa 时高压水射流冲击到大理岩表面,在冲击中心形成损伤破坏,并在破碎坑周围形成损伤裂纹,此时裂

纹数量较少,只有 1 条向岩石表面发展的侧向裂纹。当射流压力为 300MPa 时,高压水射流在冲击应力波作用下对大理岩产生破坏形成较深切缝,切缝形态为“长颈漏斗”形^[18],其特征是顶部为漏斗形,深度在约 6mm 处为手柄形。高压水射流对晶体边界的侵蚀作用导致切缝的邻近区域产生了密集的微裂纹。由于大理岩本身抗拉强度较低,所以在切槽底部形成较多拉伸损伤裂纹。因大理岩结晶颗粒分布较均匀,所以裂纹在切缝两边扩展分布相似,裂纹相对于切缝垂直线呈 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 夹角且长度大多在 6~15mm,有的延长至 20mm。由于裂纹几乎都是向岩石切割表面发展,而侧向裂纹与自由面围成的区域将会成为潜在剥落区域,有利于后续破碎。



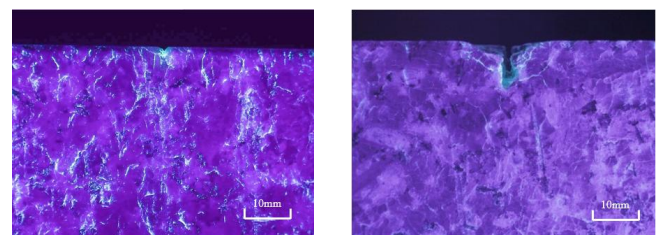
a 150MPa

b 300MPa

图 13 不同射流压力下大理岩剖面

Fig. 13 Marble profile at different jet pressures

花岗岩内部损伤如图 14 所示,在 150MPa 时高压水射流的穿透力不足,花岗岩表面几乎不产生破碎坑,此时裂纹以竖向裂纹为主,几乎无侧向裂纹,同时通过将荧光液涂满岩石表面可清晰发现,花岗岩内部天然裂纹较多且随机分布无明显规律性。当射流压力达到 300MPa 时,相较于大理岩,花岗岩切缝深度更小(约为 4mm)。观察切槽周围裂纹扩展,发现花岗岩内部竖向裂纹减少,而侧向裂纹增加,可看到明显的穿晶破坏和沿晶破坏。



a 150MPa

b 300MPa

图 14 不同射流压力下花岗岩剖面

Fig. 14 Granite profile at different jet pressures

4 结语

通过对 3 大类岩石即砂岩、大理岩与花岗岩的高压水射流切缝特征调查发现,随着射流压力增大,3 种岩石的切缝深度都有增加。当射流压力 > 240 MPa 时,碎屑结构的砂岩的切缝深度增加趋势大大减缓,

而结晶结构的大理岩切缝深度的增幅则有明显增加。对于同样为结晶结构的花岗岩,则在 210MPa 时切缝深度的增幅开始增加。在高压水射流作用下砂岩表面形成笔直平整的切缝,未出现破碎坑,大理岩表面产生连续破碎带,花岗岩表面出现较大破碎坑,但破碎坑数量较少。产生这种差异的原因在于,高压水射流切割下 3 种岩石的破坏机理不同:砂岩的损伤主要来自于射流的侵蚀作用,骨架间胶结物被冲刷剥落,应力冲击作用不强,切缝横截面周围未观察到微裂纹;除侵蚀作用外,2 种强度更高的结晶岩的损伤还受应力冲击作用影响,大理岩主要发生了穿晶破坏形成“长颈漏斗”形切槽,花岗岩在更强的水楔作用影响下发生了大量沿晶破坏,最终有较大岩片剥落。

参考文献:

- [1] 鲁义强,李光.深部高应力隧道 TBM 护盾长度和推力计算方法研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(2):577-585.
- LU Y Q, LI G. Research on TBM shield length and thrust calculation method of deep high-stress tunnel[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2022,18(2):577-585.
- [2] 王旭,李晓,廖秋林.岩石可掘进性研究的试验方法述评[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):67-73.
- WANG X, LI X, LIAO Q L. A review of test methods for rock excavability studies[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2009,5(1):67-73.
- [3] 龚秋明,许弘毅,李立民.岩石磨蚀性指数分级讨论[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):748-758.
- GONG Q M, XU H Y, LI L M. Rock abrasiveness index grading discussion[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021,17(3):748-758.
- [4] SUMMERS D A. Water jetting technology[M]. London, UK.: E&F N SPON.
- [5] ZHANG J, YANG F, CAO Z, et al. In situ experimental study on TBM excavation with high-pressure water-jet-assisted rock breaking[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(12): 4066-4077.
- [6] PENG J, WONG L N Y, **TEH C I**. Influence of grain size heterogeneity on strength and microcracking behavior of crystalline rocks[J]. Journal of geophysical research: solid earth, 2017, 122(2): 1054-1073.
- [7] 徐小荷,余静.岩石破碎学[M].北京:煤炭工业出版社,1984.
- XU X H, YU J. Rock fragmentation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1984.
- [8] 廖华林,李根生,易灿.水射流作用下岩石破碎理论研究进展[J].金属矿山,2005(7):1-5,66.
- LIAO H L, LI G S, Yi C. Research progress of rock fragmentation theory under the action of water jet[J]. Metal mine, 2005(7):1-5,66.
- [9] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during collapse of a spherical cavity[J]. Philosophical magazine, 1917, 34: 94-98.
- [10] POWELL J H, SIMPSON S P. Theoretical study of the mechanical effects of water jets impinging on a semi-infinite elastic solid[J]. Rock mechanics and mining science, 1969(6): 353-364.
- [11] REHBINDER G. A theory about cutting rock with a water jet[J]. Rock mechanics, 1980, 12(3-4): 247-257.
- [12] LU Y, HUANG F, LIU X, et al. On the failure pattern of sandstone impacted by high-velocity water jet[J]. International journal of impact engineering, 2015, 76: 67-74.
- [13] SUMMERS D A, HENRY R L. Water jet cutting of sedimentary rock[J]. Journal of petroleum technology, 1972, 24(7): 797-802.
- [14] MOMBER A W. Deformation and fracture of rocks due to high-speed liquid impingement[J]. International journal of fracture, 2004, 130(3): 683-704.
- [15] FORMAN S E, SECOR G A. The mechanics of rock failure due to water jet impingement[J]. SPE J.,1974, 14: 10-18.
- [16] **Hood M, NORDLUND R L, & THIMONS E. (1990). A STUDY OF ROCK EROSION USING HIGH PRESSURE WATER JETS. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 27, 77-86.**
- [17] CAI C, WANG X, YUAN X, et al. Experimental investigation on perforation of shale with ultra-high pressure abrasive water jet: shape, mechanism and sensitivity[J]. J. Nat. Gas Sci. Eng.,2019,67:196-213.
- [18] HUANG F, ZHAO Z, LI D, et al. Investigation of the breaking manifestations of bedded shale

impacted by a high-pressure abrasive water jet[J].

Powder technology, 2022, 397: 117021.