DOI：10.16285/j.rsm.2021.0883

切槽对 TBM 刀具破岩机制的影响研究

周 辉[1,2]，徐福通[1,2]，卢景景[1,2]，高 阳[1,2]，肖建成[1,2]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：高压水射流与机械滚刀相联合破岩技术的出现，改变了传统隧道掘进机（tunnel boring machine，简称 TBM）的作业方式。以高压水射流在滚刀两侧岩体切槽的破岩模式为研究对象，开展常截面滚刀压头贯入不同预切槽深度白砂岩板状试样的试验和数值模拟计算分析，对破裂后图像进行 DIC 分析，研究发现：切槽的存在，阻断了刀具贯入裂纹的拓展，使能量能够更加集中于压头下方的局部岩石块体，有利于形成“八”字形贯通裂纹，促进岩石的破碎；随着槽深增加，压头下方岩石内部的应力状态和力学响应分区逐渐过渡改变。槽深较大时，压头下方的力学响应区域在原有裂纹扩展区、弹性区之间增加了破坏过渡区，该区域内微裂纹被压密，区域内岩石存在较大变形，但未出现明显破坏；切槽后，滚刀压头下方的岩体破坏机制由无切槽试样挤压剪切为主导的径向裂纹拓展，演变为由刀具和切槽共同控制作用—拉伸剪切为主导的主裂纹扩展。

关 键 词：TBM；贯入试验；切槽深度；联合破岩；破岩机制

中图分类号：TD231.62 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2022) 03－0625－10

Influence of pre-cutting groove on rock breaking mechanism of tunnel boring machine disc cutter

ZHOU Hui[1,2], XU Fu-tong[1,2], LU Jing-jing[1,2], GAO Yang[1,2], XIAO Jian-cheng[1,2]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The emergence of rock breaking technology combined with high-pressure water jet and mechanical disc cutter has changed the operation mode of traditional tunnel boring machine (TBM). The research object is the rock-breaking mechanism of the high pressure water jet cutting grooves into the rock mass on both sides of the disc cutter. We carry out tests and numerical simulations of white sandstone slab samples with constant cross-section indenters penetrating into different pre-cutting groove depths. We use the DIC method to analyze the post-fracture images. The results show that: (1) The existence of the cutting groove blocks the expansion of the penetration crack of the indenter, so that the energy can be more concentrated on the local rock block, which is conducive to the formation of the splayed cracks and promotes the fracture of the rock. (2) With the increase of groove depth, the stress state and mechanical response zones inside the rock under the indenter are changed gradually. When the groove is deep, the mechanical response zone under the indenter further presents a failure transition zone, which locates between the original crack propagation zone and the elastic zone. In this area, micro-cracks are compacted, and the sample shows obvious deformation, but no obvious failures. (3) The use of grooving changes the rock failure mechanism under the indenter. Without grooving, the mechanism shows the radial crack growth dominated by extrusion shear of the complete specimen, whereas after grooving, it shows the main crack propagation that dominated by tensile shear controlled by both the indenter and the grooves.

Keywords: TBM; penetration test; groove depth; combined rock breaking; rock breaking mechanism

1 引 言

全断面隧道掘进机（tunnel boring machine，简称 TBM）是通过刀盘施加扭矩和推力，实现岩体破碎的大型工程装备，具有高效、快速、优质、安全等突出优势，特别在硬岩隧道建设领域应用广泛[1]。

收稿日期：2021-06-11 修回日期：2021-12-15

基金项目：中国科学院基础前沿科学研究计划（No.ZDBS-LY-DQC022）；国家自然科学基金项目资助（No.41941018）；中国科学院科技服务网络计划（STS 计划）项目（No.KFJ-STS-QYZD-174）；华能集团科技项目（No.HNKJ19-H14）。

This work was supported by the Key Research Program of Frontier Sciences(ZDBS-LY-DQC022), the National Natural Science Foundation of China (NSFC)(41941018), the Science and Technology Service Network Initiative (KFJ-STS-QYZD-174) and China Huaneng Group Technology Project (HNKJ19-H14).

第一作者简介：周辉，男，1972 年生，博士，研究员，博士生导师，主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

通讯作者：卢景景，女，1985 年生，博士研究生，主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: jjlu@whrsm.ac.cn

TBM 滚刀直接与岩体产生相互作用，通过开展滚刀破岩模型和机制的研究，对于提高的 TBM 破岩能力和掘进效率具有重要意义[2]。

滚刀破岩过程可以分为两个阶段[3]，一是在刀盘推力作用下，滚刀侵入岩体一定深度，并在岩体内部产生不同形式的裂纹，从而致裂岩体；二是通过刀盘施加扭矩，滚刀旋转切削岩体，相邻滚刀间侧向裂纹拓展交汇，连接岩体表面，片起形成碴片。由此可见，岩石内部裂纹的萌生、拓展与 TBM 的破岩方式及机制密切相关。因此，为探究岩石内部裂纹演化特征对破岩效率的影响，分析破岩机制对提高 TBM 破岩能力的潜在可行性，研究人员基于理论研究和经验方法建立了不同形式的破岩模型。Evans[4]提出的挤压破岩模型认为，当滚刀施加在岩石表面的压应力超过岩石的单轴抗压强度时，岩石被破坏；Ozdemir 等[5]假定滚刀法向力是由压碎岩石的挤压力和相邻滚刀之间破坏岩石的剪切力构成，挤压力和剪切力是滚刀破岩的主要原因。Sanio[6]提出的挤压−张拉模型认为：滚刀破岩是刀具下方挤压破坏形成密实核和相邻滚刀间岩石张拉片起共同作用的结果。Rostami 等[7]提出的 CSM 模型认为，挤压、拉伸和剪切复合模式的破岩理论比较符合实际。上述学者所开展不同破岩机制的探索和研究，对提升 TBM 的破岩能力发挥了重要作用。

随着技术进步，日趋复杂的工程地质条件和不断提高的市场效率需求为 TBM 的发展带来了新的挑战，常规 TBM 的破岩方式随之变化。近年来，为提高 TBM 的破岩效率，机械刀具与高压水射流联合破岩的技术[8-11]受到了广泛关注。常规破岩理论的研究是基于刀具−岩体的相互作用过程提出的，通常假定 TBM 破碎岩体是由机械刀具做功完成。目前，我们虽然在不同尺度和方法上[12-18]分析了机械滚刀的破岩机制，但是在 TBM 刀具结合新技术的联合模式下，对破岩过程和机制的认识尚不明确。Ciccu 等[19]设计的水射流辅助滚刀破岩系统，将水射流喷嘴安装在滚刀侧面，试验分析了组合作用下的破岩性能，发现水射流能够显著降低岩石的剪切强度。由于水射流切割岩体之后，降低了后续刀具施加的破岩力，常规破岩理论的适用条件发生变化。因而，有必要在开展水射流切割后，滚刀滚压相邻切槽自由面分割的岩体时（如图 1 所示），对岩体内部的变形破坏特征和机制进行研究。

常截面（constant cross section，简称 CCS）滚刀是硬岩 TBM 的主要刀型之一，目前学术界普遍认为，其对岩石内部造成破坏是拉伸和剪切两种形式同时作用的结果[20]。研究表明，滚刀推力对裂纹的萌生和拓展具有重要作用，贯入法向力是岩石内部裂纹系统形成的主要诱导因素[12]。大量室内试验[13-15]和数值模拟[16-18]证明，刀具破岩过程可以简化为不同形式压头的二维贯入问题。在理论方面，描述半空间无限体表面弹塑性贯入过程的空腔膨胀模型[21-24]，将压头压力作用下的岩石分为不同的响应区域，以此研究岩石的破坏现象和机制。

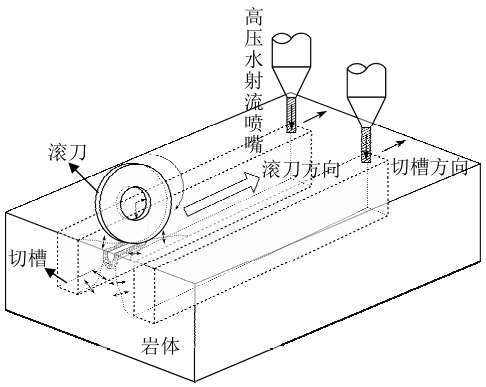


图 1 机械滚刀−高压水射流联合破岩示意图

Fig.1 Schematic diagram of the rock breaking technique combining high pressure water jet and mechanical disc cutter

上述成果表明，板状岩石试样的贯入研究具有可行性[25]。本文通过预制切槽模拟水射流切缝，开展常截面压头贯入预切槽板状砂岩试样的试验和数值模拟，结合数字图像相关分析，研究不同切槽深度试样的变形破坏特征和破岩机制。

2 试验和数值模拟方案

当高压水射流装置安装在滚刀侧前方时，会首先在滚刀两侧形成一定深度的水力切槽，随后机械滚刀滚压两切槽之间的岩体，如图 1 所示。为了研究机械滚刀切割带槽岩体的破岩机制，对试样进行预切槽，并开展滚刀贯入试验和数值模拟分析。

2.1 试验方案

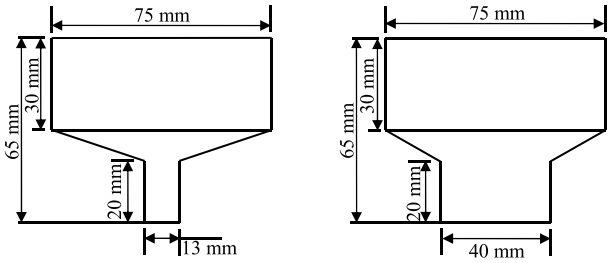
考虑了尺寸效应对试样边界的影响[23]，制备 210 mm×100 mm×40 mm 尺寸的板状砂岩试样，试样无层状节理[26]且均质性较好，岩石的基本力学参数见表 1。采用直径为 150 mm 的金刚砂轮对板状试样切槽，形成宽度为 2 mm、间距为 60 mm 的切槽，获得槽深 h 分别为 0、10、20、30、40、50 mm 的岩石试样，其中，0 mm 为对照组试样，不进行预切槽处理。

试验在 RMT-150C 电液伺服刚性试验机进行，考虑到缩尺试验压头尺寸没有统一的设计标准，以

表 1　岩石试样物理力学参数
Table 1　Physical and mechanical parameters of rock sample

试样类型	单轴抗压强度σ_c/MPa	抗拉强度σ_t/MPa	弹性模量E/GPa	密度/(kg·m^{-3})	泊松比ν
白砂岩	64.43	5.54	13.96	2 414	0.23

及 RMT 试验机内部空间尺寸限制，采用自制常截面刚性压头进行试验，压头入岩部位进行调质处理，压头尺寸如图 2 所示。试验中，利用自行设计的简易约束装置，对试样两侧施加侧限。



(a) 主视图　　(b) 侧视图

图 2　压头尺寸图
Fig.2　Size chart of the indenter

数字图像相关技术（digital imagine correlation，简称 DIC）是一种追踪试验物体表面应变变化和位移变化的技术[27]，采用 DIC 技术记录岩石试样贯入的破裂过程，试样表面用白色底漆和黑色漆散点喷涂制造散斑，如图 3 所示。在整个试验阶段，用索尼 4K 高清摄像机记录拍摄，帧率为 25 帧/秒，图像分辨率为 2 048×1 080，如图 2 所示。试样加载完成后，利用 DIC 分析软件 PhotoInfo 获取并分析试样的位移矢量图和位移云图[28]。

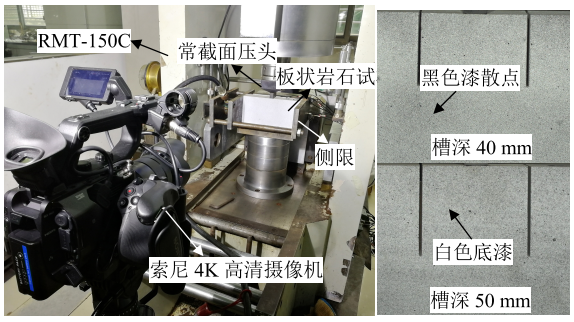


图 3　板状岩石试样贯入试验
Fig.3　The penetration test of the slab rock specimens

2.2　单把滚刀贯入弹性分析

TBM 刀盘上单把滚刀接触岩体的瞬间，可以将掘进方向的岩体视为半无限弹性空间体，对于半无限弹性空间体表面受垂直集中力作用时，岩体内部的应力分布与变形问题，可以称为 Boussinesq 问题[29]。

如图 4 所示，半无限空间体受集中力荷载 Q 作用，可以将空间中σ_z（σ_z为集中力 Q 作用后半无限宽间的法向应力）相同的点连接成曲面，可以得到σ_z的等值线图，所述空间曲面的形状如泡状，也被称为应力泡[30]，图中，$p = Q/(1\ \mathrm{m}^2)$，其中，p 为集中力荷载 Q 作用下半无限空间体内的应力。

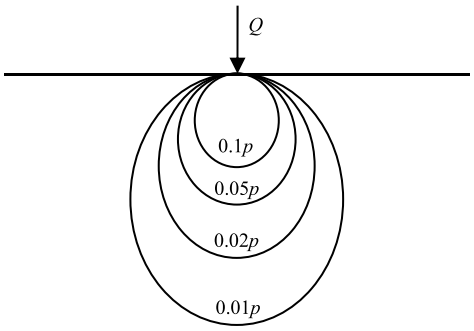


图 4　σ_z 的等值线图[30]
Fig.4　Contour plot of σ_z[30]

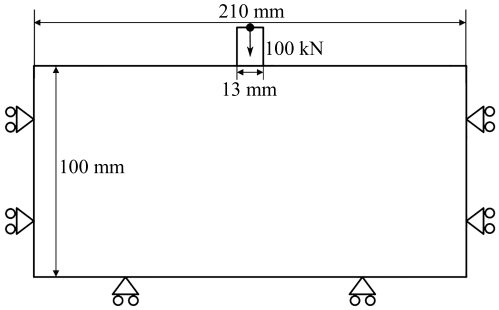
这样就把滚刀贯入模型简化为半无限弹性空间体的受压问题，当滚刀对岩体施加压力但尚未侵入时，可以获得滚刀下方岩体内部的应力场。特别是对于均质性较好的岩体，滚刀作用在岩体不同深度时，岩体内部可以出现不同的应力分区，并以滚刀作用点为中心，以不同梯度椭圆形应力泡的形式扩散。

板状试样常用来分析岩体贯入受压时的受力状态[25]，建立板状砂岩试样同尺寸的二维平面模型，试样尺寸为 210 mm×100 mm，试样的基本力学参数见表 1，对常截面宽度为 13 mm 的压头施加 100 kN 的法向压力，限制试样底部和两侧的位移，采用有限元软件 Abaqus 对试样的刀具贯入过程进行弹性分析，如图 5 所示，图为板状岩石试样的加载概念图。

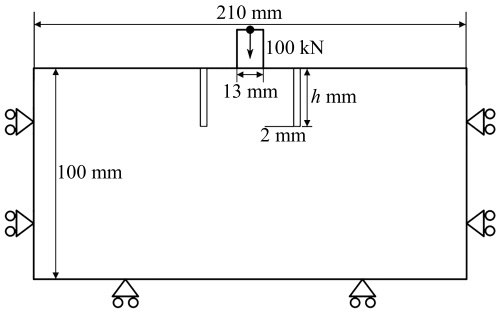
3　不同槽深板状砂岩贯入试验研究

3.1　板状砂岩试样贯入试验分析

图 6 为常截面刀具侵入板状岩石的荷载贯入度曲线，可以观察到，试样自贯入开始直至达到峰值荷载破坏，基本上经历了微裂隙压密、弹性阶段和塑性阶段等 3 个过程。研究不同切槽深度的荷载贯入度曲线，可以发现，试样切槽之后，达到峰值荷载强度对比无切槽试样有明显降低，如图 7 所示。然而，与块状试样预切槽贯入试验相比[31]，切槽深



(a) 无切槽试样加载概念图



(b) 切槽试样加载概念图

图 5 试样加载概念图

Fig.5 Conceptual diagram of sample loading

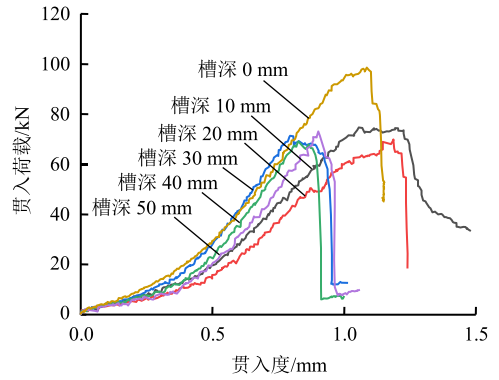


图 6 不同切槽深度岩石试样荷载贯入度曲线

Fig.6 Load-penetration plots of rock samples with different depths of pre-cutting grooves

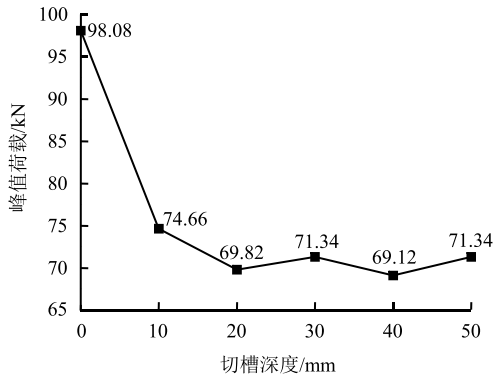


图 7 峰值荷载随切槽深度变化趋势图

Fig.7 Plot of peak load versus grooves depth

度改变对峰值荷载影响并不明显，说明试样厚度较小且前后两面为临空面时，当板状试样仅为两侧施加侧限，受到泊松效应的影响，切槽深度对峰值荷载的影响效果并不显著。

3.2 板状岩石试样破坏效果分析

图 8 为不同切槽深度试样裂纹破坏阶段的图像。试样在刀头的贯入作用下，由微小赫兹裂纹到宏观可见主裂纹的发育过程可以分为两种类别，其一是切槽较浅时，刀具下方形成贯穿试样的主裂纹；其二是切槽较深时，刀具正下方两切槽之间，形成了明显的“八”字形裂纹[30]，如图 9 所示。图 8 中，T1～T3 时刻表示试样逐渐破坏的 3 个阶段，两种不同切槽深度试样的 T1 时刻并不表示相同加载时间。

试样切槽较浅时，刀具正下方的微裂隙被压碎为粉末状的密实核，随着贯入度增加，岩石内部裂纹发育，沿着贯入垂直方向形成向下扩展的主裂纹。值得注意的是，压头正下方主裂纹在初始贯入阶段并不明显，随着贯入度增加，试样表面呈现出明显的裂纹特征，且裂纹一端为常截面刀具入岩直角处的应力集中区。由于试样正下方处于静水压力状态，试样密实度较高，不利于裂纹显现，因此主裂纹呈现出“由下而上”的发育特点。

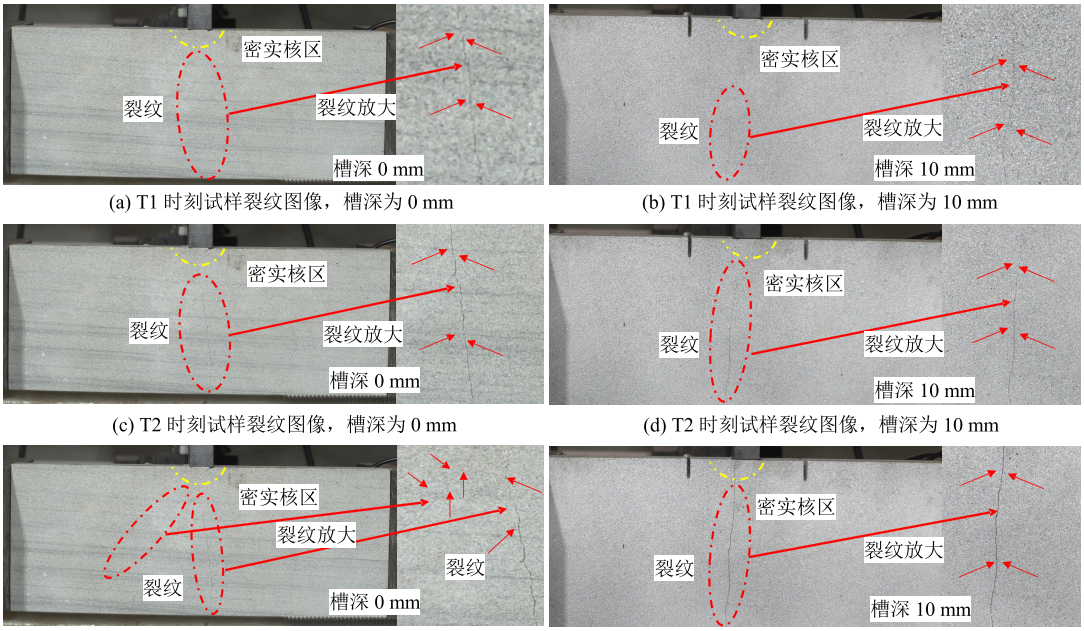
随着预切槽深度增加，压头下方的裂纹拓展特征发生明显变化。以槽深 50 mm 为例，如图 9 所示，为压头逐渐贯入试样后，不同加载阶段 T1～T6 时刻的裂纹图像。在法向荷载的作用下，压头下方出现明显的密实核区域和裂纹显现，且裂纹的起止端分别为常截面压头入岩截面直角处与切槽底部的应力集中区，并最终形成由切槽分割的局部破坏区。然而，研究发现压头下方的“八”字形裂纹并非同时对称形成，裂纹发育总有一侧是首先破坏的。

考虑到岩体的非均质性及裂隙演化的不确定性，在压头作用下，当一侧首先达到裂纹尖端破坏的强度极限，由刀具下方密实核的边缘形成具有破坏角的主裂纹，并且随着压头的进一步贯入，滚刀下部材料继续变形膨胀，该侧的切槽随着岩石块体的膨胀逐渐闭合，压头的另一侧的裂纹开始形成。

4 切槽对刀具破岩机制的影响分析

4.1 裂隙变形拓展机制

刀具下方裂纹的发育、拓展到开裂的过程，伴随着岩石试样表面黑色喷漆散点的点位变形，提取岩石裂隙发育的过程图像，采用数字图像相关分析板状岩石试样表面点位的位移[32]，用蓝色方形虚线框选取数字图像相关分析的区域，如图 9 所示，X



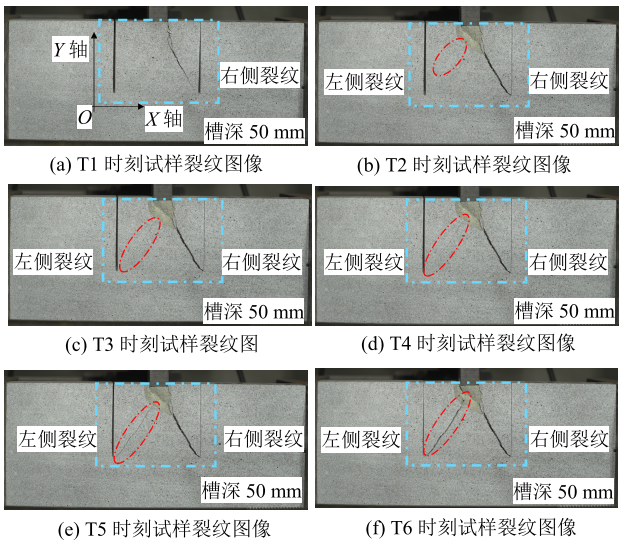
(a) T1 时刻试样裂纹图像，槽深为 0 mm　(b) T1 时刻试样裂纹图像，槽深为 10 mm

(c) T2 时刻试样裂纹图像，槽深为 0 mm　(d) T2 时刻试样裂纹图像，槽深为 10 mm

(e) T3 时刻试样裂纹图像，槽深为 0 mm　(f) T3 时刻试样裂纹图像，槽深为 10 mm

图 8　浅切槽裂纹扩展图

Fig.8　Crack propagation snapshots of the shallow-grooved samples



(a) T1 时刻试样裂纹图像　(b) T2 时刻试样裂纹图像

(c) T3 时刻试样裂纹图　(d) T4 时刻试样裂纹图像

(e) T5 时刻试样裂纹图像　(f) T6 时刻试样裂纹图像

图 9　槽深 50 mm 不同阶段裂纹扩展图

Fig.9　The crack propagation snapshots of different stages at a groove depth of 50 mm

轴和 Y 轴分别表示分析区域的水平和竖直方向。

高清相机可以捕捉岩石试样自压头开始贯入到断裂破碎的全过程，取压头开始加载时的试样为基准图像，随着加载的进行，试样发生变形，直至达到破坏状态时，可以获得试样的最大表面点位移状态。以槽深 50 mm 试样为研究对象，利用 DIC 分析软件 PhotoInfo 可以获取试样的位移矢量图和位移云图[27]，如图 10、11 所示。

槽深 50 mm 最终破坏状态的位移矢量图显示，如图 10 所示，刀具下方与两切槽底部之间可以观察到明显的“八”字形裂纹，刀具正下方则为完全破碎的密实核区域，局部位移的方向较为混乱，但是压头正下方整体呈现受压向下的趋势，这一点在远离压头的区域表现较为清晰。

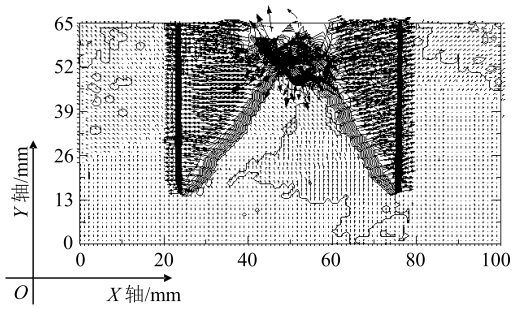


图 10　槽深 50 mm 试样位移矢量图

Fig.10　The displacement vector of the sample with a groove depth of 50 mm

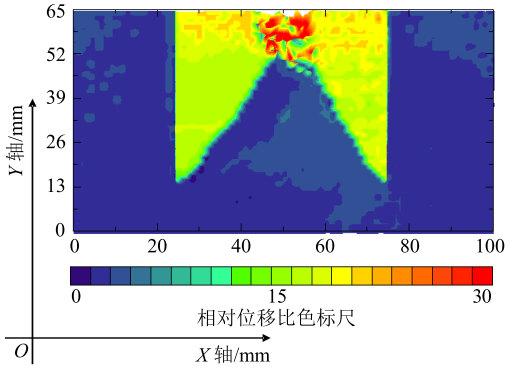


图 11　槽深 50 mm 试样位移云图

Fig.11　Snapshot of the displacement magnitude of the sample with a groove depth of 50 mm

在压头下方“八”字形裂纹与切槽之间的区域，试样表面的点位移分别向两侧发展，说明压头贯入过程中，逐渐挤压两侧岩石，在此过程中，岩石内部裂纹逐渐拓展，当裂纹尖端发育并贯通连接入岩刀具截面直角和切槽底部应力集中区时，在刀具挤压作用下，“八”字形裂纹形成，试样受拉破坏，破碎为两侧近似三角形的块体。

将试样的位移云图和位移矢量图结合研究可以发现，切槽外侧的试样区域几乎没有受到试样贯入过程的扰动，表明切槽形成的自由面阻断了刀具贯入裂纹的拓展，使能量能够更加集中于该局部岩石块体，促进岩石的破碎。

4.2 荷载作用岩石试样的弹性分析

采用有限元软件 Abaqus 对不同深度预切槽试样的刀具贯入过程进行弹性分析，如图 12 所示，运算得到最大主应力分布云图，其中负值表示压应力，正值表示拉应力。

如图 12(a)所示，对于无切槽试样，常截面压头下方产生以压力作用点为中心，以不同梯度椭圆形应力泡形式扩散的应力分布，并且随着深度增加，应力的降低幅度加快，法向力作用对距离压头贯入点深部岩体的影响范围减弱。

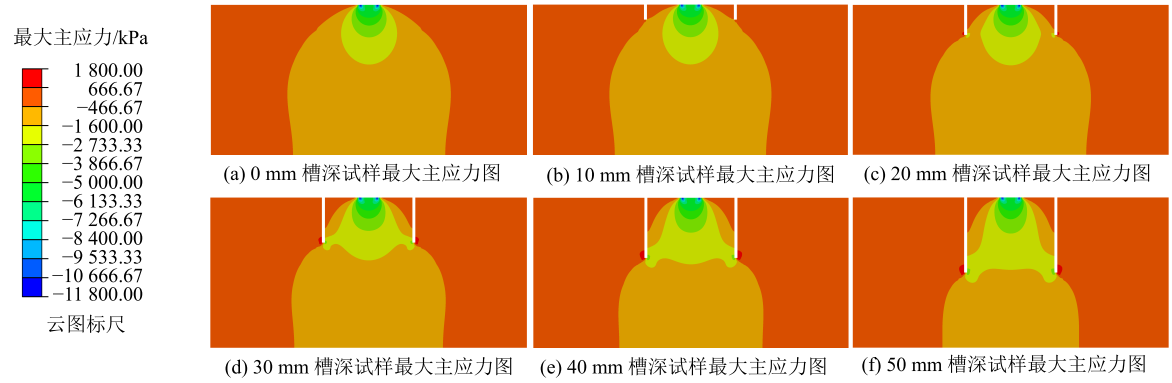


图 12 不同切槽深度试样最大主应力云图

Fig.12 Contours of the maximum principal stress of samples with different depths of grooves

对比不同切槽深度试样的最大主应力分布云图，可以观察到压头下方的应力分布存在较大差异。刀具贯入作用下，所有试样都存在代表密实核区域的绿色应力云图，随着切槽深度增加，切槽行为对板状岩石试样的应力分布影响变大，切槽底部出现应力集中现象。

当无切槽（槽深为 0 mm）或槽深分别为 10、20 mm 较浅切槽时，切槽对试样的应力分布影响较小，这一结果与图 8 的试验现象一致，证明浅切槽对岩石的贯入破坏难以起到有效的促进作用。当切槽深度达到 30、40、50 mm 时，刀具下方应力云图不再以刀具为中心呈现不同梯度的半椭圆形，而是在中心密实核应力区外侧，形成了连接切槽底部的异形应力响应区，该区域底部边界与两切槽底部连接线近似重合，随槽深不同有所变化。因此，说明切槽行为改变了岩石试样的应力分布，半无限弹性空间的应力分布不适用于切槽条件下岩体的贯入问题。

每隔 10 mm 提取刀具正下方试样中心线上节点的应力数据，并绘制出不同切槽深度试样的最大主应力变化趋势图，如图 13 所示，压应力为负值。切槽行为有助于刀具集中能量对槽体隔离的局部块体破坏，然而，增加切槽深度虽然有助于提高节点的压应力，但是应力增加的数值并不明显，切槽行为对刀具正下方块体的破坏影响较弱。

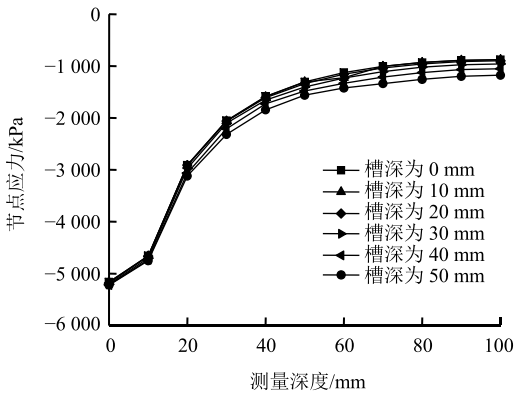


图 13 刀具正下方节点最大主应力变化趋势图

Fig.13 Plot of the maximum principal stress versus the measurement depth at the position below the cutter

刀具正下方最大主应力数值的模拟结果和半无限空间弹性体应力分布的结果并不一致，是因为数值模拟的集中力作用在刀具上，对应力的传递产

生影响；二是因为受到边界条件的影响，板状试样的贯入问题不能视为是半无限弹性空间的求解问题，局部的尺寸效应产生了巨大的影响，这一现象需要进一步论证研究。

同样地，对不同槽深试样每隔 10 mm 提取切槽两侧试样节点的最大主应力值，并绘制趋势图，如图 14 所示，图例虚线表示切槽内侧，即距离试样中心线 29 mm；实线表示切槽外侧，即距离试样中心线 31 mm。由于试样对称布置，因此仅需提取一侧数据。当槽深 0 mm 时，切槽部位两侧节点的最大主应力值几乎相等，并随着切槽深度的增加表现为一致趋势。当存在切槽时，在槽的底部两侧折角处，显示为内侧受压外侧受拉的现象，且随着切槽深度的增加，内外侧应力的差值增大，之后槽两侧节点对应测量深度的应力值回归相同数值与走势，说明槽深增加有助于提高破岩效果，但是在切槽底部以下的位置，切槽仅能对槽深范围内的岩石贯入破坏效果产生影响。

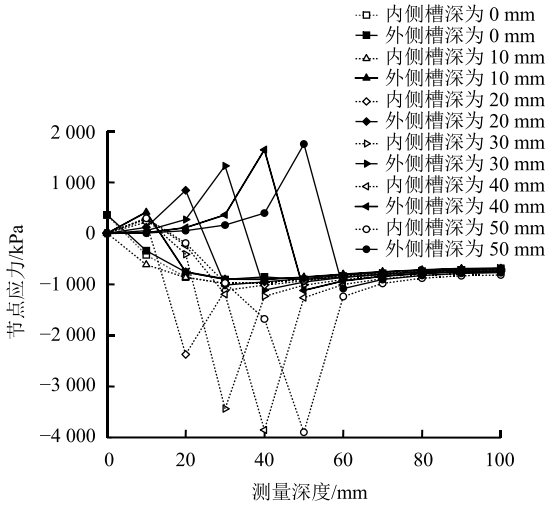


图 14　切槽两侧节点最大主应力变化趋势图

Fig.14　Plots of the maximum principal stress versus the measurement depth at the positions on both sides of the groove

4.3　岩石响应分区变化

常截面刀具贯入无切槽试样时，滚刀截面接触岩体的直角部位出现应力集中，该处岩体内部的微裂纹和缺陷首先发育形成赫兹裂纹[19]。随着贯入荷载增加和滚刀压入，刀具下方岩体形成了半椭圆形的高应力压碎区，此时岩石主要受到来自滚刀的挤压力作用，岩碴呈现粉末状，该压碎区为静水压力状态的密实核区域。密实核区内部岩体完全为粉碎状态，可以传递上部刀具施加的三维压力。当滚刀继续压入岩体时，密实核所处的高压力粉碎区外侧岩体更容易受到挤压力的破坏，形成压剪破坏主导的裂纹起裂区域[20, 33]，该区域的岩体未完全粉碎，宏观裂纹通常在此区域发育扩展。

随滚刀进一步贯入，已经侵入岩体的刀头部分，会对裂纹起裂区域外侧岩体挤压剪切，促使周边岩体膨胀变形。此时，岩体内部沿侧向、轴向为主的裂纹发育延伸并且相互交汇，在裂纹起裂区域周围形成密集拉伸裂纹的裂纹扩展区。而距离滚刀压入位置更远的区域，受到刀具挤压，产生了可恢复的弹性变形而没有产生裂纹，该区域为弹性区。更远处，不受刀具贯入扰动的区域则被称为远场区。

通过对岩石贯入过程的分析，可以将滚刀下方岩体根据其破碎过程和破碎机制划分成不同的区域。李克金等[24]应用空腔膨胀模型将滚刀贯入过程的岩石响应区划分为密实核区、破碎区、径向裂纹区、弹性区和未扰动区。本文区别其划分方法，需要研究裂纹起裂的位置，将岩体处于不同状态响应分区划分为：密实核区、裂纹起裂区、裂纹扩展区、弹性区和远场区，如图 15 所示，w、r_c、r_e 分别为常截面刀具宽度的 1/2、裂纹拓展区和弹性区的影响半径，Δw 为裂纹起裂区自密实核区边界延伸的影响范围，Q 为法向集中力。

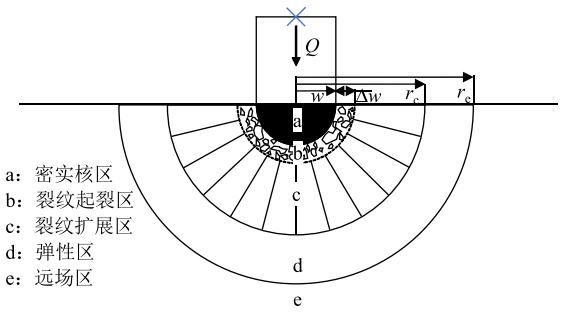


图 15　无切槽试样刀具下方岩石响应分区

Fig.15　Response zones of the sample without groove under the cutter

而对于不同槽深的预切槽试样，结合试验和数值模拟的分析结果，可以判断预切槽改变了岩石试样贯入的破岩机制，需要对预切槽试样贯入过程的力学响应问题提出新的解释。参照无切槽试样岩石力学响应分区的划分特征，如图 15 所示，对预切槽试样刀具下方岩石试样的响应分区特征进行划分，如图 16 所示，s_p 为试样中心线到切槽内侧的距离。

与无切槽试样相比，试样切槽后，岩石响应分区仍保留密实核区、裂纹起裂区、裂纹扩展区、弹性区和远场区，其具体特征与形成原因与无切槽试样类似。结合图 12 可知，不同之处在于，随着槽深

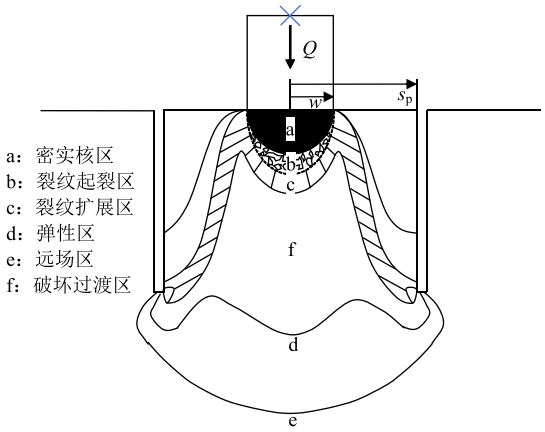


图 16 预切槽试样刀具下方岩石响应分区

Fig.16 Response zones of rock sample with the pre-cutting grooves under the cutter

增加，在近似对称“八字形”主裂纹的裂纹拓展区下方形成了连接切槽底部的异形应力响应区，即破坏过渡区。破坏过渡区为裂纹拓展区所产生宏观裂纹及破碎带下方的未脱落岩石区域，滚刀贯入过程中，该区域受上部荷载作用，岩石颗粒被压密，产生不可恢复的变形。主裂纹形成后，试样被破坏，该区域的变形和压密并不会完全消失。Cheng 等[34]将预切槽花岗岩试样贯入破坏后的岩石碎片清除之后，可以观察到表现为残留岩脊的破坏过渡区。根据图 12 数值模拟的结果，该区域与弹性区的边界近似与两切槽底部连线近似重合，随槽深不同有所变化。

试样切槽底部与刀具入岩作用位置的应力集中区为岩体受拉破坏的薄弱区，尽管刀具下方两侧主裂纹的形成时间不同，刀具贯入促使岩石内部裂纹向应力集中区发育，并连接为贯通性的主裂纹。主裂纹扩展形成后，其他裂纹难以越过主裂纹发展，因此，相应的裂纹扩展区形成以主裂纹为核心的“八”字形区域。由此，切槽试样下方的裂纹扩展区的主要破岩机制发生了变化，由无切槽试样刀具挤压剪切为主导的径向裂纹拓展演变为由刀具和切槽共同控制，以拉伸剪切为主导的主裂纹扩展。

此外，观察不同切槽深度试样的最大主应力特征，如图 12 所示，刀具下方“八”字形主裂纹与切槽底部所在深度之间属于同一应力区，与更下方区域处于不同的应力梯度，该区域上方的裂纹起裂区和裂纹拓展区基本处于破碎状态，该区域可以被视为裂纹拓展到弹性区域之间的破坏过渡区。由于“八”字形主裂纹阻碍了该区域内裂纹的发育，使该区域能够一直保持受压状态，促使区域内的微裂纹被压密，结合图 9 的试验结果，可知，区域内岩石存在较大变形，但未出现明显破坏仍保留一定的强度，使该区域有别于更下方的弹性区。

5 结 论

（1）预切槽有利于降低常截面刀具贯入致裂岩石的峰值荷载，但是受到泊松效应的影响，切槽深度对峰值荷载的影响效果并不显著。

（2）常截面刀具入岩截面直角处存在应力集中区，是试样裂纹的端点。对于预切槽试样，压头下方的“八”字形裂纹并非对称同时扩展发育，而是先在一侧形成贯通裂纹后，此时预切槽底部的内侧直角处为试样的另一应力集中区，也是裂纹的另一端点。

（3）预切槽试样贯入试验的 DIC 分析表明，切槽阻断了刀具贯入裂纹的拓展，使能量能够更加集中于该局部岩石块体，促进岩石的破碎。试样的 Abaqus 弹性分析表明，预切槽改变了压头下方岩石的受力状态，形成与无切槽试样应力泡不同的应力场分布形式。

（4）无切槽及切槽较浅时，滚刀压头下方岩样的力学响应区域可划分为：密实核区、裂纹起裂区、裂纹扩展区、弹性区和远场区；随着切槽深度增加，试样的力学响应区域逐渐过渡调整为：密实核区、裂纹起裂区、裂纹扩展区、破坏过渡区、弹性区和远场区。其中，破坏过渡区有别于弹性区，区域内试样存在较大变形但未被明显破坏。

（5）切槽后，岩体试样的破坏机制发生了变化，由无切槽时刀具挤压剪切为主导的径向裂纹拓展破坏，演变为由刀具和切槽共同控制作用—拉伸剪切为主导的主裂纹扩展破坏形式。

参 考 文 献

[1] 薛亚东, 周杰, 赵丰, 等. 基于 MatDEM 的 TBM 滚刀破岩机理研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 1): 337-346.
XUE YA-dong, ZHOU Jie, ZHAO Feng, et al. Rock breaking mechanism of TBM cutter based on MatDEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 337-346.

[2] 满林涛, 李守巨. 盘形滚刀破岩过程有限元数值模拟[J]. 工程建设, 2011, 43(4): 1-5.
MAN Lin-tao, LI Shou-ju. Finite element numerical simulation of rock-breaking process of disc cutter[J]. **Chinese Journal of Construction**, 2011, 43(4): 1-5.

[3] 潘玉丛. 不同岩石强度和围压水平下 TBM 滚刀破岩机理实验研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究

所, 2017.

PAN Yu-cong. Experimental study on rock cutting mechanism by TBM disc cutter for different rock strengths and confining stress[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2017.

[4] EVANS I. The force required to cut coal with blunt wedges[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts**. 1965, 2(1): 1-12.

[5] OZDEMIR L, WANG F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design[R]. [S. l.]: Nasa Stirecon Technical Report N80. 1979.

[6] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts**, 1985, 22(3): 153-161.

[7] ROSTAMI J, OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[C]//Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference. [S. l.]: [s. n.], 1993.

[8] CICCU R, GROSSO B. Improvement of disc cutter performance by water jet assistance[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013(47): 733-744.

[9] OH T M, JOO G W, CHA Y, et al. Effect of garnet characteristics on abrasive waterjet cutting of hard granite rock[J]. **Advances in Civil Engineering**, 2019: 1-12.

[10] OH T M, JOO G W, CHA Y, et al. Effect of abrasive feed rate on rock cutting performance of abrasive waterjet[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering** 2019, 52(9): 3431-3442.

[11] LIU S Y, ZHOU F Y, LI H S, et al. Experimental investigation of hard rock breaking using a conical pick assisted by abrasive water jet[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(1): 4221-4230.

[12] 刘泉声, 潘玉丛, 孔晓璇, 等. TBM 滚刀贯入过程中泥岩破坏特征试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 166-174.

LIU Quan-sheng, PAN Yu-cong, KONG Xiao-xuan, et al. Experimental investigation on mudstone fragmentation characteristics in indentation process by TBM disc cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 166-174.

[13] ZHANG H, HUANG G Y, SONG H P, et al. Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2012, 96: 667-675.

[14] YIN L J, GONG Q M, MA H S, et al. Use of indentation tests to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 72: 261-276.

[15] LIU Q, LIU Q S, PAN Y C, et al. Experimental study on rock indentation using infrared thermography and acoustic emission techniques[J]. **Journal of Geophysics and Engineering**, 2018, 15(5): 1864-1877.

[16] 苏利军, 孙金山, 卢文波. 基于颗粒流模型的 TBM 破岩过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2823-2829.

SU Li-jun, SUN Jin-shan, LU Wen-bo. Research on numerical simulation of rock fragmentation by TBM cutters using particle flow method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2823-2829.

[17] 孙金山, 陈明, 陈保国, 等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1891-1897.

SUN Jin-shan, CHEN Ming, CHEN Bao-guo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1891-1897.

[18] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 基于 UDEC 的隧道掘进机滚刀破岩数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1196-1202, 1209.

MO Zhen-ze, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Research on numerical simulation of rock breaking using TBM disc cutters based on UDEC method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1196-1202.

[19] CICCU R, GROSSO B. Improvement of Disc Cutter Performance by Water Jet Assistance[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013(47): 733-744.

[20] TAN X C, KOU S Q, LINDQVIST P A. Application of the DDM and fracture mechanics model on the simulation of rock breakage by mechanical tools[J]. **Engineering Geology**, 1998, 49(3): 277-284.

[21] DETOURNAY E, FAIRHURST C, LABUZ J F, A model of tensile failure initiation under an indentor[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock (MJFR-S). Vienna: [s. n.], 1995.

[22] HUANG H. Discrete element modeling of rock-tool interaction[D]. Minnesota: University of Minnesota, 1999.

[23] 陈立宪, 黄国忠, 陈尧中. 岩体贯切破坏在不同侧向自由边界的声发射演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2411-2420.
CHEN Li-xian, HUANG Kuo-chung, CHEN Yao-chung. Acoustic emission evolution in indentation fracture of rocks under different lateral stress-free boundaries[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2411-2420.

[24] 李克金, 李文, 张德文, 等. 基于空腔膨胀理论的TBM滚刀破岩模型研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(7): 583-590.
LI Ke-jin, LI Wen, ZHANG De-wen, et al. Study on rock breakage model of TBM disc cutter based on cavity expansion theory[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2020, 53(7): 583-590.

[25] 刘泉声, 刘琪, 刘学伟, 等. 楔刀作用下软硬互层岩体贯入破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1849-1855.
LIU Quan-sheng, LIU Qi, LIU Xue-wei, et al. Experimental study on penetration failure of soft-hard interbedded rock mass under a wedge indenter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 1849-1855.

[26] 王旭一, 黄书岭, 丁秀丽, 等. 层状岩体单轴压缩力学特性的非均质层面影响效应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 581-592.
WANG Xu-yi, HUANG Shu-ling, DING Xiu-li, et al. Study on the effect of inhomogeneous bedding plane on the mechanical properties of uniaxial compression of layered rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**,2021, 42(2): 581-592.

[27] 孙文进, 金爱兵, 王树亮, 等. 基于DIC的高温砂岩劈裂力学特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 511-518.
SUN Wen-jin, JIN Ai-bing, WANG Shu-liang, et al. Study on sandstone split mechanical properties under high temperature based on the DIC technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 511-518.

[28] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(8): 1684-1690.
LI Yuan-hai, JING Hong-wen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007(8): 1684-1690.

[29] 马文著. 刀齿破岩的数值模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.
MA Wen-zhu. Numerical simulation of broken rocks[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.

[30] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
LI Guang-xin, ZHANG Bin-yin, YU Yu-zhen. Soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2015.

[31] 徐福通, 卢景景, 周辉, 等. 预切槽和TBM机械滚刀的新型联合破岩模式研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1363-1372.
XU Fu-tong, LU Jing-jing, ZHOU Hui, et al. Research on combined rock breaking mode of pre-cutting groove and TBM mechanical cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(5): 1363-1372.

[32] ZHANG H, HUANG G Y, SONG H P, et al. Experimental investigation of deformation and failure mechanisms in rock under indentation by digital image correlation[J]. **Engineering Fracture Mechanics** 2012, 96: 667-675.

[33] 李亮. TBM双滚刀破岩仿真分析及试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
LI Liang. Simulation analysis and experimental research on rock breaking of TBM double disc cutter[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.

[34] 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): 1-18.