

# 预制孔几何参数对盘形刀盘侵岩力学特性影响试验研究

袁超<sup>1,2</sup>, 黄煊祺<sup>1</sup>, 王卫军<sup>1,2</sup>, 万文<sup>1,2</sup>, 吴海<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为研究预制孔几何参数对盘形刀盘侵岩力学特性的影响规律, 采用室内试验与数值模拟相结合的方法, 对含不同几何参数预制孔试件开展了盘形刀盘双轴侵岩力学试验, 分析了侵入力、侵入能耗和侵入难度系数随孔排列方式、孔角度与孔深度的变化特征, 研究了裂纹时空演化过程, 揭示了预制孔诱导裂纹扩展路径的作用机理。研究结果表明: 与完整试件相比较, 排间距和孔间距的变化会明显影响侵岩效果, 大排间距(4, 5 mm)和小孔间距(1 mm)效果显著优异; 含孔试样的最大侵入力、侵入能耗、侵入难度系数随角度的减小而明显的降低; 孔深度越大, 其能够降低最大侵入力的效果逐渐减弱; 试件的主要裂纹演化顺序为剪切裂纹→混合裂纹→张拉裂纹; 预制孔有较为明显引导裂纹扩展路径的作用, 通过优化预制孔参数可加快破岩进程。当预制孔角度较大时, 其中轴线附近向下扩展的裂纹越长; 当预制孔角度较小时, 裂纹能够快速扩展至孔洞底部, 使裂纹局限于孔洞之间, 破坏更为充分。研究成果可为预破坏辅助盘形滚刀侵岩、减少刀盘磨损提供技术支持。

**关键词:** 预制孔; 几何参数; 力学特性; 裂纹扩展; 数值模拟

**中图分类号:** TD 41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0316-14

## Experimental study on the influence of geometric parameters of prefabricated holes on the mechanical properties of rock-intruding disc cutters

YUAN Chao<sup>1,2</sup>, HUANG Xuanqi<sup>1</sup>, WANG Weijun<sup>1,2</sup>, WAN Wen<sup>1,2</sup>, WU Hai<sup>2</sup>

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. Work Safety Key Laboratory on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the geometric parameters of the prefabricated hole on the mechanical properties of the rock-intruding disc cutter, the biaxial rock-intruding mechanical tests of the disc cutter with different geometric parameters were carried out by using the method of indoor test and numerical simulation. The variation characteristics of the intru-

收稿日期: 2024-11-08 修回日期: 2025-01-06 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.20240524

基金项目: 国家自然科学基金项目(52274080, U24A2086)

通信作者: 黄煊祺(2000—), 男, 湖南省衡阳市人, 博士研究生, 从事岩土工程、矿山建设工作方面的研究。

E-mail: 24300101014@mail.hnust.edu.cn Tel: 18273406705

引用格式: 袁超, 黄煊祺, 王卫军, 等. 预制孔几何参数对盘形刀盘侵岩力学特性影响试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 316-329.

YUAN Chao, HUANG Xuanqi, WANG Weijun, et al. Experimental study on the influence of geometric parameters of prefabricated holes on the mechanical properties of rock-intruding disc cutters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 316-329.

sion force, the intrusion energy consumption and the intrusion difficulty coefficient with the hole arrangement, the hole angle and the hole depth were analyzed. The temporal and spatial evolution process of the crack was studied, and the mechanism of the crack propagation path induced by the prefabricated hole was revealed. The results show that compared with the complete specimen, the change of row spacing and hole spacing will significantly affect the rock intrusion effect, and the effect of large row spacing (4, 5 mm) and small hole spacing (1 mm) is significantly excellent. The maximum intrusion force, intrusion energy consumption and intrusion difficulty coefficient of the specimen with holes decrease obviously with the decrease of angle. The greater the depth of the hole, the effect of reducing the maximum intrusion force is gradually weakened; the main crack evolution order of the specimen is shear crack  $\rightarrow$  mixed crack  $\rightarrow$  tensile crack. The prefabricated hole has a more obvious effect on guiding the crack propagation path, and the rock breaking process can be accelerated by optimizing the parameters of the prefabricated hole. When the prefabricated hole angle is large, the longer the crack propagates downward near the central axis; When the prefabricated hole angle is small, the crack can quickly expand to the bottom of the hole, so that the crack is limited between the holes, and the damage is more sufficient. The research results can provide technical support for pre-failure auxiliary disc cutter to invade rock and reduce cutterhead wear.

**Key words:** prefabricated hole; geometric parameters; mechanical properties; crack propagation; numerical simulation

随着煤炭资源开采逐渐向深部延伸,深部高地应力、高地温、高渗透压与坚硬岩体的特殊复杂地质环境导致巷道掘进面临众多挑战。近年来已陆续有多个矿井开始尝试将全断面隧道掘进机(Full-face Rock Tunnel Boring Machine,简称TBM)引入巷道掘进<sup>[1-2]</sup>。与传统钻爆法相比,TBM法是一种安全、快速、经济的巷道施工先进技术,但在面临复杂地质条件时,掘进时仍存在大量技术瓶颈,如盘形滚刀的工作寿命不理想、滚刀的综合切削性能普遍偏低<sup>[3-4]</sup>。由于需要巨大的推力以及刀盘和岩石之间的摩擦力进行破岩,其刀盘磨损非常严重<sup>[5]</sup>。因此,减缓刀盘磨损,减少掘进中的停机换刀次数可有效提高设备利用率,加快掘进速度。刀盘磨损和低效率带来的施工问题,已成为制约深部巷道安全高效掘进的技术瓶颈<sup>[6]</sup>。

为克服上述TBM刀具破岩难题,在当前刀盘材料制备技术制约下,鉴于水射流<sup>[7]</sup>、激光<sup>[8-9]</sup>、磨料空气射流<sup>[10]</sup>等非刀具破岩技术在掘进、石油钻探领域已取得良好的效果<sup>[11-14]</sup>,科研工作者提出了多种非刀具破岩技术协同TBM破岩的思路,充分发挥非刀具破岩的技术优势,并辅助TBM进行破岩掘进,降低岩石破碎能耗。

非刀具破岩技术在岩石表面产生预切割,有效降低岩石力学强度。文献[15]指出,水射流辅助刀具破岩,在刀盘切割过程中,水射流不仅可以

冷却刀具,且产生的预切割区与塑性区之间发生内部裂纹连接扩展,促进大岩碴的形成。激光破岩通过短时间内将岩石局部加热到高温,使岩石破碎、熔化与气化,加快破岩速度<sup>[16-18]</sup>。文献[19]通过大功率激光器照射石灰岩与花岗岩,均射穿试件,产生15 mm以上的射孔深度。文献[20]采用磨料空气射流预切槽技术辅助机械掘进,发现采用磨料空气切槽卸压能够明显降低整机功率和刀具受力。

在预破坏降低岩石强度方面,不少学者也开展了滚压破岩试验研究。文献[21]对砂岩试件进行了小尺度的切割试验,发现节理倾角会影响断裂角度。文献[22]分析了预切割对TBM机械滚刀在破碎岩石过程中的力学行为,发现预切割可以有效降低压头对岩样的法向荷载,岩样单轴抗压强度越低,预切割对法向荷载的降低比例就会越大。文献[23]开展了预切割辅助盘形滚刀对砂岩力学试验,指出预切割和侵彻深度对岩石表面和内部裂纹切口有较大影响。文献[24]证实了预切割后,岩体破坏从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的拉伸剪切为主导的主裂纹扩展破坏。文献[25]开展了预切槽内撑式破岩试验,发现预切槽可有效控制裂缝起裂位置,并引导裂纹扩展,降低岩石破裂瞬间的最大破裂力。文献[26]通过改变预切

割深度,发现割缝深度的增加有助于减低滚刀载荷,滚刀切削速度的增加会弱化割缝深度对载荷的改善效果。

上述研究成果主要集中于预破坏降低岩石强度方面,这也为揭示非刀具破岩技术辅助盘形滚刀促进岩石破碎的力学机理方面奠定了基础,但目前关于预破坏的几何参数对岩石力学特征、裂纹扩展过程等影响的研究较少。基于此,通过在类岩石试件中预制孔形成含孔试件,采用侵岩试验平台和 PCI-2 声发射监测仪,对不同几何参数预制孔试件开展盘形刀盘双轴侵岩试验,并进行数值仿真分析(采用 PFC<sup>2D</sup>),研究预破坏几何参数影响下的含孔试件力学行为和裂纹扩展特征,揭示了预制孔诱导裂纹扩展路径的作用机理,为非刀具破岩技术辅助下预破坏几何参数设定依据。

### 1 试件制备与试验方案

#### 1.1 试件制备

试验选取类岩石模型试样(由水泥、沙子、水组成)进行力学试验,试件尺寸为 150 mm×150 mm×70 mm,采用的配比(质量比)为水泥:沙子:水=26:25:10。在制作预制孔类岩石试件的过程中,先通过模具浇注好试件,随后在室温下进行 2~2.5 h 的养护,然后将擦拭润滑油的 2 mm 直径预制孔支架插入预定孔洞位置形成预制孔。当试件养护 12 h 后,开始脱模,并将支架取出,经

过 28 d 的养护后,将其放在打磨机上打磨,使上下端面平整度小于 0.02 mm,确保试件符合试验要求。试件预制孔参数设定如图 1 所示。试件编号依据图中注释,*S* 为孔洞深度,*J* 为孔洞角度,*K* 为孔间距,*P* 为排间距。如试件编号 S2.5J90K1P3 代表此试件预制孔深度为 2.5 mm、孔洞角度为 90°、孔间距为 1 mm、排间距为 3 mm 的类岩石试件。具体试件编号如表 1 所示。

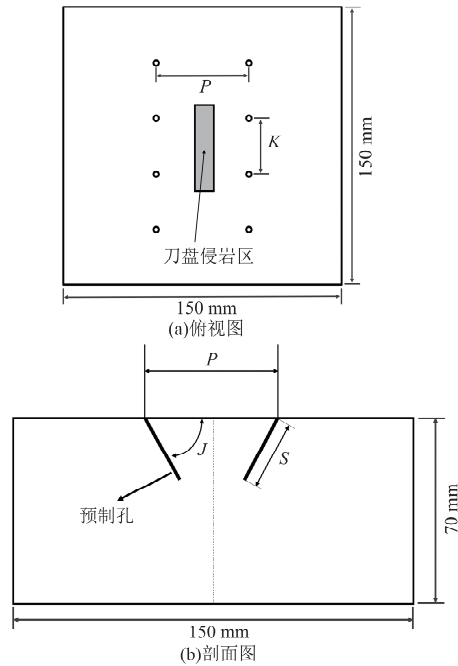


图 1 试件预制孔参数设定

Fig. 1 Design and manufacture of rock-like materials

表 1 试件编号

Table 1 Specimen number

K/mm	S=2.5 mm										S=1 mm		S=3 mm	
	J=90°					J=60°					J=90°		J=90°	
1	P0	P3	P4	P5	P3	P4	P5	P3	P4	P5	P0	P3	P0	P3
1.5	P0	P3	P4	P5	P3	P4	P5	P3	P4	P5	P0	P3	P0	P3
3	P0	P3	P4	P5	P3	P4	P5	P3	P4	P5	P0	P3	P0	P3

#### 1.2 试验平台与试验流程

试验采用 RYL-600 岩石剪切流变试验仪(图 2)进行,采用双轴加载,围压设为 1 MPa。刀具选用高硬度热处理的刀盘(图 3),设定刀盘侵岩速率为 1 mm/min,目标位移为 8 mm。加载过程采用 PCI-2 型 32 通道设备作为声发射监测系统,用于捕获试件在破坏过程中产生的声发射信号。

利用 RYL-600 岩石剪切流变试验仪对刀盘侵入试样过程中的侵入力与侵深变化进行实时记录,侵入力随着侵深的增加不断变化,当侵深达到 8 mm 时,此时试验仪将不再对刀盘施加垂直方向

的速度,侵岩终止。

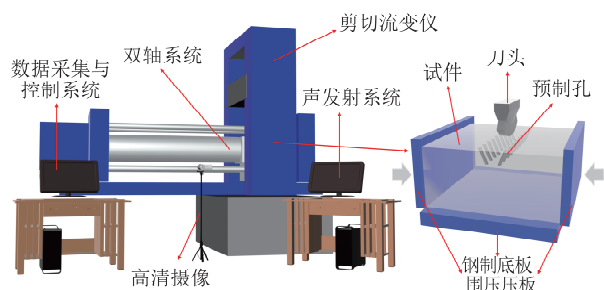


图 2 RYL-600 岩石剪切流变仪、预制孔试件侵岩试验平台模型

Fig. 2 RYL-600 rock shear rheometer, prefabricated hole specimen rock invasion test platform model

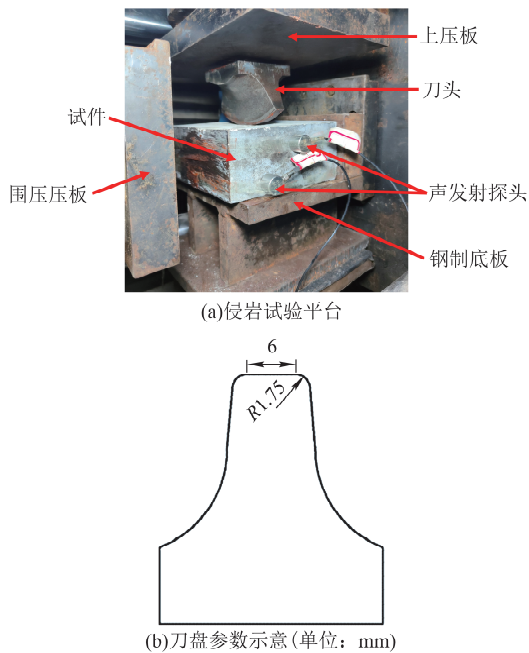


图 3 侵岩试验平台与刀盘参数  
Fig. 3 Rock invasion test platform and cutter head parameters

## 2 不同孔参数侵岩试验力学特性

### 2.1 不同孔间距与排间距下试件力学特性

图 4 记录了 S2.5J90 试件组在侵岩试验中的最大侵入力。完整试件的最大侵入力要高于任何其他有预制孔的试件，最大侵入力最高的含孔试件与完整试件相比，其最大侵入力降低 10.2%，与完整试件相比，S2.5J90K1P4 试件最大侵入力降低了 38.5%，这表明在预制孔的参与下有利于降低刀盘的最大侵入力，能有效降低刀盘的磨损。

在 S2.5J90P4 试件组中，孔间距为 1, 1.5 和 3 mm 的试件最大侵入力对应为 23.53, 31.69 和 31.80 kN，相较于完整试件分别降低 38.5%，17.3% 和 16.9%。S2.5J90 组中，孔间距 1, 1.5

和 3 mm 的平均最大侵入力分别对应 26.87, 31.75, 32.54 kN，呈现出随着孔间距增大，平均最大侵入力随之增加。

最大侵入力最低的 2 个试件为 S2.5J90K1P4 与 S2.5J90K1P5，对应最大侵入力为 23.53 和 25.90 kN，相较于完整试件分别降低 38.3% 和 32.4%，均为较小的孔间距和较大的排间距。由于试件的抗拉强度远小于抗压强度<sup>[28]</sup>，理想状况下，通过改变孔间距和排间距的参数，进而使岩石发生以张拉裂纹为主导的破坏，从而降低最大侵入力。

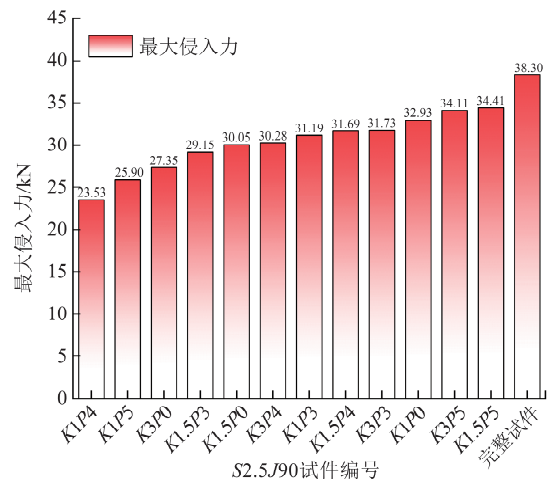


图 4 S2.5J90 组各试件最大侵入力  
Fig. 4 The maximum intrusion force of each specimen in S2.5J90 group

为进一步准确评价侵岩效果，引入侵入能耗作为评价标准之一。侵入能耗综合考虑了侵入力、侵深 2 个试验结果，是用来衡量刀盘破岩性能较为直观且准确的标准之一。不同孔排列下侵入力-侵深曲线如图 5 所示。对每组侵入力-侵深曲线进行积分所获得的面积，即为破岩过程中的侵入能耗。

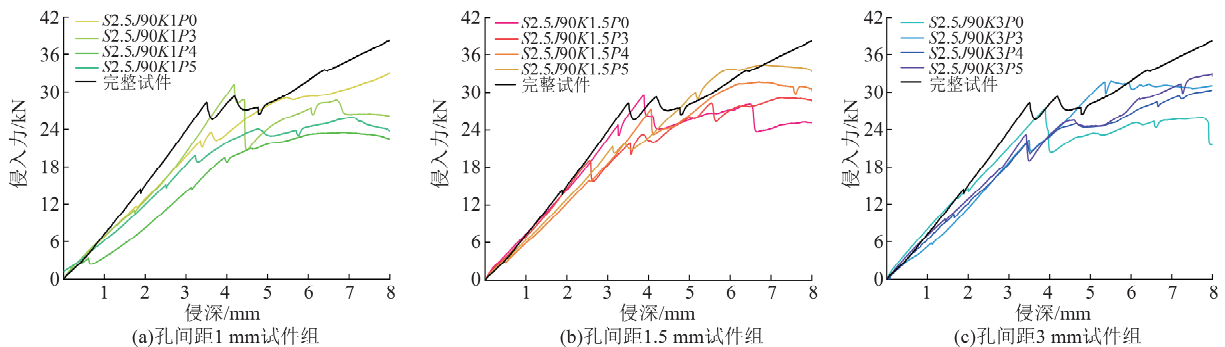


图 5 不同孔排列下侵入力-侵深曲线  
Fig. 5 Invasion force-penetration depth curves under different hole arrangements

图 6a 为不同孔间距条件下试件的侵入能耗汇总,在孔间距为 1 mm,排间距为 4 mm 时出现了最低侵入能耗,与完整试件侵入能耗 187.93 J 相比,其降低了 33.4%;在孔间距为 1.5 mm,排间距为 5 mm 时出现了最高侵入能耗,排间距 4 和 5 mm 试件组出现了侵入能耗先上升再下降的趋势,排间距 0 和 3 mm 的侵入能耗波动则不大。孔间距为 1 mm 的情况下,大排间距(4,5 mm)侵入能耗要低于小排间距(0,3 mm)。因此,从侵入能耗的角度来说,大排间距(4,5 mm)和小孔间距(1 mm)破岩效果较好。

考虑最大侵入力和侵入能耗 2 个参考因素,引入侵入难度系数可以更全面地评价预制孔对刀盘破岩效果,对侵入力-侵深曲线在首个应力降前的斜率进行拟合,该斜率称为侵入难度系数。侵入难度系数可以反映侵入试样的难易程度,侵入系数越大表示越难以侵入。

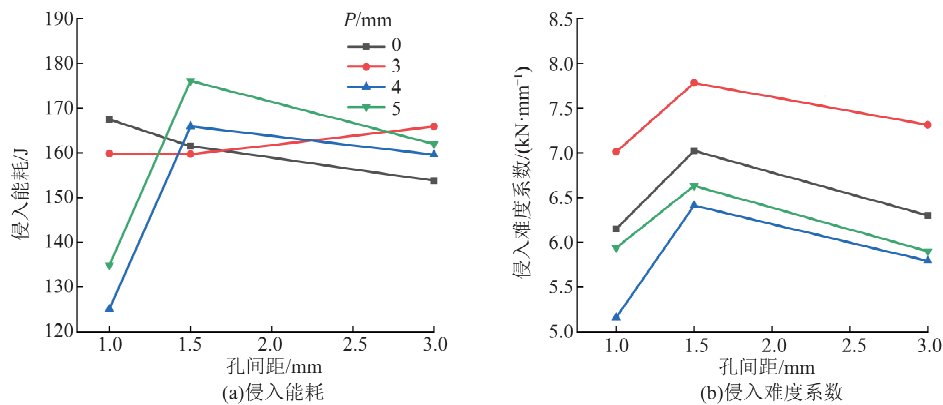


图 6 不同孔排列下侵入能耗与侵入难度系数

Fig. 6 Invasion energy consumption and invasion difficulty coefficient under different hole arrangements

## 2.2 不同孔角度下试件力学特性

图 7a 记录了不同预制孔角度试件组在侵岩试验中最大侵入力。图 7b~7d 为不同预制孔角度侵入力-侵深曲线。S2.5J90 试件组 9 种排列中有 7 组的最大侵入力要显著高于 S2.5J60 和 S2.5J45 试件组,这表明预制孔的角度变化能明显改变刀盘的侵入力峰值,孔角度是降低刀盘侵岩过程磨损的重要影响因素之一。预制孔角度  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $40^\circ$  的平均最大侵入力对应为 30.39, 20.77 和 18.70 kN, 相较于完整试件分别降低 20.7%, 45.8%, 51.17%, 试件总体上呈现最大侵入力随孔角度的减小逐渐降低的规律。

图 8a 为 2.5 mm 孔深度不同角度试件侵入能耗汇总,其中 S2.5J90 试件组相较于其他 2 组试件破坏侵入能耗总体较高,按平均侵入能耗从高

图 6b 为 S2.5J90 试件组侵入难度系数汇总,完整试件侵入难度系数为 8.48 kN/mm。S2.5J90 试件组的侵入难度系数均小于完整试件的侵入难度系数,可见预制孔的存在可以降低试件的侵入难度,提高刀盘的破岩效率。从图 6b 可知,随着孔间距的增加,侵入难度系数先增大后减小。排间距也直接影响侵入难度的大小,整体来看,较大的排间距其侵入难度系数较小,当排间距较小时,刀盘对试件的破坏主要模式为剪切破坏,由于岩石的抗压强度要远高于抗拉强度,当排间距较大时(4,5 mm),张拉作用逐渐增强,提高了破岩效率<sup>[27]</sup>,因此侵入难度系数较低。

综上所述,结合排间距和孔间距,综合考虑最大侵入力、侵入能耗与侵入难度系数 3 种评价参数,得出在较大的排间距和较小的孔间距下,破岩效果较好。

到低排列为 156.52, 107.42 和 92.94 J, 对应预制孔角度为  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $45^\circ$ , 随着孔角度逐渐减小,侵入能耗呈现出逐渐降低的状况。相较于完整试件侵入能耗 187.93 J, 编号为 S2.5J60K1.5P3 的试件降低了约 70%。可见孔角度是改善刀盘侵岩过程中的重要影响因素。

图 8b 为孔深度 2.5 mm 试件组侵入难度系数汇总,平均侵入难度系数从大到小分别为 6.40, 5.49, 3.98 kN/mm, 分别对应  $90^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $45^\circ$  试件。整体来看,试件侵入难度系数最大为孔角度为  $90^\circ$  的试件组,最小难度系数为孔角度为  $45^\circ$  的试件组,由此可知,以侵入难度系数作为判断刀盘侵岩性能的标准时,随着孔角度的逐渐减小,侵入难度逐渐降低。

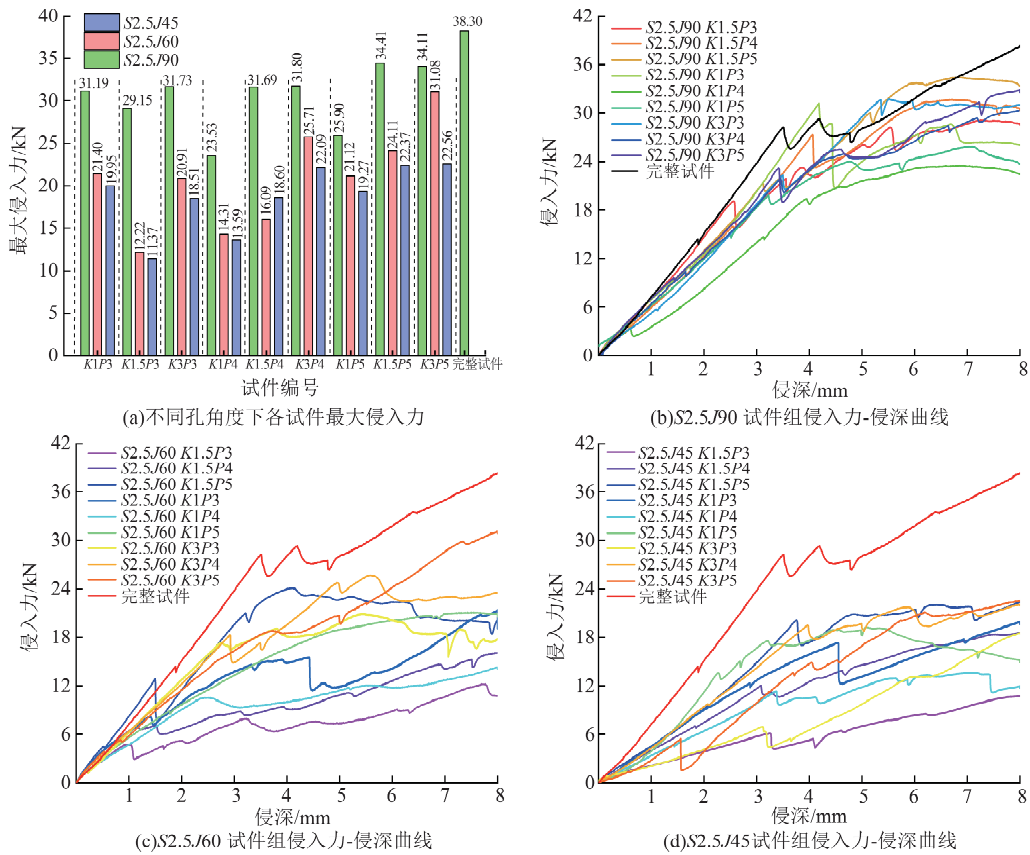


图 7 不同孔角度下各试件侵入力-侵深曲线

Fig. 7 Invasion force-penetration depth curves of each specimen at different angles

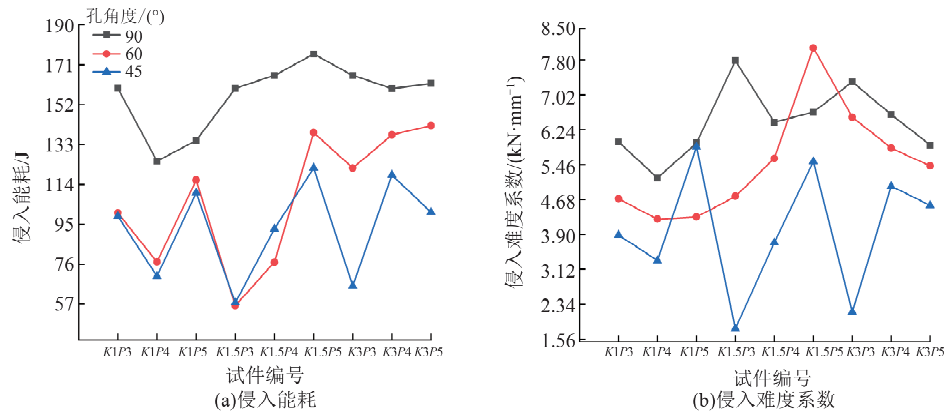


图 8 不同孔角度下各试件侵入能耗与侵入难度系数

Fig. 8 Invasion energy consumption and invasion difficulty coefficient of each specimen under different hole angles

2.3 不同孔深度下试件力学特性

图 9 为 1, 2.5 和 3 mm 孔深试件组的侵入力-侵深曲线, 可见大部分试件侵入力-侵深曲线处于完整试件的侵入力-侵深曲线之下, 深度 3 mm 试件组的侵入力要小于深度 1 和 2.5 mm 试件组, 这表明预制孔深度也是降低刀盘侵岩过程磨损的重要影响因素之一。

图 10a 为不同孔深度试件侵入能耗汇总, 最大侵入能耗为编号 S1J90K1.5P3 的试件, 为

187.34 J, 最小侵入能耗为编号 S3J90K3P0 的试件, 为 87.82 J。S3J90K1.5P3 试件侵入能耗为 135.18 J, 相较于深度为 1 mm 的试件侵入能耗 187.34 J, 其侵入能耗降低了约 27.84%。其中孔深 1 mm 试件组和孔深 3 mm 试件组侵入能耗整体走势上较为接近, 孔深 1 mm 试件组和孔深 2.5 mm 试件组平均侵入能耗均高于孔深 3 mm 试件组, 呈现出随着预制孔深度的逐渐增大, 侵入能耗随之逐渐减少的状况。

图 10b 为不同深度预制孔下各试件侵入难度系数汇总,其中完整试件的侵入难度系数为 8.48 kN/mm,孔深 1,2.5 和 3 mm 试件组的平均侵入

难度系数按从大到小分别为 8.07,6.75,4.90 kN/mm。随着预制孔深度的增加,侵入难度系数也随之减小。

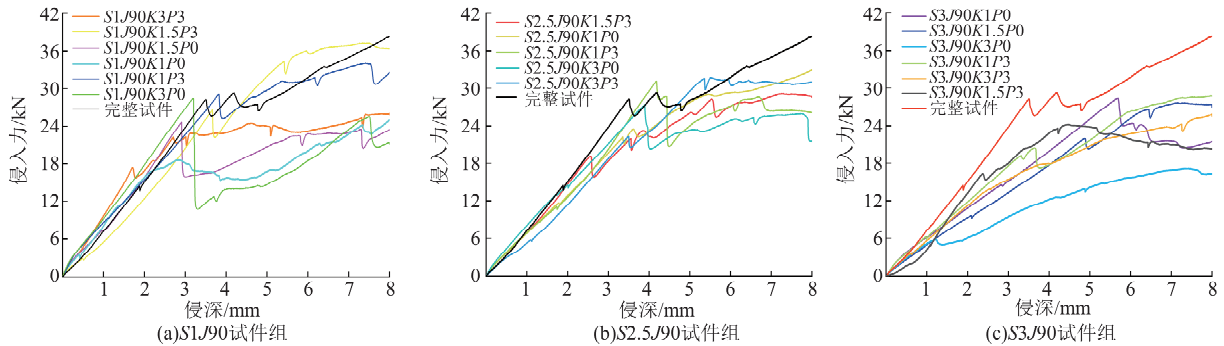


图 9 不同孔深下各试件侵入力-侵深曲线

Fig. 9 Invasion force-penetration depth curves of each specimen under different hole depths

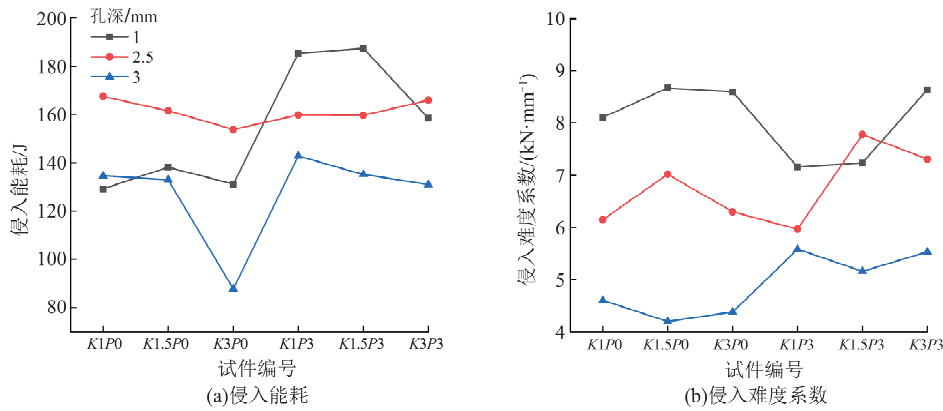


图 10 不同孔深下各试件侵入能耗与侵入难度系数

Fig. 10 Invasion energy consumption and invasion difficulty coefficient of each specimen under different hole depths

### 3 试件裂纹扩展

图 11a 为完整试件在侵岩完成后的裂纹分布情况,刀盘接触试件区域可分为 3 个小区域:密实区域(被红色虚线框住)、剪切坑区域(蓝色和红色虚线之间)以及远场区域(蓝色虚线框外),对应着破岩机理中的密实核、剪切坑和远场部分,剪切坑区域略大于密实核区域。完整试件主要从剪切坑区域发育出 5 条表面拉张裂纹,并向远场进行扩展,与含预制孔的试件相比,完整试件剪切坑两翼未萌生出平行于围压方向的裂纹,而主要从剪切坑两端处萌生裂纹,且两侧细小裂纹发育较少。含孔试件剪切坑处则明显萌生出更多平行于围压方向的裂纹,如图 11c 所示,其剪切坑两侧裂纹萌生较为平均且密集。不同孔角度对试件裂纹扩展的影响较为明显。图 11b 和 11c 分别为预制孔角度为 90°和 60°试件的剪切坑区域裂纹分布,两者裂纹扩展程度有较为明显的区别,孔角度 60°的试件剪切坑中细小裂纹发育数量较多并更密

集,且细小裂纹汇聚均被孔洞“吸引”,有更多的裂纹经过孔洞进行扩展,而孔角度 90°的试件剪切坑两侧裂纹发育明显较少。因此,预制孔的角度变化对刀盘侵岩过程中裂纹的萌生和扩展具有明显影响,孔洞角度越小,剪切坑区域萌生细小裂纹数量越多,且更容易向预制孔汇聚,对试件破坏更为严重。

图 11d 为 S2.5J90K1.5P0 试件的局部裂纹发育,密实区域因刀盘压密而表面平整,整体低于试件表面,裂隙不明显,剪切坑区域裂纹密集,应力集中。这是由于随着载荷的增加,下方被逐渐压实成致密块体,形成应力核心区域,宏观裂纹均从剪切坑区域萌生并向孔洞聚集,进而再扩展为侧向张拉主裂纹向远场扩展。如图 11e 和 11f 所示,剪切坑附近出现多处细小裂纹,然后相互“吸引”融合并向孔洞偏转扩展,最终汇聚成主裂纹并向远场扩展<sup>[28]</sup>,孔的存在导致试件内部应力集中,基于小孔应力理论,有孔时孔洞边缘的最大拉应力是无孔时最大拉应力的 3 倍<sup>[29]</sup>,使得孔洞将先

于周边岩石破坏,即上述表现为孔洞对剪切坑中产生的众多细小裂纹具有明显的“吸引”效果。

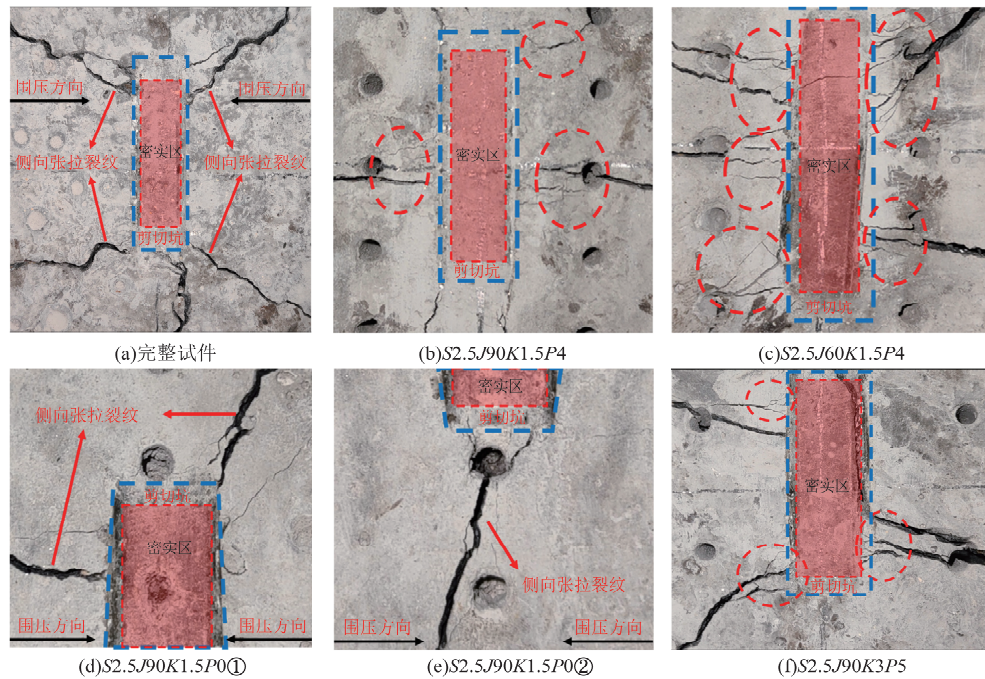


图 11 部分不同孔角度试件局部裂纹分布

Fig. 11 Local crack distribution of some specimens with different hole angles

#### 4 侵岩过程 $AF/RA$ 特征值时空分布

在声发射波形参数指标中, $RA$ (上升事件/振幅)和 $AF$ (平均频率)值可用于定性分析裂纹扩展时的破坏模式,包括张拉破坏和剪切破坏。通过比较 $RA$ 和 $AF$ 值可以分析不同预制孔参数下试件内对应不同类型裂纹的萌生、扩展和贯通演化机制<sup>[30]</sup>。通过用 $AF/RA$ 参数来描述试件裂纹扩展的方式,引入一条分割指示线,定义其斜率为 $k$ 。如图 12a 所示,当 $AF/RA$ 大于 $k$ 值时,裂纹被判定为张拉破坏;而当 $AF/RA$ 小于 $k$ 值时,则判定为剪切破坏。为了对不同试件在加载全程中的 $AF/RA$ 数值进行统计,参考文献[31]的划分方法,将 $k$ 值设定为 600,从而明确定义了剪切破坏和张拉破坏 2 个区域<sup>[32-33]</sup>。

根据每个试件侵入力-时间曲线,将全过程 $AF/RA$ 值按不同时间段分为 3 个部分,以不同颜色标注,靠近坐标轴的密集区域通过局部放大图显示。如图 12 所示,选取破岩效果差异较大且具有代表性的试件,通过 $AF/RA$ 特征值时空分布图进行讨论,其分布形式有明显不同。

如图 12b 和 12c,在试件加载初期,红色散点大部分集中在 $k$ 线以下,说明在刀盘侵岩的初期阶段,裂纹萌生与扩展所释放能量产生瞬态弹性

波反映出该阶段为剪切裂纹为主导。当试件加载到中期阶段,蓝色散点呈现出较为均匀的分布,散点分布在 $k$ 线上下,这表明在侵岩过程的中期阶段,主要出现了混合破坏情况。当试件加载到后期阶段,绿色散点大部分集中在 $k$ 线以上,说明在侵岩过程的后期阶段,主要为张拉破坏。

图 12d~12f 中,第一阶段的声发射 $AF/RA$ 信号大部分位于 $k$ 值以下,但监测出部分大于 $k$ 值的张拉信号;在第二阶段时,蓝色散点更加集中于张拉区域,这表明破坏模式已出现变化。

图 12d 和图 12e 相比, $S2.5J90K1.5P4$ 试件最大侵入力为 31.69 kN,侵入能耗 165.88 J,侵入难度系数 6.5 kN/mm, $S2.5J45K1P4$ 试件最大侵入力为 13.59 kN,侵入能耗 73.89 J,侵入难度系数 6.0 kN/mm,从力学特性评价指标来说, $S2.5J45K1P4$ 试件效果更好。两者 $AF/RA$ 特征值时空分布差异明显:第一阶段信号大部分均位于 $k$ 值以下,到第二阶段 $S2.5J45K1P4$ 试件信号相较于 $S2.5J90K1.5P4$ 试件出现了大量位于 $k$ 值以上的散点,这表明 $S2.5J45K1P4$ 试件在这一阶段相较于 $S2.5J90K1.5P4$ 试件其张拉裂纹萌生和扩展更为剧烈。张拉破坏效应逐渐增强,最大侵入力从而降低。声发射有效支撑了力学特性评价指标的可靠性。

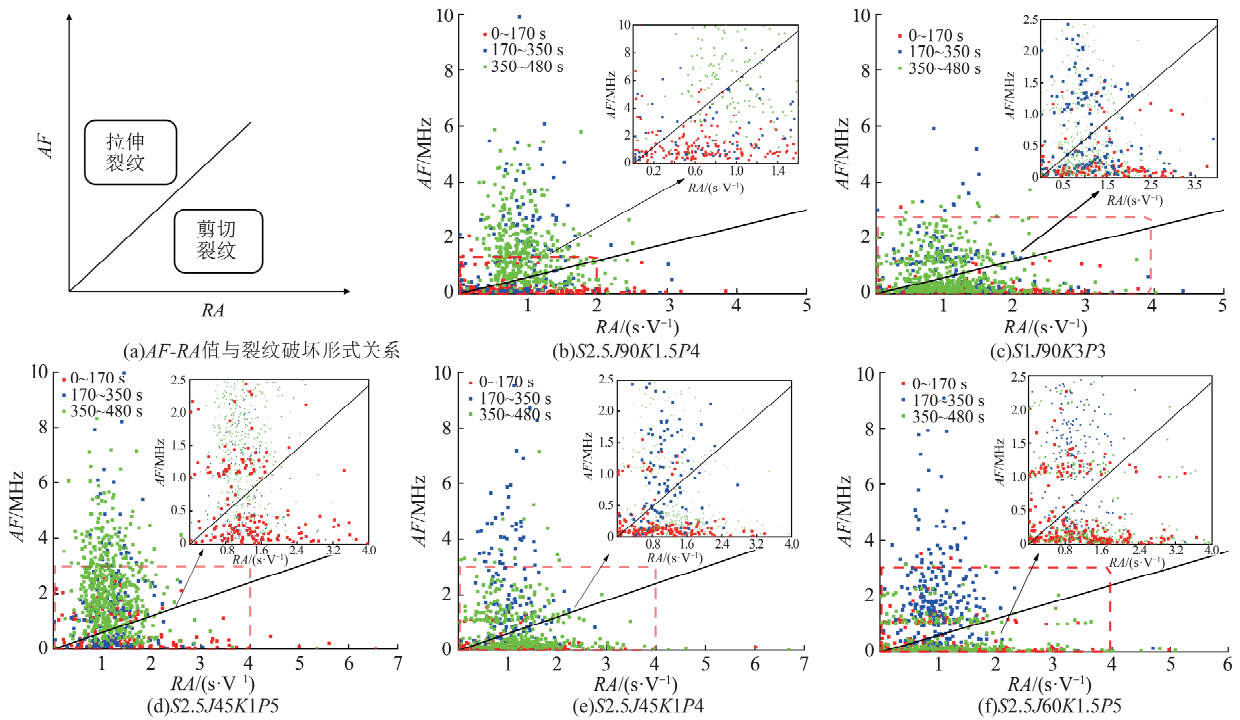


图 12 部分试件 AF/RA 特征值分布

Fig. 12 The distribution of AF/RA eigenvalues of some specimens

图 13 和图 14 中,  $a, b$  为不同阶段节点, 完整试件的侵岩过程主要裂纹分布情况可以分为 3 个阶段: 剪切裂纹阶段、混合裂纹阶段、张拉裂纹阶段。而含预制孔试件其声发射 AF/RA 信号反映出在第二阶段已由更多的张拉裂纹主导。这表明通过改变孔的几何参数可以促使试件混合破坏阶段提前, 有效加快破岩进程。

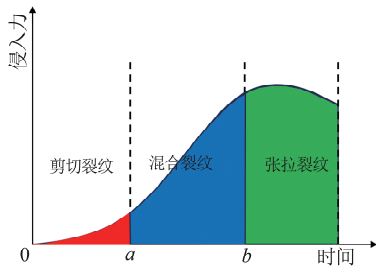


图 13 完整试件不同时间段主要裂纹分布示意  
Fig. 13 The main crack distribution of the complete specimen in different time periods

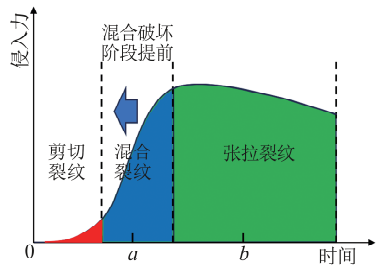


图 14 含预制孔试件不同时间段主要裂纹分布示意  
Fig. 14 The main crack distribution of specimens with prefabricated holes in different time periods

## 5 预制孔辅助下侵岩数值模拟

### 5.1 数值模型的建立及相关参数

为研究预制孔辅助盘形刀具侵岩试验, 通过 PFC<sup>2D</sup> 软件建立数值模型, 如图 15 所示。该模型尺寸为 150 mm × 70 mm, 接触模型采取线性模型, 接触力为阻尼和线性两部分, 包含 24 761 个粒子和 60 544 个平行接触键。根据侵岩试验, 利用 wall 命令生成一个宽 6 mm 的小型刀具。粒子半径 0.3~0.4 mm。单轴抗压强度和弹性模量用于校准岩石材料, 接近现实材料, 部分参数列于表 2。

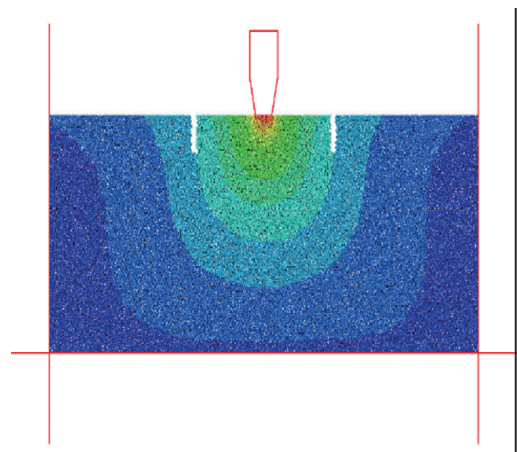


图 15 侵岩试验模型建立  
Fig. 15 Establishment of rock-intrusion test model

表 2 PFC<sup>2D</sup> 细观参数设定  
Table 2 PFC<sup>2D</sup> parameter setting

微观参数	取值
颗粒最大半径/mm	0.4
颗粒最小半径/mm	0.3
颗粒法向刚度/剪切刚度	1.5
颗粒接触模量/GPa	5.4
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 500
颗粒摩擦因数	0.8
围压/MPa	1.0
加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	1.0

## 5.2 侵岩过程中裂纹扩展规律

图 16 为通过 PFC<sup>2D</sup> 软件对不同孔参数下进行的模拟试验侵岩结果。完整试件(图 16a)破坏后一条主要裂隙贯通试件直至底部,刀盘接触区域被有限破坏,裂纹向两侧扩展较少。

图 16b~16d 为不同孔深度下的试件裂纹扩展情况。裂纹从刀盘与模型接触区域密集萌生,部分裂纹直接扩展至孔洞底部。孔洞深度越大,

破坏孔洞所需的裂纹长度越长。中轴线上均萌生出一条向下的裂纹但未贯通至试件底部。

图 16c,16e,16f 为不同孔排间距下试件裂纹扩展情况。中轴线上均萌生出一条向下的裂纹。不同排间距试件均有裂纹直接扩展到孔洞底部。裂纹向两边孔洞扩展,刀盘接触模型区域表面产生“岩片”,岩片的形成有利于刀盘的进一步破岩以及实际施工中的出渣。

图 16f~16h 为不同孔角度下的试件裂纹扩展情况。孔角度越大,其裂纹在中轴线附近向下扩展的裂纹越长,小孔洞角度会使得裂纹提前接触到孔洞底部,阻止内部裂纹跨越预制孔进行扩展,导致裂纹不会继续向下扩展,其裂纹更局限于孔洞之间的范围内,促进岩碴在孔洞之间形成,破坏更为充分。

总结上述得出,孔深和排间距越大,孔角度越小,越能使裂纹在岩石表面萌生扩展,促进孔洞之间裂纹互相贯通,形成岩片,破坏更为集中。

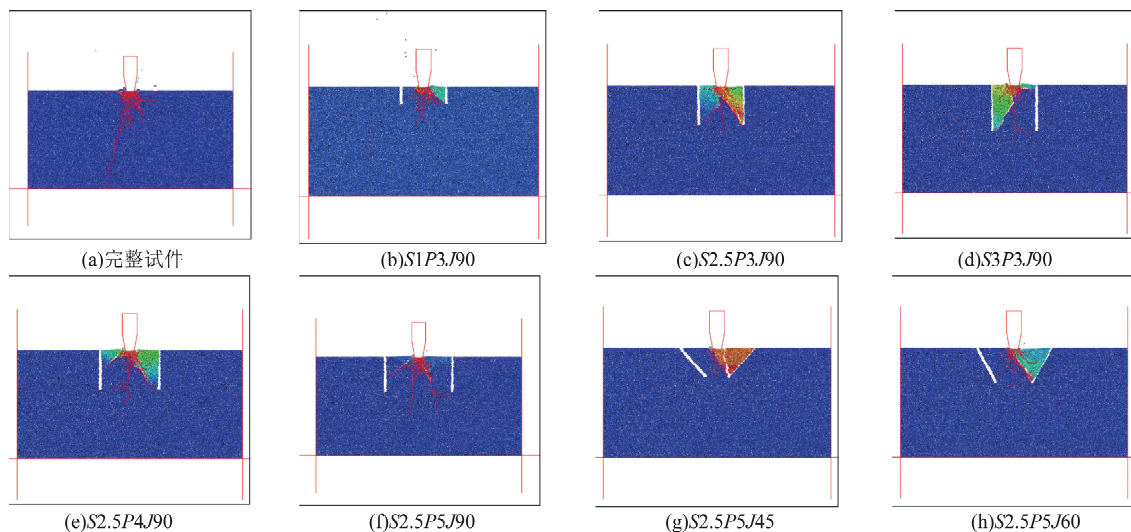


图 16 不同孔参数下模拟侵岩试验裂纹分布情况

Fig. 16 The crack distribution of simulated rock invasion test under different pore parameters

## 5.3 不同孔排间距试件力学特性数值模拟

当孔排间距逐渐增大时,由图 17a 可知,最大侵入力也随之增大,且随孔深度的增加,最大侵入力随之减少,这与实验室试验表现一致。与完整试件相比,排间距为 3 mm,深度为 3 mm 时,最大侵入力减少了 63.23%。图 17b 为模拟与实际试验对照,其趋势较为接近,随排间距的增加,最大侵入力也随之增加。相同孔深度下,侵入难度系数随排间距的增大而增大,这与试验相符。

## 5.4 不同孔角度试件力学特性数值模拟

通过模拟软件扩展孔角度的种类,由图 18 可看出,S2.5P5 试件组随着孔角度的减少,其侵入力、侵入难度系数与侵入能耗均随之减少。图 19 中可见孔洞角度与模拟最大侵入力呈近似线性关系,拟合斜率约为 0.50。说明孔洞角度的变化可以明显降低刀盘侵岩过程中试件的强度从而改善侵岩效果,减少刀盘磨损。模拟与室内试验趋势较为相似。

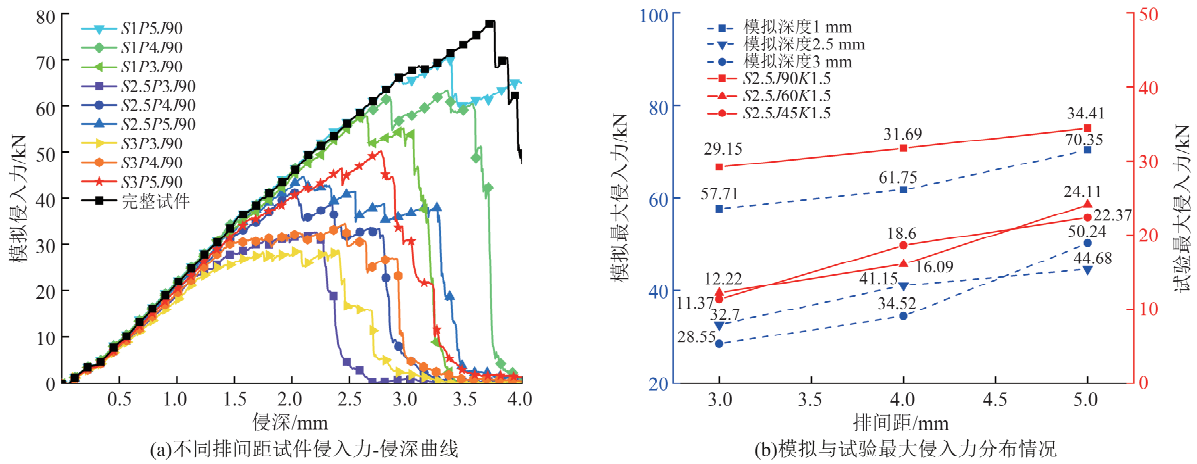


图 17 模拟 J90 试件组不同排间距侵入力-侵深曲线及模拟与试验最大侵入力分布情况  
 Fig. 17 The intrusion force-penetration depth curve of different row spacing of J90 specimen group and the distribution of maximum intrusion force in simulation and test are simulated

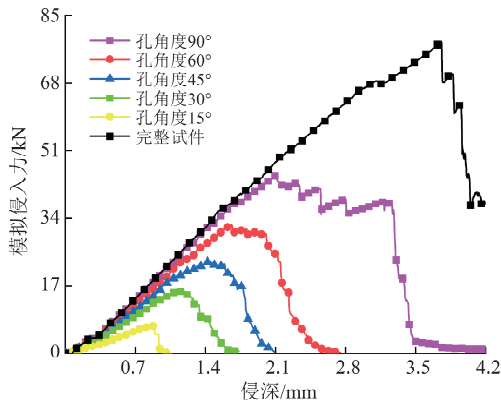


图 18 模拟 2.5 mm 孔深不同角度下侵入力-侵深曲线  
 Fig. 18 The invasion force-invasion depth curves at different angles of 2.5 mm hole depth are simulated

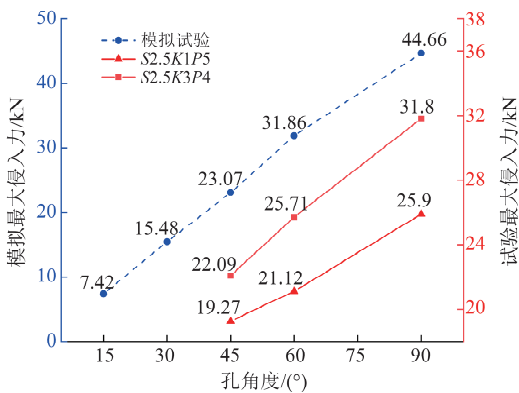


图 19 模拟与试验不同孔角度下最大侵入力分布情况  
 Fig. 19 The distribution of maximum intrusion force at different hole angles is simulated and tested

5.5 不同孔深度试件力学特性数值模拟

图 20 为 J90P5 试件组在不同孔深度下侵入力-侵深曲线与最大侵入力分布示意。由图 20a 可知,随着孔洞深度的增加,J90P5 试件组的侵入力、侵入能耗、侵入难度系数均随之减少。由图

20b 可知,随着深度的增大,其能降低最大侵入力的效果逐渐减弱。当深度从 1 mm 增加到 3 mm 时,影响最大侵入力的效果较为明显,而深度超过 5 mm 时,深度对最大侵入力的降低效果已不明显。

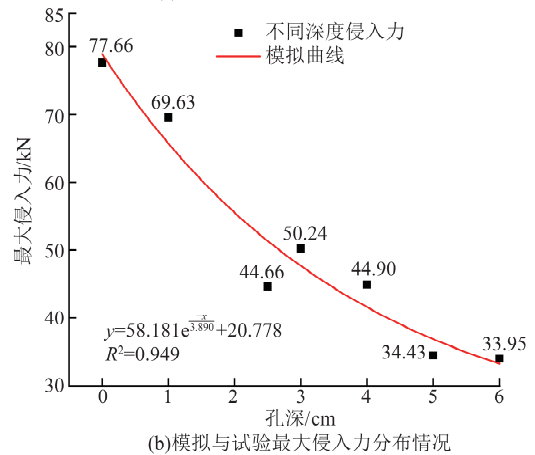
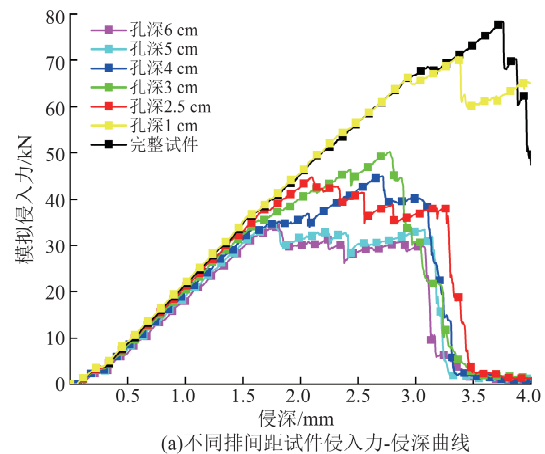


图 20 模拟 J90P5 试件组在不同孔深度下侵入力-侵深曲线与最大侵入力分布  
 Fig. 20 The intrusion force-penetration curve and maximum intrusion force distribution of J90P5 specimen group at different hole depths are simulated

## 6 结 论

1) 随着孔间距增大, 平均最大侵入力随之增加。较大的排间距和较小的孔间距下, 有助于破岩; 孔角度对侵岩效果影响较大, 随着孔角度的减少, 其侵入力、侵入能耗均随之减少; 孔深度增加, 其最大侵入力减少, 但随着深度的增大, 其能降低最大侵入力的效果逐渐减弱。

2) 当孔洞角度在  $45^\circ \sim 90^\circ$  之间时, 角度越小, 越容易使裂纹贯通孔洞。孔的存在有较为明显的引导裂纹扩展路径的作用, 通过设定预制孔参数可以诱导破岩时的岩碴形状。

3) 试件的主要裂纹演化顺序为剪切裂纹→混合裂纹→张拉裂纹, 通过改变预制孔参数能够有效加快主要裂纹形式演化过程, 加快破岩进程。

4) 孔角度越小会使得裂纹提前接触到孔洞底部, 导致裂纹不会继续向下扩展, 其裂纹局限于孔洞之间的范围内, 破坏更为充分。孔角度越大, 其裂纹在中轴线附近向下扩展的裂纹越长。适当的孔洞深度、大排间距以及较小的孔洞角度有助于实现更充分的破岩效果。

### 参考文献:

- [1] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 煤矿超千米深部全断面岩石巷掘进机的提出及关键岩石力学问题[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2006-2013.  
LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, et al. Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1 000 km and the key rock mechanics problems[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2006-2013.
- [2] HUANG X, LIU Q S, SHI K, et al. Application and prospect of hard rock TBM for deep roadway construction in coal mines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 73: 105-126.
- [3] 张照煌. 全断面岩石掘进机平面刀盘上盘形滚刀磨损研究[J]. 现代隧道技术, 2007(6): 32-36.  
ZHANG Zhaohuang. Study on the abrasion of disc cutters on full face rock tunnel boring machine[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007(6): 32-36.
- [4] 谭忠盛, 周振梁, 李宗林, 等. 高强度围岩隧洞 TBM 刀具磨损规律研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(12): 104-115.  
TAN Zhongsheng, ZHOU Zhenliang, LI Zonglin, et al. Research on wear law of cutters for TBM tunneling in hard rock[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(12): 104-115.
- [5] 谭青, 谢吕坚, 夏毅敏, 等. TBM 盘形滚刀磨损速率研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(3): 843-848.  
TAN Qing, XIE Lujian, XIA Yimin, et al. Analysis of wear rate of TBM disc cutter[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(3): 843-848.
- [6] 魏建平, 蔡玉波, 刘勇, 等. 非刀具破岩理论与技术研究进展与趋势[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 801-832.  
WEI Jianping, CAI Yubo, LIU Yong, et al. Progress and trends in non-tool rock breaking theory and technology[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 801-832.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王义江, 郁东旭, 王泽桂, 等. 激光照射花岗岩热裂规律及力学性质试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 701-712.  
WANG Yijiang, YU Dongxu, WANG Zegui, et al. Experimental research on thermal cracking and mechanical properties of granite irradiated by laser beam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 701-712.
- [10] 张宏图, 杨耀浦, 刘勇, 等. 低压磨料空气射流切槽辅助 TBM 滚刀破岩规律研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4429-4440.  
ZHANG Hongtu, YANG Yaopu, LIU Yong, et al. Study on 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.
- [11] 官兵, 李士斌, 张立刚, 等. 激光破岩技术的研究现状及进展[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 229-248.  
GUAN Bing, LI Shibin, ZHANG Ligang, et al. Research progress on rock removal by laser technology

- [J]. Chinese Optics, 2020, 13(2): 229-248.
- [12] 王瑞和, 倪红坚. 高压水射流破岩机理研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002(4): 118-122.  
WANG Ruihe, NI Hongjian. Research of rock fragmentation mechanism with high-pressure water jet [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2002(4): 118-122.
- [13] 戴俊, 孟振, 吴丙权. 微波照射对岩石强度的影响研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2014(3): 54-57.  
DAI Jun, MENG Zhen, WU Bingquan. Study on impact of rock strength by microwave irradiation [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014(3): 54-57.
- [14] 王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883-3912.  
WANG Shaofeng, SUN Licheng, ZHOU Zilong, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3883-3912.
- [15] 李洪盛, 刘送永, 郭楚文. 自振脉冲射流预制裂隙对机械刀具破岩过程温度影响特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2136-2145.  
LI Hongsheng, LIU Songyong, GUO Chuwen. Effect of crack prefabrication by self-oscillating pulsed jet on the temperature of conical pick during rock breaking processes [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2136-2145.
- [16] 官兵, 李士斌, 张立刚, 等. 激光破岩技术影响因素的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 39-51.  
GUAN Bing, LI Shibin, ZANG Ligang, et al. Review on influencing factors of laser rock drilling technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 39-51.
- [17] BHARATISH A, KISHORE KUMAR B, RAJATH R, et al. Investigation of effect of CO<sub>2</sub> laser parameters on drilling characteristics of rocks encountered during mining [J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2019, 31(4): 395-401.
- [18] WANG Y J, SHI Y L, JIANG J Y, et al. Experimental study on modified specific energy, temperature field and mechanical properties of Xuzhou limestone irradiated by fiber laser [J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 56(1): 161-173.
- [19] 蒋涛, 白杨, 解慧明, 等. 岩石的大功率激光射流研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1200-1205.  
JIANG Tao, BAI Yang, XIE Huiming, et al. Research on rock perforation by high power laser [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(10): 1200-1205.
- [20] 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.
- [21] YANG H Q, LIU J F, LIU B L. Investigation on the cracking character of jointed rock mass beneath TBM disc cutter [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(4): 1263-1277.
- [22] 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 Futong, LU Jingjing, 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.
- [23] LIU J, CHEN W, LIU T Y, et al. Stress evolution of rock breakages by a disc cutter assisted by pre-cuts [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(2): 115.
- [24] 周辉, 徐福通, 卢景景, 等. 切槽对TBM刀具破岩机制的影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 625-634.  
ZHOU Hui, XU Futong, LU Jingjing, et al. Influence of pre-cutting groove on rock breaking mechanism of tunnel boring machine disc cutter [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 625-634.
- [25] 刘媛媛, 侯哲生, 卜志凌. 预切槽对钻孔内撑式破岩效果影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增2): 4045-4053.  
LIU Yuanyuan, HOU Zhesheng, BU Zhiling. Experimental study on influence of pre-cutting slot for breaking effect in rock splitting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Sup 2): 4045-4053.
- [26] 张钦, 宋瑞峰, 李爱军, 等. 预制割缝作用下TBM滚刀切削速度对岩石破岩性能的影响规律[J]. 煤炭工程, 2023, 55(12): 203-208.  
ZHANG Qin, SONG Ruifeng, LI Aijun, et al. Influence of cutting speed of TBM hob on rock breaking performance under the action of prefabricated slotting [J]. Coal Engineering, 2023, 55(12): 203-208.
- [27] 闫长斌, 姜晓迪, 刘章恒, 等. 基于岩碴粒径分布规律的TBM破岩效率分析[J]. 岩土工程学报, 2019,

- 41(3):466-474.
- YAN Changbin, JIANG Xiaodi, LIU Zhangheng, et al. Rock-breaking efficiency of TBM based on particle-size distribution of rock detritus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 466-474.
- [28] JUDT P O, RICOEUR A, LINEK G. Crack paths at multiple-crack systems in anisotropic structures: Simulation and experiment [J]. Procedia Materials Science, 2014, 3: 2122-2127.
- [29] 张魁, 陈振宇, 杨长, 等. 基于小孔应力集中的激光预钻孔条件下 TBM 滚刀侵岩模型建模与试验验证 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(6): 1279-1288.
- ZHANG Kui, CHEN Zhenyu, YANG Chang, et al. Model for penetration of the TBM disc cutter under laser pre-drilling based on stress concentration in a circular hole and its test verification [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(6): 1279-1288.
- [30] 甘一雄, 吴顺川, 任义, 等. 基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2324-2332.
- GAN Yixiong, WU Shunchuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2324-2332.
- [31] AGGELIS D G, SOULIOTI D V, SAPOURIDIS N, et al. Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(11): 4126-4131.
- [32] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展实验及破坏机制 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1050-1059.
- ZHAO Yanlin, WAN Wen, WANG Weijun, et al. Compressive-shear rheological fracture of rock-like cracks and subcritical crack propagation test and fracture mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1050-1059.
- [33] 张村, 高敬宜, 吴润泽, 等. 含水饱和度影响下砂岩单轴压缩破碎特征及其弱化机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1117-1131.
- ZHANG Cun, GAO Jingyi, WU Runze, et al. Weakening mechanism and fragmentation characteristics under uniaxial compression of sandstone with different saturations [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6): 1117-1131.

(责任编辑 沈菊全 腾)