

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.086



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



预切缝辅助 TBM 滚刀破岩贯入荷载演化规律

蒋亚龙¹, 徐彭楚璇¹, 曾建军¹, 徐长节¹, 熊扶阳²

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 江西省交通科学研究院有限公司, 南昌 330200)

摘要: 基于全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)滚刀贯入室内模型试验, 研究了 3 种不同破岩模式(完整岩样破岩、同轨迹破岩和异轨迹破岩)在不同围压条件下高强度花岗岩样贯入荷载演化特征, 重点揭示贯入荷载-贯入度特征曲线、峰值荷载、最大跌落幅值变化规律, 获取不同破岩模式在不同围压条件下 TBM 滚刀受力特性。结果表明: 1) 高围压组贯入荷载-贯入度特征曲线较低围压组先跌落, 跌落幅度较小, 但其对应的贯入荷载并非峰值荷载, 而低围压组初次跌落荷载为峰值荷载, 且跌落幅值较大; 2) 在中高围压 10~15 MPa 时, 峰值荷载及贯入荷载最大跌落幅值均最小, 表明此围压范围较利于 TBM 的掘进; 3) 低围压条件下选用异轨迹破岩模式较同轨迹破岩模式能更有效地降低 TBM 滚刀贯入荷载, 但同轨迹破岩模式的岩样发生楔裂破坏, 其最大跌落幅值最小, 更能减少刀具所受冲击荷载, 减少刀具磨损。

关键词: 高强度超硬岩; 全断面隧道掘进机; 预切缝; 破岩模式; 贯入荷载

中图分类号: TU458; U455.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)01-0063-08

Penetration load evolution rules of rock breaking by pre-cutting slit-assisted TBM disc cutter

JIANG Yalong¹, XU Pengchuxuan¹, ZENG Jianjun¹, XU Changjie¹, XIONG Fuyang²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China;

2. Jiangxi Transportation Institute Co., Ltd., Nanchang 330200, P. R. China)

Abstract: Based on tunnel boring machine (TBM) disc cutter penetration laboratory model tests, the penetration load evolution characteristics of high-strength granite specimens under different confining pressures were studied using three different rock-breaking modes (intact rock-breaking, rock breaking along pre-cutting trajectory and rock breaking between pre-cutting trajectory). The study focused on revealing the penetration load-penetration depth characteristic curves, peak load, maximum drop amplitude variation laws, and obtaining the force characteristics of TBM disc cutters under different rock-breaking modes and confining pressures. The results show that: (1) The penetration load-penetration depth characteristic curve of the high confining pressure group drops earlier and has a smaller decrease in amplitude than that of the low confining pressure group, but

收稿日期: 2023-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(42377169、42267022); 江西省自然科学基金(20232BCJ23004、20232ACB214011); 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室开放课题(HJGZ2021102)

作者简介: 蒋亚龙(1991-), 男, 博士, 副教授, 主要从事 TBM 滚刀破岩机理与数值模拟研究, E-mail: yalongjiang@whu.edu.cn.

Received: 2023-03-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 42377169, 42267022); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (Nos. 20232BCJ23004, 20232ACB214011); The State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure Foundation (No. HJGZ2021102)

Author brief: JIANG Yalong (1991-), PhD, associate professor, main research interests: rock-breaking TBM disc cutter mechanism and numerical simulation, E-mail: yalongjiang@whu.edu.cn.

the corresponding penetration load is not the peak load, while the initial drop load of the low confining pressure group is the peak load, and the drop amplitude is larger; (2) The peak load and the maximum drop amplitude of the penetration load are smallest at medium-high confining pressures of 10-15 MPa, indicating that this confining pressure range is more conducive to TBM excavation; (3) Under low confining pressure conditions, choosing rock-breaking between pre-cutting trajectory mode can reduce TBM disc cutter penetration load more effectively than rock-breaking along pre-cutting trajectory mode. However, the rock sample with the rock-breaking along pre-cutting trajectory mode exhibits wedge failure, and its maximum drop amplitude is the smallest, which can reduce the impact load on cutters and reduce cutter wear.

Keywords: high-strength granite; tunnel boring machine; pre-cutting slit; rock-breaking modes; penetration load

随着交通强国战略的深入实施以及深部资源开采和水资源开发等需求的日益增长,大量深长隧道应运而生^[1],全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)技术随之兴起。与传统钻爆法相比,TBM掘进技术具有施工速度快、隧洞成型好、作业安全、环保等优点,因此被越来越广泛地应用于深长隧道掘进施工^[2]。然而,当TBM掘进过程中遭遇高强度高磨蚀性地层时,将不可避免地出现掘进速度缓慢、刀具磨损严重等一系列问题,导致工期延长、施工成本升高^[3]。在引汉济渭工程秦岭输水隧洞^[4]TBM掘进时遭遇了高强度的花岗岩岩体(单轴抗压强度高达242 MPa),造成刀具严重磨损,刀具更换时长占总工期的1/3,维修费用占总施工费用的1/3;挪威Røssåga水电项目^[5]在施工过程中遭遇了由云母片岩、片麻岩和大理岩等组成的高磨蚀性极硬岩层(单轴抗压强度高达280 MPa),导致刀具寿命极短,甚至刀盘轴承损坏。为了解决上述问题,工业界提出了一种采用高压水射流辅助破岩的新技术^[6],通过将高压水刀射流喷嘴搭载在盾构刀盘上,先行高压水刀切割掌子面形成预切缝,在后行TBM滚刀贯压切削作用下,促进岩体裂纹的扩展贯通,实现高效破岩掘进。首台高压水射流辅助破岩TBM“龙岩号”已成功应用于福建龙岩万安溪引水工程^[7]。

针对高压水射流辅助TBM破岩技术,目前学者们就其破岩机理及破岩效率影响因素展开了一系列研究,并取得了一定成果。周辉等^[8]开展了常截面滚刀贯入预切槽岩样试验,研究发现预切槽的存在有利于裂纹的扩展贯通,能够促进岩石的破碎。Oh等^[6]使用高压磨料水射流进行岩石切割试验,研究揭示了不同射流参数对岩石切割效果的影响规律。徐福通等^[9]基于3种不同岩性及有无预切缝试样的滚刀贯入试验,发现预切槽能降低岩样破碎时压头的法向荷载约44.13%~53.05%,且法向荷载降低比例与岩石单轴抗压强度有关。Karakurt等^[10]利用磨料水射流辅助切割花岗岩样品,得到了

磨料浓度、喷嘴距离等对预切割缝隙宽度的影响规律。程建龙等^[11]基于岩体有高压磨料水射流切缝的滚刀贯入试验进行数值模拟,研究了滚刀贯入荷载随预切缝深度的变化规律,发现贯入荷载随预切缝深度的增加而呈线性降低。汪珂^[12]基于颗粒簇离散元方法进行了预切缝辅助滚刀破岩的数值模拟,发现滚刀破岩载荷随着预切缝与滚刀间距的增大而迅速增大。Cheng等^[13]基于室内试验结果进行数值模拟,研究了水射流的约束压力和切割深度对穿透力、岩屑和比能量的影响,并建议切口深度大于18 mm,以降低穿透力,显著提高破岩效率。Zhang等^[14]依托“龙岩号”所运用的福建龙岩万安溪引水工程,对现场掘进开展研究,发现刀盘转速为6 r/min、高压水射流压力为270 MPa时掘进速度最大。

高压水射流辅助TBM滚刀破岩技术适用于高磨蚀性极硬岩地层,在破岩过程中,TBM滚刀贯入荷载演化规律复杂,荷载跌落幅值大,对TBM刀具冲击作用强烈。进一步研究该技术在破碎超硬岩过程中TBM滚刀贯入荷载演化规律对于揭示破岩效率、保护TBM刀具具有重要意义。然而,目前针对不同因素影响下TBM滚刀贯入荷载演化规律的研究工作极少。笔者基于TBM滚刀贯入模型试验对滚刀破岩过程中的贯入荷载的演化规律进行研究。通过研究不同围压条件和不同破岩模式对贯入荷载-贯入度特征曲线、峰值荷载、最大跌落幅值变化规律,获取不同破岩模式在不同围压条件下TBM滚刀受力特性,得到不同工况下滚刀所受垂直反力的变化规律,从而揭示高压水射流辅助TBM滚刀破岩机制,为极硬岩地层高压水射流辅助TBM破岩高效安全掘进提供理论支持。

1 TBM滚刀贯入模型试验

1.1 岩样参数及试验方案

试验花岗岩岩样取自湖北麻城市,经室内基础力学试验检测,岩样的单轴抗压强度为202.32 MPa,是典型的超硬岩^[15];脆性指标为18.89,属于典型的

脆性材料^[16]。将岩样加工为 190 mm×150 mm×25 mm(长×高×宽)的长方体岩样试样(见图 1),用于 TBM 滚刀贯入模型试验。

为了更好地反映预切缝与滚刀之间的位置关系,将高压水射流辅助 TBM 破岩模式分为 3 种:完整岩样破岩、同轨迹破岩和异轨迹破岩^[17]。完整岩样破岩为岩样未采用高压水射流处理直接贯入,同轨迹破岩模式为预切缝在滚刀正下方,异轨迹破岩模式为预切缝在滚刀两侧,预切缝-刀具轴线间距为

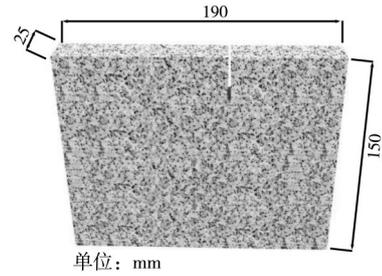


图 1 板状岩样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a tabular rock sample

L ,预切缝深度为 H ,分别如图 2 所示。

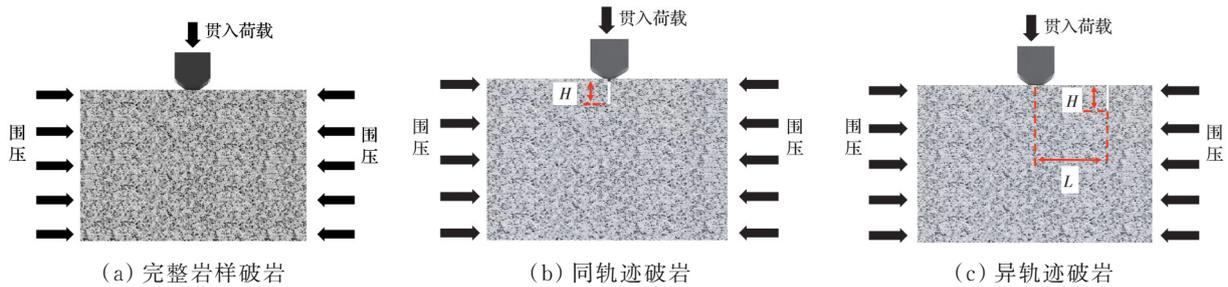


图 2 预切缝辅助滚刀破岩示意图

Fig. 2 Rock-breaking diagram with disc cutter assisted by pre-cutting grooves

设置不同围压参数:无围压(为固定岩样且模拟有侧限条件下的贯入试验,此围压条件下施加 0.1 MPa 侧限压力^[9])、低围压(1.25、2.5 MPa)、高围压(10、15、20 MPa)。完整岩样试验为对照组,进行了 6 种不同围压的试验。预切缝深度设置为 $H=20$ mm,同轨迹破岩模式、异轨迹破岩模式预切缝-刀具轴线间距设置为 0、20 mm。

1.2 试验设备及流程

试验均在 RMT-301 电液伺服刚性试验机上进行,该装置主要由 RMT-301 伺服液压试验机、横向液压千斤顶、侧向手动千斤顶和承压板组成。试验采用自主设计加工的高强度楔形压头,其刀刃角度为 120° ,宽度为 2 mm,整体宽度为 40 mm,如图 3 所示。将试样中心与滚刀中心对齐安放在上述侧向约束框架中,启动 RMT-301 电液伺服刚性试验机,

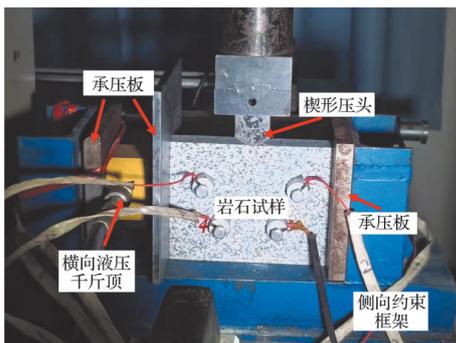


图 3 TBM 滚刀贯入装置

Fig. 3 TBM cutter penetration device

进入加载状态,加载速率为 0.005 mm/s,使滚刀开始贯入,直至岩样发生破坏。整个过程中贯入载荷深度曲线由外接电脑实时采集和显示,记录 TBM 滚刀贯入模型试验全过程。

2 围压对贯入荷载演化规律的影响

2.1 贯入荷载-贯入度特征曲线演化规律

贯入荷载-贯入度特征曲线是滚刀贯入岩样时法向力与贯入深度的相互联系,其变化特征和规律可直观反映滚刀与岩样之间的相互作用关系,可表征滚刀贯入岩样时所诱发的裂纹萌生、扩展贯通以及宏观破坏行为的演化过程。不同围压条件下岩样的贯入荷载-贯入度特征曲线如图 4 所示。将不同围压条件下岩样发生初次跃进破坏对应的贯入度汇总在表 1。

由图 4 可知,当施加在岩样两侧的围压较低时

表 1 不同围压条件下完整岩样首次跃落的次序

Table 1 The order of the first drop of intact rock samples under different confining pressure conditions

首次跌落次序	围压/MPa	对应贯入度/mm
1	无围压	0.879
2	10	0.893
3	15	1.126
4	20	1.171
5	1.25	1.271
6	2.5	1.290

(无围压、1.25 MPa、2.5 MPa),贯入荷载随着贯入度的增大而增大,直至贯入荷载达到峰值时,岩样发生跃进破坏,贯入荷载呈现较大跌落。由曲线可知,在跃进破坏之前,贯入荷载-贯入度曲线可以较为显著地分为非线性增长、线弹性增长、裂纹萌生扩展3个阶段,分别对应着岩样接触压密、微裂纹萌生、裂纹扩展破碎过程,这与刘泉声等^[18]滚刀贯入室内试验破坏行为相一致。无围压、1.25 MPa、2.5 MPa围压条件下,岩样发生跃进破坏时所对应的贯入度分别为0.879、1.271、1.290 mm。可以发现,随着围压的增大,岩样发生跃进破坏时所对应的贯入度逐渐增大,这是围压的增大对岩样内部裂纹的萌生扩展的抑制作用加强所导致^[19]。

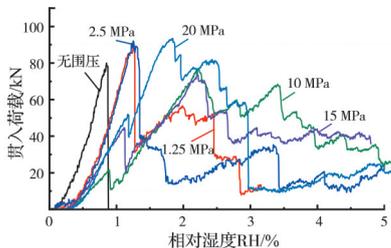


图4 不同围压下完整岩样的贯入荷载-贯入度特征曲线
Fig. 4 Penetration load-penetration depth characteristic curve of intact rock samples under different confining pressures

当施加在岩样两侧的围压较高时(10、15、20 MPa),贯入荷载-贯入度曲线与低围压组存在着一定的差异性,在达到峰值荷载之前,各围压条件下的贯入荷载-贯入度曲线有一个初次跌落,10、15、20 MPa围压条件下所对应的贯入度分别为0.893、1.126、1.171 mm。可以发现,高围压组产生初次跌落所对应的贯入度与低围压组发生跃进破坏时所对应的贯入度近似,均在1 mm左右,且高围压组均先于低围压组出现初次跌落。分析原因为:当施加在岩样两侧的围压较大时,随着贯入度的增大,滚刀下方岩样产生裂纹的萌生与一定程度的扩展,诱发贯入荷载出现小幅的初次跌落。然而该阶段高围压抑制了初始裂纹的进一步扩展贯通,致使岩样内部并未产生宏观主裂纹,此时岩样具备较高的承载能力。随着滚刀的进一步贯入,下方岩样中裂纹加速扩展并逐渐汇聚贯通形成宏观主裂纹,此刻岩样承载能力急剧下降,贯入荷载在达到峰值后大幅急剧降低,出现典型的跃进破碎现象。

基于上述分析可知,当施加在岩样两侧的围压较低时,贯入荷载初次跌落时就对应其峰值荷载,且跌落幅值较大,此时对应着岩石宏观裂纹的扩展贯通;当施加在岩样两侧的围压较高时,在达到峰

值荷载之前,贯入荷载存在初次跌落现象,但跌落幅度较小,而后随着贯入度进一步增大,贯入荷载继续增大直至达到峰值荷载。

2.2 峰值荷载演化规律

峰值荷载为滚刀下方岩样发生破裂时的荷载,绘制不同围压条件下岩样峰值荷载变化柱状图,如图5所示。为了更为直观地展现围压对岩样峰值荷载的影响,以无围压条件的峰值荷载为分母,各围压条件与无围压条件下的峰值荷载差值为分子,计算得到峰值荷载增大百分比,结果见表2。

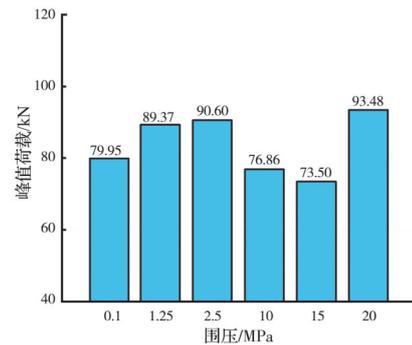


图5 不同围压下完整岩样的峰值荷载变化柱状图

Fig. 5 Peak load change histogram of intact rock sample under different confining pressures

表2 不同围压条件下完整岩样的峰值荷载变化

Table 2 Peak load change of intact rock samples under different confining pressures

围压/MPa	峰值荷载/kN	峰值荷载增大百分比/%
0	79.95	0
1.25	89.37	11.78
2.5	90.60	13.32
10	76.86	-3.86
15	73.50	-8.08
20	93.48	16.92

由图5和表2可见,随着围压的增大,峰值荷载整体呈先增大、后减小、再增大的趋势。当施加在岩样上的围压小于2.5 MPa时,峰值荷载随着围压的增大而增大,其中,1.25、2.5 MPa围压条件下的峰值荷载增大百分比分别为11.78%、13.32%,表明在此围压范围内滚刀破岩所需推力随着围压的增大而增大。随着围压的进一步增大,峰值荷载呈减小的趋势,在10、15 MPa时呈现出较小值,相较于无围压条件,分别降低了3.86%、8.08%。说明在10~15 MPa围压范围内岩样发生破裂时所需要的推力较小,破岩难度一定程度减小;当施加在岩样上的围压继续增大时,峰值荷载继续呈增大的趋势,20 MPa围压条件下峰值荷载增大百分比为16.92%,此时岩样发生破裂所需推力较大。

不同围压水平对TBM破岩过程的影响主要表

现在两个方面:一方面,围压作用可能诱发裂纹向水平方向扩展并与自由面贯通,形成侧向裂纹,促进岩石破碎;另一方面,围压作用也可能抑制中间裂纹的扩展,增加破岩难度^[20-22]。根据相关文献并结合笔者研究结果,推断可能存在临界围压值(或范围),即:当围压低于临界值,TBM 破岩促进作用明显;相反地,当围压高于临界值,TBM 破岩抑制作用明显。基于试验结果可得,在围压为 10~15 MPa 时,促进作用大于抑制作用,此时 TBM 滚刀贯入峰值荷载最小;而当围压上升至 20 MPa 时,围压对裂纹扩展的抑制作用大于促进作用,此时 TBM 滚刀贯入峰值荷载增大,即岩样发生破裂所需推力更大。上述结果与已有研究成果结论具有较好的一致性^[23]。

基于上述分析可知,在低围压条件下,完整岩样峰值荷载随着围压的增大而增大,表明低围压施工环境不利于 TBM 掘进,且围压越大,TBM 掘进越困难。这与张魁等^[24]的试验研究结果相同:当围压低于 2.5 MPa 时,岩样中间裂纹的发展相比于侧向裂纹的发展更好,当围压大于 2.5 MPa 时,侧向裂纹反而更易扩展。TBM 的有效掘进一般是侧向裂纹之间贯通后产生大块岩片^[9],因此,围压低于 2.5 MPa 时侧向裂纹扩展较困难,不利于 TBM 掘进。当围压为 10~15 MPa 时,峰值荷载较小,说明围压为 10~15 MPa 是较利于 TBM 掘进的施工环境。10~15 MPa 是一个临界范围,当围压超过临界范围时,TBM 掘进难度增大,对刀盘、刀具造成的损伤较大。因此,在围压超过 20 MPa 和低于 2.5 MPa 的环境下施工时,需选用较高硬度的刀刃。

2.3 贯入荷载最大跌落幅值演化规律

TBM 破岩过程中将会多次出现跃进破碎现象,贯入荷载突降时,岩样破碎释放出的能量会对刀具产生瞬时且巨大的冲击力,这会对刀具造成损伤,甚至导致刀具崩裂。因此,通过计算贯入荷载最大跌落幅值,分析各因素对贯入荷载降低幅度的影响,对如何保护刀具有重要意义。

图 6 为各围压条件下完整岩样的贯入荷载最大跌落幅值柱状对比图,可以发现,贯入荷载最大跌落幅值随着围压的增加而降低,在围压为 10、15 MPa 时出现最小值,分别为 24.27、24.09 kN。表示当 TBM 在围压为 10~15 MPa 的施工环境时,完成一次有效破岩^[25]后刀盘、刀具所受冲击力最小,因此,10~15 MPa 围压为较优施工环境。这与彭琦^[20]的围压作用有利于 TBM 滚刀破岩研究结论相同;也与围压为 10~15 MPa 时峰值荷载最小、有利于 TBM 破岩的结论对应。高围压比低围压的最大跌

落幅值小,原因为高围压会抑制裂纹的产生,破碎时能量释放较缓,低围压对裂纹抑制作用较弱,主裂纹形成后岩样破碎立刻对刀具释放出较大冲击力。

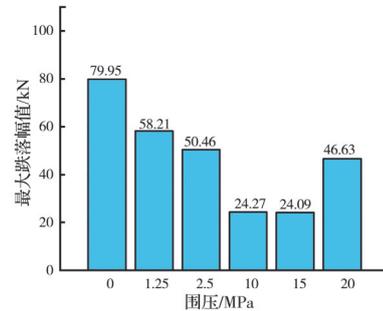


图 6 不同围压下完整岩样的最大跌落幅值柱状图

Fig. 6 Histogram of the maximum drop amplitude of intact rock sample under different confining pressures

围压为 20 MPa 的贯入荷载最大跌落幅值较大,为 46.63 kN。分析图 4 中 2.5 MPa 围压下贯入荷载-贯入度特征曲线发现,其贯入荷载最大跌落幅值未出现在峰值贯入荷载跌落后,而是发生在第 4 次跌落后。表明在最大跌落幅值出现前,岩样内部已经积累了较多细微裂纹,但由于高围压一直抑制主裂纹的扩展,当达到岩样所能承受的最大贯入荷载时,岩样内部积聚了较多能量,主裂纹出现并迅速发展,岩样破碎释放大量能量对刀具产生巨大冲击力,对应第 4 次的大幅度跌落。

3 破岩模式对贯入荷载演化规律的影响

3.1 贯入荷载-贯入度特征曲线演化规律

固定预切缝深度 $H=20$ mm,在低围压条件下进行不同破岩模式 TBM 滚刀贯入模型试验,研究低围压条件下不同破岩模式贯入荷载-贯入度特征曲线的演化规律。如图 7 所示,在 3 种围压条件下,异轨迹模式及完整岩样均在贯入度 1 mm 左右时出现峰值荷载,且跌落幅度为其最大跌落幅值,表示异轨迹模式及完整岩样在贯入度 1 mm 左右完成了一次有效破岩。

同轨迹模式的特征曲线与完整岩样和异轨迹模式不同,随着贯入度的逐渐增加,贯入荷载较其他模式增加更为缓慢,峰值荷载所对应贯入度远大于其他破岩模式,且达到峰值荷载后跌落幅值较小,在最大跌落幅值出现之前均有几次小幅度的跌落。其原因为:同轨迹破岩模式的受力情况不同于其他破岩模式,岩样是受到楔裂作用^[26]发生破坏,其他模式岩样发生劈裂破坏。由于预切缝位于滚刀正下方,使得滚刀与试样之间存在空隙,因而刀刃并未直接接触岩样,而是滚刀刀刃侧面与预切缝的

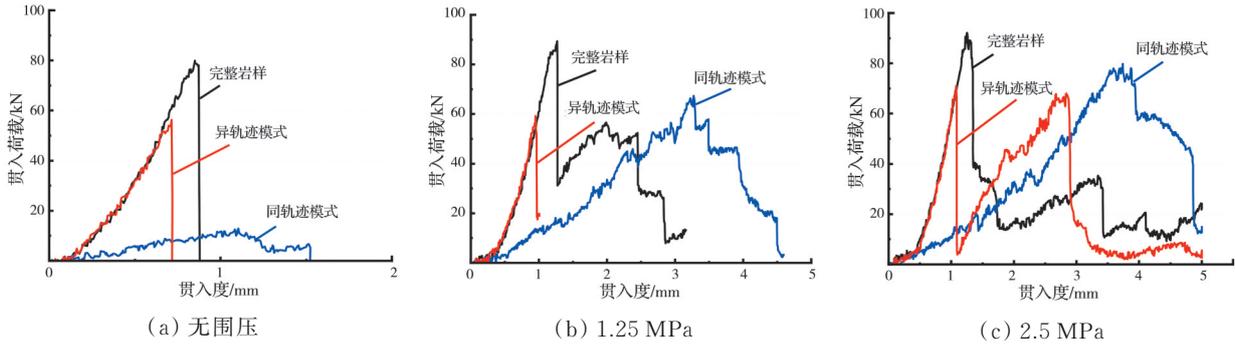


图 7 不同围压下不同破岩模式的贯入荷载-贯入度特征曲线

Fig. 7 Penetration load-penetration depth characteristic curves of different rock-breaking modes under different confining pressures

侧壁相接触,因此,需要较大的贯入度才能使刀具完全接触岩样,出现峰值荷载,完成一次有效破岩。

3.2 不同破岩模式下峰值荷载演化规律

绘制各破岩模式在各围压条件下的峰值荷载柱状图,如图 8 所示。可以看出,各破岩模式峰值荷载均随围压的增大而增大,同轨迹、异轨迹模式峰值荷载均小于完整岩样,表明预切缝辅助 TBM 破岩在不同破岩模式下均有效。在无围压条件下,同轨迹模式峰值荷载远低于其他破岩模式,其值是异轨迹模式的 23%,完整岩样的 16%。表明在无围压条件下,同轨迹模式对 TBM 破岩的辅助效果较好。当围压为 1.25 MPa 时,同轨迹模式峰值荷载大于异轨迹模式,说明此时异轨迹模式对 TBM 破岩的辅助效果较好,在围压为 2.5 MPa 时也呈现近似规律。因此,在低围压情况下,选用异轨迹破岩模式较好,更能减少 TBM 破岩推力。

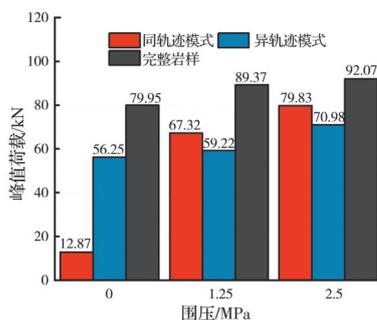


图 8 不同围压下不同破岩模式的峰值荷载柱状图

Fig. 8 Histogram of peak loads of different rock-breaking modes under different confining pressures

3.3 不同破岩模式下贯入荷载最大跌落幅值演化规律

图 9 为各围压条件下不同破岩模式的贯入荷载最大跌落幅值柱状对比图。同轨迹模式贯入荷载最大跌落幅值均随围压的增大而增大,完整岩样随围压的增大而减小,异轨迹模式则随着围压的增大上下波动。可以看出,在各围压条件下,同轨迹模式的贯入荷载最大跌落幅值均小于其他破岩模式,

表明同轨迹破岩模式完成一次有效破岩后对滚刀的冲击力最小,更能避免损伤刀具^[27]。

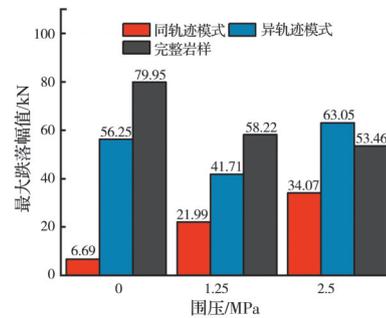


图 9 不同围压下不同破岩模式的最大跌落幅值柱状图

Fig. 9 Histogram of the maximum drop amplitude of different rock-breaking modes under different confining pressures

表 3 为各围压条件下同轨迹模式最大跌落幅值较其他破岩模式的减少量。随着围压的增大,同轨迹模式的减少量减小。在低围压条件下,与完整岩样相比的减少量呈线性减小;与异轨迹模式相比,减少量趋于平缓,稳定在 45% 左右。表明在低围压情况下,完成一次有效破岩后,同轨迹模式可大大降低 TBM 刀具所受冲击力。

表 3 同轨迹模式贯入荷载最大跌落幅值减少量

Table 3 The maximum drop amplitude reduction of the penetration load in the same-trajectory mode

围压/MPa	异轨迹模式/%	完整岩样/%
0	88.11	91.63
1.25	47.27	62.23
2.5	45.96	36.49

4 结论

通过 TBM 滚刀贯入室内模型试验对高压水射流预切缝辅助 TBM 滚刀破岩过程中的贯入荷载演化规律展开研究,揭示不同围压条件和不同破岩模式下贯入荷载-贯入度特征曲线、峰值荷载、最大跌

落幅值的变化规律,获取了不同破岩模式在不同围压条件下 TBM 滚刀的受力特性。得到以下主要结论:

1)各围压条件下完整岩样贯入荷载-贯入度特征曲线均出现典型的跃进破碎现象,初次跌落对应贯入度均在 1 mm 左右。高围压较低围压先出现初次跌落,但对应贯入荷载并非峰值荷载,跌落幅度较小;低围压组初次跌落对应贯入荷载为峰值荷载,且跌落幅值较大。

2)围压为 10~15 MPa 是较有利于高压水射流辅助 TBM 滚刀破岩的环境。在围压为 10~15 MPa 时峰值荷载和最大跌落幅值均最小,此时对刀具造成的损伤相对较小;在围压为 2.5 MPa 或高于 20 MPa 时,峰值荷载和贯入荷载最大跌落幅值均较大,此时建议选用硬度较高的刀刃。

3)不同破岩模式各有优势,应结合实际工况选择合适的破岩模式。在低围压条件下,异轨迹破岩模式峰值荷载更低,能有效降低 TBM 滚刀破岩时的推力;同轨迹模式最大跌落幅值均远小于其他破岩模式,能有效降低滚刀所受冲击力,从而避免刀具损耗。

参考文献

- [1] WU Z J, JIANG Y L, LIU Q S, et al. Investigation of the excavation damaged zone around deep TBM tunnel using a Voronoi-element based explicit numerical manifold method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 158-170.
- [2] 黄兴, 刘泉声, 刘恺德, 等. 深部软弱地层 TBM 掘进围岩变形破坏特性室内试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 76-92.
HUANG X, LIU Q S, LIU K D, et al. Laboratory study of deformation and failure of soft rock for deep ground tunnelling with TBM [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 76-92. (in Chinese)
- [3] 洪开荣. 高强度高磨蚀地层 TBM 滚刀破岩与磨损研究[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2019, 1(1): 76-85.
HONG K R. Study on rock breaking and wear of TBM hob in high-strength high-abrasion stratum [J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2019, 1(1): 76-85. (in Chinese)
- [4] 孙振川, 杨延栋, 陈馈, 等. 引汉济渭岭南 TBM 工程二长花岗岩地层滚刀磨损研究[J]. *隧道建设*, 2017, 37(9): 1167-1172.
SUN Z C, YANG Y D, CHEN K, et al. Study of wear of disc cutter boring in monzonitic granite strata of Lingnan TBM section of Hanjiang River-Weihe River water conveyance project [J]. *Tunnel Construction*, 2017, 37(9): 1167-1172. (in Chinese)
- [5] ZHENG Y L, HE L. TBM tunneling in extremely hard and abrasive rocks: Problems, solutions and assisting methods [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(2): 454-480.
- [6] OH T M, CHO G C. Characterization of effective parameters in abrasive waterjet rock cutting [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 745-756.
- [7] 宋晓东.“穿山甲”舞“水刀”我国首台高压水力耦合破岩 TBM 下线[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(6): 945.
SONG X D. “Pangolin” dance “water knife”, China’s first high-pressure hydraulic coupling rock breaking TBM offline [J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(6): 945. (in Chinese)
- [8] 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 H, XU F T, LU J J, 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. (in Chinese)
- [9] 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 F T, LU J J, ZHOU H, 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. (in Chinese)
- [10] KARAKURT I, AYDIN G, AYDINER K. An investigation on the kerf width in abrasive waterjet cutting of granitic rocks [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(7): 2923-2932.
- [11] 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 J L, ZOU Q Y, YANG S Q, et al. Simulation of indentation behavior of TBM disc cutter and failure mechanism of hard rock assisted by hydraulic pre-cutting kerfs [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2317-2326. (in Chinese)
- [12] 汪珂. 临空面辅助滚刀破岩的数值模拟研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(10): 96-102.
WANG K. Numerical simulation research on the rock fracturing by a TBM disc cutter assisted by free faces [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(10): 96-102. (in Chinese)
- [13] CHENG J L, WANG Y X, WANG L G, et al. Penetration behaviour of TBM disc cutter assisted by vertical pre-cutting free surfaces at various depths and confining pressures [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21(1): 1-18.

- [14] ZHANG J L, YANG F W, CAO Z G, 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.
- [15] 王玉杰, 曹瑞琅, 王胜乐, 等. TBM施工超硬岩分类指标和确定方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(Sup2): 38-44.
WANG Y J, CAO R L, WANG S L, et al. Study on classification index and determination method of extra-hard rock for TBM tunnel [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(Sup2): 38-44. (in Chinese)
- [16] 刘泉声, 刘建平, 时凯, 等. 评价岩石脆性指标对滚刀破岩效率的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 498-510.
LIU Q S, LIU J P, SHI K, et al. Evaluation of rock brittleness indexes on rock fragmentation efficiency by disc cutter [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 498-510. (in Chinese)
- [17] LI B, HU M M, ZHANG B, et al. Numerical simulation and experimental studies of rock-breaking methods for pre-grooving-assisted disc cutter [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81: 90.
- [18] 刘泉声, 潘玉丛, 刘建平, 等. 常截面滚刀贯入试验中岩石破坏行为分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(Sup2): 3516-3525.
LIU Q S, PAN Y C, LIU J P, et al. Analysis on fragmentation behavior of rocks in indentation tests by disc cutter [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 3516-3525. (in Chinese)
- [19] 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 S F, CAO S H, ZHOU X P, 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. (in Chinese)
- [20] 彭琦. 围压对TBM滚刀破岩影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(Sup1): 2743-2749.
PENG Q. Research on influence mechanism of confining pressure on rock breakage by TBM cutters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 2743-2749. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] PAN Y C, LIU Q S, LIU J P, et al. Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting efficiency by TBM disc cutter [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 197-210.
- [23] 汤胜旗, 曾亚武, 叶阳. 临空面对TBM楔刀贯入破岩效果影响试验研究[J]. 人民长江, 2021, 52(11): 175-182, 189.
TANG S Q, ZENG Y W, YE Y. Experimental study on effect of free surface on rock breaking by wedge cutter penetration [J]. Yangtze River, 2021, 52(11): 175-182, 189. (in Chinese)
- [24] 张魁, 夏毅敏, 谭青, 等. 不同围压条件下TBM刀具破岩模式的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1780-1787.
ZHANG K, XIA Y M, TAN Q, et al. Numerical study on modes of breaking rock by TBM cutter under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1780-1787. (in Chinese)
- [25] 顾健健. 地应力下TBM盘形滚刀载荷特性及破岩参数匹配研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
GU J J. Study on load characteristics and rock breaking parameters matching of TBM disc hob under in-situ stress [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [26] 蒋亚龙, 熊扶阳, 徐长节. 高压水刀辅助TBM滚刀破岩效率室内模型试验[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 222-232.
JIANG Y L, XIONG F Y, XU C J. Model test study on rock breaking efficiency by TBM cutter assisted with high pressure water jet [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(8): 222-232. (in Chinese)
- [27] 黄文鹏. 节理密集带地质硬岩TBM刀盘损坏形式及对策[J]. 隧道建设, 2012, 32(4): 587-593.
HUANG W P. Study on damage of hard rock TBM induced by tunneling through joint-densely-developed hard rock section and countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(4): 587-593. (in Chinese)

(编辑 胡玲)