

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S1.022

# TBM 滚刀贯入过程中泥岩破坏特征试验研究

刘泉声<sup>1</sup>, 潘玉丛<sup>1</sup>, 孔晓璇<sup>2</sup>, 刘建平<sup>1</sup>, 时 凯<sup>3</sup>, 崔先泽<sup>1</sup>, 黄诗冰<sup>1</sup>

(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. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 碧桂园控股有限公司 营销中心, 广东 广州 528000)

**摘 要:**为研究无侧限和有侧限条件下软岩贯入破坏特征,结合声发射检测技术和电镜扫描试验进行泥岩立方体试样常截面滚刀贯入试验,分析试验过程中荷载-贯入度曲线和声发射参数特征,并对岩石渣块断口进行细观电镜扫描,研究了破坏时细观和宏观裂纹形成过程。试验结果表明,(1)无侧限和有侧限贯入试验中荷载-贯入度曲线在跃进荷载处均出现明显峰值,跃进荷载峰值以后无侧限试样完全破坏,有侧限试样尚未完全破坏;(2)当宏观裂纹产生时无侧限试样声发射参数出现明显峰值,主要源于该宏观裂纹在试样内部的扩展。有侧限试样破坏过程中出现多次声发射参数峰值,对应多条宏观裂纹形成和扩展;(3)常截面滚刀贯入过程中试样内部出现微滑动,剪切破坏现象比较明显,可以认为滚刀贯入过程中泥岩破坏模式以剪切破坏为主。

**关 键 词:**隧道掘进机(TBM);常截面(CCS)滚刀;泥岩贯入试验;声发射;电镜扫描

**中图分类号:**TU 452

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-7598(2016)增1-0166-09

## Experimental investigation on mudstone fragmentation characteristics in indentation process by TBM disc cutter

LIU Quan-sheng<sup>1</sup>, PAN Yu-cong<sup>1</sup>, KONG Xiao-xuan<sup>2</sup>, LIU Jian-ping<sup>1</sup>,  
SHI Kai<sup>3</sup>, CUI Xian-ze<sup>1</sup>, HUANG Shi-bing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Marketing Center of Country Garden Holdings Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 528000, China)

**Abstract:** The cubic mudstone specimens are indented with constant cross-section(CCS) disc cutter to study the fragmentation characteristics of soft rock in indentation tests with or without lateral confinement. The acoustic emission technique and scanning electron microscope analysis are employed to analyze the failure information. The load-penetration curves and acoustic emission parameters are studied with the observation and detection of macrocrack formation processes and mesoscopic failure characteristics. The results show that: (1) The load-penetration curves appear distinct peak value in both cases, after that the unconfined specimen is completely broken down and the confined one still could bear load at a pretty high level. (2) The acoustic emission parameters reach the peak values when the main macroscopic crack forms and propagates in the unconfined test; the acoustic emission parameters arise for several times in accordance with the initiation and propagation of certain number of macrocrack in the confined test. (3) Micro-slips within mudstone specimens can act as evident shear cracks; and the mudstone fragmentation pattern in indentation test with CCS disc cutter is mainly controlled by shear failure.

**Keywords:** tunnel boring machine(TBM); constant cross section(CCS) disc cutter; mudstone indentation test; acoustic emission; scanning electron microscope

## 1 引 言

全断面岩石隧道掘进机(TBM)成功设计和使用

的关键理论是盘形滚刀和岩石之间的相互作用过程和相互作用机制,其核心在于破岩过程中滚刀三向受力变化规律和岩石内部裂纹扩展模式。在滚刀贯

收稿日期:2015-06-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2014CB046904, No.2015CB058102);国家自然科学基金(No.41130742)。

This work was supported by the National Key Basic Research Program of China (2014CB046904, 2015CB058102) and the National Natural Science Foundation of China (41130742).

第一作者简介:刘泉声,男,1962年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事岩土力学和地下工程方面的研究工作。E-mail:liuqs@whrsm.ac.cn

入过程中岩石表面产生一定深度的压槽，内部产生不同分布形式的裂纹，造成岩石损伤劣化和片起脱落，可以认为贯入过程中法向力是刀具作用下岩石内部裂纹系统形成的主要诱导因素，因此滚刀贯入试验往往被选作破岩机制研究的切入点<sup>[1]</sup>。

基于二维准静态贯入过程的基本假设，研究人员<sup>[2-8]</sup>针对常截面(CCS)滚刀作用下的破岩过程、破岩机制、破岩规律和破岩力计算模型进行深入研究，在破岩过程裂纹扩展模式、刀具受力变化规律和多刀具组合破岩优化方面取得很大进展。

数值模拟方面，Cook 等<sup>[9]</sup>采用简易的二维轴对称弹性有限元(FEM)软件模拟了平底压头作用下岩石受压破坏和受拉破坏过程，并与试验结果进行对比。Liu 等<sup>[10]</sup>基于 R2PA 开发岩石-刀具相互作用代码(R-T2D)模拟单压头和多压头作用下非均质岩石渐进破坏过程，动态显示了破坏过程中裂纹萌生、扩展、相互作用和交汇的全过程。Gong 等<sup>[11-12]</sup>采用离散元程序(UDEC)模拟了考虑节理间距和节理倾向影响的岩石内部裂纹扩展模式和扩展过程，并分析 TBM 掘进效率受到的影响。莫振泽等<sup>[13]</sup>采用 UDEC 软件建立滚刀贯入岩石数值模型，提出刀具破岩是拉破坏和剪破坏的综合反映。苏利军等<sup>[1, 6-7]</sup>采用颗粒流方法(PFC)建立岩石-滚刀作用数值模型，研究了不同刀具类型、刀具组合和切削条件下的破岩过程和破岩效率问题。

试验研究方面，马洪素等<sup>[14]</sup>采用混凝土试样模拟节理岩体，探讨了节理及其参数对滚刀破岩模式、裂纹起裂和扩展方向及滚刀破岩效率的影响。Zhang 等<sup>[15]</sup>采用 DIC (数字图像相关技术)研究二维贯入过程中砂岩试样内部变形行为、裂纹扩展长度和拉伸断裂开始点，指出劈裂破坏机制可能是砂岩在圆柱形压头贯入下的主要破坏模式。Chen 等<sup>[16]</sup>采用花岗岩和砂岩试样进行不同类型楔刀和不同围压的二维贯入试验，分析贯入压力和塑性区尺寸的变化，研究了岩石内部弹塑性交界面处拉伸裂纹的萌生和扩展过程。莫振泽等<sup>[17]</sup>采用不同刃角的楔刀进行花岗岩二维贯入试验，研究不同刃角楔刀下岩石内部损伤破坏情况，指出损伤核发展经历损伤核萌生、裂源增生从聚和损伤区扩展 3 个阶段。Yin 等<sup>[18]</sup>采用大尺寸(300 mm×300 mm×200 mm)花岗岩和大理岩试样进行双向围压作用下 TBM 滚刀贯入试验，研究了不同围压水平下裂纹萌生临界荷载、压碎区尺寸和裂纹分布形态。

目前关于滚刀贯入过程数值模拟和室内试验存在以下 3 点不足：(1) 大多数分析模型为平面应

变状态，采用二维数值软件描述破岩过程，建模过程中选取通过滚刀轴承并垂直于被贯入岩石自由面的平面作为研究面，分析该平面内裂纹萌生扩展过程和刀具组合优化配置问题，二维分析结果不能准确地反映滚刀贯入岩石过程中三维裂纹网络形成和扩展问题。(2) 为有效观测滚刀贯入过程中裂纹萌生扩展的动态过程，室内试验中大多选用具有一定厚度的板状试样，根据声发射探头安装的要求，试样前后表面并没有施加围压。室内试验在一定程度上可认为是平面应力状态，其裂纹扩展模式也不是三维情况，并且试验中往往造成试样在前后表面片起剥离。(3) 目前研究中数值模拟和室内试验多选用中硬岩和硬岩，以花岗岩、砂岩和大理岩为主，但随着 TBM 技术进步和掘进条件改变，软岩地层和复合地层越来越常见，研究 TBM 滚刀贯入软岩试样过程中贯入荷载变化规律和裂纹系统演化过程十分必要。

本文采用 RMT-150 C 电液伺服刚性试验机，结合声发射检测技术，选择大尺寸(150 mm×150 mm×100 mm)立方体泥岩试样进行无侧限和有侧限条件下滚刀贯入试验，分析了滚刀-岩石相互作用过程中滚刀贯入荷载变化规律、试样内部微破裂演化和表面裂纹扩展情况，研究了软岩在滚刀作用下微观损伤劣化和宏观破碎开裂全过程，并对岩石渣块破坏断口进行电镜扫描微观破坏机制分析，获得软岩试样宏观破坏形态和细观破坏机制，可为滚刀在软弱岩石中破岩机制研究提供参考和依据。

## 2 试验系统

本试验通过分析 TBM 滚刀垂直贯入过程中泥岩试样的破坏特征，研究试样内部微破裂演化和表面宏观裂纹扩展全过程，分析泥岩试样破坏细观力学机制，包括岩石贯入试验加载系统、声发射检测系统和电镜扫描试验 3 个子系统。

### 2.1 岩石贯入试验加载系统

试验的加载系统为 RMT-150 C 电液伺服刚性试验机，见图 1。选用试验机垂直加载功能，试验控制方式为垂直活塞行程控制，加载速率为 0.005 mm/s。试验过程中实时记录和跟踪贯入荷载、垂直活塞行程信息，获得荷载-贯入度曲线。试验机加载部分选用自制模型滚刀，刀具由高强度钢材加工而成。模型滚刀选用平刃形式以模拟 TBM 刀盘中常用的 CCS 滚刀，其刀刃宽度为 13 mm，刀具直径为 120 mm。试验过程中侧向压力(0.1 MPa)通过高刚度框架、刚性加载板和千斤顶施加到泥岩试样左

右两表面，试样前后表面因为安装声发射探头的需要未施加围压，作为自由表面以观测试样表面宏观裂纹扩展形态。



图 1 岩石贯入试验加载系统

Fig.1 Loading system for rock indentation test

## 2.2 声发射检测系统

声发射检测技术是一种无损检测技术，可连续、实时地监测加载过程中试件内部裂纹产生、扩展直至破坏的演化过程，通过研究岩石试件破裂过程中释放出的弹性应力波特征有助于揭示其内部裂纹开裂和损伤劣化过程，研究材料内部的破坏状态。本试验采用美国物理声学公司 PAC 生产的 PCI-2 声发射测试分析系统，实现对声发射信号的自动计数和存储，实时监测和定位微破裂事件，并利用 AEwin 软件进行结果分析。试验中选择第 1~4 通道进行声发射信号采集，4 个传感器分别经前置放大器连接到 1~4 通道上，以交叉对角方式设置在泥岩试样前后表面，其布置见图 2。采用的声发射传感器为 NANO30 型，并通过均匀涂抹的耦合剂与试件紧密黏接固定。为有效滤除试验中环境噪声，声发射数据采集阈值设置为 40 dB，采样频率为 1 M SPS。

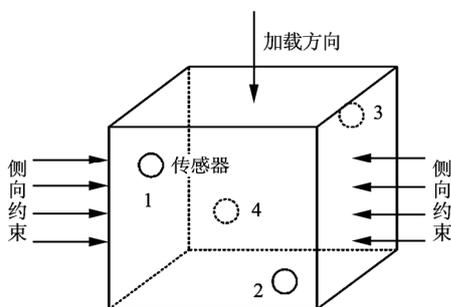


图 2 声发射传感器布置示意图

Fig.2 Layout sketch of acoustic emission sensors

## 2.3 电镜扫描试验

岩石破坏断口是岩石断裂后留下的关于断裂过程和断裂信息的全面记录，岩石断裂后留下的最直接和最直观信息都在断口上，断口破坏信息分析

是岩石断裂机制和断裂过程分析不可缺少的一部分。采用 Quanta 250 型扫描电子显微镜（见图 3）进行岩石渣块破坏断口微观扫描分析，电镜扫描样本本次选择贯入过程后密实核区域以外的岩石破碎产物，直接观测样本破坏断口表面微结构和形貌等信息，以揭示滚刀贯入作用下岩石微观破坏过程和破坏机制。



图 3 Quanta 250 型扫描电子显微镜

Fig.3 Scanning electron microscope Quanta 250

## 3 试样制备和试验方案

### 3.1 试样制备

本试验泥岩试样取自淮南潘一东矿-848 m 轨道大巷。综合考虑 RMT-150C 试验机有效加载空间和实验过程尺寸效应两方面的影响，泥岩试样尺寸取为 150 mm×150 mm×100 mm。对圆柱体标准试样进行单轴抗压试验和巴西劈裂试验，获得泥岩基本力学参数，其单轴抗压强度为 45.85 MPa，抗拉强度为 1.66 MPa，弹性模量为 22.096 GPa，泊松比为 0.239，为较软岩。工程上一般将抗压强度小于 30 MPa 的岩石定义为软岩，但在 TBM 掘进过程中岩石单轴抗压强度约为 60 MPa 时才会发生机器操作模式由贯入度控制型到推进力控制型的转变<sup>[19]</sup>，因此本次试验中所采用的泥岩试样在 TBM 掘进中仍属于较软岩石。

### 3.2 试验方案

**声发射检测系统设置：**布置在试样表面 NANO30 传感器，启动声发射检测系统 AEwin 软件，采用“断铅法”判断传感器和试件之间的耦合质量。不断地调整系统相关参数直至声发射事件点位置与试验点位置相近或一致。

**试件安放：**将泥岩试件安放于 RMT-150C 试验机加载平台上，保证滚刀位于试样上表面中心位置处，并沿垂直方向贯入以避免偏心加载。在有侧限试验中，试件底面和左右两侧面均垫入聚四氟乙烯薄膜以消除边界噪声，通过侧向加载板和千斤顶施

加侧向约束。在无侧限试验中，试件底部垫入聚四氟乙烯薄膜，4 个侧面均为自由表面。

预加载：启动 RMT-150 C 试验机控制系统，输入试验控制参数后进行预加载，使滚刀垂直向下走完空程后与试件上部接触并保证一定的初始贯入荷载保证紧密接触。

正式加载及数据记录：开始正式加载，轴向方向采用位移控制方式，加载速率为 0.005 mm/s，加载时滚刀持续贯入直至试件破坏。RMT-150 C 试验机自动跟踪记录加载过程中荷载-贯入度曲线，声发射采集系统进行声发射信号采集与定位工作。试验结束后选择密实核以外岩石渣块进行电镜扫描试验，获取断口细观破坏信息。

数据处理及结果分析：依据滚刀贯入试验中荷载-贯入度曲线波动特征与声发射技术和能量等参数，分析声发射事件定位信息，分析泥岩试样在贯入作用下微裂纹演化和宏观裂纹扩展全过程，结合岩石渣块细观扫描试验结果，揭示滚刀贯入过程中软岩破坏机制和破坏过程。

### 4 试验结果及分析

#### 4.1 声发射计数和能量与荷载-贯入度曲线分析

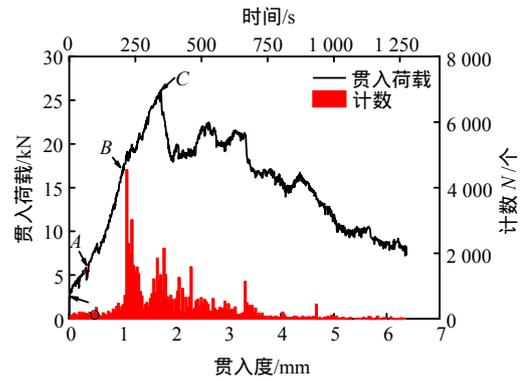
图 4 为无侧限和有侧限条件下 CCS 滚刀贯入泥岩试样刀具荷载-贯入度曲线和声发射计数与能量的关系。根据荷载-贯入度曲线特征和声发射参数，可将 CCS 滚刀贯入实验中泥岩试样破坏过程大体上划分为 4 个阶段：

##### (1) 非线性变形阶段 (OA 段)

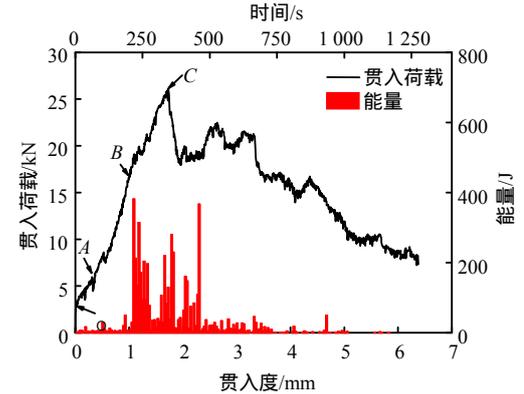
当滚刀与岩石刚接触时，岩石内部原有张开型结构面和微裂隙等逐渐闭合，滚刀正下方一定范围内的岩石逐渐被压密，形成早期非线性变形，对应于荷载-贯入度曲线的上凹段。对于无侧限和有侧限 2 组试样，本阶段均只监测到很少的声发射计数和能量释放，表明泥岩试件中在此阶段并没出现较多的微破裂活动和能量释放过程，见图 4 中 OA 段。

##### (2) 线弹性变形阶段 (AB 段)

随着贯入荷载持续增加，岩石内部大部分原生空(孔)洞的压密过程逐渐完成。滚刀正下方形成极高的静水压力区，此区域外侧形成拉应力区，对应声发射计数出现增长段和事件定位出现密集区。此时岩石仍处于线弹性变形状态，岩石内部只发生微弱损伤，但其内部迅速蓄积很多能量。本阶段对应的破岩荷载上限一般超过峰值荷载的 45%，对应于滚刀 2 个拐角处锥形裂纹的出现<sup>[9]</sup>，荷载-贯入度曲线近似直线，见图 4 中 AB 段。图 4 中，此阶段

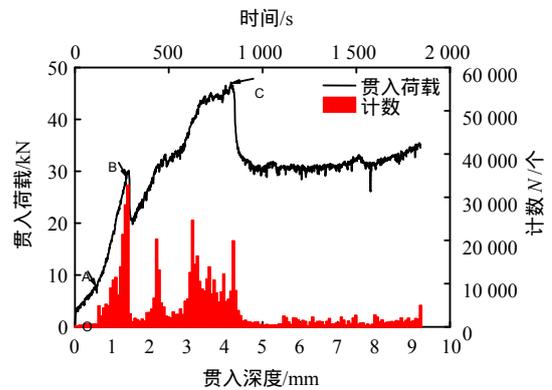


(a) 荷载-贯入度曲线和声发射事件计数的关系

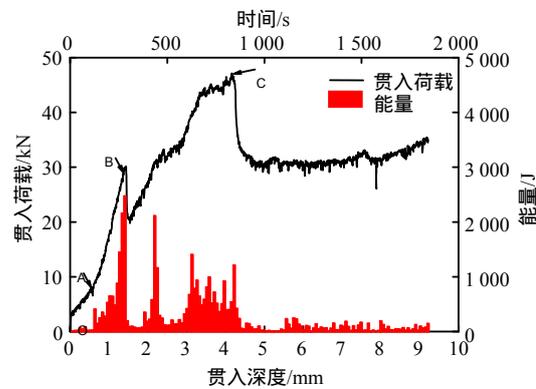


(b) 荷载-贯入度曲线和声发射事件能量的关系

(1) 无侧限试验



(a) 荷载-贯入度曲线和声发射事件计数的关系



(b) 荷载-贯入度曲线和声发射事件能量的关系

(2) 有侧限试验

图 4 无侧限和有侧限试验荷载-贯入度曲线与声发射现象的关系

Fig.4 Relationships between load-penetration curve and acoustic emission phenomena with lateral confinement

对应贯入度范围为 0.5 ~ 1.0 mm, 无侧限试样仍未监测到较多数量的声发射计数和能量释放, 表明无侧限条件下声发射参数峰值前信号沉寂期较长, 岩石内部能量蓄积过程持久。但对于有侧限试样, 线弹性变形段监测到较大数量的声发射计数和能量释放, 结合图 4(2)的(a)图中荷载-贯入度曲线在荷载峰值前的 B 点处出现较大幅度荷载降, 其原因可以解释如下: 泥岩试样内部裂隙发育, 颗粒间连接弱, 有侧限试样在贯入度为 1.4 mm 产生宏观裂纹, 荷载-贯入度曲线表现为荷载突降, 因此宏观破坏之前的线弹性变形段声发射计数和能量释放较为活跃。

### (3) 裂纹萌生和扩展阶段 (BC 段)

分析荷载-贯入度曲线和声发射计数与能量曲线可得, 无侧限试样贯入度范围为 1.0 ~ 1.7 mm, 有侧限试样贯入度范围为 1.0 ~ 4.4 mm 时, 声发射计数和能量释放总体上都处于相应整个加载曲线的最活跃区段, 表明本阶段内岩石剧烈地损伤裂化, 内部微破裂广泛发育, 其破坏范围不断扩大, 能量量级不断增加, 岩石内部不断产生新的微裂纹并交汇集形成宏观裂纹。此阶段产生的原因主要是由于贯入荷载的进一步增加, 滚刀下方一定区域内岩石剧烈粉碎, 并将滚刀贯入荷载以静水压力形式传递到周围岩石上, 促使它们不断抬升或者外推, 导致中间裂纹、径向裂纹和侧向裂纹存在的破坏区范围逐渐扩大。同时可发现, 在无侧限条件和有侧限条件下岩石在滚刀贯入过程中的破坏现象存在不同。

对于无侧限试验, 在贯入度为 1.1 mm 附近出现声发射计数明显峰值, 贯入荷载值对应裂纹萌生临界荷载<sup>[18]</sup>, 此点后微裂纹迅速交汇, 宏观裂纹产生, 能量迅速释放。图 5(a)显示了无侧限试样在贯入试验之后的表面宏观裂纹形态, 可见在滚刀刀体所在平面内产生一条明显的劈裂裂纹, 从试样上表面贯通试样高度方向直至试样下表面, 周围无其他次级裂纹产生, 表明无侧限条件下即使是软岩也以劈裂模式发生破坏。

对于有侧限试验, 在 BC 段内 (见图 4(2)) 出现多次声发射计数峰值, 表明在该段内多次出现微裂纹迅速萌生扩展形成宏观裂纹的过程, 可从试样表面宏观裂纹形态观测得到。从图 5(b)中可以看出, 在滚刀压槽前部和后部区域处形成若干条斜交于试样前后自由表面的发散状裂纹, 试样表面一定区域内比较破碎。在贯入试验中可发现, 基本上每一个声发射计数峰值都对应一条宏观裂纹产生。由于试验中施加侧压过小 (0.1 MPa), 泥岩试样并没有出

现明显侧向片起现象, 破坏形态仍呈现劈裂破坏模式。可以预见, 如果施加的侧压足够大, 那么压槽前部和后部区域处裂纹会逐渐向压槽区两侧移动, 在压槽两侧出现侧向裂纹并在试样表面形成岩片。



(a) 无侧限试验泥岩试样破坏形态



(b) 有侧限试验泥岩试样破坏形态

图 5 贯入试验后泥岩试样破坏形态对比  
Fig.5 Comparison of failure modes of mudstone specimens after indentation test

### (4) 峰后破坏阶段 (C 点以后)

当贯入荷载达到最大值, 即出现第一次跃进破碎后仍持续加载以研究泥岩试样破坏后的承载能力和破坏特征。

无侧限试验中, 贯入荷载随贯入深度增加出现波动减小趋势, 可认为试样的承载能力不断下降。虽然在峰后阶段贯入荷载曲线仍出现若干次峰值, 声发射计数和能量也出现波动, 但并没有在试样表面形成新的宏观裂纹, 微破裂活动主要来源于已有劈裂裂纹不断向试样下部和前后表面的扩展过程。

有侧限试验中, 在贯入度大于 4.4 mm 时, 因为侧向位移受到限制, 试件破坏后仍然具有很高的承载能力。本阶段内仍然有较多声发射计数出现, 但未出现较为明显的峰值, 表明此时试件内部微破裂现象并不活跃, 可以归因于此时滚刀贯入施加的能量主要用于形成滚刀下方的压碎区, 并没有促进试样其他部位微破裂活动产生。

分析无侧限试样和有侧限试样的荷载-贯入度曲线和声发射计数和能量之间的关系可以发现, 无

侧限试样出现单条控制性宏观裂纹，声发射现象出现明显峰值，呈现劈裂破坏特征（见图 5(a)），但荷载降并不如硬岩明显；有侧限试样出现多条宏观裂纹（见图 5(b)），声发射现象出现多次峰值，呈现塑性破坏特征。这种现象与前人数值模拟结果<sup>[10]</sup>一致，即无侧向约束时试样内部往往出现发育很深的中间主裂纹，对应本试验无侧限试样中观察到的劈裂裂纹，而在有侧向约束时试样内部往往出现破碎区，中间主裂纹不再向深处发育，取而代之的是侧向发育的径向裂纹，对应本试验有侧限试样中观察到的多条宏观裂纹。

#### 4.2 声发射事件定位分析

图 6、7 为无侧限泥岩试样和有侧限泥岩试样在 CCS 滚刀贯入过程中不同阶段的声发射事件定位。从图中可以看出，由于泥岩物理力学性质的非均质性和不确定性，且滚刀贯入过程中压碎区和已有裂纹对新产生裂纹定位的影响和干扰，声发射事件定位准确性较差，但仍可以得到如下结论：

(1) 从声发射事件定位数量上可以看出，有侧限试样内部微破裂活动和能量释放现象远大于无侧限试样，同样的结论也可以从声发射计数上得出，其原因可归纳为以下 3 点：第一，侧向限制的施加使得试样侧向变形和位移受到限制，试样中蓄积更多变形能，发生宏观破坏时急剧而猛烈，出现更多微破裂活动，具体表现为主裂纹出现时声发射计数峰值很高，能量释放剧烈，如图 4(2)所示。第二，侧向限制的施加使得试样破坏不再是一条裂纹控制的劈裂破坏模式，而是转化为多条裂纹控制的发散状裂纹破坏模式，而每一条裂纹的出现均对应于声发射参数峰值，也即有侧限试验中裂纹萌生和扩展阶段出现若干次声发射计数和能量峰值，相对应地出现多条宏观裂纹，如图 5 所示。第三，侧向限制的施加使得有侧限试样荷载-贯入度曲线荷载峰值点对应的贯入度大于无侧限试样跃进荷载对应的贯入度，滚刀贯入岩石深度越大则岩石内部扰动损伤区范围越大，因此微破裂活动范围也越大（见图 7），相应声发射事件定位数量也就越多。

(2) 从声发射事件定位范围可以看出，在无侧限试样中声发射事件定位出现方向性丛聚，沿着某一条状区域发展，可对应于在试验中观测到的单条宏观裂纹扩展。在有侧限试样中声发射事件定位范围比较大，与无侧限试样中滚刀正下方某一区域内出现声发射事件簇不同，有侧限试样在滚刀下方和试样内部相当大范围内产生声发射事件定位密集

区，这可对应于在实验中观测到的多条宏观裂纹发育和扩展现象。

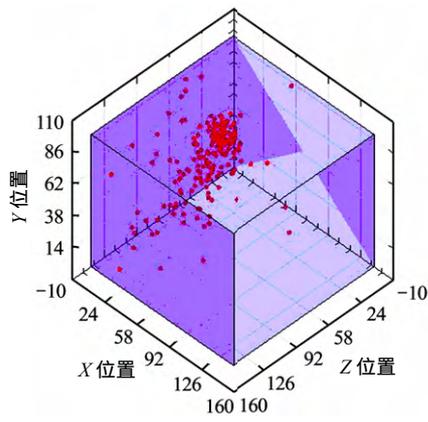
无侧限试验中容易出现沿滚刀贯入方向的劈裂裂纹，其原因在于实验室内试样尺寸有限，并不能完全排除尺寸效应，如果滚刀贯入半空间无限体岩石，那么作为中间裂纹的劈裂裂纹会在某一深度范围内停止扩展，取而代之的是向着侧向发展的若干条次级裂纹。有侧限试验中滚刀作用下岩石会出现较大范围内的压碎区，较大的控制性裂纹一般不会出现，取而代之的是若干条宏观裂纹，岩石呈现出塑性变形行为，扰动区更大，因此声发射事件定位范围更广。

(3) 滚刀贯入初期试件内部声发射事件定位较少，主要分布在滚刀正下方，说明此时破坏主要在滚刀正下方与岩石接触区域内发生。随着滚刀贯入度增大，滚刀正下方声发射事件数明显增多，范围小且幅增大，表明此区域内发生密集破坏，可对应于密实核区形成过程，同时密实核区域外也出现声发射事件定位点，岩石的潜在破坏范围增大。临近破坏时，密实核区域内部和外部声发射事件均继续增多，岩石内部破坏稳定发展。当贯入荷载达到跃进荷载时，声发射事件大量发生，事件点数量急剧增多，密度增大，并沿主要破裂面呈密集分布趋势，主要破坏发生后各声发射参数均处于较低水平。

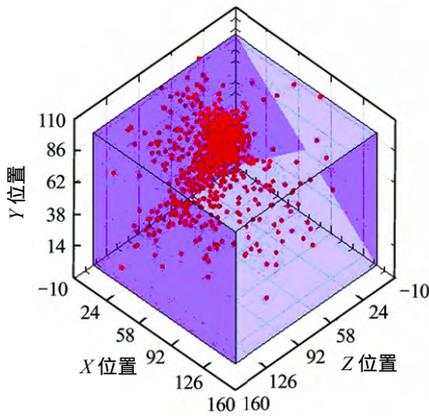
需要说明，试验中并不能将宏观裂纹出现的位置和扩展路径与声发射事件定位结果建立相对较好的联系，只能指出在滚刀正下方的岩石内部出现较大范围的压碎区，其外围是裂纹网络形成的损伤区。损伤区是一个变形较大、裂纹密布的大应变区，区域内存在中间裂纹、径向裂纹和侧向裂纹各种类型的裂纹，有侧限试验中压碎区和损伤区均要大于无侧限试样，因为在有侧限试验中滚刀贯入度更大，诱发的岩石响应区也更大，消耗的能量也更多，贯入破岩也更困难。

#### 4.3 岩石渣块电镜扫描分析

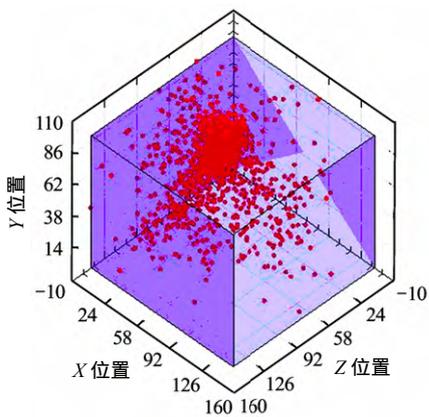
岩石破裂面上的微观形貌是由岩石断裂过程中受力情况和细观特征所决定的，考察岩石破裂面的细观形貌特征，可以在一定程度上反映岩石的破坏模式。根据郝宪杰等<sup>[20]</sup>的研究，拉破坏面特征为棱角锋利鲜明、断面呈阶梯状、在断面上以及侧面低洼部位没有或者少有散落岩屑、平行擦痕不明显。剪切破坏面由于存在相对滑移，使表面沿运动方向产生擦痕，擦痕平行且密集分布，台阶高度一般较拉破坏要小。



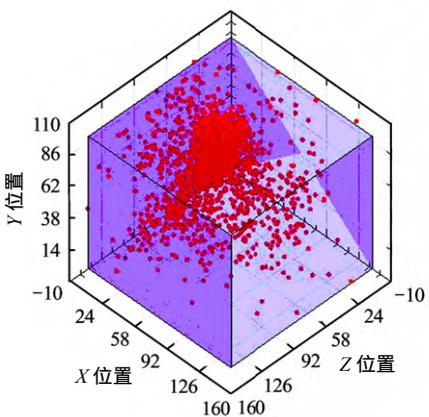
(a) 贯入度为 1.0 mm



(b) 贯入度为 2.0 mm

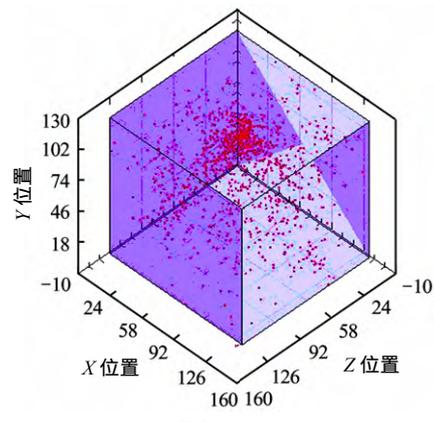


(c) 贯入度为 3.0 mm

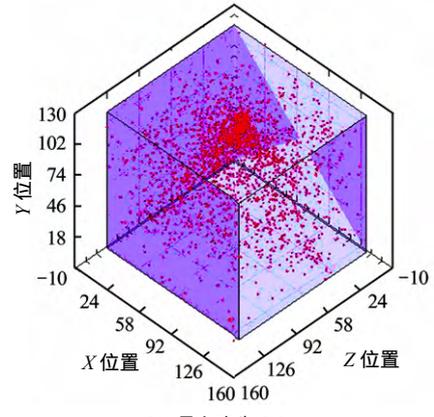


(d) 贯入度为 5.0 mm

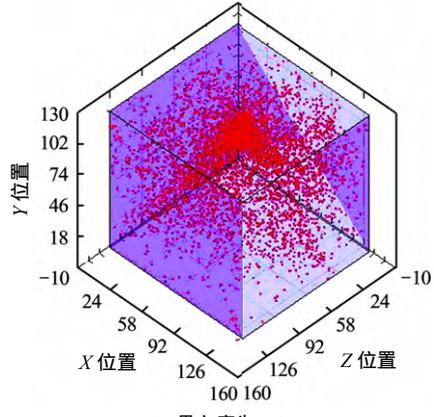
图6 无侧限试件声发射事件定位演化过程  
Fig.6 Evolution process of acoustic emission events locations without lateral confinement



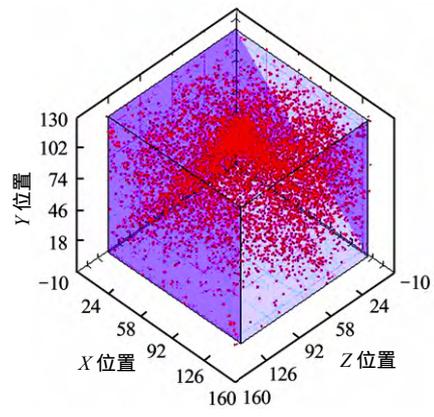
(a) 贯入度为 1.0 mm



(b) 贯入度为 2.0 mm



(c) 贯入度为 4.0 mm



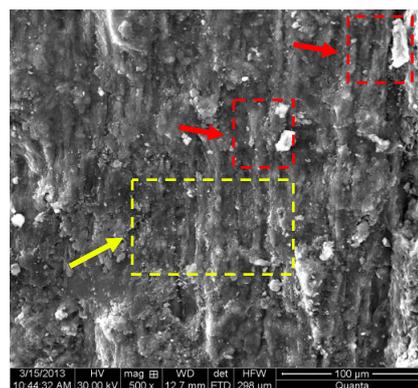
(d) 贯入度为 8.0 mm

图7 有侧限试件声发射事件定位演化过程  
Fig.7 Evolution process of acoustic emission events locations with lateral confinement

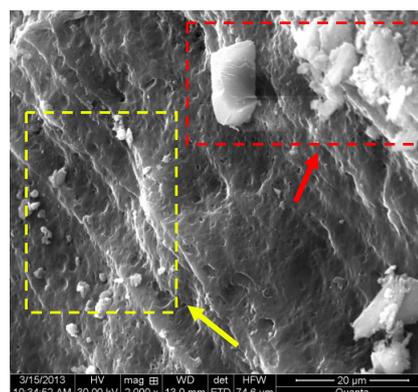
在 TBM 滚刀贯入过程中, 岩石内部可划分为压碎区和裂纹区两个区域, 压碎区是由滚刀正下方极高的压应力碾压粉碎岩石块体形成的岩石粉末区域, 一般认为压碎区处于近似三向压应力状态。滚刀贯入过程中诱发的裂纹系统比较复杂, 可分为中间裂纹、径向裂纹和侧向裂纹, 其中中间裂纹和径向裂纹一般是由于压碎区边界上某些点处切向拉应力超过岩石抗拉强度而形成的<sup>[10]</sup>, 但由径向裂纹向着自由面扩展形成的侧向裂纹是因滚刀水平侧向力推动造成的简单剪切破坏, 还是原有径向裂纹拉伸破坏的延续目前还没有定论。滚刀贯入试验结束后从泥岩试样压碎区外侧发生片起的岩渣中(见图 5 黄色箭头处)选取典型样本进行电镜扫描试验。图 8 显示了岩石渣块断裂面在不同放大倍数下的电镜扫描图像。

从泥岩试样压碎区以外岩石渣块电镜扫描微观形态可以看出, 断面呈现台阶状起伏, 但台阶高度较小, 并未呈现明显拉破坏特征(见图 8 黄色箭头处)。考虑到断面台阶状起伏具有明显方向性, 断面上错动和剪切碾磨岩粉特征较显著(见图 8 红色箭头), 可以认为岩石断口发生剪切破坏。试验结果与劈裂破坏模型基本假设<sup>[15]</sup>和剪切破岩机制基本模型<sup>[21]</sup>相吻合。在劈裂破坏模式中, 滚刀贯入下试样内部某些区域内出现微滑动, 微滑动发挥剪切裂纹的作用, 试样内部平行于受压轴线的裂纹依赖于倾向加载轴线方向的剪切裂纹。在剪切破岩模型中, 滚刀间岩石的横向断裂不属于拉伸破坏, 主要是由滚刀水平推压力引起的简单剪切断裂, 但剪切破岩模型也指出拉伸断裂在裂纹萌生初期也起到相应作用。

岩石抗拉强度一般均小于抗剪强度。坚硬岩石和脆性岩石在滚刀贯入过程中往往因岩石内部压碎区边界上的切向拉应力超过其抗拉强度而发生脆性破坏, 形成各种形式的裂纹, 此时拉伸破坏消耗的破岩能占据主导地位。本次试验结果支持以下结论, 即在无侧限条件下软岩试样以劈裂破坏模式发生破坏, 其劈裂裂纹的形成依赖于倾向加载轴线方向的剪切裂纹; 在有侧限条件下软岩试样以剪切破岩模型发生破坏, 岩片产生主要是由滚刀水平推压力引起的简单剪切断裂。总地来说, 软弱岩石中滚刀贯入过程主要诱发剪切破坏的裂纹, 形成的是较大范围的塑性区和剪切裂纹密集区, 而剪切破坏往往需要消耗更高的能量, 采用滚刀破碎软弱岩石往往是高耗能的, 在实际掘进过程中应该予以注意。



(a) 500 倍



(b) 2 000 倍

图 8 泥岩试件岩渣断口电镜典型图样  
Fig.8 Representative SEM patterns of rock chip fracture surfaces for mudstone

## 5 结 论

(1) 依据荷载-贯入度曲线、声发射计数与能量曲线, 可以将滚刀贯入过程划分孔隙裂隙压密阶段、线弹性变形阶段、裂纹萌生和扩展阶段及峰后破坏阶段 4 个阶段。

(2) 泥岩试样无侧限和有侧限条件贯入试验中荷载-贯入度曲线在跃进荷载处均出现明显峰值, 在跃进荷载峰值以后, 无侧限试样贯入荷载不断降低直至完全破坏, 有侧限试样贯入荷载不断降低直至稳定在某一较高水平上, 试样并未完全破坏。

(3) 无侧限试样声发射计数和能量释放在宏观裂纹产生时出现明显峰值, 其后声发射事件主要来源于宏观裂纹在试样内部的扩展。有侧限试样声发射信号沉寂期较短, 破坏过程中出现多次声发射计数和能量释放峰值, 可对应多条宏观裂纹的形成和扩展。

(4) 无侧限试样声发射计数水平较低, 定位范围较集中, 主要来源于压碎区形成和单条宏观裂纹扩展。有侧限试样声发射计数水平较高, 定位范围比较广, 主要来源于多条宏观裂纹形成和扩展。

(5) 滚刀贯入作用下试样内部出现微滑动, 可

对应劈裂破坏模式中的剪切裂纹,断口呈现拉剪破坏特征,剪切破坏现象比较明显,可认为滚刀贯入过程中泥岩破坏模式以剪切破坏为主。

### 参 考 文 献

- [1] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon: [s.n.], 1965: 57 - 73.
- [2] 苏利军, 孙金山, 卢文波. 基于颗粒流模型的 TBM 滚刀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.
- [3] 梁正召, 于跃, 唐世斌, 等. 刀具破岩机制的细观数值模拟及刀间距优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 84 - 89.  
LIANG Zheng-zhao, YU Yue, TANG Shi-bin, et al. Numerical modeling of rock fracture mechanism under disc cutters and associated cutter spacing optimization[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2012, 29(1): 84 - 89.
- [4] 姚羲和, 赵晓豹, 龚秋明, 等. 滚刀线性侵入试验中岩石破裂模式研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1705 - 1713.  
YAO Xi-he, ZHAO Xiao-bao, GONG Qiu-ming, et al. Linear cutting experiments on crack modes of rock under indentation of a single disc cutter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(9): 1705 - 1713.
- [5] 谭青, 徐孜军, 夏毅敏, 等. 2 种切削顺序下 TBM 刀具破岩机制的数值研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(3): 940 - 946.  
TAN Qing, XU Zi-jun, XIA Yi-min. Numerical study on mode of breaking rock by TBM cutter in two cutting orders[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(3): 940 - 946.
- [6] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. TBM 滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2453 - 2464.  
TAN Qing, YI Nian-en, XIA Yi-min, et al. Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(12): 2453 - 2464.
- [7] 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 cutters[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1891 - 1897.
- [8] 刘泉声, 时凯, 朱元广, 等. TBM 盘形滚刀破岩力计算模型研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(7): 1136-1142.  
LIU Quan-sheng, SHI Kai, ZHU Yuan-guang, et al. Calculation model for rock disc cutting forces of TBM[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(7): 1136 - 1142.
- [9] COOK N G W, HOOD M, TSAI F. Observations of crack growth in hard rock loaded by an indenter[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon:[s.n.], 1984: 97 - 107.
- [10] LIU H Y, KOU S Q, LINDQVIST P A, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 491 - 505.
- [11] GONG Q M, JIAO Y Y, ZHAO J. Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, 21(1): 46 - 55.
- [12] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(2): 183 - 191.
- [13] 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.  
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.
- [14] 马洪素, 纪洪广. 节理倾向对 TBM 滚刀破岩模式及掘进速率影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 155 - 163.  
MA Hong-su, JI Hong-guang. Experimental study of the effect of joint orientation on fragmentation modes and penetration rate under TBM disc cutters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 155 - 163.
- [15] ZHANG H, HUANG G, SONG H, 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.
- [16] CHEN L H, LABUZ J F. Indentation of rock by wedge-shaped tools[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2006, 43(7): 1023 - 1033.
- [17] 莫振泽, 李海波, 周青春, 等. 楔刀作用下岩石微观劣化的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1333 - 1340.  
MO Zhen-ze, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of rock microscopic deterioration under wedge cutter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(5): 1333 - 1340.
- [18] 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.
- [19] FRENZEL C, KÄSLING H, THURO K. Factors influencing disc cutter wear[J]. **Geomechanics and Tunnelling**, 2008, 1: 55 - 60.
- [20] 郝宪杰, 冯夏庭, 江权, 等. 基于电镜扫描实验的柱状节理隧洞卸荷破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1647 - 1655.  
HAO Xian-jie, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Research on unloading failure mechanisms of columnar jointed rock mass tunnel based on scanning electron microscopy experiments[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1647 - 1655.
- [21] WANG F D, OZDEMIR L. Tunnel boring penetration rate and machine design[M]//Tunneling and Underground Structure. Washington: [s.n.], 1978: 21 - 28.