

文章编号: 1000-7598 (2012) 05-1333-08

# 楔刀作用下岩石微观劣化的试验研究

莫振泽<sup>1</sup>, 李海波<sup>1</sup>, 周青春<sup>1</sup>, 邹 飞<sup>1</sup>, 朱小明<sup>1</sup>, 王长柏<sup>1,2</sup>, 郝亚飞<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, 武汉 430071; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:** 通过改装 RMT-150C 系统, 使用不同刃角的楔形刀具对花岗岩进行贯切试验, 利用 DISP 声发射测试系统进行声发射的定位特征分析, 研究岩石在楔形刀具作用下损伤劣化破坏的全过程。试验结果表明: 声发射试验是一种研究 TBM 滚刀破岩微观机制的有效方法, 脆性岩石材料的破坏过程是内部微裂纹的萌生和扩展过程的宏观反映; 在楔形刀具匀速贯入时, 声发射信号随着荷载的变化呈一定对应趋势的变化, 荷载-贯入度曲线能反映试件内的损伤历程; 声发射 2D 定位结果显示, 在岩石破碎区的密实核下方存在“损伤核”, 它由微震裂源增生丛聚分布形成, 核内劣化程度高, 是孕育密实核的场所, 为 TBM 滚刀作用下岩石的宏观破裂现象提供了解释和依据; 楔形刀具产生“球状”损伤核, 钝刃刀具产生“水滴状”损伤核, 钝刃刀具贯切试件产生更深的贯入度和更宽的损伤核, 致使试件中不仅破碎深度大, 而且破损范围广, 破岩效果优于尖刃刀具。

**关 键 词:** 隧道掘进机; 滚刀; 破岩; 声发射; 损伤核

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Experimental study of rock microscopic deterioration under wedge cutter

MO Zhen-ze<sup>1</sup>, LI Hai-bo<sup>1</sup>, ZHOU Qing-chun<sup>1</sup>, ZOU Fei<sup>1</sup>,  
ZHU Xiao-ming<sup>1</sup>, WANG Chang-bo<sup>1,2</sup>, HAO Ya-fei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** Penetrating granite specimens with different wedge cutters by changed RMT-150C system which is specially produced for indentation, and using DISP acoustic emission location system to research rock damage and physical deterioration. Acoustic emission test is an effective method to study the microscopic mechanism of rock fragmentation by tunnel boring machine (TBM) cutters. Testing results show that: rock breaking is the macro-phenomenon of internal microcrack's initiation and development. There is a realistic corresponding trend of load value and AE signals when wedge cutters penetrate specimens at a uniform velocity. Load-penetration curve could demonstrate the process of specimen damage. Acoustic emission plane location results show that: there is a damage core under the dense broken core, which is clustered by micro-seismic locations and is seriously deteriorated. Damage core plays a significant role to produce the next dense broken core. Experimental results provide an explanation for the macro-phenomenon of rock breaking under TBM cutter. Blunt cutter's indentation produces a damage core of spherical shape while sharp cutter's water-drop shape. Blunt cutters are better than sharp cutters to break rock specimens because of deeper penetration and wider width of damage core.

**Key words:** tunnel boring machine; disc cutter; rock breaking; acoustic emission; damage core

## 1 引 言

工程实践证明, 隧道的长度与直径之比大于 600 时, 采用全断面隧道掘进机 (tunnel boring machine, TBM) 进行隧道施工是经济的<sup>[1]</sup>。TBM 施工的方法具有快速、高效、安全等特点, 如今在国内的长大隧道中已被广泛采用<sup>[2]</sup>。TBM 通过刀盘

上相邻滚刀作用下裂纹贯通剥落岩块, 如图 1 所示。图中  $F_n$  为法向力,  $F_t$  为切向力,  $s$  为刀间距,  $p$  为贯入度。由于在工程实际中遭遇刃口磨损、机具破坏、开挖困难、进度滞后等问题, 所以滚刀与岩石相互作用机制的研究是合理选择 TBM 滚刀设计参数的基础。早在 1964 年, Evans<sup>[3]</sup>就分析了锐刃楔刀和钝刃楔刀在采掘煤岩中的力学破岩机制, 并假

收稿日期: 2010-11-20

基金项目: 国家杰出青年基金 (No.51025935); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (No. 2010CB732001); 国家科技支撑计划项目 (No. 2007BAF09B01); 国家科技支撑计划项目 (No. 2006BAB04A06)。

第一作者简介: 莫振泽, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事 TBM 滚刀破岩机制和破岩效率方面的研究工作。E-mail: mozhenze525@163.com

设岩石的强度由单轴抗压强度决定, TBM 滚刀刀刃与岩石接触面是由两条抛物线围成的面积的一半, 且于 1966 年提出了 TBM 楔形滚刀破岩垂直力的计算公式。Roxborough<sup>[4]</sup>、秋野藤三郎<sup>[5]</sup>、Rostami 等<sup>[6]</sup>在 Evans 理论的基础上分别修正了楔形滚刀受力的预测公式。Wijk<sup>[7]</sup>考虑了楔形滚刀刀尖的磨损变形对破岩效果的影响, 并提出岩石的破坏强度由冲压强度(约 3 倍的单轴抗压强度)确定。Sanio<sup>[8]</sup>认为, 张拉破坏才是楔形滚刀破岩的主要力学机制, 并提出滚刀下存在静水压力核的现象。Chiaia<sup>[9]</sup>结合理论和试验综合分析了球形刀刃、平底刀刃、锥形刀刃作用下岩石的破裂机制, 并运用基于点阵模型编制的软件数值模拟了法向力和切向力组合作用下岩石中的裂纹扩展。Gong 等<sup>[10-11]</sup>结合新加坡 DTSS 工程, 并运用通用离散元软件 UDEC 真实地模拟了不同节理间距和不同节理角度的岩体在滚刀作用下的破裂形态。李亮等<sup>[12]</sup>提出了可以针对不同的岩石采用不同的刀圈断面的观点, 并结合秦岭隧道工程提出了提高破岩效率的改形方案。苏利军等<sup>[13]</sup>采用 PFC 数值模拟软件, 将岩石模拟成颗粒的集合体, 讨论了楔形滚刀刀圈断面和岩石强度变化对破岩过程的影响。

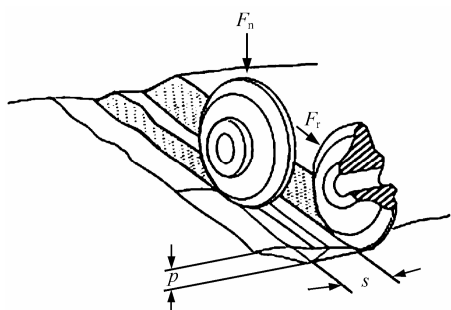


图 1 滚刀作用力和切槽几何尺寸示意图 (Nelson, 1993 年)  
Fig.1 TBM disc cutter forces and rock groove size (Nelson, 1993)

如图 2 所示, 刀具作用于岩石, 产生粉碎体, 然后粉碎体成为传力媒介, 刀具上的载荷通过粉碎体传给未破坏的岩石。粉碎体在刀具加载作用下被压实和储能, 成为具有高压流动性能的密实核。密实核将能量均匀地传给周围岩石, 使包围它的岩石在切向方向上产生拉应力, 出现径向裂纹, 密实核中的岩粉再钻入径向裂纹, 形成粉楔, 劈开靠近自由面的岩石, 形成断裂体<sup>[14]</sup>。图中密实核下方散点分布的区域表示滚刀作用下岩石的损伤区域, 即微震裂源产生区域。

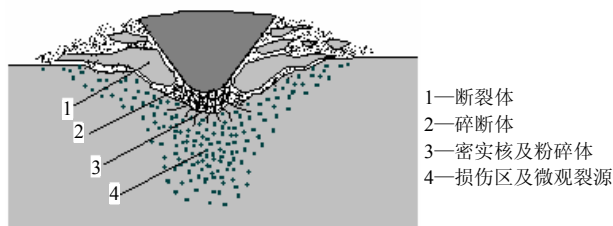


图 2 滚刀破岩断面微震裂源和宏观破裂示意图  
Fig.2 Illustration of microseismic locations and macrofracture development within section of rock breaking by TBM disc cutter

破碎是指力作用于岩石, 从岩石中分离出大小不等的岩块或把大块变成小块的过程, 应包括: 岩石变形(应变形式贮能), 微裂纹应力集中, 微裂纹发生、扩展和汇交形成粉碎体, 粉碎体压实成密实核(贮能), 密实核释放能量形成宏观径向裂纹、扩展到自由面等<sup>[14]</sup>。现今, 大多滚刀破岩理论是针对刀具作用下岩石的宏观破坏细节进行, 将岩石破碎过程细化分析, 而对滚刀破岩过程中微观裂源的研究甚少。微观裂源的产生与发展直接决定宏观破裂的程度和范围, 所以对滚刀作用下岩石损伤破坏的微观机制的研究很有必要。

鉴于此, 本文借助贯切破坏试验仪器, 并结合非破坏声发射定位检测技术进行了不同刃角楔形刀具的贯切试验, 求取完整的加载历程信息和声发射信号, 以分析不同刃角楔形刀具作用对岩石的损伤破坏情况, 为滚刀破岩理论提供一些参考和依据。

## 2 试验概况

### 2.1 岩石试样的制备

试验中使用的天然岩体为四川大岗山水电站的花岗岩。根据常规试验结果<sup>[15]</sup>, 岩石的单轴抗压强度为 195 MPa, 弹性模量为 47.6 GPa, 泊松比为 0.3, 单轴抗拉强度为 6.2 MPa。将岩样平整切割成尺寸为 150 mm×150 mm×20 mm (高×宽×厚) 的岩板试件, 表面打磨抛光, 使平整度达到 0.02 mm 以内的标准, 以保证声发射讯号接收探头的耦合质量, 见图 3。



图 3 岩板试件  
Fig.3 Rock plates

## 2.2 贯入破坏试验系统

TBM 盘形滚刀主要由刀圈、刀体、轴承和心轴等组成, 刀圈为可拆卸部件, 磨损后可更换。常用的楔刀刀圈断面形状如图 4 所示, 刀刃角一般有  $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  或平刃等多种<sup>[2]</sup>。美国科罗拉多矿业学院进行的大量线性切割试验采用的滚刀刀盘也为 V 型楔刃刀<sup>[6]</sup>, 刀刃角为  $60^\circ \sim 120^\circ$ 。如图 5 所示, 在贯入度  $P$  确定时, 刃角  $\alpha$  决定滚刀与岩石的接触宽度为  $2P \tan \frac{\alpha}{2}$ , 影响岩石体内的应力分布和破碎岩屑的尺度, 是滚刀破岩微观机制的重要影响因素。本文着重讨论不同刃角楔刀作用对岩石微观劣化的影响, 暂不考虑刃宽的影响。

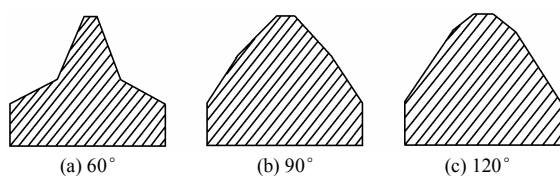


图 4 常用楔刃刀圈断面

Fig.4 Common sections of wedge cutter ring

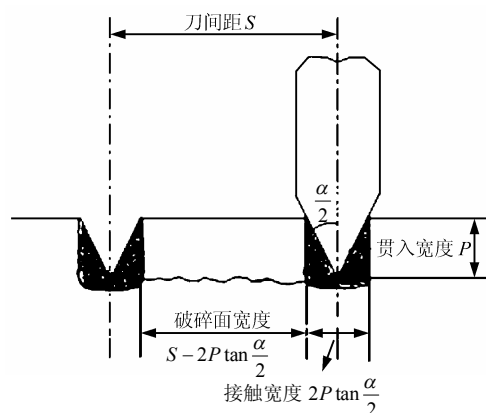


图 5 TBM 滚刀破岩

Fig.5 Rock breaking with TBM disc cutters

试验采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 电液伺服刚性试验机加载系统, 并定制刀刃角为  $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$  的楔形和嵌装刀具架。为了使刀具与试件充分接触, 设置楔刀厚度为 4 cm (大于试件厚度 2 cm), 宽度为 4 cm, 刃尖采用高强度合金钢材料制造并打磨锋利。将刀具架装配于 RMT 刚性施压仪器上, 形成贯入破坏试验系统, 见图 6。利用 RMT-150C 系统基于 Windows 平台的可视化操作软件, 可同时跟踪记录载荷、应力和应变的大小。



图 6 贯入破坏试验系统

Fig.6 Testing system of penetration

## 2.3 声发射定位系统

声发射 (AE) 为材料内部的局部能量快速释放所产生瞬时弹性应力波的一种现象。声发射技术主要记录微震烈源的微小能量释放讯号, 同时统计与预测其声发射定位。声发射源的定位, 需由多通道声发射仪来实现。对于突发型声发射信号最常用的定位方法是时差定位, 即经过各个声发射通道信号到达时间差、波速、探头间距等参数的测量来确定波源的位置。2 个声发射探头可以确定一条 AE 源所在的双曲线; 3 个声发射探头可以确定两条双曲线的交点, 即 1 个真实的 AE 源, 1 个伪 AE 源; 4 个声发射探头构成菱形阵列进行平面定位, 则可以得到惟一真实的 AE 源<sup>[16]</sup>, 见图 7。

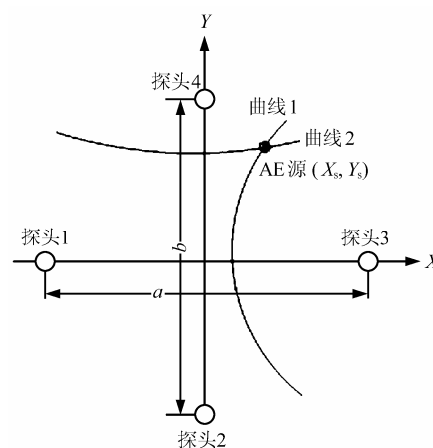


图 7 AE 源平面定位

Fig.7 AE signal plane positioning

声发射定位信号采集采用美国物理声学公司的 DISP 声发射测试系统, 如图 8 所示, 该系统可对声发射事件自动计数、存储, 实现声发射的实时监测, 可在 WINDOWS 环境下进行 AE 特征提取,

运用灵活的图形显示,实现 2D 和 3D 的各种定位功能。

如图 9 所示,预制声发射探头橡胶圈夹具,夹具的中间孔直径为 4.5 mm (比声发射探头的直径小 0.5 mm),厚度为 4 mm,用强力胶水将夹具粘贴于试件四角,使夹具中间孔的圆心与定位点重合。在探头表面涂抹适量的凡士林,保证耦合质量,然后将探头轻轻挤入已经定位的夹具中,利用夹具的收缩性将探头紧紧地固定在定位点上,使探头和试件充分接触。试验前,采用笔芯折断法对声发射定位系统进行校正。4 个压电式转换计作为声发射讯号感应接受器,声波信号经过 4 个前置放大器进入 DISP 系统,设定 40 db 为固定门槛值。

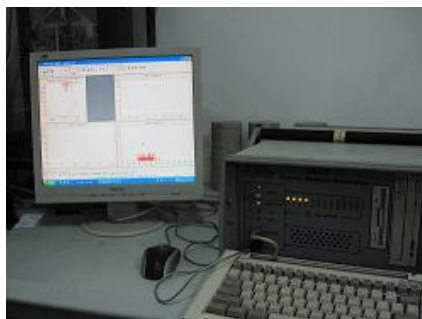


图 8 DISP 声发射测试系统

Fig.8 Testing system of DISP acoustic emission



图 9 声发射传感器布置

Fig.9 AE sensors positioning

## 2.4 模型的建立及试验概况

准备了 4 组试件的声发射二维定位测试,分别进行 60°、90°、120°、150° 刃刀的贯入试验,每组 3 个试件。每次试验时,利用钢性试验平台和由千斤顶施压的两侧钢板,限制试件的三边位移。由于粘贴声发射探头的要求,设置试件前后面为自由面。为了使试件内的初始损伤和增生具有充分的时间进行演化和发展,贯入过程采用同一较小的应变

速率控制,贯入速率设定为 0.005 mm/s。程序中设置刀具的最大贯入度为 5 mm,试验中可根据试样破裂情况随时人为终止贯入程序。试验记录了试件加载过程、试验过程中声发射事件定位图像及能量损耗,并对试件破裂状态进行了拍摄。

由于试件中的裂纹会影响声发射事件的定位,所以本文的声发射定位图形取自试件产生裂纹之前。试件破裂以后继续一段时间的加载,是为了记录试件在固定约束作用下试件的 2 次承载能力以及声发射能量数,分析刀具刃角差异对其的影响。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 声发射能量数与荷载-贯入度曲线的关系

图 10 反映了不同角度的刀具侵入时典型的刀具荷载-贯入度曲线 ( $F-P$  曲线)与岩石声发射能量数之间的关系。 $F-P$  曲线反映出荷载不随贯入度的增长而均衡地增加。在贯入之初,荷载呈一定比例增长;当贯入至某一临界值时,荷载暂时小幅下跌;待刀具贯入至新的深度后再次上升,荷载与贯入度又回复到某种比例关系。随着楔刀匀速的贯入,荷载值往复跃进式的上升,至试件中产生宏观裂纹时,荷载瞬时大幅度跌落。

试验中随着楔刀刀具的贯入度增大,荷载增大,试件内部的微缺陷扩展而导致声发射现象频发,并且从图中容易发现,声发射能量数与荷载值在幅度变化上有一定对应趋势,荷载增加时声发射能量数随之激增。对比试验结果说明,楔刀贯切的荷载-贯入度关系可以反映刀具下方岩石中的损伤劣化历程。

60° 刀刃角破岩时,试样断裂的比较“干脆”,刀刃下几乎没有岩屑粉末,从加载到试件中裂纹贯穿,平均贯入度只有 0.78 mm,相应的刀刃与试件接触宽度也只有 0.90 mm,施加的荷载几乎集中于一点,试件被裂纹贯穿时的最大极限荷载达 11.42 kN。裂纹贯通后,由于刀刃与试件的接触宽度较小,随着刀刃的进一步贯入,试件的承载能力在较长一段时间里维持在 4 kN 左右的低水平 (见图 10(a))。90° 刀刃角破岩时,试件在裂纹彻底贯通前刃口有少量岩屑粉末,因为微裂纹张拉和岩屑粉末的崩离导致刀刃下存在瞬时的空隙,刀具缺乏着力点,荷载呈现几次微弱跌落。试件被裂纹贯穿时的最大极限荷载达 24.15 kN,由于周围的约束,裂纹贯穿后随着刀具与试件接触宽度的增加,荷载微弱增长,当试件破碎出现新的微裂纹,荷载又一次跌落 (见图 10(b))。120° 刀刃角破岩时,试件被裂纹贯穿时

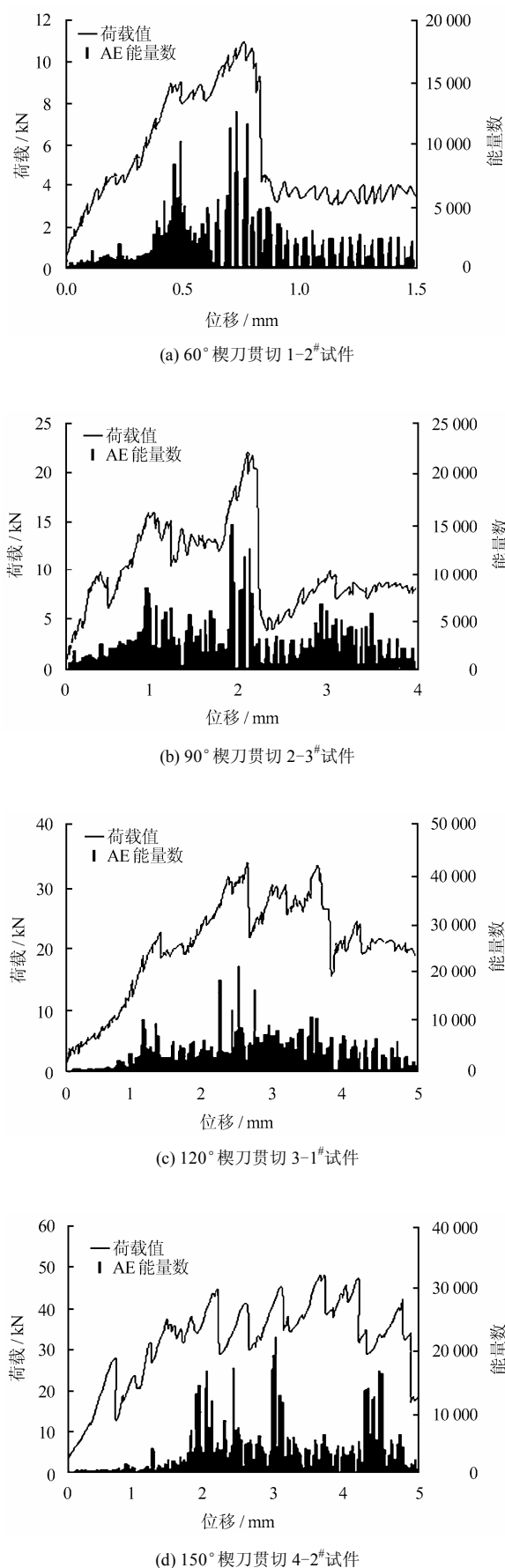


图 10 荷载-贯入度曲线与声发射现象的关系

Fig.10 Relationships between load-penetration curves and acoustic emission phenomenon

的最大极限荷载达 34.83 kN, 裂纹贯穿试件前后荷载升跌的现象都更加明显 (见图 10(c))。150° 刀刃角破岩时, 岩屑大量崩落, 试件被刀刃压出“弧形坑”, 坑中分布大量细小裂纹。裂纹贯通前, 加载过程中声发射信号频繁、荷载跌落频繁, 荷载保持在 40 kN 左右 (见图 10(d))。试验中随着刀刃的贯入, 刀刃与试件的接触宽度骤增, 岩石频频发生“咔咔”的破裂声响。当裂纹贯穿、试件脆断时, 岩板最大极限荷载达 47.44 kN, 平均贯入度为 3.66 mm, 接触宽度为 27.2 mm, “弧形坑”的岩石被压的支离破碎, 碎石粉屑极易被剥落, 破岩效果良好, 见图 11。

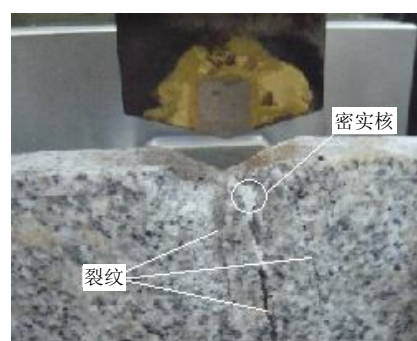


图 11 150° 楔刀作用下试件破碎形态

Fig.11 Broken forms of rock plate under wedge cutter (150°)

### 3.2 损伤区演化的声发射 2D 定位

组成岩石的矿物颗粒之间或颗粒内部的微小二维界面和三维孔隙中存在颗粒边界、矿物解理、微裂隙、粒间孔隙、软弱矿物等岩石缺陷, 按照最小耗能原则, 在外部荷载作用下缺陷最易被压实、压密, 缺陷附近的岩石产生变形而微裂, 并突然释放储存的能量产生瞬态弹性波, 形成微震裂源。岩石内部的微裂虽然不形成宏观破坏, 但能较好地反映岩石内部的损伤劣化情况。

刀具侵压岩石时总会出现密实核, 它是物体在承受巨大压力作用下发生局部粉碎或显著塑性变形而形成的<sup>[16]</sup>, 前人对密实核的研究已很多, 在这里不再赘述。有趣的是试验中发现, 在密实核的下方还存在着一个损伤核, 它是由微震烈源聚集分布造成的。

据试验研究, 损伤核的发展可以分为损伤核萌生、裂源增生丛聚、损伤区扩展 3 个阶段。试件在不同刃角楔刀贯切下裂断时的极限荷载是不同的, 当刀具加载至极限荷载的 20% 左右时, 声发射定位图中记录的定位点最先在刀具正下方产生, 如图 12

所示,前 10 个定位点相对集中,确定了损伤核的核心位置。

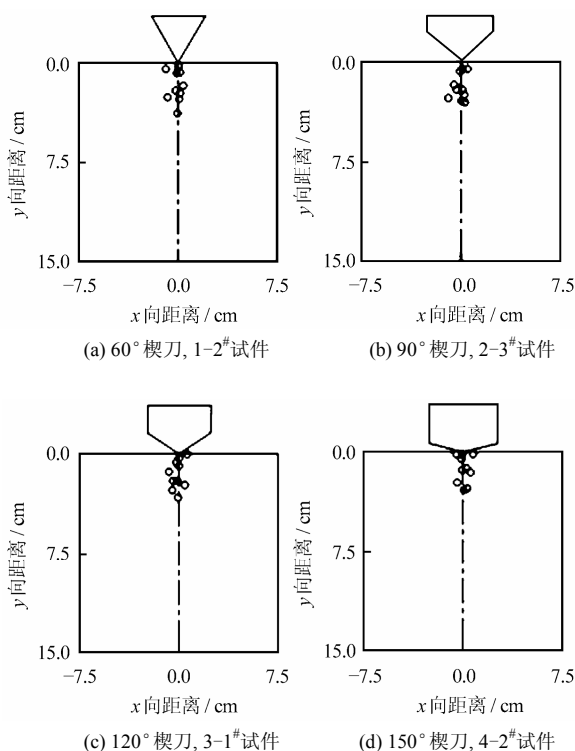


图 12 损伤核核心定位(前 10 个点)

Fig.12 Damage core locations (the first ten points)

随后在核心附近 AE 定位点频现,增生速度较快,出现裂源丛聚现象。据分析,前 30 个点基本能代表损伤核的范围,如图 13 所示,将定位图中的各 AE 源坐标导入 Autocad 软件,从岩板试件中心轴向两侧推进,按照横向距离由小到大的顺序,对于每一个 AE 定位点,以搜索半径  $R$  (根据试验结果分析,取 1/5 矩形试件边长为宜,即 30 mm) 查找圆面范围内的其他 AE 定位点,若搜索范围内除本点外不少于 2 个 AE 定位点,则认为此 AE 定位点参与了丛聚事件,隶属于损伤核;相反,则认为此点周围的损伤程度不高,未参与损伤丛聚事件,例如图 13 中的点 1、2、3 就是较为离散的点,不隶属于损伤核。据此由丛聚事件中 AE 定位点所占据的空间范围可称之为损伤核,并定义损伤核宽度  $w$  为损伤核内 AE 定位点的横向坐标最大差值。

由图 14 看出,尖刃刀具贯切试件产生“水滴状”损伤核,而钝刃刀具贯切试件产生的损伤核呈“球状”。表 1 中的试验结果显示 150° 刃角刀具作用下,试件中平均损伤核宽度达 71.3 mm,较 60° 刃角时的 41.7 mm,损伤核宽度几乎增加了一倍。

图 15 表明,贯入度和损伤核宽度随着刃角的增

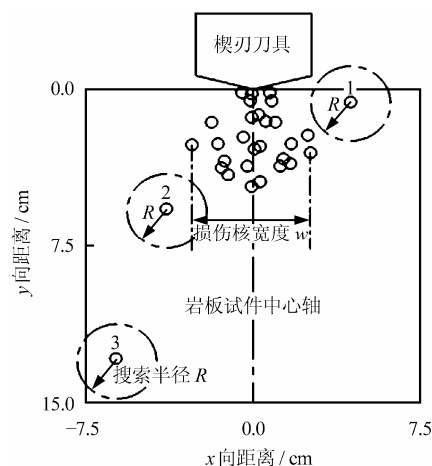


图 13 损伤核示意图

Fig.13 Illustration of damage core

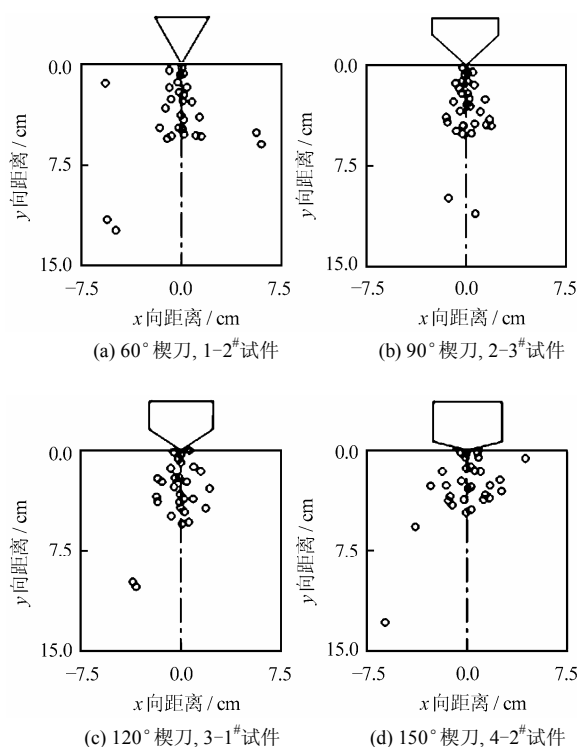


图 14 微震裂源丛聚(前 30 个点)

Fig.14 Microseismic clustering (the first thirty points)

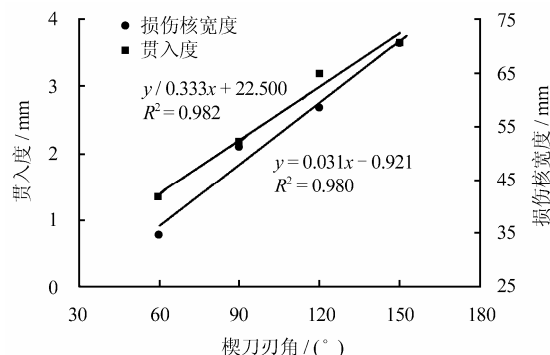


图 15 平均贯入度、平均损伤核宽度与刃角的关系  
Fig.15 Penetration and width of damage core at different wedge cutters

表 1 楔形刀具贯切试样试验结果  
Table 1 Testing results of wedge cutter indentation

| 楔刀刃角<br>/(°) | 试样编号             | 速率<br>/(mm/s) | 破岩荷载<br>/kN | 破岩贯入度<br>/mm | 平均贯入度<br>/mm | 接触宽度<br>/mm | 损伤核宽度<br>/mm | 平均损伤核宽度<br>/mm |
|--------------|------------------|---------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|----------------|
| 60           | 1-1 <sup>#</sup> | 0.005         | 10.55       | 0.75         | 0.78         | 0.9         | 39           | 41.7           |
|              | 1-2 <sup>#</sup> |               | 10.94       | 0.78         |              |             | 42           |                |
|              | 1-3 <sup>#</sup> |               | 11.42       | 0.81         |              |             | 44           |                |
| 90           | 2-1 <sup>#</sup> | 0.005         | 24.15       | 2.23         | 2.08         | 4.2         | 55           | 51.3           |
|              | 2-2 <sup>#</sup> |               | 20.94       | 1.93         |              |             | 47           |                |
|              | 2-3 <sup>#</sup> |               | 22.18       | 2.09         |              |             | 52           |                |
| 120          | 3-1 <sup>#</sup> | 0.005         | 34.83       | 2.69         | 2.68         | 9.3         | 65           | 64.0           |
|              | 3-2 <sup>#</sup> |               | 35.44       | 2.81         |              |             | 66           |                |
|              | 3-3 <sup>#</sup> |               | 34.27       | 2.55         |              |             | 61           |                |
| 150          | 4-1 <sup>#</sup> | 0.005         | 44.95       | 3.52         | 3.66         | 27.2        | 69           | 71.3           |
|              | 4-2 <sup>#</sup> |               | 47.44       | 3.65         |              |             | 71           |                |
|              | 4-3 <sup>#</sup> |               | 47.64       | 3.81         |              |             | 74           |                |

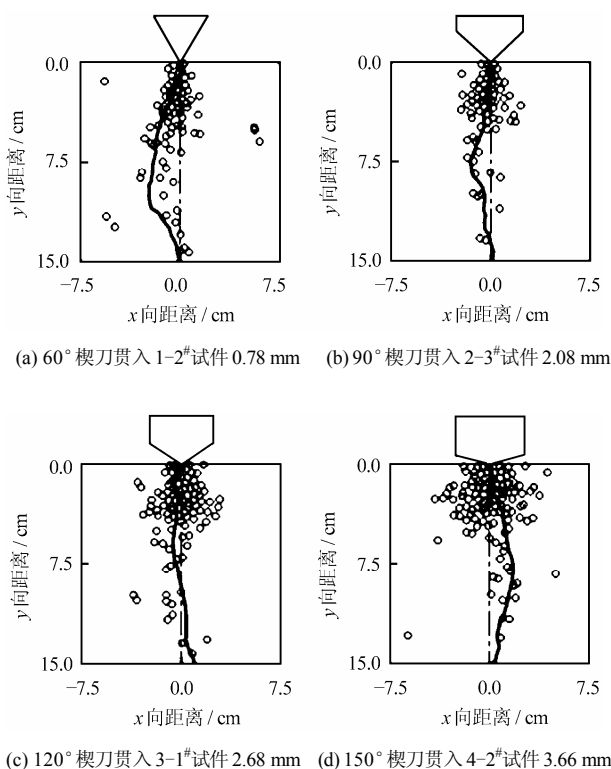


图 16 微观裂源定位和宏观破裂发展示意图

Fig.16 Illustration of microseismic locations and macrofracture development

大分别呈一定比例的线性增长。由于 TBM 滚刀破岩是依靠相邻滚刀间微裂纹的搭接形成宏观断裂剥离岩块，所以对于花岗岩来说，钝刃刀具比尖刃刀具的破岩效果更好，试件中不但破碎深度大，而且破损范围广。

随后试件各处微震裂源频现，如图 16 所示，定位点散布，损伤区域由损伤核向周围扩展，显裂纹出现时，定位点分布呈现两个显著特点：①损伤核

内 AE 定位点的密度大，试件劣化程度高，为孕育下一个密实核提供了条件；②宏观裂纹附近的微震裂源出现频率高，AE 定位点较多，为宏观裂纹的衍生和扩展提供条件和方向。

图 17 所示为声发射 2D 定位试验工况，试件加工缺陷、端部效应、试样尺寸、加载设备及控制条件对试验结果不可避免地存在一定影响。但总的来说，AE 定位试验结果良好地呈现了试件损伤破坏的全过程，直观阐述了楔形刀具贯切作用下试件内的损伤与劣化情况，给滚刀作用下岩石的宏观破裂现象提供了解释和依据。



图 17 声发射 2D 定位试验工况

Fig.17 Testing conditions of acoustic emission 2D localizations

## 4 结 论

(1) 声发射信号与荷载-贯入度曲线有良好的对应关系; 楔刀跃进式的挤压贯切试件, 楔刀刃角越大, 刀具与试件的接触宽度越大, 试件承受的极限荷载和破碎范围就越大, 破碎效果也越明显。

(2) 声发射定位试验直观阐述了楔形刀具贯切作用下试件内的损伤与劣化情况, 试验结果显示密实核的下方存在损伤核, 它由微震聚集分布形成。损伤核的发展分为损伤核萌生、裂源增生丛聚、损伤区扩展 3 个阶段。尖刃刀具作用下试件内产生“水滴状”损伤核, 钝刃刀具作用下试件内产生“球状”损伤核。钝角刃刀比锐角刃刀的破岩效果要好。

(3) 损伤核内劣化程度高, 为孕育密实核提供了条件。宏观裂纹附近的微震出现频率高, 声发射定位点较多, 为宏观裂纹的衍生和扩展提供条件和方向。反映微观损伤劣化现象的声发射定位试验给 TBM 滚刀作用下岩石的宏观破裂现象提供了解释和依据。

(4) 声发射信号可以用于判断岩石内部缺陷的演化情况, 工程实际中可以利用声发射研究滚刀作用下岩石破碎前内部损伤劣化的微观机制。在本研究基础上, 使用三维声发射定位技术, 进一步研究滚刀法向推压力与切向滚动力共同作用下损伤核的空间发展过程将会是非常有价值的工作。

## 参 考 文 献

- [1] 张镜剑. TBM 的应用及其有关问题和展望[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 363—367.  
ZHANG Jing-jian. Application of TBM and its related problems and prospects[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 363—367.
- [2] 水利部科技推广中心. 全断面岩石掘进机[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [3] EVANS I. The force required to cut coal with blunt wedges[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1965, 2(1): 1—12.
- [4] ROXBOROUGH F F, PHILLIPS H. Rock excavation by disc cutter[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1975, 12(12): 361—366.
- [5] 秋三藤三郎. 盘形滚刀破岩理论[J]. 小松技报, 1970, 16(3): 43—51
- [6] ROSTAMI J, OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[M]. Golden: Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute, Colorado School of Mines, 1993.
- [7] WIJK G. A model of tunnel boring machine performance[J]. **Journal of Geotechnical and Geological Engineering**, 1992, 10(1): 19—40.
- [8] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1985, 22(3): 153—161.
- [9] CHIAIA B. Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38(44—45): 7747—7768.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李亮, 傅鹤林. TBM 破岩机制及刀圈改形技术研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(增刊): 8—10.  
LI Liang, FU He-lin. Rock breaking mechanism by TBM and modification to pan knife ring[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2000, 22(Supp.): 8—10.
- [13] 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.
- [14] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [15] 吕森鹏, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 脆性岩石破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2772—2778.  
LÜ Sen-peng, CHEN Wei-zhong, JIA Shan-po, et al. Experimental study on brittle rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.1): 2823—2829.
- [16] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(3): 114—125.  
SHEN Gong-tian, GENG Rong-sheng, LIU Shi-feng. Acoustic emission source location[J]. **Nondestructive Testing**, 2002, 24(3): 114—125.