

常截面滚刀贯入试验中岩石破坏行为分析

刘泉声¹, 潘玉丛¹, 刘建平¹, 孔晓璇², 时凯³, 刘琪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. 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: 为研究滚刀贯入过程中不同强度岩石的破坏行为, 采用泥岩、花岗岩、砂岩和水泥砂浆制作立方体试样, 结合岩石贯入试验加载系统和声发射监测系统, 进行无侧向约束条件和有侧向约束条件下 TBM 常截面盘形滚刀贯入试验, 获得完整荷载-贯入度曲线和声发射参数信息, 分析不同岩石试样的破坏过程、破坏类型和破坏模式。结果表明: (1) 软岩试样荷载-贯入度曲线跌落现象不明显, 呈现延性破坏特征, 而硬岩试样荷载-贯入度曲线跌落现象显著, 具有脆性断裂特征。(2) 无侧向约束条件下试样破坏类型属于劈裂破坏模式, 有侧向约束条件下试样破坏过程由中间劈裂裂纹和侧向裂纹共同控制。(3) 声发射参数曲线和荷载-贯入度曲线之间具有良好的对应关系, 可以反映贯入过程中岩石试样内部损伤劣化和宏观裂纹形成过程。(4) 类岩石材料滚刀贯入试验在一定程度上有助于更好地理解岩石贯入破坏过程和破坏模式, 但类岩石材料与天然岩石材料在强度和变形性质上并不能完全吻合, 因此相似材料模拟试验的结果需要进一步的验证。

关键词: 岩石力学; 隧道掘进机; 常截面滚刀; 贯入试验; 声发射

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 2-3516-10

Analysis on fragmentation behavior of rocks in indentation tests by disc cutter

LIU Quansheng¹, PAN Yucong¹, LIU Jianping¹, KONG Xiaoxuan², SHI Kai³, LIU Qi²

(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 Company Limited, Guangzhou, Guangdong 528000, China)

Abstract: The rock loading system and acoustic emission monitoring system were employed to conduct the indentation tests on four rocks with different strengths, namely mudstone, granite, sandstone and cement mortar specimens with cubic dimensions, with or without lateral confinement. The complete load-penetration curves and acoustic emission parameters were analysed together, and the process, form and mode of the rock fragmentation by TBM constant cross section (CCS) disc cutter were studied. The load drop of the load-penetration curve for soft rock is not obvious and the rock fragmentation presents the failure characteristic of elastoplasticity, while the load drop is remarkable in accordance with the brittle rupture for hard rock indentation test. The rock fragmentation without lateral confinement can be regarded as obvious splitting fracture mode and the failure process of the

收稿日期: 2015-04-29; **修回日期:** 2016-04-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904, 2015CB058102); 国家自然科学基金重点项目(41130742)

Supported by National Key Basic Research and Development Program of China(973 Program)(Grant Nos. 2014CB046904 and 2015CB058102) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41130742)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿山建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土力学和地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0532

confined specimen is controlled by the combined effect of both splitting fractures and lateral fractures. The curves of acoustic emission parameters are in good agreement with the load-penetration curves and can generally reflect the damage degradation and fracture formation of the indented rock specimens. The indentation tests conducted on the rock-like material can reproduce the fragmentation process and failure mode of the natural rock at some extent, but due to the discordances of the strength and deformation properties between rock-like material and natural rock, the results obtained from similar material simulations should be further investigated.

Key words : rock mechanics ; tunnel boring machine(TBM) ; constant cross section(CCS) disc cutter ; indentation test ; acoustic emission(AE)

1 引言

在过去几十年间,岩石隧道掘进机(TBM)因其开挖效率高、经济安全和劳动强度低等诸多优点受到工程界的高度重视,其设计制造和施工操作技术一直是制造领域和工程领域的研究热点。作为 TBM 设计和施工阶段的基础和关键,滚刀破岩机制和破岩效率问题研究得到了广泛关注。

在滚刀破岩机制研究方面,主要采用压头贯入试验^[1-7]和数值模拟软件^[8-9]研究贯入过程中岩石内部破碎区形成过程和裂纹萌生扩展形态,获得不同贯入条件下岩石破碎过程和破碎机制,其主要成果是刀具贯入作用下岩石内部裂纹扩展过程和扩展模式。在滚刀破岩效率研究方面,主要采用线性切割试验^[10-12]、回转切割试验和数值模拟软件^[13-18]研究刀具单独破岩和组合破岩时切削力变化规律、岩石破碎性状和破岩性能优化问题,获得不同切削条件下宏观破岩效果评价方法,其主要成果是比能(specific energy)概念的提出和广泛应用^[10-15, 19]。

作为滚刀破岩机制和破岩规律研究的有力手段,室内贯入试验因为试样尺寸小、设备要求低和简便易行等优点得到普遍应用。结合声发射监测技术^[1-2, 5-6]和电子散斑干涉技术^[7]等无损检测方法,研究人员分析 TBM 滚刀贯入过程中荷载-贯入度曲线特征、声发射参数特征与岩石损伤破碎过程之间的关系,对贯入过程中压碎区和裂纹区的形成过程和形成范围有了进一步理解。但目前来说贯入试验对象多是花岗岩、砂岩和大理岩等高强度或中等强度的硬质脆性岩石,仅有少数研究人员采用混凝土、水泥砂浆和高强度石膏进行相似材料模拟软岩试验^[2-5],这远远不能反映目前 TBM 掘进现场频繁遇到的软硬交替复合地层等复杂地质条件;同时贯入试样通常是具有一定厚度的板状试样,并且前后表面因为观测需要并未施加约束条件,这种平面应力状态的简化方法并不能很好反映 TBM 滚刀破岩的

真实状态。

本文采用 4 种不同强度的岩石类型:泥岩、花岗岩、砂岩和水泥砂浆,利用岩石贯入试验加载系统和声发射监测系统,进行无侧向约束条件和有侧向约束条件下 TBM 常截面(CCS)滚刀贯入试验,获得完整的荷载-贯入度曲线和声发射参数信息,分析不同岩石试样的破坏过程,研究不同强度和侧向约束条件下岩石试样破坏的差异,获得软岩和硬岩在 TBM 滚刀贯入过程中不同的破坏类型和破坏模式,并指出采用水泥砂浆试样模拟软岩试样 TBM 滚刀破岩过程的优势和不足,其结果有助于更好地理解 TBM 滚刀贯入过程中不同类型岩石的力学响应问题,为 TBM 滚刀破岩机制研究提供依据和参考。

2 试验概况

本试验主要目的是通过分析 TBM 常截面滚刀贯入过程中泥岩、花岗岩、砂岩和水泥砂浆试样的强度和变形性质及破坏过程,获得不同类型岩石贯入破坏类型和破坏模式。试验系统主要包括 2 个组成部分:岩石贯入试验加载系统和声发射监测系统。

2.1 岩石贯入试验加载系统

本试验加载系统采用 RMT-150C 电液伺服刚性试验机。试验控制方式为垂直活塞行程控制,位移加载速率设定为 0.005 mm/s,可认为是准静态加载过程。加载试验中贯入荷载和贯入度由垂直向加载千斤顶内置传感器进行测量和传递,并实时记录和显示,便于试验操作和控制。在有侧向约束条件试验中通过水平液压千斤顶借助竖向刚性压板对试样左右两表面施加 0.1 MPa 初始侧向压力,并在随后加载过程中保持压板位置不变模拟侧向约束条件限制试样横向位移。

根据刀圈截面形状,TBM 盘形滚刀可以分为 3 种类型:尖刃楔形滚刀、弧刃楔形滚刀和常截面(CCS)滚刀^[2]。在刀具未发生磨损时,采用楔形滚刀

可以获得较高的掘进速度,但在较高磨蚀性硬岩地层中楔形滚刀迅速磨损,破岩效率显著下降。七十年代后期发展起来的 CCS 盘形滚刀,因其磨损后仍可保持近似恒定的断面尺寸,并不会明显降低掘进效率,因此被广泛应用到硬岩 TBM 上^[12]。目前常用 CCS 滚刀直径一般为 330~508 mm,其中直径为 432 mm(17 英寸)和 483 mm(19 英寸)的 CCS 单刃滚刀最为普遍。采用全尺寸滚刀进行贯入试验虽然可最大限度地模拟自然破岩状态和破岩过程,但考虑到 RMT 试验机加载空间有限,本试验采用自制模型滚刀取代常规岩石试验压头作为试验机加载部件。模型滚刀刀刃宽度为 13 mm,直径为 120 mm,由高强度合金钢材加工制作而成。

考虑到厚板状试样加载过程中前后表面可自由变形这一情况与实际 TBM 滚刀破岩状态不同,并且厚板状试样加载过程中容易出现沿试样前后两表面的片起剥落现象,因此本试验采用立方体试样,其尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,试样表面经打磨抛光处理,其底面和左右两侧面平整度达到 0.1 mm 以内。为对比分析软岩和硬岩破坏过程的不同,选取的代表性岩样为泥岩、花岗岩和砂岩,其中泥岩取自淮南潘一东矿,花岗岩和砂岩取自甘肃北山地区。制作水泥砂浆试样进行对比试验,其主要目的是为以后采用水泥砂浆试样替代泥岩等软岩试样进行 TBM 破岩过程和破岩规律研究提供前导和基础。试样的基本力学性质如表 1 所示。本研究共进行 6 组岩石贯入试验:2 组泥岩试样、2 组水泥砂浆试样、1 组花岗岩试样和 1 组砂岩试样,分别进行泥岩试样无侧限贯入试验、泥岩试样有侧限贯入试验、水泥砂浆试样无侧限贯入试验、水泥砂浆试样有侧限贯入试验、花岗岩试样无侧限贯入试验和砂岩试样无侧限贯入试验。需要指出,本实验中砂岩试样结构致密,完整性较好,而花岗岩试样颗粒粗糙,表面密布细微裂纹,因此花岗岩试样抗压强度和弹性模量均低于砂岩试样。

表 1 岩石试样基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of rock samples

试样类型	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
水泥砂浆	9.56	0.87	6.24	0.300
泥岩	45.85	1.66	22.10	0.239
花岗岩	126.78	5.61	33.44	0.223
砂岩	160.70	5.26	42.63	0.155

2.2 声发射监测系统

声发射(acoustic emission, AE)是材料内部局部能量快速释放所产生瞬时弹性应力波的现象^[2]。声发射技术是一种无损检测方法,主要用于记录材料内部微破裂活动震源产生的微小能量释放讯号,同时记录声发射事件数目和释放能量值,并进行三维微破裂事件定位,进而获得材料微观破坏模式。

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,在岩石试样前后表面 2 条相互交叉对角线上共布置 4 个信号采集传感器,试验前通过断铅法检查传感器和试样之间的耦合质量。试验中声发射数据采集门槛设为 40 dB,采样频率设为 1 MSPS。岩石贯入试验加载系统和声发射监测系统如图 1 所示。



图 1 岩石贯入试验加载系统和声发射监测系统

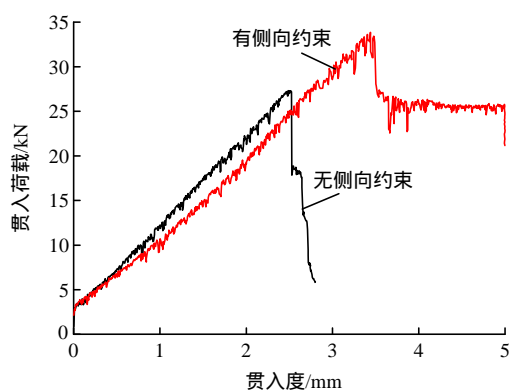
Fig.1 Loading system and acoustic emission monitoring system for rock indentation test

3 试验结果

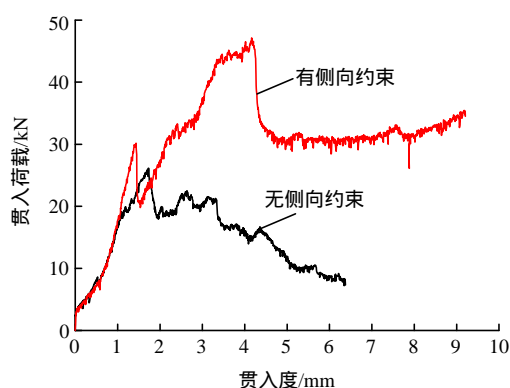
3.1 试样荷载-贯入度曲线分析

荷载-贯入度曲线可以表征 TBM 滚刀贯入过程中岩石内部裂纹萌生、扩展与交汇直至宏观断裂整个过程中的荷载波动现象,一方面反映作用在 CCS 滚刀上的法向荷载随时间的变化规律,一方面反映岩石内部裂纹扩展和宏观破坏的演化过程。图 2 显示了不同岩石试样在 TBM 滚刀贯入试验中的荷载-贯入度曲线。

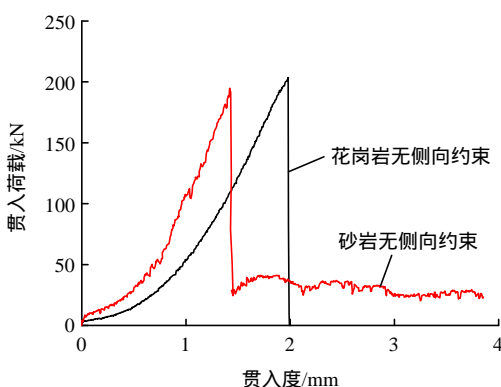
对比不同岩石试样在无侧向约束条件下滚刀贯入过程中的荷载-贯入度曲线,可以发现:贯入荷载并不是随着贯入度的增加而单调增大,而是出现跃进破碎现象。在一定的贯入度范围内,贯入荷载随贯入度增加而不断增大。对于极软岩,例如水泥砂浆试样,在发生跃进破坏以前贯入荷载和贯入度之间近似呈现线性关系,如图 2(a)所示;对于本试



(a) 不同侧向约束条件下水泥砂浆试样典型贯入荷载曲线



(b) 不同侧向约束条件下泥岩试样典型贯入荷载曲线



(c) 无侧向约束条件下花岗岩和泥岩试样典型贯入荷载曲线

图 2 不同贯入试验中荷载-贯入度曲线

Fig.2 Load-penetration curves for different indentation tests

验其他岩石试样，荷载-贯入度曲线出现明显的压密段和弹性变形段，如图 2(b)和(c)所示。当贯入度达到某一临界值后，无侧向约束条件试验中贯入荷载均出现突然跌落。由于无侧向约束条件限制，试样左右两侧面可自由变形，因此在随后加载过程中贯入荷载持续降低。对于图 2(a)和(c)所示的水泥砂浆、花岗岩和砂岩试样无侧向约束条件下荷载-贯入度曲线来说，在跃进破坏之后试样立即失去承载能力，其贯入荷载降低至极低水平，可认为试样此时已完全破坏；而对于图 2(b)所示的泥岩试样，在

无侧向约束条件下跃进荷载之后试样承载能力并没有出现突然降低，而是以波动形式呈总体缓慢下降趋势，在此过程中出现多次小幅度上升和下降过程。

研究表明，岩石性质尤其是脆塑性对跃进破坏现象的幅度和次数有较大影响^[20-23]。软岩强度低，脆性不显著，其破坏过程具有明显塑性变形特征，因此跃进破坏不明显，其荷载跌落值相对较小，曲线较为缓和，典型荷载-贯入度曲线如图 2(a)和(b)所示。中等强度和高强度岩石一般具有很明显的脆性破坏特征，在试样破坏前并未出现明显变形，其蓄积的变形能在破坏瞬间突然释放，因此破坏剧烈，跃进破坏特征非常明显，荷载跌落值幅度很大，如图 2(c)所示。

对比岩石试样在不同侧向约束条件下滚刀贯入过程中荷载-贯入度曲线，如图 2(a)和(b)所示，可以发现：在无侧向约束条件下，荷载-贯入度曲线存在显著荷载突降，承载能力急剧降低，试样迅速破坏；但在有侧向约束条件下，荷载-贯入度曲线出现多次较小荷载突降，在每次突降后贯入荷载均有一定程度的提高，因此试样仍保持较高的承载能力，可认为试样未出现明显破坏。需要指出，本文并未着重研究侧向约束条件对 CCS 滚刀贯入试验中岩石破坏过程的影响，因此不能定量分析侧向约束条件对试样荷载-贯入度曲线的影响，只能定性指出：施加侧向约束条件可提高发生第一次跃进破坏时对应的贯入荷载值，同时试样破坏形态显示出从脆性破坏特征到延性破坏特征的转化。

对比本试验中 2 种不同类型软岩试样的荷载-贯入度曲线，可以发现：虽然泥岩试样和水泥砂浆试样均是强度较低的软岩，但是 TBM 滚刀贯入过程中两者的破坏曲线却具有显著差异。在无侧向约束条件下，水泥砂浆试样破坏比较干脆，只发生一次较大荷载突降，之后便完全失去承载能力，但是泥岩试样却出现明显塑性变形行为，在破坏过程中出现多次荷载突降，其破坏曲线比较平缓。产生这种不同破坏模式的原因可能在于：水泥砂浆试样相比泥岩试样具有更好的均质性，且内部原生裂纹等不连续弱面较少，其破坏过程对应于一条主裂纹的突然失稳扩展，因此在宏观上表现为荷载-贯入度曲线出现明显荷载降。本试验选用的泥岩试样内部裂隙较发育，因此在滚刀贯入过程中裂纹产生和扩展时卸荷效应明显，荷载波动现象显著，在宏观上表现为试样破坏后承载能力以波动形式缓慢降低，未出现明显荷载突降。

3.2 试样破坏特征分析

TBM 滚刀通过在岩石内部形成一系列裂纹来

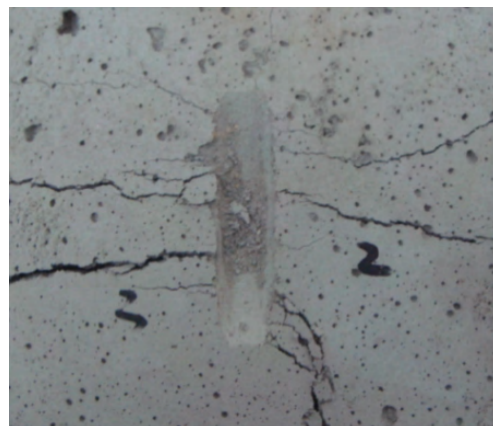
实现破岩，裂纹的萌生和扩展对应于荷载-贯入度曲线的波动。图 3 显示了不同岩石试样在 TBM 滚刀贯入试验中的宏观破坏特征。

当 TBM 滚刀贯入泥岩和水泥砂浆试样时，在跃进破坏点以前可以看到试样表面出现许多微小裂纹，其长度和隙宽均随着加载过程不断增加，在接近跃进破坏点时裂纹突然失稳扩展，形成若干条裂

纹。在滚刀贯入花岗岩和砂岩试样时，试样表面始终未出现明显裂纹，在达到跃进破坏的瞬间试样突然破坏，裂纹的产生及扩展迅速而剧烈。可以发现，CCS 滚刀贯入过程中软岩试样表面产生的裂纹数目较多，呈现明显延性破坏特征，而硬岩试样的破坏受到一条或少数几条主裂纹的控制，呈现脆性破坏特征。



(a) 无侧向约束条件下水泥砂浆试样宏观破坏形态



(b) 有侧向约束条件下水泥砂浆试样宏观破坏形态



(c) 无侧向约束条件下泥岩试样宏观破坏形态



(d) 有侧向约束条件下泥岩试样宏观破坏形态



(e) 无侧向约束条件下花岗岩试样宏观破坏形态



(f) 无侧向约束条件下砂岩试样宏观破坏形态

图 3 不同贯入试验中试样宏观破坏形态

Fig.3 Macroscopic fragmentation behavior for different indentation tests

当 TBM 滚刀贯入泥岩和水泥砂浆试样时, 试样表面发生显著塑性变形, 在滚刀和试样表面接触处出现明显压痕, 其轮廓明显且深度较大, 压痕边缘较为破碎。当滚刀贯入花岗岩和砂岩试样时, 试样表面没有出现明显压痕, 破坏以前试样变形较小, 且压痕附近未出现明显微裂纹。可以发现, 在贯入过程中软岩试样破碎坑附近出现许多小尺寸岩石渣块, 细颗粒产物较多, 这会带来 2 个方面的不利影响: 一方面岩石过度破碎造成破岩比能较高, 另一方面产生的粉碎体造成滚刀二次磨损, 恶化其工作环境。

对比不同侧向约束条件下岩石试样的破坏形态可以发现: 在无侧向约束条件时, 随着贯入度增加滚刀前后分别出现 2 条裂纹, 随后的贯入过程中这 2 条裂纹不断向试样边缘和内部发展, 隙宽迅速增加, 在贯入荷载达到跃进荷载时, 试样被切断并失去承载能力, 如图 3(a), (c), (e)和(f)所示。无侧向约束条件下试样破坏类型可认为属于劈裂破坏模式, 即试样破坏是由一条平行于受压轴线并贯穿试样高度方向的主裂纹引起的。在有侧向约束条件时, 除劈裂形式裂纹外, 在垂直或者斜交于压痕方向上产生若干条裂纹, 试样破坏过程比较复杂, 既存在向试样前后表面发展的劈裂裂纹, 又存在向试样左右表面发展的侧向裂纹。在真实 TBM 滚刀破岩过程中, 中间裂纹向着岩石内部发展, 起到预压裂作用, 造成岩石性质劣化, 使得岩石更容易破坏; 侧向裂纹垂直切削轨迹向滚刀两侧发展, 当与岩石自由面相交后便会形成岩石渣片, 顺利破岩。从这一角度来说, 相比无侧向约束条件试样, 有侧向约束条件的试样其荷载-贯入度曲线变化规律和岩石破碎形态更接近实际情况, 更能体现滚刀和岩石之间的相互作用过程和相互作用规律。因此在研究滚刀破岩机制和破岩效率时必须考虑侧向约束条件的影响。

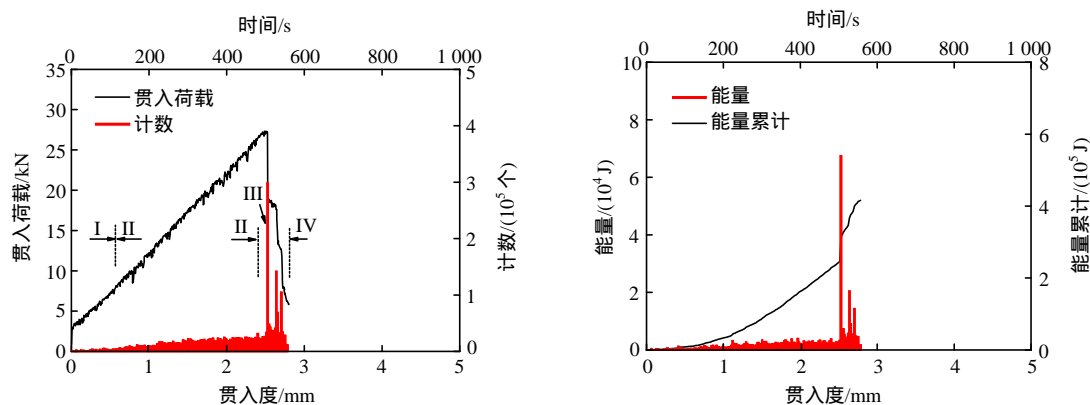
3.3 声发射参数曲线特征分析

声发射技术可以实时并连续地监测物体内部微裂纹的产生与扩展。对岩石在加载状态下的声发射信号进行分析, 可以推断试样内部的损伤变化, 反映其破坏过程和破坏机制。声发射计数定义为超过预设数据采集门槛的声发射信号震荡次数, 广泛用于材料破坏过程中声发射活动性的评价。在本试验中, 声发射数据采集门槛设为 40 dB。声发射能量定义为声发射事件信号检波包络线下的面积, 但不能直接等同于声发射信号的自然物理能量。声发射计数可以反映 TBM 滚刀贯入过程中声发射活动的频度, 是微破裂事件活跃度的直观表现; 声发射能量可以反映 TBM 滚刀贯入过程中声发射活动的强度, 是微破裂活动强弱程度的显示指标。对声发射参数的深入解释有助于更好理解滚刀贯入过程中不同岩石试样的损伤和破坏过程。

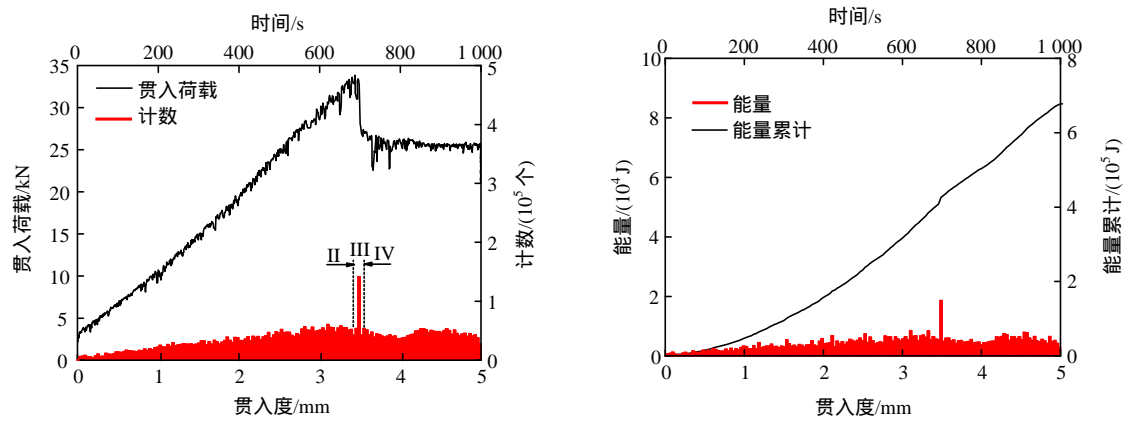
(1) 贯入过程声发射参数曲线分析

图 4 显示了不同岩石试样在有侧向约束条件和无侧向约束条件下 TBM 滚刀贯入试验中的声发射参数曲线, 包括声发射计数曲线与荷载-贯入度曲线的关系和声发射能量与能量累计曲线的关系。总体来说, TBM 常截面滚刀贯入过程中岩石试样声发射活动过程经历 4 个阶段: 平静期(I)、发展期(II)、爆发期(III)和回落期(IV):

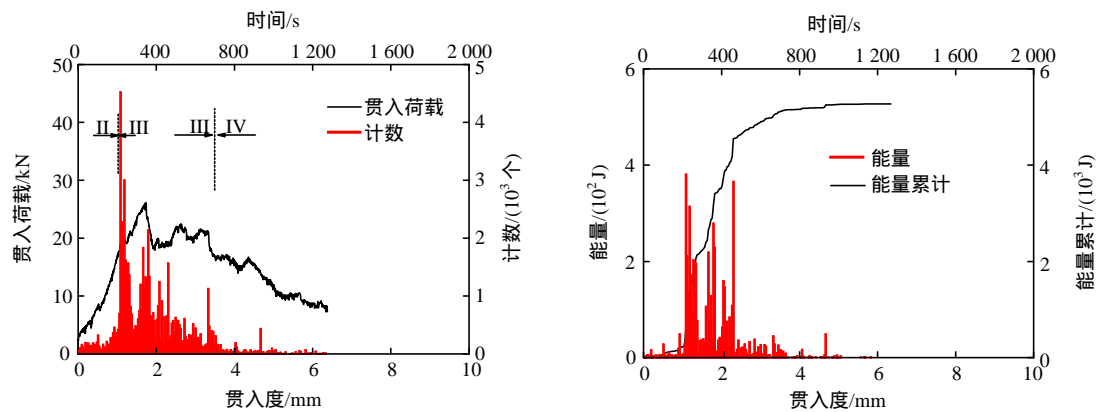
在试验加载初期, 岩石内部原生微裂纹随着贯入度增加被不断压密。在此过程中并没有产生新的微裂纹, 因此基本没有监测到声发射事件, 如图 4(e)和(f)所示。对于某些强度较低的岩石, 如泥岩试样和水泥砂浆试样, 在此过程中因为其内部薄弱原生微裂纹处出现优先破坏, 以及内部颗粒之间出现摩擦和滑移现象, 因此可以监测到少量声发射事件, 如图 4(a)~(d)所示。该阶段可以定义为“平静期”, 对应于荷载-贯入度曲线 I 区。



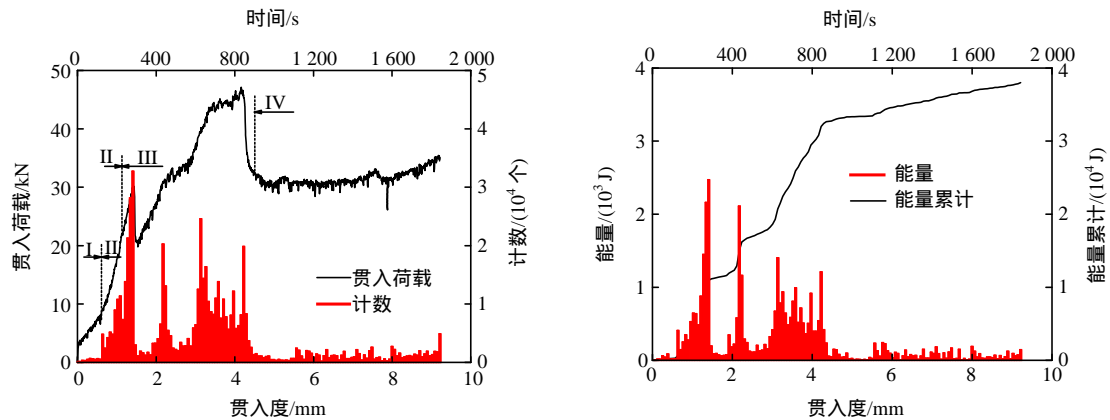
(a) 无侧向约束条件下水泥砂浆试样声发射参数曲线



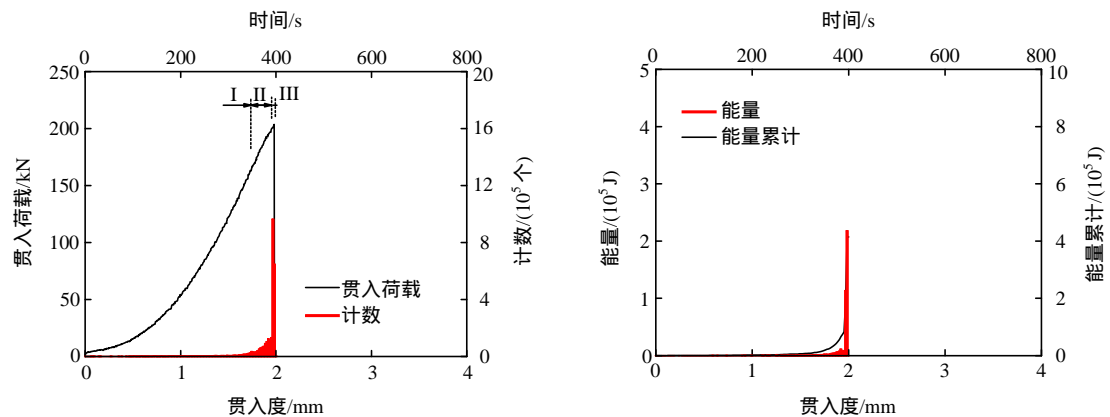
(b) 有侧向约束条件下水泥砂浆试样声发射参数曲线



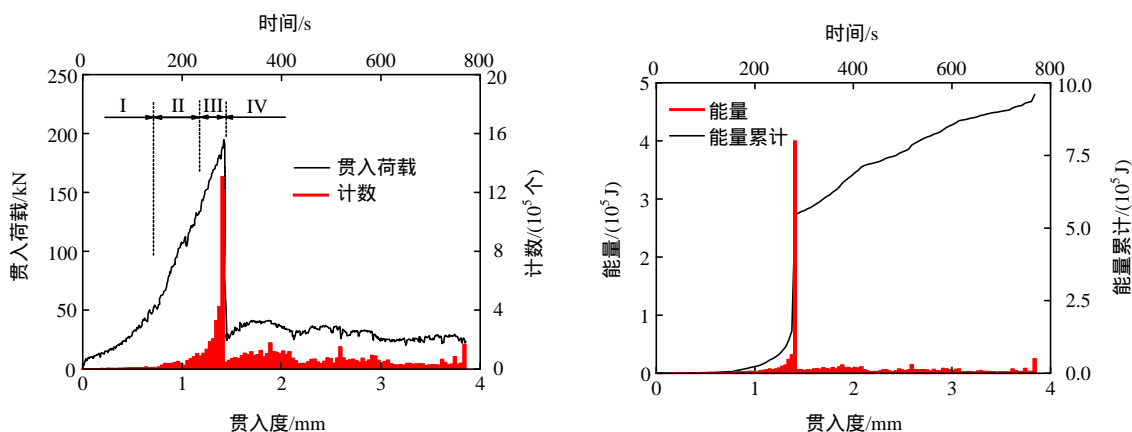
(c) 无侧向约束条件下泥岩试样声发射参数曲线



(d) 有侧向约束条件下泥岩试样声发射参数曲线



(e) 无侧向约束条件下花岗岩试样声发射参数曲线



(f) 无侧向约束条件下砂岩试样声发射参数曲线

图 4 不同贯入试验中试样声发射参数曲线

Fig.4 Acoustic parameter curves for different indentation tests

随着滚刀贯入度持续增加,岩石内部微破裂活动不断加剧,原有微裂纹出现滑移和扩展,新生微裂纹不断出现,微破裂事件范围不断扩大,频度不断增加。随着微裂纹不断生成与扩展,声发射活动逐渐增多,记录的声发射事件计数和能量量级不断增大,但总体来说并不剧烈。该阶段可以定义为“发展期”,对应于荷载-贯入度曲线 II 区间。

当岩石试样内部蓄积的能量超过某一限度后,原来稳定扩展的微裂纹迅速失稳扩展,其长度和隙宽急剧增加,微裂纹之间交汇贯通使得试样出现宏观破坏,具体表现为一条或者若干条宏观主裂纹的出现。在此过程中声发射事件计数和能量均出现峰值,表明此时声发射事件大量发生,能量迅速释放。该阶段可以定义为“爆发期”,对应于荷载-贯入度曲线 III 区间。

声发射活动并不仅仅表现岩石试样的宏观破坏,在宏观裂纹产生之后试样内部应力场并没有停止变化,而是在寻求新的应力平衡状态^[24],在此过程中声发射活动仍在继续,直至试样彻底失去承载能力或者达到新的平衡状态。该阶段可以定义为“回落期”,对应于荷载-贯入度曲线 IV 区间。

(2) 不同类型岩石试样贯入破坏过程分析

不同类型岩石结晶程度、晶粒大小、晶粒形状及矿物颗粒组成和胶结情况等微观结构性质不同,内部微孔洞、微裂纹、节理和层理等细观和宏观不连续结构面分布密度和分布形式具有显著差异,在宏观上表现为岩石强度和变形性质不同,其破坏过程和破坏模式也具有各自不同的特征。

硬岩强度高、质地坚硬、结构致密且裂隙不发育,因此贯入试验初期破坏范围有限,声发射活动性较低,在相当长的时段内都没有监测到声发射事

件计数和能量释放,只有当贯入度达到某一深度值后才出现明显的声发射信号。软岩强度低、质地较软、颗粒间胶结弱且裂隙较发育,因此在加载过程初期就监测到较多声发射活动并随着滚刀贯入过程逐渐增多。总地来说,软岩试样声发射参数曲线“平静期”和“发展期”均有一定数量的声发射事件,硬岩试样声发射参数曲线却具有相当长的“平静期”。

当声发射参数曲线达到相应峰值后,花岗岩和砂岩等硬岩试样声发射参数曲线跌落明显,表明岩石试样主要破坏过程已经完成,宏观表现为试样表面形成一条(或少数几条)非常明显的主裂纹并贯通试样高度方向造成试样发生劈裂破坏,破坏过程无先兆且突然发生,脆性特征显著,破坏后残余承载力较低。由于 RMT 试验机反应刚度并未达到完全刚性试验机的要求,因此在滚刀贯入过程中试验机机架和岩石试样均积聚较多变形能,在试样破坏瞬间能量迅速释放,一方面使得声发射事件计数峰值和能量峰值均远大于其他时刻,导致其他时刻声发射事件计数和能量柱状图均显示不出来;另一方面使得岩石试样彻底破坏,其承载能力保持在极低水平(砂岩试样,见图 4(f))甚至无承载能力(花岗岩试样,见图 4(e))。

对于泥岩和水泥砂浆等软岩试样来说,其破坏过程往往对应于若干条宏观裂纹的形成和扩展,试样表面比较破碎且呈现延性破坏特征,在试验中可以发现基本上每一个声发射计数峰值和能量峰值都可以和一条宏观裂纹的出现对应起来。从图 4(a)~(d)可以看出,软岩试样声发射参数曲线“爆发期”一般可持续较长时间,存在若干个声发射计数和能量峰值,在此阶段声发射参数均可以保持在相对较

高的水平上。同时声发射参数曲线跌落不明显,并且仍出现若干次峰值,这表明岩样仍然持续不断形成新的微观裂纹和宏观裂纹,主要表现出延性破坏特征,并且破坏后仍具有较高的承载能力。

(3) 类岩石材料和自然岩石材料破坏过程对比分析

材料在外力作用下蓄积的变形能,除卸载过程中可恢复的弹性应变能外,大部分都被微裂纹吸收并促进微裂纹丛聚和扩展,或者产生宏观裂纹以表面能的形式耗散掉。岩石损伤和劣化过程中释放的能量是被单一或者少数裂纹吸收,还是被较多数量裂纹平均消耗掉,这主要取决于材料在外力作用下的力学响应过程和响应机制以及能量在各裂纹间的分配机制^[25]。

对于混凝土类人工材料,在准静态加载过程中材料会产生黏性蠕变流动,这种黏滞性流动现象会与微裂纹演化过程相耦合,将能量最终分散到多条裂纹上,并被其吸收作为表面能耗散掉。在此过程中各裂纹间能耗比较均匀,多条裂纹几乎同时产生和扩展^[25]。但对于岩石类脆性材料,其黏性不显著,裂纹间耦合效应并不是很强烈,破坏时仍然以一条或少数几条主裂纹的出现为主要特征,表面不会出现充分发展的次级裂纹。

对比图 4(a), (b) 中水泥砂浆试样声发射参数曲线和图 4(c), (d) 中泥岩试样声发射参数曲线可以发现:水泥砂浆试样声发射计数曲线和能量曲线从滚刀贯入过程开始就一直保持在较高的水平上,并随着滚刀贯入度增加近似线性增加。当达到跃进破坏时,水泥砂浆试样声发射计数和能量均达到峰值,其计数和能量最大峰值持续时间短且数值大。在随后加载过程中,虽然试样表面仍出现若干条裂纹,但是声发射参数曲线并没有很明确地与这些裂纹的形成和扩展过程对应起来。可以认为,本试验中声发射参数曲线较好地反映了水泥砂浆试样内部损伤劣化过程,但并不能很好地表征宏观裂纹的形成过程。泥岩试样声发射计数和能量曲线与水泥砂浆试样声发射参数曲线具有显著不同,具体表现为较长的声发射事件“爆发期”和多次声发射事件峰值。这表明在泥岩试样贯入过程中多次出现微裂纹迅速萌生扩展形成宏观裂纹的过程,且每次宏观裂纹的出现都对应于相应的声发射参数峰值。这种声发射参数曲线峰值和裂纹产生过程之间的对应关系表明声发射监测技术不仅可以反映泥岩试样内部损伤劣化过程,还可以反映试样宏观裂纹的形成和扩展过程。

通过对水泥砂浆试样这一类岩石材料和泥岩试样这一自然岩石材料的声发射参数曲线进行对比可知:类岩石材料内部微孔洞和微裂纹等不连续结构面赋存状态与自然岩石材料具有显著不同。类岩石材料物理力学性质较为均匀且连续,不同于具有明显非均质性和不连续性的自然岩石材料,因此在破坏过程中显示的强度和变形性质及破坏模式均不同于自然岩石材料。当采用类岩石材料模拟机械破岩过程时,应该选择合适的原材料及相应配合比,一方面克服采用自然岩石试样进行滚刀贯入试验时贯入荷载和贯入度等数据的离散性,另一方面又能够很好地利用类岩石材料重现自然岩石试样的强度和变形性质及破坏过程。

4 结 论

本文采用泥岩、花岗岩、砂岩和水泥砂浆等四种不同强度岩石,利用岩石贯入试验加载系统和声发射监测系统,进行无侧向约束条件和有侧向约束条件下 TBM 常截面(CCS)滚刀贯入试验,获得完整的荷载-贯入度曲线和声发射参数信息,分析不同岩石试样的破坏过程、破坏类型和破坏模式,得到以下结论:

(1) TBM 常截面滚刀贯入试验中软岩试样荷载-贯入度曲线跌落现象不明显,裂纹数目较多,压痕和破碎坑明显,呈现延性破坏特征,而硬岩试样荷载-贯入度曲线跌落现象显著,破坏由一条或少数几条主裂纹控制,压痕不明显,具有脆性断裂特征。

(2) 无侧向约束条件下试样破坏类型属于劈裂破坏模式,试样破坏是由一条平行于受压轴线并贯穿试样高度方向的主裂纹引起的。有侧向约束条件时,试样破坏过程比较复杂,既存在向试样前后表面发展的劈裂裂纹,又存在向试样左右表面发展的侧向裂纹。

(3) 贯入试验中声发射参数曲线和荷载-贯入度曲线之间具有良好的对应关系,可以反映岩石试样内部损伤劣化过程,在一定程度上可以与宏观裂纹的形成和扩展过程对应起来。

(4) 采用水泥砂浆等类岩石材料代替泥岩等自然岩石材料进行 TBM 滚刀贯入试验具有一定的可行性和操作性,在一定程度上有助于更好地理解滚刀贯入过程中岩石的破坏过程和破坏模式。但因为类岩石材料和自然岩石材料在材料均质性、连续性和宏观结构特征等方面具有显著不同,相似材料模拟试验的结果需要进一步的验证。

参考文献(References)：

- [1] 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.
- [2] 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): 1 333 – 1 340.(MO Zhenze, LI Haibo, ZHOU Qingchun, et al. Experimental study of rock microscopic deterioration under wedge cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1 333 – 1 340.(in Chinese))
- [3] 邹 飞,李海波,周青春,等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1 640 – 1 646.(ZOU Fei, LI Haibo, ZHOU Qingchun, et al. Experimental study of influence of joint space and joint angle on rock fragmentation by TBM disc cutter[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1 640 – 1 646.(in Chinese))
- [4] 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 Hongsu, JI Hongguang. 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.(in Chinese))
- [5] 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): 2 411 – 2 420.(CHEN Lixian, HUANG Guozhong, CHEN Yaozhong. 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): 2 411 – 2 420.(in Chinese))
- [6] 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) : 1 023 – 1 033.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] MA H S , YIN L J , JI H G. Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2011 , 48(6) : 1 021 – 1 033.
- [10] GERTSCH R , GERTSCH L , ROSTAMI J. Disc cutting tests in Colorado Red Granite : implications for TBM performance prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2007 , 44(2) : 238 – 246.
- [11] CHO J W , JEON S , JEONG H Y , et al. Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2013 , 35(4) : 37 – 54.
- [12] BALCI C , TUMAC D. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2012 , 30(4) : 183 – 193.
- [13] 朱 逸. TBM 多滚刀组合破岩特性的数值模拟及实验研究[硕士学位论文][D]. 长沙：中南大学，2013.(ZHU Yi. Numerical simulation and experimental study of rock fragmentation characteristic by TBM disc cutters[M. S. Thesis][D]. Changsha : Central South University , 2013. (in Chinese))
- [14] 徐孜军. 盾构刀具破岩特性的数值模拟及实验研究[硕士学位论文][D]. 长沙：中南大学，2012.(XU Zijun. Numerical simulation and experimental study of rock breaking mechanism by shield machine cutters[M. S. Thesis][D]. Changsha : Central South University , 2012. (in Chinese))
- [15] 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): 2 453 – 2 464.(TAN Qing, YI Nian'en, XIA Yimin, 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): 2 453 – 2 464.(in Chinese))
- [16] 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 Zijun, XIA Yimin, et al. 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.(in Chinese))
- [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): 1 891 – 1 897.(SUN Jinshan, CHEN Ming, CHEN Baoguo, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutters[J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 , 32(6) : 1 891 – 1 897.(in Chinese))
- [18] 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): 1 780 – 1 787.(ZHANG Kui, XIA Yimin, TAN Qing, 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) : 1 780 – 1 787.(in Chinese))
- [19] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts , 1965 , 2(1) : 57 – 73.
- [20] TUMAC D , BALCI C. Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental , theoretical and empirical force estimations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology , 2015 , 45 : 84 – 98.
- [21] DOLLINGER G L. Choosing cutters for best boreability[J]. Compressed Air , 1977 , 82(9) : 15 – 19.
- [22] GOKTAN R M. Brittleness and micro-scale rock cutting efficiency[J]. Mining Science and Technology , 1991 , 13(3) : 237 – 241.
- [23] BLINDHEIM O T , BRULAND A. Boreability testing , Norwegian TBM tunneling 30 years of experience with TBMs in Norwegian Tunneling[J]. Norwegian Soil and Rock Engineering Association , 1998 , (1) : 29 – 34.
- [24] 赵兴东,唐春安,李元辉,等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 673 – 3 678.(ZHAO Xingdong, TANG Chun'an, LI Yuanhui, et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(Supp.2) : 3 673 – 3 678.(in Chinese))
- [25] 蒋 宇. 周期荷载作用下岩石疲劳破坏及变形发展规律[硕士学位论文][D]. 上海：上海交通大学，2003.(JIANG Yu. Fatigue failure and deformation development law of rock under cyclic load[M. S. Thesis][D]. Shanghai : Shanghai Jiaotong University , 2003.(in Chinese))