

DOI: 10.11779/CJGE201409018

# 滚刀线性侵入试验中岩石破裂模式研究

姚羲和<sup>1</sup>, 赵晓豹<sup>1\*</sup>, 龚秋明<sup>2</sup>, 马洪素<sup>3</sup>, 李晓昭<sup>1</sup>, 唐伟<sup>1</sup>, 卢广亮<sup>1</sup>, 何冠文<sup>2</sup>

(1. 南京大学华东有色地勘局地下空间与地质环境研究所, 江苏 南京 210093; 2. 北京工业大学城市防灾与减灾

教育部重点实验室, 北京 100124; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**摘要:** 采用北京工业大学自主研制的大型机械破岩试验平台, 研究了北山花岗岩在单个滚刀单次及多次线性侵入试验中的岩石破裂情况。试验采用直径 17 英寸 (432 mm) 的常截面盘形滚刀, 对尺寸 1000 mm×1000 mm×600 mm 的花岗岩试样进行了侵入试验。研究发现在滚刀切槽周边, 随距离远近, 岩石破裂程度不一。基于试验观察和裂纹数字化处理结果, 将岩样划分为岩粉区、破裂区和原岩区 3 个区域, 并对各区的尺寸和面积加以统计。同时对波速和回弹指标进行测试, 发现各区内的指标存在明显差异。随着侵入次数增多, 岩石中破裂各区的面积有明显增大, 但相应区域内的指标变化并不显著。

**关键词:** 盘形滚刀; 线性侵入试验; 破裂分区; 分区特性; 北山花岗岩

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)09-1705-09

**作者简介:** 姚羲和(1989-), 江苏南通人, 硕士, 从事岩石力学和隧道工程方面研究。E-mail: 642874138@qq.com。

## Linear cutting experiments on crack modes of rock under indentation of a single disc cutter

YAO Xi-he<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-bao<sup>1</sup>, GONG Qiu-ming<sup>2</sup>, MA Hong-su<sup>3</sup>, LI Xiao-zhao<sup>1</sup>, TANG Wei<sup>1</sup>, LU Guang-liang<sup>1</sup>, HE Guan-wen<sup>2</sup>

(1. NJU-ECE Institute for Underground and Geo-environment, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster

Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium

Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to study the crack modes of Beishan granite under the indentation of a single disc rolling cutter, a series of linear cutting experiments are conducted on the Mechanical Rock Fragmentation Experimental Platform developed by Beijing University of Technology. During the experiment, a constant cross-section disc cutter with a diameter of 17 inches (432 mm) is used and a block of Beishan granite with the size of 1000×1000×600 mm is adopted. After the tests, it is found that there is a cracked part beneath the groove with varied fragmentation degree. Based on the observed crack mode and crack density, the rock sample is classified into re-compacted zone, crushed and cracked zone and intact rock zone, then the sizes and areas of these zones are summarized accordingly. Meanwhile the ultrasonic velocity tests and rebound tests are conducted to obtain the properties of different zones. Finally, it is found that these test results agree well with the fragmentation degrees of different zones. In addition, as the time of cutting increases, the areas of these zones expand significantly, while the properties of the corresponding zones almost keep constant.

**Key words:** disc cutter; linear cutting experiment; zoning of cracked area; property of cracked zone; Beishan granite

## 0 引言

隧道掘进机法 (TBM 法) 因具有施工速度快, 围岩扰动小, 安全性高等优点, 被广泛应用于国内外公路、铁路、水利等领域的岩石隧道工程中。TBM 破岩主要依靠刀具与岩石的相互作用, 其中, 单个刀具作用下的岩石破裂情况, 是研究 TBM 破岩和围岩损伤机理的基础<sup>[1-2]</sup>。

国内外学者对于不同压头侵入岩样的过程、破裂

模式和分区情况已进行了大量的试验和数值模拟研究。Lawn 等<sup>[3]</sup>、Swain 等<sup>[4]</sup>、Hagan 等<sup>[5]</sup>研究了 Vickers 和小尺寸球形侵入体作用下, 钠玻璃中锥形裂纹、币形裂纹和中间裂纹随侵入、卸载过程的产生、发展过

基金项目: 国防科技重点项目 (科工二司[2012]491 号); 国防科技重点项目 (科工二司[2012]492 号)

收稿日期: 2014-02-07

\*通讯作者

程,并对其力学机制进行了解释。Cook等<sup>[6]</sup>通过试验研究了压头侵入硬岩时,微观裂纹衍生、扩展并最终导致宏观破坏的过程。黄士芳等<sup>[7]</sup>研究了多种齿形(圆柱平头齿、球齿、弹头齿、楔齿)及多种盘形滚刀(平头、尖头、钝头)侵入大理岩样品过程各个阶段的声发射情况。Lindqvist<sup>[8]</sup>根据压头下方法向主应力的理论解<sup>[4-5]</sup>,解释了Mäki<sup>[9]</sup>在尖锥形压头侵入花岗岩试验中发现的中间裂纹和锥形张性裂纹的产生机制。Howarth等<sup>[10]</sup>观测并记录了双压头作用下岩石裂纹的形态。Liu等<sup>[11]</sup>、Gong等<sup>[12]</sup>、梁正召等<sup>[13]</sup>、谭青等<sup>[14]</sup>学者采用不同的数值方法,模拟研究了岩石在单个和多个侵入体作用下的裂纹形成、发展及岩石破碎过程。余静等<sup>[15]</sup>将压头前方出现的粉碎或发生显著塑性变形的部分称为承压核,并认为它储存和传递了刀具的能量,同时他们在大理岩、石灰岩、花岗岩和钠玻璃的侵入试验中也发现了承压核残体(残核体)。莫振泽等<sup>[16]</sup>根据声发射数据,研究了岩石在楔形刀具作用下的损伤劣化破坏过程,试验发现在承压核下方存在一个微震裂源增生丛聚分布的损伤核,并比较了不同压头侵入产生的损伤核形状的差异,发现钝刃刀具贯切岩石试件时,会产生更宽的损伤核。

目前隧道掘进机通常配置常截面盘形滚刀,而前人大量侵入试验中的压头形状与盘形滚刀并不完全一致,并且滚刀在破岩过程中,自身也会产生滚动,因此科罗拉多矿业学院(CSM)设计出了与实际破岩过程更为相符的线性切割试验装置(LCM),同时,该种装置采用体积较大的试样,可以有效避免由尺寸效应和边界效应带来的试验误差<sup>[17]</sup>。Rostami等<sup>[18]</sup>利用该装置,研究建立了破岩模型和刀具受力预测公式。余静<sup>[19]</sup>在盘形滚刀线性侵入玻璃试块的试验中,不仅观察到承压核的存在,还观测记录了试块中滚刀运行产生的碟状裂纹。茅承觉等<sup>[20]</sup>归纳了破岩过程中粉末体的来源和分布,并将其中一部分处于三向压缩状态,密度很大的粉末体定义为粉核体,认为粉核体是存贮能量、释放能量的媒介物。金国栋等<sup>[21]</sup>将滚刀线性侵入试验中,岩样经刀具压入粉碎的部分称为岩粉区,将岩石颗粒有明显纵横裂纹穿割,但碎块之间没有明显脱离的区域称为碎裂区,将在载荷作用下发生弹性变形和部分破碎的区域称为变形区,该区经卸载后弹性恢复,但仍可见到有裂纹存在。

综上所述,前人虽已针对岩石的破裂模式和破裂分区进行了大量研究,但各研究者对破裂分区的原则阐述不一,对破裂各区的力学指标关注也不多。同时,TBM实际破岩过程,需考虑前期侵入损伤的影响,与单次侵入(无前期损伤)有较大区别。因此,本文采用北京工业大学的大型机械破岩试验平台,对北山花

岗岩进行了单次和多次线性侵入试验,研究了样品的破裂模式,破裂分区和各区指标,并比较了相同切深不同侵入次数对岩样破裂情况的影响。

## 1 试验设置

### 1.1 试验装置

本次研究采用的机械破岩试验平台由北京工业大学自主研发(图1),该平台可移动试样与滚刀产生相对运动,模拟滚刀的切割,以控制滚刀切深(即滚刀与岩样相对距离)的方式控制推力。本次试验所用刀具为常截面17英寸(432 mm)盘形滚刀,切割速度为20 mm/s。

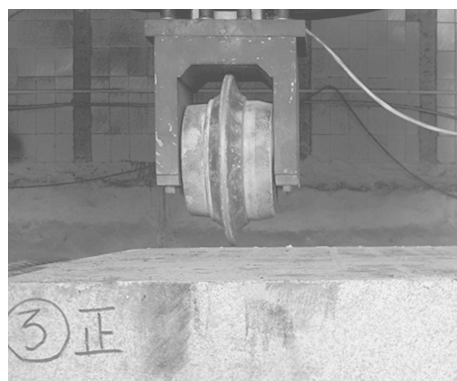


图1 机械破岩试验平台(装样后)

Fig. 1 Mechanical rock fragmentation experimental platform (with rock sample loaded)

### 1.2 样品准备

本次试验的岩石试样为甘肃北山花岗岩,试样尺寸为1000 mm×1000 mm×600 mm(长×宽×高),其中,各向切割误差小于2 mm,表面起伏小于0.2 mm。试样的基本物理力学指标如表1所示。

表1 北山花岗岩样品基本指标

Table 1 Basic properties of Beishan granite

密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	纵波波速 /(m·s <sup>-1</sup> )
2.60	105.62	6.43	23.01	0.19	3345.72

### 1.3 试验及测试方案

(1) 将试样放入试样箱,在试样前后、左右两向各施加0.5 MPa的围压,防止试验过程中岩样发生抖动和滑移。

(2) 设置不同侵入次数的切槽位置,并确保试验中切槽间不产生相互影响。

(3) 对设定的3条切槽位置分别进行1次,3次和5次切深为1.5 mm的侵入试验,并观察记录破岩过程中的现象。

(4) 试验完成后,将岩样沿垂直于切槽方向剖开,对剖开截面切槽周边进行裂纹观察及图像获取、波速

和回弹指标测试。

切割后的岩样截面需先采用 50 目至 1500 目的水磨砂轮逐级进行抛光, 再从中挑出裂纹最为清晰的截面进行裂纹处理。在裂纹处理过程中, 先由肉眼查找, 并使用便携显微镜对裂纹的起止点及张开度作最终确认, 最后以红色水彩笔描摹标记。

以往对岩样各区的力学指标研究较少, 由于各区形状不规则, 且范围较小, 直接进行力学测试难度较高, 因此本文采用与岩石强度密切相关的波速和回弹指标, 研究各区的性质差异, 其中, 波速测试采用 800 kHz 超声纵波探头, 对试块平行于切槽方向的波速进行了测试。

2 现象及分区

本次试验利用便携式显微镜对破裂岩样不同部位进行了细部观察, 发现岩样各部位的破裂情况差异明显 (如图 2), 并根据此类差异, 将岩样分为 3 个主要区域: 岩粉区、破裂区和原岩区。

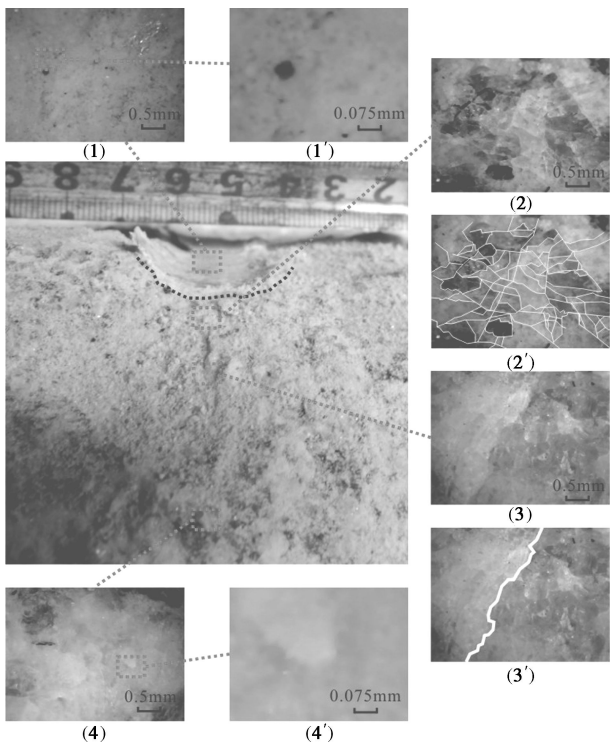


图 2 岩样典型位置破裂特征

Fig. 2 Typical crack modes at different positions in rock sample

(1) 岩粉区截面为月牙形 (图 2 中黑色虚线上方区域), 区内物质呈白色, 颗粒细腻, 含少量黑褐色颗粒及闪光颗粒 (如图 2-1), 部分压实的粉片可直接从切槽内揭下, 但质软易碎, 捏碎后粉末呈白色, 搓捏时有轻微滑腻感。该区是刀具压入脆性岩石时, 矿物颗粒发生严重破碎后残留在切槽内的部分, 可用软毛

刷从切槽内扫除。

(2) 原岩区是岩样受滚刀作用后, 没有发生物理力学性质变化的区域 (如图 2-4)。

(3) 破裂区处于岩粉区和原岩区之间, 可细分为碎裂区和裂纹区。其中, 碎裂区裂纹极为发育, 且有纵横裂纹穿割 (如图 2-2), 岩石虽然呈较为破碎的小块状, 但仍具有一定强度, 小锤轻敲时并不碎裂崩落, 只是声音明显较原岩区喑哑; 裂纹区为碎裂区外含有数目不等裂纹的区域 (如图 2-3), 该区内裂纹张开度总体较小, 在靠近碎裂区处张开度最大 (0.02~0.03 mm), 向外随距离增大逐渐尖灭。裂纹区在小锤敲击时, 声音与原岩区基本无区别。本次研究发现, 该区内裂纹密度变化较大, 可进一步依据其密度的高低划分出密集区和非密集区 (如图 3)。

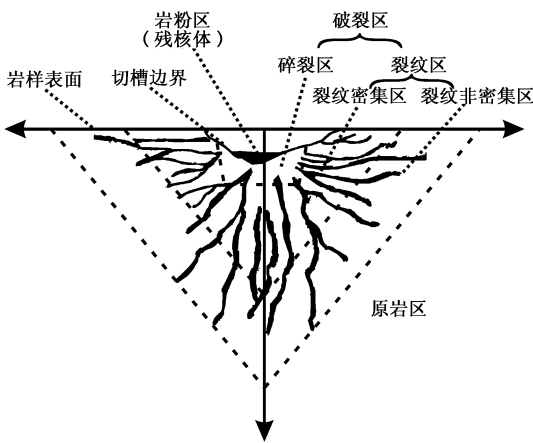


图 3 岩样破裂分区示意图

Fig. 3 Schematic picture of different zones in rock sample

本次分区主要依据的是试验后岩样不同部位的破裂特征, 其中, 岩粉区性质与文献[19]中所述的承压核残体及文献[21]中所述的岩粉区相同, 因此本文将该区也称为岩粉区, 而将残留于切槽中的压密粉状物质称为残核体; 虽然本次研究与文献[21]中的滚刀形式不同, 但本文观察到的碎裂区特征与其类似, 因此, 也将该区称为碎裂区; 此外, 文献[21]中将含有裂纹的区域根据其变形特性称为变形区, 但本文依据观察到的裂纹存在及裂纹密度情况, 将该区域进一步细分为裂纹密集区和非密集区。

3 单次侵入试验结果

3.1 裂纹处理

岩样在经过前述步骤处理后, 可拍照得到裂纹区的原始图像 (如图 4 (a)), 利用南京大学地球环境计算工程研究所开发的 PCAS 图像处理系统, 对裂纹图像进行二值化、去杂点和骨架化等处理[22]。其中, 处

理后图像内的裂纹宽度为笔画的宽度，不再具有实际意义，但裂纹长度和交切情况等结果仍较为可信。为定量分析裂纹密度，首先将裂纹图像转化为矢量图像，并结合前期拍摄的带透明比例尺照片进行配准，图像可被划为若干  $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  的小单元格(如图 4(b))，而后对每个单元格统计其内部的裂纹总长，以该值表征此位置的裂纹密度。

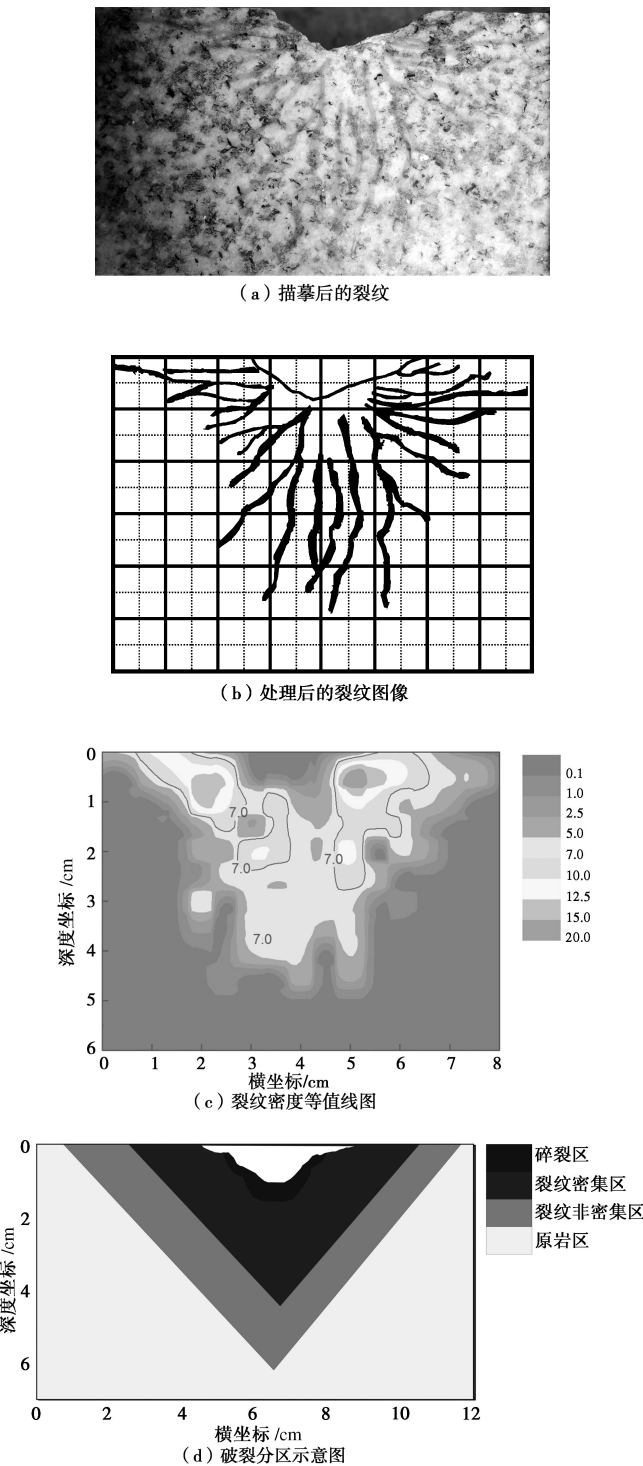


图 4 岩样裂纹图像处理过程（单次侵入工况），破裂分区示意图

Fig. 4 Procedure of crack image processing (after first indentation)

对各个单元格内裂纹密度加以统计计算后，得到滚刀单次侵入后岩样内部裂纹密度等值线图（如图 4 (c)）。由图可知，切槽两侧和正下方位置裂纹密度较高，其中，两翼的裂纹密度更高，形状近似为三角形。

当单元格内部裂纹总长超过  $7.0\text{ mm}$ （即单元格对角线长）时，该单元格内至少存在 2 条裂纹。因此本次研究将格内裂纹总长超过  $7.0\text{ mm}$  的区域划分为裂纹密集区，在  $0\sim 7.0\text{ mm}$  间的区域划分为裂纹非密集区，而  $0\text{ mm}$ （不存在裂纹）的区域划分为原岩区。根据裂纹等值线分布，在保证各区面积不变的情况下，小幅平滑、调整区域边界，使得各区域可以采用三角形表示，得到滚刀单次侵入作用下的破裂分区示意图（如图 4 (d)）。其中，碎裂区由于裂纹极为密集，无法描摹，因此本次研究中并未以前述方法处理，而图 4 中所列的碎裂区范围由裂纹密集区边界和切槽边界直接确定而成。基于图 4 (d)，通过 Image J 软件和 CorelDraw 软件的 GMS 脚本，计算得到破裂各区的尺寸和面积，见表 2。

表 2 岩样破裂各区尺寸及面积（单次侵入工况）

Table 2 Sizes and areas of different zones in cracked part (after first indentation)			
分区	深度 <sup>①</sup> /mm	宽度 <sup>②</sup> /mm	面积 /mm <sup>2</sup>
碎裂区	8.4	13.9	80
裂纹密集区	32.2	67.0	891
区非密集区	50.5	87.4	1131

注：①深度指该区下边界与岩样表面的距离，其中切槽深度为  $5.5\text{ mm}$ ；②宽度为该区最大宽度。

3.2 指标测试

对切开后岩样各区进行了波速和回弹指标测试，其中波速以  $5\text{ mm}$  的间距对尺寸为  $220\text{ mm}\times 90\text{ mm}$  的区域进行了测试。由于波速探头的尺寸限制，该区域的起始深度为岩样表面下方  $5\text{ mm}$ 。各分区的波速和回弹指标测试汇总结果分见表 3 和表 4。

表 3 岩样破裂各区及原岩区波速（单次侵入工况）

Table 3 Ultrasonic velocities in different zones (after first indentation)				
分区	波速范围 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	平均波速 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	标准差 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	降幅 /%
碎裂区	2448~2721	2670	176.5	19.3
裂纹密集区	2724~3048	2954	147.7	10.7
区非密集区	3091~3294	3129	102.4	5.4
原岩区	3284~3372	3298	35.7	—

由表 3 和表 4 可知：

(1) 岩样破裂各区的波速比原岩明显降低，并随破裂程度的增大而减小，其中切槽附近的碎裂区波速

降幅接近 20%, 随着距离的增大, 裂纹密集区和非密集区的波速降幅分别减小到 10% 和 5% 左右。

表 4 岩样破裂各区及原岩区回弹值 (单次侵入工况)  
Table 4 Rebound values in different zones (after first indentation)

分区	回弹值	样本数	标准差	降幅/%
碎裂区	35.7	24	6.4	46.3
裂纹区	密集区	48.5	3.8	27.0
	非密集区	62.0	3.4	6.6
原岩区	66.4	24	1.6	—

(2) 岩样破裂各区的回弹值比原岩明显降低, 并随破裂程度的增大而减小, 各区回弹指标与波速的变化趋势一致, 但回弹值比波速降幅更为显著。

(3) 由各区波速和回弹值的标准差发现, 原岩区指标的标准差较小, 裂纹区居中, 而碎裂区指标的标准差最大, 该两项指标的变异性与破碎程度的大小对应关系符合一般规律。

(4) 参照《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》(SL47—94) [23], 当波速降幅超过 10% 时, 可判定岩体为损伤。对照此标准, 由表 3 可知, 本次试验的碎裂区和裂纹密集区的波速降幅均达到或超过 10% (近似以 3000 m/s 作为本次试验的损伤阈值), 因此将岩样的碎裂区和裂纹密集区划为损伤区域, 得到单次侵入的损伤区域最大厚度为 26.7 mm (从切槽底部算起)。

此外, 从波速测试结果中, 提取出 5 条波速测线, 其中图 5 (a) 为 2 条分别距岩样表面 15 mm 和 30 mm 的水平测线, 而 5 (b) 为切槽中心下方和切槽两侧距切槽中心均为 30 mm 的竖直测线。

由图 5 可知:

(1) 水平波速测线关于切槽中心近似对称, 切槽附近波速最低, 随与切槽距离增大, 波速先在较小范围内快速回升, 而后缓慢趋向原岩波速。

(2) 以 3000 m/s 为阈值对水平测线进行划分, 可发现深度较浅的测线具有较大的损伤宽度, 该现象与观察到的裂纹密集区呈三角形分布相对应。

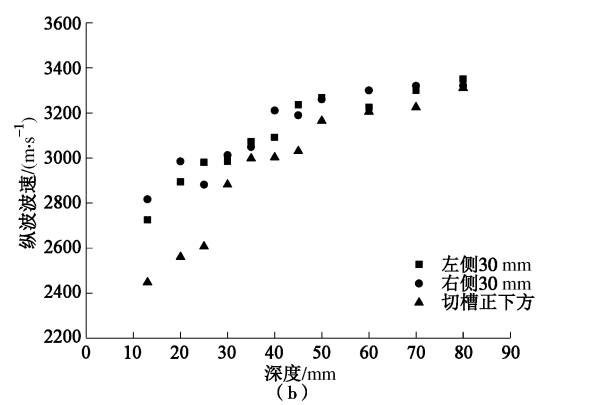
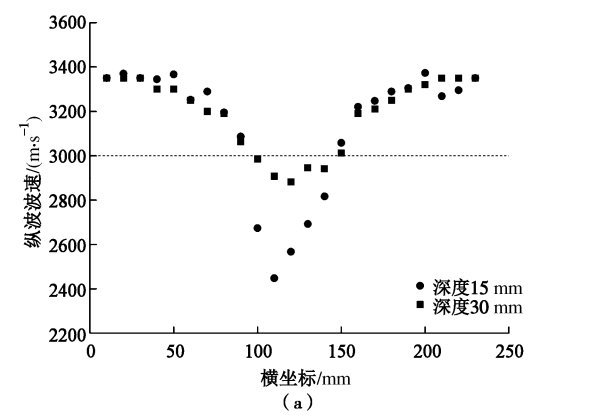


图 5 岩样切槽附近纵波波速水平和竖向测线 (单次侵入工况)  
Fig. 5 Horizontal and vertical ultrasonic velocity profiles around the groove (after first indentation)

(3) 竖直测线在切槽下方最近处波速最低, 随深度增大而逐渐回升。其中, 左右两侧测线波速数值相近, 对应较好, 表明波速分布在切槽两侧大致对称。

## 4 累进侵入试验结果及对比分析

### 4.1 裂纹处理

将滚刀单次、3 次和 5 次侵入后的岩样裂纹图像叠加 (见图 6) 发现, 随滚刀作用次数的增大, 破裂范围明显增大, 对 3 次和 5 次侵入后裂纹图像进行处理, 得到对应的裂纹密度等值线图 and 破裂分区图 (见图 7)。

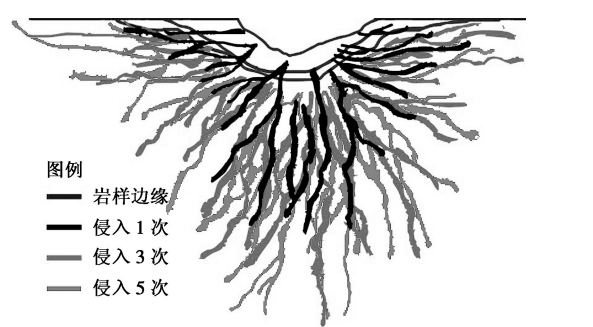


图 6 不同累进次数裂纹对比图 (1 次、3 次、5 次侵入工况)  
Fig. 6 Schematic picture of cracks after different times of indentation (after first, third, fifth indentation)

对图 7 进行处理 (数据的处理方式和意义同表 2), 并结合表 2 数据, 可得不同侵入次数岩样的破裂各区尺寸及面积结果, 如表 5。

由表 5 可知: 破裂区的 3 个分区尺寸和面积均随滚刀侵入次数增多而显著增大, 其中, 滚刀侵入 1 次与 5 次相比, 各区的尺寸和面积大幅增加, 而滚刀侵入 3 次与 5 次相比, 各区的尺寸和面积虽仍有增大, 但增幅已经很小。

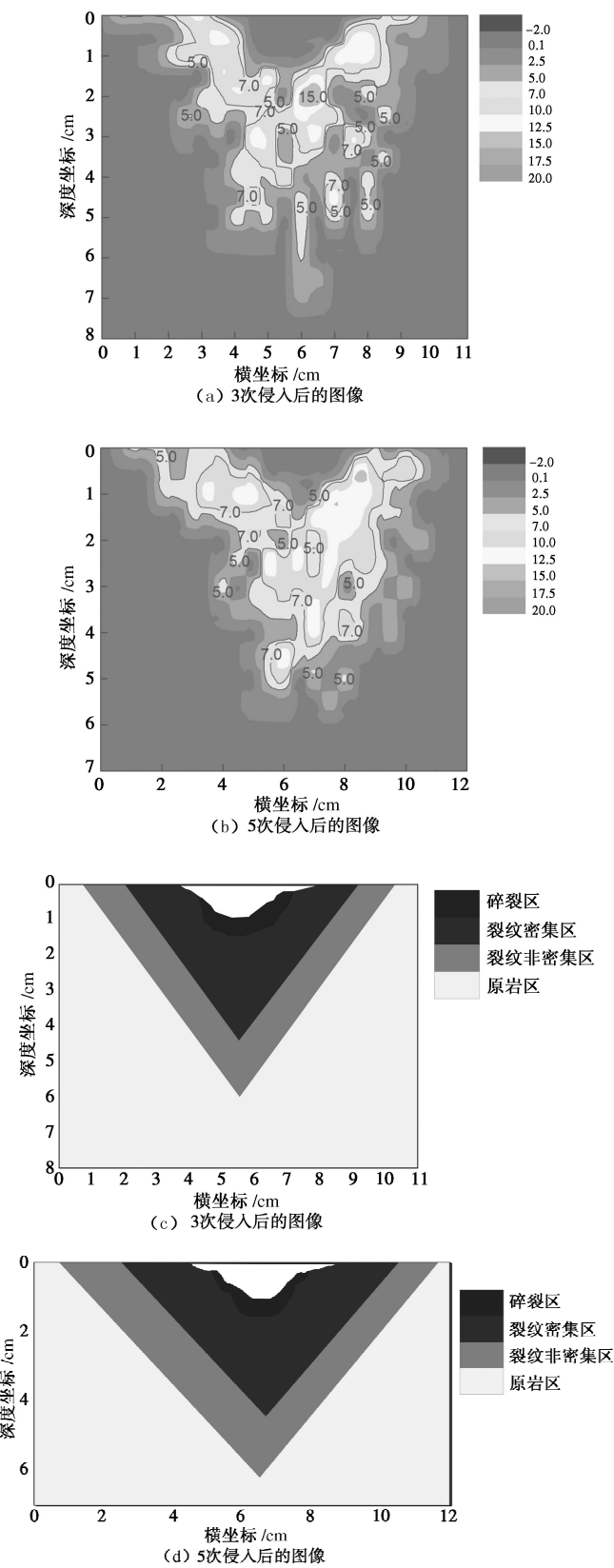


图 7 岩样裂纹密度及分区结果图（3 次、5 次侵入工况）  
Fig. 7 Contours of crack density and different zones (after third, fifth indentation)

4.2 指标测试

对 1 次、3 次和 5 次侵入岩样各区域波速、回弹指标进行了汇总，分别见表 6 和表 7。

表 5 不同侵入次数岩样破裂各区尺寸（1 次、3 次、5 次侵入工况）

Table 5 Sizes and areas of different zones in cracked part (after first, third, fifth indentation)

分区	深度* /mm	宽度 /mm	面积 /mm <sup>2</sup>
1 次侵入	碎裂区	8.4	13.9
	密集区	32.2	67.0
	非密集区	50.5	87.4
3 次侵入	碎裂区	14.4	29.6
	密集区	44.0	71.6
	非密集区	59.9	95.8
5 次侵入	碎裂区	18.4	28.6
	密集区	47.4	79.9
	非密集区	65.1	109.4

注：\*1 次、3 次、5 次侵入后，岩样的切槽深度分别为 5.5 mm，9.0 mm，12.2 mm。

表 6 不同侵入次数岩样各区波速（1 次、3 次、5 次侵入工况）  
Table 6 Ultrasonic velocities in different zones (after first, third, fifth indentation)

工况	分区	碎裂区	裂纹区		原岩区
			密集区	非密集区	
1 次侵入	平均波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	2670	2954	3129	3298
	标准差 /(m·s <sup>-1</sup> )	176.5	147.7	102.4	35.7
	降幅/%	19.3	10.7	5.4	—
3 次侵入	平均波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	2665	2977	3126	3309
	标准差 /(m·s <sup>-1</sup> )	200.3	153.3	93.8	69.5
	降幅/%	19.5	10.0	5.5	—
5 次侵入	平均波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	2713	3011	3143	3292
	标准差 /(m·s <sup>-1</sup> )	190.8	160.3	97.9	52.2
	降幅/%	17.6	8.5	4.5	—

表 7 不同侵入次数岩样各区回弹值（1 次、3 次、5 次侵入工况）

Table 7 Rebound values in different zones (after first, third, fifth indentation)

工况	分区	碎裂区	裂纹区		原岩区
			密集区	非密集区	
1 次侵入	回弹值	35.7	48.5	62.0	66.4
	标准差	6.4	3.8	3.4	1.6
	降幅/%	46.3	27.0	6.6	—
3 次侵入	回弹值	33.9	46.4	62.3	66.1
	标准差	6.9	6.5	2.6	1.0
	降幅/%	48.7	29.8	5.8	—
5 次侵入	回弹值	36.0	46.5	59.9	65.9
	标准差	7.8	7.4	5.1	0.6
	降幅/%	45.4	29.5	9.1	—

由表 6 和表 7 可知：  
（1）类似单次侵入试验，多次侵入岩样的破裂

各区波速也比原岩明显降低, 并随破裂程度的增大而减小, 其规律为, 原岩区波速>裂纹非密集区波速>裂纹密集区波速>碎裂区波速。

(2) 类似单次侵入试验, 多次侵入岩样的破裂各区回弹指标规律与波速指标规律一致, 但回弹值的降幅比波速的降幅更为显著。

(3) 虽然表 5 显示, 不同侵入次数的各区尺寸随侵入次数的增大而变大, 但表 7 与表 8 中的数据表明, 各区波速和回弹指标随侵入次数的变化差异很小, 可近似认为各区性质没有变化。

(4) 对比不同侵入次数岩样损伤区的尺寸和面积 (如表 8) 可知, 随着侵入次数的增多, 损伤范围增大, 其中 3 次侵入相对 1 次侵入的增大比例较为明显, 而 5 次侵入相对 3 次侵入的增大幅度则较小。

表 8 岩样损伤区尺寸 (1 次、3 次、5 次侵入工况)

Table 8 Sizes and areas of damaged zone in rock sample (after first, third, fifth indentation)			
分区	厚度* /mm	宽度 /mm	面积 /mm <sup>2</sup>
1 次	26.7	67.0	971
3 次	35.0	71.6	1415
5 次	35.2	79.9	1673

注: \*厚度从切槽底部位置算起。

此外, 对多次侵入岩样提取波速水平和竖向测线, 如图 8 所示, 其中图 8 (a)、8 (c) 分别为 3 次和 5 次侵入试验中, 距岩样表面 15 mm 和 30 mm 深度处波速水平方向测线, 8 (b)、8 (d) 分别为 3 次和 5 次侵入试验中, 3 条切槽中心下方和切槽两侧距离切槽中心为 30 mm 处的竖直方向波速测线。

由图 8 可知:

(1) 多次侵入岩样的水平波速测线规律与单次侵入时类似, 即测线关于切槽中心近似对称, 同时切槽附近波速最低, 随与切槽距离增大, 波速先在较小范围内快速回升, 而后缓慢趋向原岩水平; 此外, 以 3000 m/s 为阈值对水平测线进行划分, 可发现多次侵入岩样中, 深度较浅的测线均具有较大的宽度, 该现象与观察到的裂纹密集区呈三角形分布相对应。

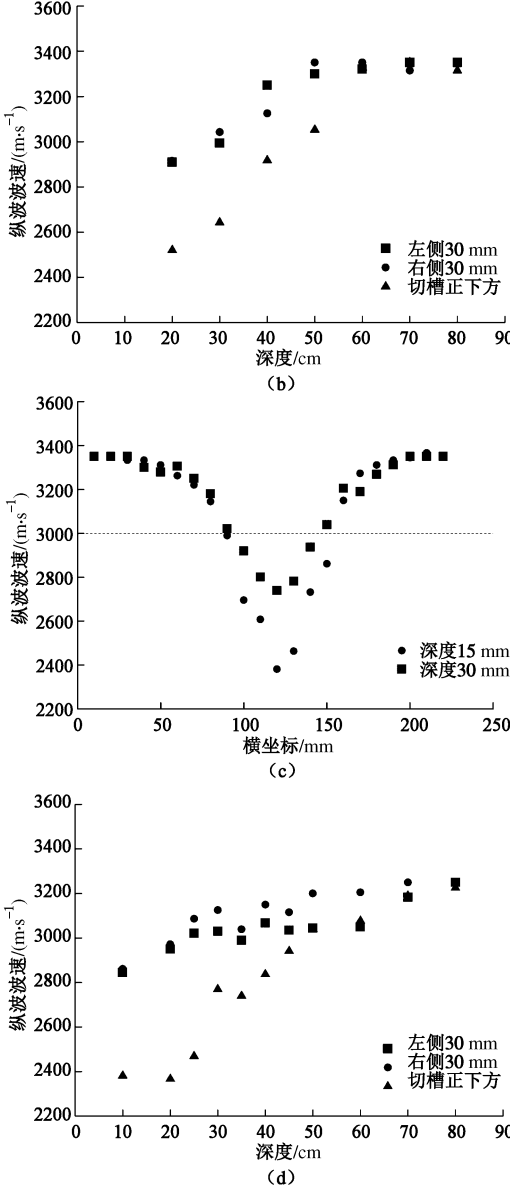
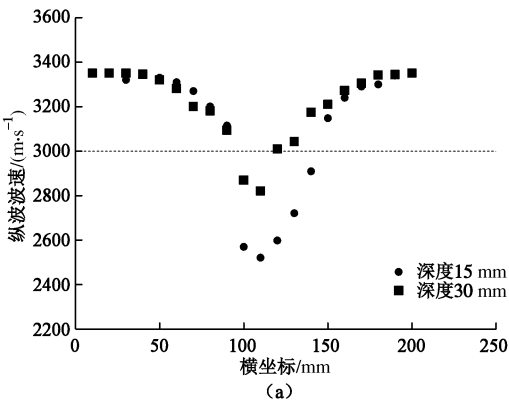


图 8 岩样切槽附近纵波波速水平和竖向测线 (3 次和 5 次侵入后)

Fig. 8 Horizontal and vertical ultrasonic velocity profiles around the groove (after third and fifth indentation)

(2) 多次侵入岩样的竖直波速测线规律也与单次侵入时类似, 竖直测线在切槽下方最近处, 波速最低, 随深度增大而逐渐回升。其中, 左右两侧测线波速数值均较为相近, 对应较好, 表明波速分布在切槽两侧大致对称。

5 结 论

采用北京工业大学研制的大型机械破岩试验平台, 对尺寸为 1000 mm×1000 mm×600 mm 的北山花岗岩试样进行了滚刀单次及多次线性侵入试验。同时, 对岩样切开后的截面采用抛光处理—肉眼查找—显微镜确认—有色笔描摹—数字图像获取及处理的步骤来研究岩样破裂特征, 进而进行破裂分区, 并对相应分

区进行了波速和回弹指标测试。

试验发现,滚刀切槽周边随距离远近,岩样破裂程度不一。基于试验观察和裂纹处理结果,可将岩样按其破裂特征分为 3 个区:岩粉区,破裂区和原岩区。岩粉区是刀具压入脆性岩石时,矿物颗粒发生严重破碎后残留在切槽内的物质,颗粒细腻,部分被压实,可用软毛刷从切槽内扫除;破裂区包括碎裂区和裂纹区,碎裂区内裂纹极为发育,有纵横裂纹穿割,岩石呈小块状,但仍具有一定强度,而裂纹区含有数目不等的裂纹,其张开度总体较小,在靠近碎裂区处张开度最大(0.02~0.03 mm),向外随距离增大逐渐尖灭,该区域又可根据裂纹密度细分为裂纹密集区和非密集区。

对单次侵入岩样各区的波速和回弹测试结果显示,各区的波速和回弹值相比原岩明显降低,并随破裂程度的增大而减小,其规律为,原岩区>裂纹非密集区>裂纹密集区>碎裂区,相较波速的变化,回弹值降幅更大;同时,不同次数侵入试验的结果显示,岩样各区尺寸随着侵入次数的增多而增大,其中 3 次相较 1 次增大较多,5 次相较 3 次增大则较小,但各区内的波速和回弹指标随侵入次数的变化却不显著。

此外,参照《水工建筑物岩石基础开挖工程技术规范》(SL47—94)对损伤区域的划分标准,本次试验的碎裂区和裂纹密集区可划为损伤区域,结果显示,不同侵入次数岩样损伤区的厚度在 20~40 mm 之间,同时,随着侵入次数的增多,损伤区域的尺寸和面积均有增大,而增大趋势随着侵入次数的增多而放缓。

**致谢:**感谢北京工业大学城市防灾与减灾教育部重点实验室张浩、苗崇通硕士及广州新欧机械相关工程师在试验中提供的帮助,感谢南京大学刘春老师、王德银硕士在后期图像处理中提供的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 张照煌. 全断面岩石掘进机盘形滚刀破岩机理的探讨[J]. 矿山机械, 1995(10): 27 - 29. (ZHANG Zhao-huang. Investigation of rock cutting mechanism of disc cutter of full face development machine[J]. Mining & Processing Equipment, 1995(10): 27 - 29. (in Chinese))
- [2] 宋克志, 王本福. 隧道掘进机盘形滚刀的工作原理分析[J]. 建筑机械, 2007(4): 71 - 74. (SONG Ke-zhi, WANG Ben-fu. Operation principle of disc cutter on TBM[J]. Construction Machinery, 2007(4): 71 - 74. (in Chinese))
- [3] LAWN B R, FULLER E R. Equilibrium penny-like cracks in indentation fracture[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(12): 2016 - 2024.
- [4] SWAIN M V, LAWN B R. Indentation fracture in brittle rocks and glasses[C]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 1976, 13(11): 311 - 319.
- [5] HAGAN J T, SWAIN M V. The origin of median and lateral cracks around plastic indents in brittle materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1978, 11(15): 2091.
- [6] 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, 1984, 21(2): 97 - 107.
- [7] 黄士芳, 金国栋. 静压侵入作用下的岩石声发射[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1981(2): 91 - 100. (HUANG Shi-fang, JIN Guo-dong. Acoustic emission of rock under penetration fracture[J]. Journal of Northeast Institute of Technology (Natural Science), 1981(2): 91 - 100. (in Chinese))
- [8] LINDQVIST P A. Stress fields and subsurface crack propagation of single and multiple rock indentation and disc cutting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1984, 17(2): 97 - 112.
- [9] MÄKI K. Studies of indentation fractures in granite caused by a sharp indenter. Mechanical rock fragmentation. Results from rock indentation tests during a doctoral course[R]. Lule: University of Lule, 1981, 57T: 14 - 31. (MAKI K. Studies of indentation fractures in granite caused by a sharp indenter, Mechanical rock fragmentation, Results from rock indentation tests during a doctoral course[R]. Lule: University of Lule, 1981: 57T: 14 - 31. (in German))
- [10] HOWARTH D F, BRIDGE E J. Micro fracture beneath blunt disc cutters in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1988, 25(1): 35 - 38.
- [11] 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.
- [12] GONG Q M, ZHAO J, HEFNY A M. Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 1 - 8.
- [13] 梁正召, 于跃, 唐世斌, 等. 刀具破岩机理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(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(1): 84 - 89. (in Chinese))
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] 余静, 程凯. 滚刀破碎理论分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1980(2): 105 - 113. (YU Jing, CHENG Kai. A theoretical analysis of rock fracture by rolling disc cutter[J]. Journal of Northeast Institute of Technology, 1980(2): 105 - 113. (in Chinese))
- [16] 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. (in Chinese))
- [17] NILSEN B, OZDEMIR L. Hard rock tunnel boring prediction and field performance[C]// Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, INC, 1993: 833 - 833.
- [18] ROSTAMI J, OZDEMIR L, NILSON B. Comparison between CSM and NTH hard rock TBM performance prediction models[C]// Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology. Las Vegas, 1996: 1 - 10.
- [19] 余静. 岩石机械破碎规律和破岩机理模型[J]. 煤炭学报, 1982, **7**(3): 10 - 18. (YU Jing. Rules of rock fragmentation with mechanical methods and model of rock failure mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 1982, **7**(3): 10 - 18. (in Chinese))
- [20] 茅承觉, 刘友元. 隧洞掘进机盘形滚刀滚压岩石的试验[J]. 工程机械, 1986(3): 21 - 26. (MAO Cheng-jue, LIU You-yuan, Experiment of tunnel mechanical boring machine disk cutter roll rock[J]. Construction Machinery and Equipment, 1986(3): 21 - 26. (in Chinese))
- [21] 金国栋, 黄士芳, 虞和霖, 等. 全断面岩石隧道掘进机盘形滚刀破岩机理分析 (上)[J]. 制冷空调与电力机械, 1981(3): 1 - 9. (JIN Guo-dong, HUANG Shi-fang, YU He-ji, et al. Analysis of rock cutting mechanism of disc cutter of full face development machine[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 1981(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [22] 刘春, 王宝军, 施斌, 等. 基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (LIU Chun, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1383 - 1388. (in Chinese))
- [23] SL 47—94 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S]. 1994. (SL 47—94 Construction technical specification on rock foundation excavation engineering of hydraulic structures[S]. 1994. (in Chinese))