

高地应力下岩石的真三轴试验研究

陈景涛^{1, 2}, 冯夏庭¹

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉理工大学 理学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 通过真三轴试验模拟高地应力条件下地下工程开挖引起的复杂的应力路径的演化。在设定的加载方式下, 针对拉西瓦新鲜花岗岩的试验结果表明: 当卸载最小主应力时, 岩石发生回弹变形, 声发射计数率比卸载前显著增加, 增加的幅度随中间主应力的增加而逐渐提高。岩石的应力-应变关系为弹脆性, 峰值强度随中间主应力的增加有所提高, 峰值强度的提高值与中间主应力的比值随中间主应力的提高逐渐减小。声发射计数率峰值与应力水平有关, 峰值的次数与破坏后主裂缝的条数相对应。最后, 分析了岩石的破坏机制。

关键词: 岩石力学; 高地应力; 真三轴试验; 强度与变形特性; 声发射; 破坏机制

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)08-1537-07

TRUE TRIAXIAL EXPERIMENTAL STUDY ON ROCK WITH HIGH GEOSTRESS

CHEN Jingtao^{1, 2}, FENG Xiating¹

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;*

2. School of Nature Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: The complicated evolvement of stress load, which is produced by excavating underground engineering under high stress conditions, is simulated through true triaxial experiment. Under the given loading method, the experimental results about new granite in Laxiwa show that the resilient deformation is found and acoustic emission counts rate is evidently enhanced when the minor principal stress is unloaded. The enhancing extent of acoustic emission counts rate increases with the intermediate principal stress. The constitutive relation is elasto-brittle. The peak value of strength increases with the intermediate principal stress; and the ratio of increasing value of limit strength and the intermediate principal stress decrease with the intermediate principal stress. The peak value of acoustic emission counts rate depends on stress state; and the amount of peak value is equal to that of major crack after failure. Finally, the failure mechanism is discussed.

Key words: rock mechanics; high geostress; true triaxial experiment; characteristics of strength and deformation; acoustic emission(AE); failure mechanism

1 引言

随着我国西部大开发等相关战略的实施, 一批重大基础设施建设, 如西电东送、南水北调等, 正以前所未有的速度在全国展开。拟建、在建的水

利水电工程多达 30 余项, 且大多以地下洞室(群)作为主要的水工建筑物, 如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等。施工中的龙滩水电站的地下厂房尺寸为 388.5 m×74.4 m×30.3m(长×宽×高)。资源开发、石油开采、地热开发等已向深部发展, 如红透山铜矿目前开采已进入 900~1 100 m 深

收稿日期: 2005-04-25; **修回日期:** 2005-09-02

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50325414)

作者简介: 陈景涛(1976-), 男, 1998年毕业于武汉工业大学工程结构与力学系结构工程专业, 现为博士研究生、讲师, 主要从事岩土工程、结构工程方面的教学与研究工作。E-mail: jtchen2006@163.com

度,而南非金矿开采深度则达 3 800 m^[1]。西部地区的高山峡谷以及采深的增加使得高地应力的问题日益突出,例如,规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深最大埋深达 1 150 m,部分洞段将穿越高地应力区,开挖时可能会遇到 50.0 MPa 左右的高水平挤压应力。我国已有大量的军事高放核废物,核电站核废物到 2010 年将达 1.0×10^4 kg。深部岩体中埋置放射性核废物已列入国家的试验计划。由于经济和战略储备的需要,深部岩层中储存石油、天然气也已引起我国政府的关注。

高地应力条件下地下工程围岩在开挖前处于三维应力状态,其中某 1~2 个方向的主应力很高,如拉西瓦地下厂房的地应力超过 30.0 MPa。开挖后,围岩由三维应力状态转变为二维应力状态,在岩质较脆的情况下,有可能产生能量的急剧释放,围岩发生劈裂弹射破坏,这就是人们常说的岩爆。此外,周边洞室的开挖,有可能引起已开挖洞室围岩应力集中的加剧,导致已开挖洞室围岩在开挖一段时间以后,能量释放率急剧增加而发生岩爆。一些学者通过常规三轴加载以及卸载试验对岩爆进行研究^[2~7],但这样复杂的应力路径的演化,常规三轴试验是不能反映的。C. Chang 和 B. C. Haimson^[8, 9]通过真三轴加载试验对岩石的力学性能及岩爆进行研究,李庶林等^[10]、X. L. Lei 等^[11]及潘长良等^[12]对岩石破坏过程中的声发射现象进行研究。目前对高地应力下岩石力学性能研究也有一定进展^[13],但通过真三轴加载、卸载试验模拟高地应力条件下地下工程开挖引起的复杂的应力路径的演化,并结合声发射监测来研究高地应力下岩石的力学性能及岩爆,这方面的报道还较为鲜见。因此,很有必要开展真三轴卸载试验,研究围岩在复杂的应力路径演化过程中的力学性能和破坏机制,为高地应力条件下岩石力学分析与计算奠定基础,这也是岩石力学学科的前沿研究课题和难点。

2 试验

2.1 试验装置

本次试验是在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的岩石真三轴试验机系统上进行的,同时应用美国 PAC 公司的声发射测试系统采集声发射信号。试验前,试样两侧对称地粘贴纵、横向应变片,并固定声发射探头,试验在安静的环境下进行。

2.2 试验样品

本文以拉西瓦新鲜花岗岩为研究对象,该花岗岩主要矿物为石英、斜长石、微斜~微调长石,次要矿物主要为黑云母和角闪石,为中粗粒结构,呈灰白色,块状构造,岩石强度高,岩体致密坚硬。试样尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm(长×宽×高),其平行度、平直度和垂直度均符合《水利水电工程岩石试验规程》(SL264-2001)要求。

2.3 加载方式

根据现场实测的地应力,确定真三轴试验的初始应力水平如表 1 所示。

表 1 真三轴试验的初始应力水平

Table 1 Initial stresses of true triaxial experiment

试样 编号	最小主应力 /MPa	中间主应力 /MPa	最大主应力 /MPa
1 [#]	10	15	20
2 [#]	10	20	30
3 [#]	10	30	40
4 [#]	10	40	50
5 [#]	10	50	60
6 [#]	30	60	70
7 [#]	30	70	80
8 [#]	30	80	90

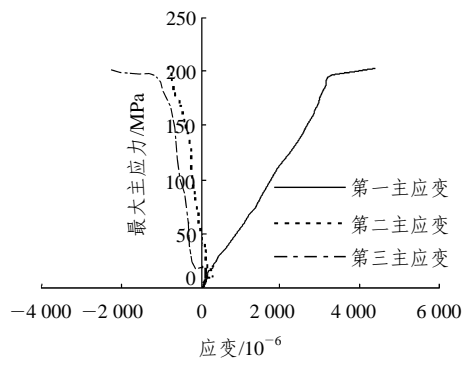
根据拉西瓦地下厂房开挖情况,确定加载路径:

(1) 加载 σ_3 至初始地应力水平; (2) 加载 σ_2 至初始地应力水平; (3) 加载 σ_1 至初始地应力水平; (4) 保持 σ_1 , σ_2 不变,卸载 σ_3 至 0; (5) 保持 σ_2 , σ_3 不变,加载 σ_1 至试样破坏。试验时,加载速度基本恒定。

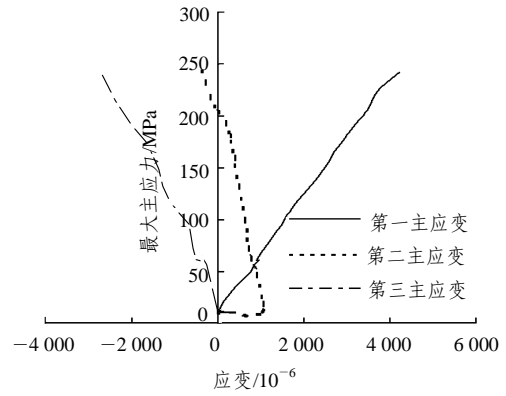
3 强度和变形特性

试样的应力-应变关系曲线(以压应变为正)如图 1 所示。

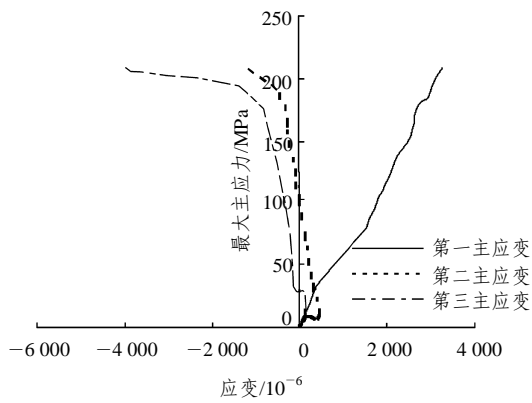
从试验结果可以看出,应力-应变关系近似直线,无明显的屈服前和屈服后的非线性段,也无破坏后的非线性段。虽然在峰值强度前有一定的塑性变形,但破坏仍为脆性破坏。卸载最小主应力时有明显的回弹变形。随着中间主应力的提高,峰值强度有明显的提高(见表 2),在试验中间主应力范围内,与单轴抗压强度相比最大提高幅度为 53%,与



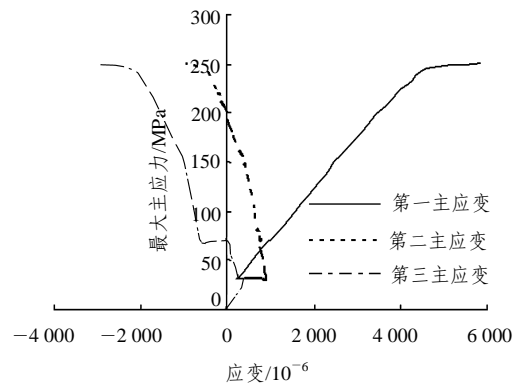
(a) 1# 试样



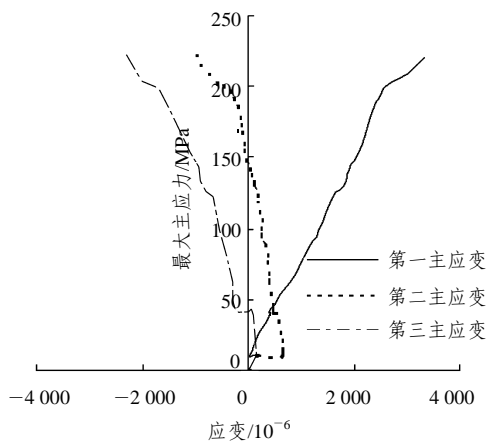
(e) 5# 试样



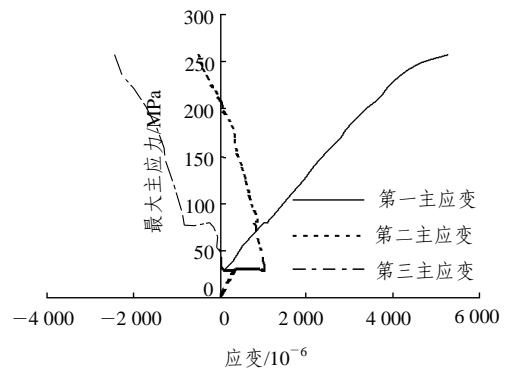
(b) 2# 试样



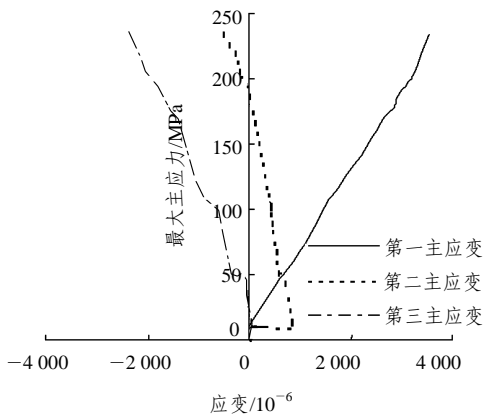
(f) 6# 试样



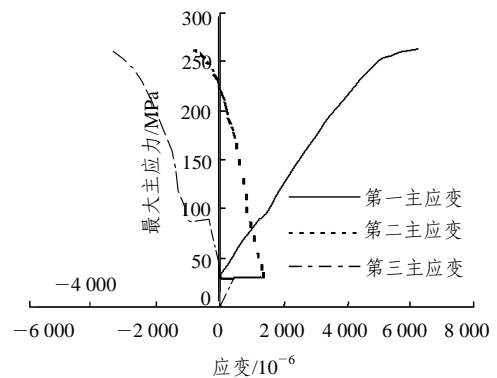
(c) 3# 试样



(g) 7# 试样



(d) 4# 试样



(h) 8# 试样

图 1 应力 - 应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain relation curves

单轴抗压强度相比,不同中间主应力时峰值强度随中间主应力的变化见表2,峰值强度的提高值与中间主应力 σ_2 的比值随中间主应力的提高而逐渐减小。在试验中,应力提高值/中间主应力的值从2.06减小至1.15(见表2)。弹性模量随中间主应力的提高而有所提高,但并不明显(见表3)。

射数特征曲线与应力路径见图2。

表2 峰值强度随中间主应力 σ_2 的变化

Table 2 Peak values vs. the intermediate principal stress σ_2

试样编号	中间主应力 /MPa	峰值强度 /MPa	峰值强度的提高值 /MPa	提高值/中间主应力
0 [#]	0	172		
1 [#]	15	203	32	2.06
2 [#]	20	209	38	1.85
3 [#]	30	221	49	1.63
4 [#]	40	233	61	1.53
5 [#]	50	243	71	1.42
6 [#]	60	252	80	1.33
7 [#]	70	258	89	1.27
8 [#]	80	264	92	1.15

注:0[#]试样为单轴压缩试验。

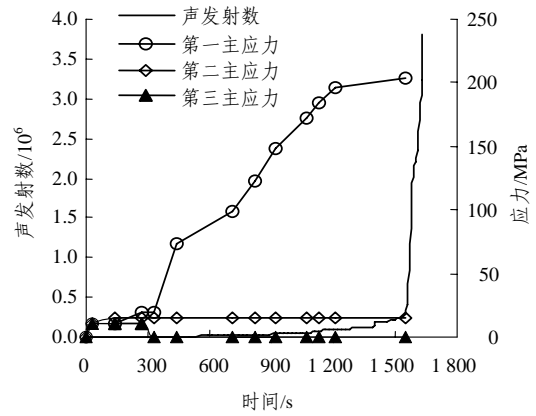
表3 弹性模量随中间主应力的变化

Table 3 Elastic modulus vs. the intermediate principal stress σ_2

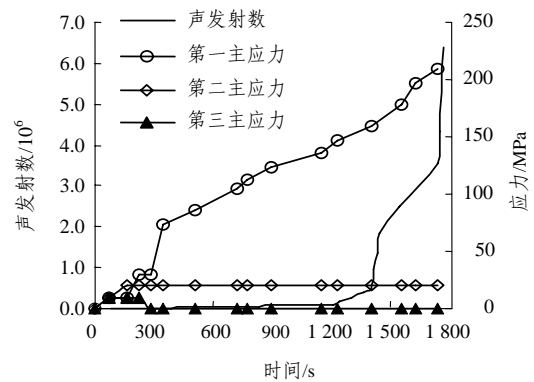
试样编号	中间主应力/MPa	弹性模量/GPa
1 [#]	15	48.8
2 [#]	20	54.9
3 [#]	30	51.1
4 [#]	40	53.8
5 [#]	50	55.4
6 [#]	60	53.6
7 [#]	70	54.1
8 [#]	80	50.4

4 声发射特征

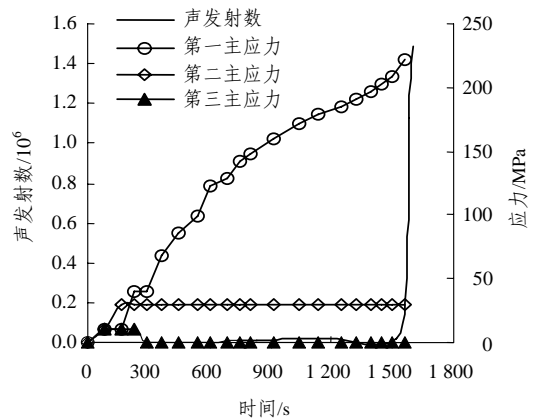
岩石声发射是指岩石材料在受荷变形过程中内部晶格错位或微裂纹扩展而引起瞬态弹性波的现象。通过声发射测试系统采集声发射活动的波形,经包络检波后,波形超过预设的阈值电压形成一个矩形脉冲,一个矩形脉冲就称为一个声发射数。单位时间的声发射数称为声发射计数率。试样的声发



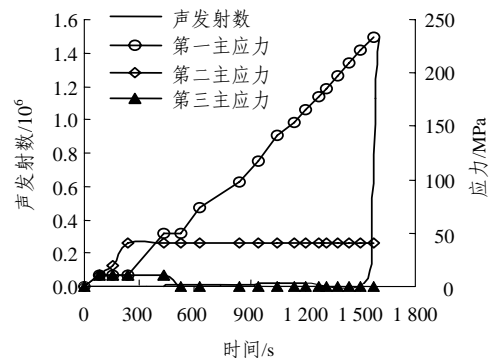
(a) 1[#]试样



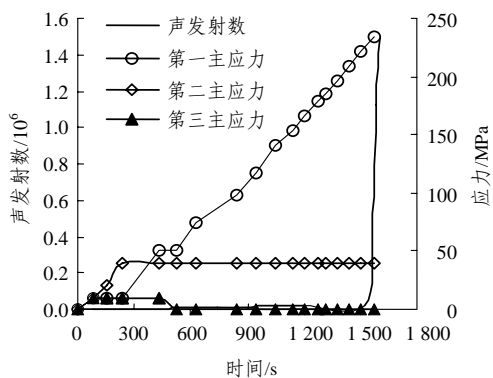
(b) 2[#]试样



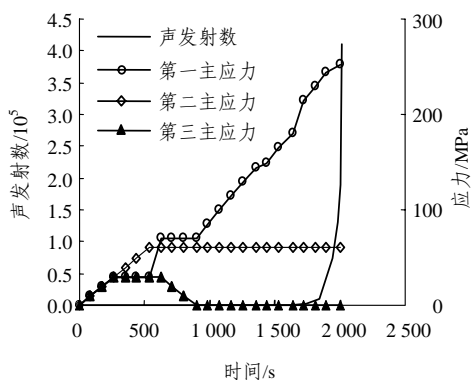
(c) 3[#]试样



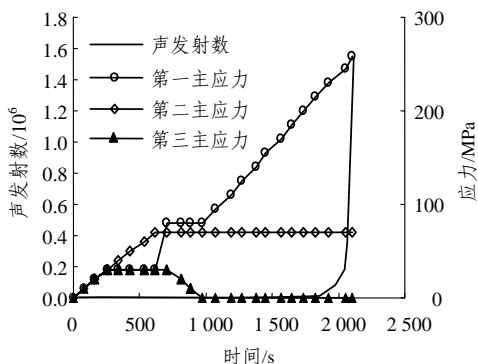
(d) 4[#]试样



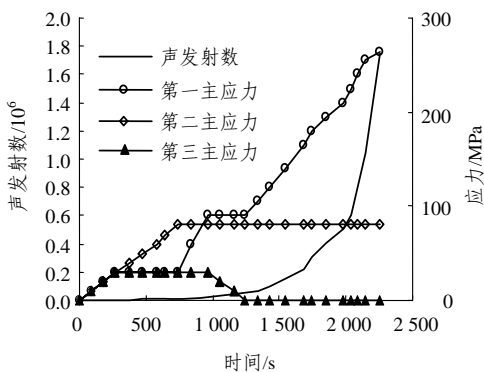
(e) 5[#]试样



(f) 6[#]试样



(g) 7[#]试样



(h) 8[#]试样

图 2 声发射数曲线和应力路径

Fig.2 Curves of AE activity and stress paths

从以上试验结果可以看出, 试样在试验中有明显的声发射现象, 在分析时取声发射数作为声发射活动的指标。

(1) 同等最小主应力在卸载时, 声发射计数率增加的幅度随中间主应力的增加而逐渐提高, 卸载最小主应力前、后声发射计数率之比见表 4。

表 4 卸载最小主应力前、后声发射计数率之比

Table 4 Ratios of AE counts rate before unloading to that after unloading

试样编号	卸载前声发射计数率	卸载后声发射计数率	声发射计数率增加幅度/%
1 [#]	1.5	39.6	26.4
2 [#]	1.9	52.5	27.6
3 [#]	1.4	55.9	40.0
4 [#]	1.3	45.7	35.2
5 [#]	1.2	59.1	49.3
6 [#]	1.8	85.8	47.7
7 [#]	1.5	78.6	52.4
8 [#]	1.7	94.5	55.6

(2) 试验过程中声发射活动有明显的峰值。声发射计数率峰值对应的最大主应力 σ_2 见表 5。当应力达到强度极限的 30%~50%时, 声发射活动首次明显加强, 表示岩石中微观裂缝的产生; 当应力达

表 5 声发射活动峰值时对应的最大主应力 σ_2

Table 5 Peak values of AE activity vs. the major principal stress σ_2

试样编号	最大主应力/峰值强度				声发射计数率			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
1 [#]	39	56	79	96	260	132	377	4 478
2 [#]	32	60	65	81	143	123	217	2 921
3 [#]	46	76	91		153	225	5 964	
4 [#]	46	95			148	8 964		
5 [#]	30				169			
6 [#]	35	67	92		190	269	3 257	
7 [#]	41	90			186	7 165		
8 [#]	31	58	76	94	247	362	743	2 674

到强度极限的 80%~95%时, 声发射计数率达到最大, 代表岩石中破裂面的出现。

(3) 若不考虑最后与破坏面形成对应的声发射计数率峰值, 声发射计数率的峰值次数与破坏后主裂缝的条数是相对应的, 声发射计数率的峰值次数与破坏后主裂缝的条数见表 6。

表 6 声发射计数率的峰值次数与破坏后主裂缝的条数
Table 6 Amount of AE peak values vs. those of macrocracks

试样编号	声发射计数率峰值数	破坏后主裂缝条数
1 [#]	3	3
2 [#]	3	3
3 [#]	2	2
4 [#]	1	1
5 [#]	1	4
6 [#]	2	2
7 [#]	1	1
8 [#]	3	3

(4) 5[#]试样的声发射特征与上述规律不符, 可能由于第 1 条宏观裂缝正好在 AE 探头附近, 从而影响声发射信号的采集。

5 破坏机制

试样的破坏形态如图 3 所示。

卸载最小主应力后, 随着最大主应力的增加, 岩石斜截面上的剪应力和平行于最小主应力方向的拉伸应变逐渐增大, 岩石的破坏就是在斜截面上的剪应力或拉伸应变的作用下, 岩石矿物颗粒之间发生相对位移。岩石破坏时表现为受拉破坏或剪切破坏, 取决于截面上的剪应力或拉伸应变达到其极限值。

部分试样的破坏呈剪切破坏, 是由于破坏面上的剪应力达到极限值引起的。此时, 又可分为 2 种破坏形式, 一种为“X”状共轭斜面剪切破坏(如 1[#], 2[#] 试样), 一种为单斜面剪切破坏(如 4[#], 7[#] 试样), 为剪切破坏机制。部分试样(如 3[#] 试样)呈劈裂破坏, 是在最大主应力作用下产生沿最小主应力方向的拉伸应变达到极限值引起的。破坏面粗糙, 且平行于最小主应力作用面, 破坏时发生类似岩

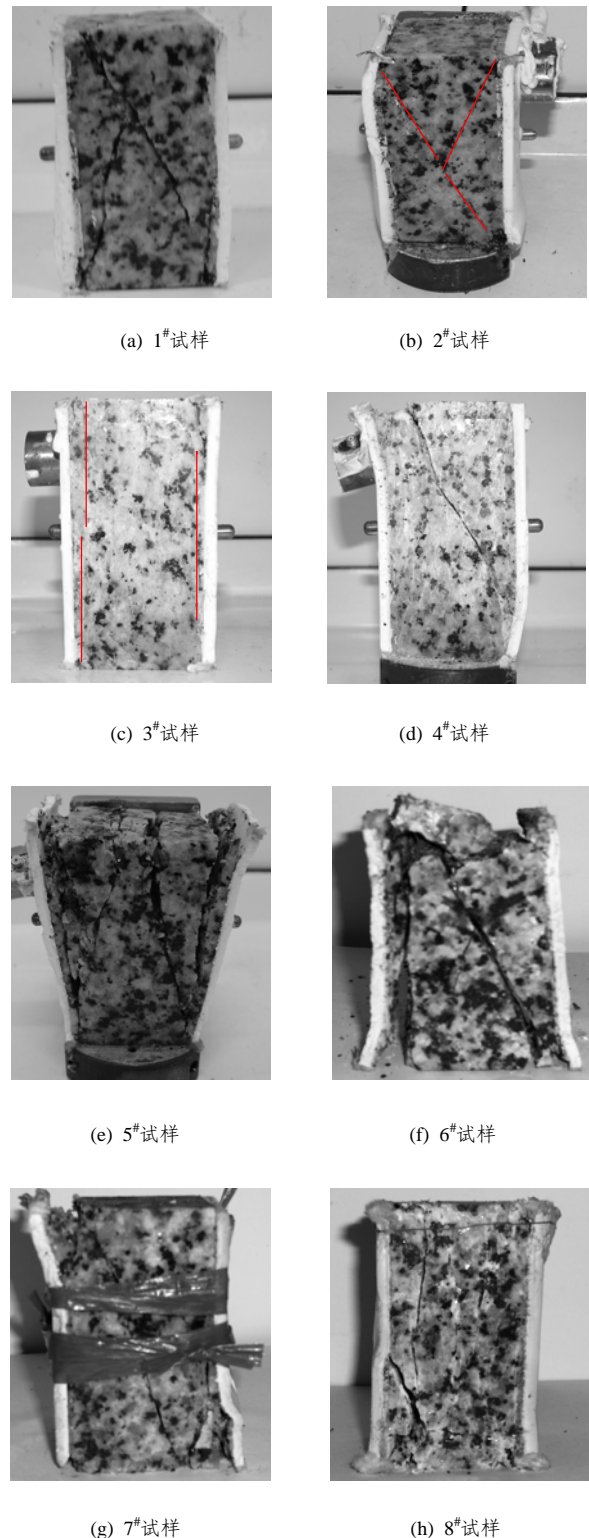


图 3 试样的破坏形态
Fig.3 Failure modes of the rock specimens

爆为片状剥离, 属张拉破坏。部分试样(如 5[#], 6[#] 和 8[#] 试样)呈拉 - 破坏, 既有剪应力引起的斜裂缝, 又有拉伸应变引起的竖向裂缝。试样破坏时伴随巨大声响, 为脆性破坏。

6 结 论

高地应力条件下地下工程开挖引起的复杂应力路径演化, 通过真三轴试验可方便模拟。在设定的加载方式下, 拉西瓦新鲜花岗岩的试验结果表明:

(1) 卸载时岩石发生回弹变形, 峰值强度随中间主应力的增加有所提高, 峰值强度的提高值与中间主应力的比值随中间主应力的提高逐渐减小。

(2) 卸载最小主应力时岩石发生回弹变形, 声发射计数率比卸载前显著增加, 增加的幅度随中间主应力的增加而逐渐提高; 声发射计数率的峰值与应力水平有关, 当应力达到强度极限的 30%~50% 时, 声发射活动首次明显加强, 表示岩石中主裂缝的产生; 当应力达到强度极限的 80%~95% 时, 声发射计数率达到最大, 表明岩石中破裂面的出现。

(3) 声发射计数率峰值的次数是与破坏后主裂缝的条数相对应的, 并与岩石的破坏机制有关。岩石破坏时表现为张拉破坏、剪切破坏或拉-剪破坏, 取决于截面上的剪应力还是拉伸应变先达到其极限值。

参考文献(References):

- [1] Malan D F, Basson F R P. Ultra-deep mining: the increased potential for squeezing conditions[J]. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1998, 98(11/12): 353 - 363.
- [2] 徐林生, 王兰生. 岩爆形成机制研究[J]. *重庆大学学院学报(自然科学版)*, 2001, 24(2): 115 - 117.(Xu Linsheng, Wang Lansheng. Study on the mechanism of rock burst[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science)*, 2001, 24(2): 115 - 117.(in Chinese))
- [3] 吴 刚. 工程岩体卸荷破坏机制的研究现状及展望[J]. *工程地质学报*, 2001, 9(2), 174 - 181.(Wu Gang. Current status and prospects of research on mechanism for unloading failure of engineering rock mass[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2001, 9(2), 174 - 181.(in Chinese))
- [4] 王贤能, 黄润秋. 岩石卸荷破坏特征与岩爆效应[J]. *山地研究*, 1998, 16(4): 281 - 285.(Wang Xianneng, Huang Runqiu. Analysis of deformation and failure features characteristics of rock under unloading conditions and their effects on rock burst[J]. *Mountain Research*, 1998, 16(4): 281 - 285.(in Chinese))
- [5] 徐松林, 吴 文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 763 - 767.(Xu Songlin, Wu Wen, Wang Guangyin, et al. Study on complete procedures of marble under triaxial compression I: testing study on complete procedure of triaxial compression and the processes of unloading confining at the pre-peak and post peak[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(6): 763 - 767.(in Chinese))
- [6] 徐林生. 卸荷状态下岩爆岩石力学试验[J]. *重庆交通学院学报*, 2003, 22(1): 1 - 4.(Xu Linsheng. Research on the experimental rock mechanics of rock burst under unloading condition[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2003, 22(1): 1 - 4.(in Chinese))
- [7] 许东俊, 章 光, 李廷芥, 等. 岩爆应力状态研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 19(2): 169 - 172.(Xu Dongjun, Zhang Guang, Li Tingjie, et al. On the stress state in rock burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 19(2): 169 - 172.(in Chinese))
- [8] Chang C, Haimson B C. True triaxial strength and deformability of the KTB deep hole amphibolite[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(8): 18 999 - 19 013.
- [9] Haimson B C, Chang C. True triaxial strength of KTB amphibolite under borehole wall conditions and its use to estimate the maximum horizontal in-situ stress[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B10): 2 257 - 2 271.
- [10] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压破坏全过程声发射特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(Li Shulin, Yin Xiangang, Wang Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [11] Lei X L, Masuda K, Nishizawa O, et al. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26: 247 - 258.
- [12] 潘长良, 祝方才, 曹 平, 等. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. *中南工业大学学报*, 2001, 32(4): 336 - 338.(Pan Changliang, Zhu Fangcai, Cao Ping, et al. Characteristics of acoustic emission of bursting-intended rocks under uniaxial compression[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2001, 32(4): 336 - 338.(in Chinese))
- [13] 徐林生, 唐伯明, 慕长春, 等. 高地应力与岩爆有关问题的研究现状[J]. *公路交通技术*, 2002, (4): 48 - 51.(Xu Linsheng, Tang Boming, Mu Changchun, et al. Study on the current issues of high geostress and rock blasting[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2002, (4): 48 - 51.(in Chinese))