

含预制裂纹的脆性岩石单轴压缩下渐进性破坏过程的试验研究

周建超, 贾纯驰, 吕建国

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:对含预制裂纹的花岗岩进行单轴压缩试验研究预制裂纹倾角 α 对脆性岩石渐进性破坏过程的影响。首先对破坏过程的轴向应力-横向应变曲线进行总结和讨论,然后分析预制裂纹与加载方向夹角 α 对岩石的应力门槛值:裂纹起始应力 σ_{ci} 、裂纹扩展应力 σ_{cd} 、峰值强度 σ_f ,由应变片记录的应力-应变曲线和试样的表面裂纹扩展情况的影响机制。结果表明,含有预制裂纹的岩石试样进行加载试验过程中,预制裂纹倾角 α 的变化成了决定脆性岩石破裂方式的主要因素。故在对含节理、裂隙的脆性岩石的工程应用上,通过对岩体的轴向应力-横向应变曲线进行分析,可以对地下开挖工程起到指导设计开挖方式及支护形式的作用。

关键词:脆性岩石;预制裂纹;应力门槛值;岩石力学;应力-应变曲线;渐进性破坏

中图分类号:P634.1 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2012)09-0066-05

Experimental Study on Progressive Failure Process of Brittle Rock with Pre-existing Flaw Based on Uniaxial Compression/ZHOU Jian-chao, JIA Chun-chi, LV Jian-guo (School of Engineering and Technology, China University Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A series of uniaxial compression experiment on the granite with the pre-existing flaw were carried out to study the influence of the inclining angle α of the pre-existing flaw on the progressive failure of brittle rock. The paper firstly summarized and discussed the axial stress-radial strain curves of progressive failure process, then analyzed the stress thresholds affected by pre-existing flaw and inclining angle α crack initiation stress σ_{ci} , crack damage stress σ_{cd} , peak strength σ_f ; stress-strain curves recorded by the strain gauges and the influence mechanism of surface flaw propagation of rock specimen. The experimental results show that in the loading test process of rock specimen with pre-existing flaw, the difference of inclining angle α is the main factor affecting the rupture pattern of brittle rock. So in the engineering applications of brittle rock with joint and fracture, the analysis on axial stress-radial strain curves can play the guiding role for the designs of underground excavation method and support form.

Key words: brittle rock; pre-existing flaw; stress threshold; rock mechanics; stress-strain curve; progressive failure

0 引言

岩石变形破裂过程是岩石力学的核心内容之一,对于理解并巷工程的稳定性、边坡失稳和地震等地壳介质破裂过程的机制具有重要意义。实际工程中,含节理裂隙岩体是经常遇到的一类工程介质。岩体内裂隙的产状、走向及分布情况对整个岩体的变形程度及强度性质有着至关重要的影响^[1,2]。因此,研究含节理岩体的变形破坏过程有着深刻的意义。

在低围压条件下,岩体的破坏和失稳过程是由岩体内部非连续的裂隙面张开、闭合和扩展进而贯通所引起的^[3-5]。Cook N. G. W.^[2]研究表明,岩石承载能力的丧失是逐渐、连续地进行的,而不是间断

进行的,也就是说岩石到最终破坏失稳存在一个渐进性破坏的过程。一般而言,记录这个过程的手段有应变片法^[7]、CT分析法^[8]、声发射法(AE)^[2,9]及数字散斑相关量测方法(DSCM)^[10]等。其中利用应变片法具有简单方便、测试灵活、价格低廉等优点。事实上岩石实验在实验室中所得数据结论最终仍是要应用到实际工程中,因而,即便应变片法有着受粘贴位置和粘贴方向等因素影响较大的不足,但利用应变-应力曲线所分析得出的结论较其他方法更有实用性。

针对预制裂纹对岩石试样的处理方法通常有三点弯法^[11,12]、切割法^[2]、预埋薄片法^[7]等。尹祥础、滕春凯等人在应用三点弯法时发现,三点弯法对裂纹

收稿日期:2012-05-02;修回日期:2012-07-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介:周建超(1991-),男(汉族),安徽合肥人,中国地质大学(北京)在校学生,勘查技术与工程专业,研究方向为岩土工程,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)18楼,409015669@qq.com。

载体的要求较为苛刻,在岩石上应用成功率低,裂纹长度及倾角不易控制,且在岩石板上预制成的裂纹受到岩石本身多晶体结构的影响,预制出的裂纹不如玻璃等均匀材料中的平直^[12]。切割法因其方法简单,可以比较自由的在岩石上实现各种倾角角度及长度的裂纹制作。但是传统的圆形切刀加工出的裂隙面间距至少在 0.6 mm 以上,这和 Griffith 定义的平直、端部极其尖锐及厚度为零的裂纹,有明显出入。预埋薄片法只适用在水泥、混凝土中,无法在天然岩石上实施。本文采用电镀金刚石线锯加工裂纹,其在硬脆材料加工中具有切割面连续光滑、加工裂隙间隙窄的特点,相较于其他方法,利用电镀金刚石线锯加工的裂纹更接近理想裂纹,也更贴合天然岩体中节理的产状。

本文针对含不同倾角预制裂纹的脆性类岩石在单轴受压情况下岩石渐进性破坏过程,分析裂纹发展过程中的应力阈值值和表面裂纹的扩展情况。

1 实验方法

实验试样取自福建,岩石种类为花岗岩。试样尺寸为 100 mm × 50 mm × 20 mm。试样的预制裂纹制作过程为:首先用高压水枪在试样中心穿一个孔径为 2 mm 的圆孔,再用金刚石线锯,以小孔为中心点在试样上进行切割,加工出一条长度为 20 mm、裂隙面间距为 0.26 mm 的预制裂纹。根据预制裂隙面与加载方向的夹角不同,分别加工出倾角 α 为 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°七组,每组 3 个试样。试样的上下端面经过研磨加工,保证 2 个加载面之间的不平行度不超过 0.05 mm,端面垂直于试样轴线,最大偏差不超过 0.25°。因花岗岩本身颜色较为复杂,造成对裂纹扩展的观察记录不便,故将试样外表面漆成亚光黑色。

利用电液伺服万能材料试验机对试样进行加压试验,加载速率为 0.2 MPa/s,通过数码摄像机对试验过程中试样表面的裂纹扩展情况进行实时记录。在试样上粘贴应变片,分别记录轴向和径向应变。图 1 为试样及实验装置。

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

图 2 所示为预制裂纹倾角为 75°时试样的应力-应变曲线。

由图 2 可见,岩石类脆性材料的应力-应变曲线有 3 个显著的特征应力指标:裂纹起始应力 σ_{ci} 、裂

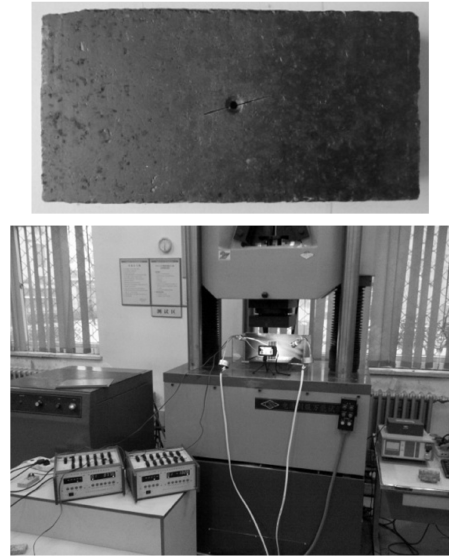


图 1 试样及实验装置图

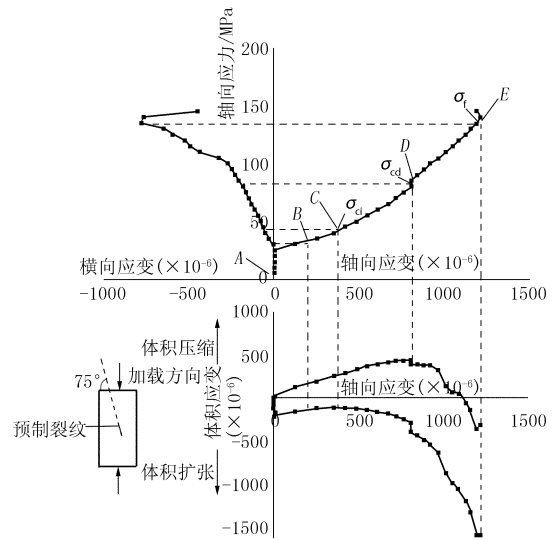


图 2 预制裂纹倾角为 75°时试样的应力-应变曲线

纹扩展应力 σ_{cd} 和峰值强度 σ_f 。根据张晓平^[3]、Martin C. D^[4]等的研究,可以将岩石类脆性材料的应力-应变曲线划分为 5 个阶段,分别为:

I, 裂纹压密闭合阶段,对应图 2 中 AB 段,此阶段反映岩石本身原始裂纹及孔隙的压密闭合作用,是脆性岩石由不连续体过渡到连续体的过程;

II, 弹性阶段,对应图 2 中 BC 段,此阶段岩石的应力-应变曲线呈线性,可将其视为理想弹性体;

III, 裂纹稳定扩展阶段,对应图 2 中 CD 段,其中 C 点对应的应力水平即为裂纹起始应力 σ_{ci} ,根据 W. F. Brace, W. R. Wersik^[6]的研究,此阶段起始于大约 0.4 σ_f 处;

IV, 裂纹加速扩展阶段,对应图 2 中 DE 段,其中 D 点对应的应力水平为裂纹扩展应力 σ_{cd} ,一般

认为 σ_{cd} 约为 $0.8\sigma_f$ 左右^[14],此阶段为不稳定裂纹生成阶段,图2中总体积应变-轴向应变曲线的反弯点标志着该阶段的开始;

V,峰后阶段,对应图2中E点之后段,在应力水平达到峰值强度 σ_f 时,岩石试样发生脆性断裂,接着进入峰后阶段。

2.1.1 应变及应力计算

表1为由式(1)-(3)计算步骤所得的各组试样的裂纹起始应力 σ_{ci} 、裂纹扩展应力 σ_{cd} 及峰值强度 σ_f 平均值。

$$\varepsilon_{ve} = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

$$\varepsilon_v \approx \varepsilon_{axial} + 2\varepsilon_{lateral} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{vc} \approx \varepsilon_v - \varepsilon_{ve} \quad (3)$$

式中: ε_{ve} ——弹性体积应变; ε_v ——总体积应变; ε_{vc} ——裂纹体积应变; μ 、 E ——分别为泊松比和杨氏模量,可由标准试样的应力-应变曲线得出。

若在单轴压缩实验中,式(1)-(3)中的 σ_3 取为0。

表1 各组试样应力门槛值平均值

裂纹倾角/(°)	σ_f /MPa	σ_{ci} /MPa	σ_{ci}/σ_f	σ_{cd} /MPa	σ_{cd}/σ_f
0	109.4	79.5	0.73	90.7	0.83
15	101.1	31.7	0.31	87.3	0.86
30	119.1	0	0	84.0	0.71
45	124.1	14.2	0.11	62.3	0.50
60	142.1	41.8	0.29	92.3	0.66
75	158.7	50.1	0.32	123.3	0.78
90	154.5	53.3	0.34	121.7	0.79

2.1.2 应力-应变曲线分析

预制裂纹及其倾角变化对脆性岩石单轴压缩实验影响是显著的,反映在应力-应变曲线上为:在预制裂纹倾角 $\alpha < 45^\circ$ 时,由应变片记录的横向应变有明显的压缩阶段,见图3。并且这种压缩趋势随着预制裂纹倾角的上升迅速减小消失,如图4所示。

2.2 预制裂纹倾角 α 变化对应力门槛值的影响

预制裂纹对脆性岩石的应力门槛值影响亦是显著的,由图5可见,随着倾角 α 的增加峰值强度 σ_f 也增加。这与已有的相关单轴实验结果相符。由于在脆性类岩石的单轴压缩实验中,岩石最后的宏观破坏是由前期损伤不断积累释放的结果,而前期的损伤形式主要为微裂纹的萌生。在单轴压缩实验中,岩石在加载方向上受限,而在另两个方向上有自由扩展空间,故微裂纹以平行于加载方向的张裂纹为主。这些微小张裂纹的相互扩张贯通通道近似垂直于加载方向,故在预制裂纹垂直于加载方向的试

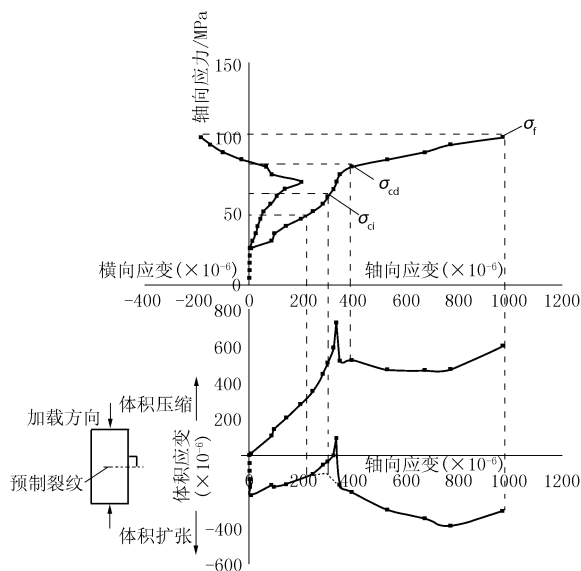


图3 预制裂纹倾角为 0° 时试样的应力-应变曲线

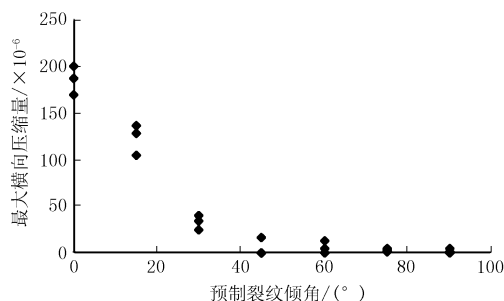


图4 横向应变最大压缩量与倾角 α 关系

样($\alpha = 0^\circ$)中,预制裂纹起到了架桥的作用,使岩石内部伴随荷载增加所萌生的裂纹可以更为轻易地发生相互作用,进而使岩石试样的承受荷载能力下降。同理,随着倾角 α 的增加,同样长度的预制裂纹所能连通的沿加载方向扩展的张裂纹越来越少,故岩石的峰值极限强度呈上升态,特别当倾角 α 为 90° 时,预制裂纹几乎对岩石的峰值强度没有影响。

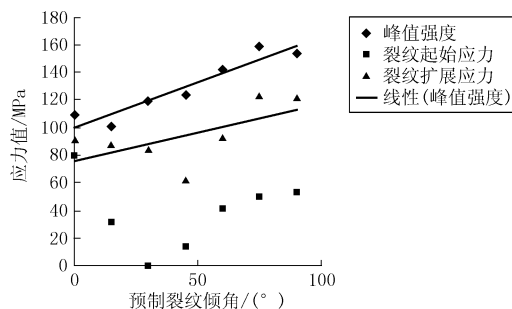


图5 应力门槛值与预制裂纹角度关系

预制裂纹倾角变化对脆性岩石裂纹扩展应力 σ_{cd} 与其对峰值强度 σ_f 的影响是类似的。即随着预制裂纹和加载方向的夹角 α 越大,裂纹扩展应力水

平越高。并且,裂纹扩展应力 σ_{ei} 与峰值强度 σ_f 的比值集中在0.65~0.85的范围内,这与相关实验的研究结果非常吻合。图4中,裂纹扩展应力的线性直线几乎与峰值强度线性直线平行,可以认为 α 对裂纹扩展应力及峰值强度影响的作用机制是一样的。

然而,在对裂纹起始应力 σ_{ei} 进行观察分析时发现,预制裂纹倾角 α 变化对 σ_{ei} 的影响比较复杂,在 $\alpha < 45^\circ$ 时, σ_{ei} 呈现递减变化,即随着 α 的增加,裂纹起始应力 σ_{ei} 越来越小,这与相关研究认为的 σ_{ei} 集中在 $0.4\sigma_f$ 附近的规律不符。但是在 $\alpha > 45^\circ$ 后, σ_{ei} 开始呈现和 σ_f 、 σ_{ed} 变化趋势一致;随着倾角 α 的增加而 σ_{ei} 逐渐上升,且在此范围内, σ_{ei} 集中约为 $0.4\sigma_f$ 的范围。

σ_{ei} 变化规律的复杂性可能与岩石内部的应力状态不确定性有关,在预制裂纹倾角 α 较小时,因为预制裂隙面间距仅为0.26 mm的缘故,在压力试验机的作用下,预制裂纹的上下两个裂隙面很快就相互接触。由于构成天然岩石不同的矿物成分间本身的力学性质差异巨大,且矿物在岩石体中的分布并不均匀,再结合在岩石生成的过程中地质应力状态的复杂性造就其本身内部具有随机分布的缺陷。故上下两个裂隙面的相互作用力具有很大的随机性,又因为在倾角 α 较小时,上下裂隙面的应力水平较高,从而使裂隙面处应力集中的不确定因素得以放大。最终,反应在裂纹体积应变曲线就是 σ_{ei} 的值呈两极化分布。

由于应变片记录的仅仅是轴向张裂纹的产生情况,且实验中应变片粘贴在试样中部,即预制裂纹所在区域,因此由应变片所记录的应变并不能完全反应整个岩石在实验中真实的应变场变化情况。在预制裂纹倾角 $\alpha < 45^\circ$ 时,由于预制裂纹的存在,所以在裂纹附近的岩石单元体有向内部扩展的自由空间,反映在应力-应变曲线上便是在 $\alpha < 45^\circ$ 时,由应变片记录的横向应变有明显的压缩阶段。同理,当 $\alpha > 45^\circ$ 时,岩石试样在径向上向内部扩展的空间有限,而在轴向上预制裂纹的原始长度相较于于岩石试样整个实验过程的轴向压缩量可视为无穷大,所以在 α 增大至 90° 的过程中,预制裂纹的存在对岩石体应力-应变曲线的影响越来越小。

2.3 预制裂纹倾角变化对表面裂纹扩展的影响

郭彦双^[1]等对含表面裂纹岩石试样的单轴压力下的裂纹扩展进行研究时发现,非穿透型裂纹主要以反翼裂纹方式,而穿透型裂纹则以翼裂纹的形

式进行扩展。本次实验的预制裂纹为穿透型裂纹,在观察中发现裂纹以翼裂纹方式扩展为主,与相关结论符合较好。

在对试样在本次实验中表面裂纹扩展过程研究中发现,最终导致岩石整体断裂的主裂纹大体以3种类型为主:A、过中心圆孔贯通上下两个端面,并与预制裂纹走向相反的裂纹;B、过预制裂纹端部贯通上下两个端面的裂纹;C、顺预制裂纹扩展的裂纹。各类型裂纹在图6中标出。

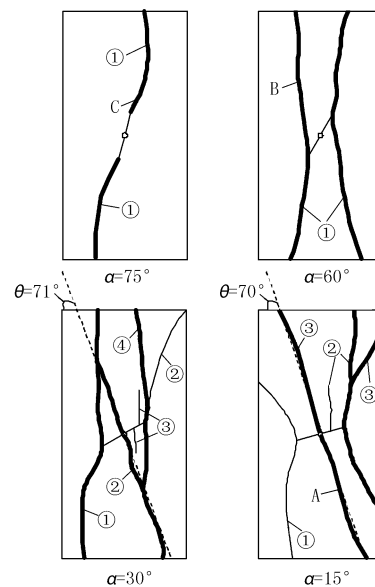


图6 部分试样主裂纹分布图

在倾角 $\alpha < 45^\circ$ 时,主裂纹多以A、B两种形式出现,裂纹密度较倾角 α 较大时的高。并且主裂纹的出现并非是瞬间完成,而是在一段时间内逐渐叠加而成,图6的标号反映裂纹出现的先后顺序。除此之外,在倾角较小时极易出现以预制裂纹为扩展中心向上下端面扩展的伴生裂纹。出现这种现象的原因是在单轴压缩实验中,垂直预制裂纹面的应力为 $\sigma = \sigma_1 \cos\alpha$,平行预制裂隙面的应力有 $\sigma' = \sigma_1 \sin\alpha$,参见图7。故当 α 较小时 σ 较大,裂隙面两侧岩石单元体在较高应力水平下,易发生破坏,表现为伴生裂纹的产生。

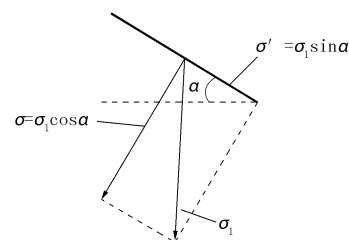


图7 裂纹面受力分析示意图

当倾角 $\alpha > 45^\circ$ 时,主裂纹几乎是同时贯通,并

多以 B 形式出现,这是因为此时 α 较大,从而 σ 下降,致使应力不足以再使裂隙面两侧岩石单元体产生裂纹。特别地,当倾角 $\alpha = 75^\circ$ 时,主裂纹以 C 形式出现,这可能是因为此次实验所用岩石的内摩擦角近似为 75° 的缘故,由图 6 中可以看出,本实验中其他试样破坏产生的主裂纹与上下端面夹角 θ 均在 75° 左右。同时因为 $\sigma' = \sigma_1 \sin \alpha$, 当 $\alpha > 45^\circ$ 时, σ' 变大。所以倾角较大试样实验中,在破坏发生后,岩石出现沿裂隙面明显滑动的行为,而在 α 较小时,这种行为则不明显。

3 结论

(1)脆性岩石单轴压缩破坏过程包含 5 个阶段:裂纹压密闭合阶段、弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹加速扩展阶段和峰后阶段。其中,裂纹压密阶段并不一定存在。相关脆性岩石的应力-应变曲线展现了 3 个重要的应力水平:裂纹起始应力 σ_{ci} , 不稳定裂纹生长应力即裂纹加速扩展应力 σ_{cd} , 峰值强度岩石 σ_f 。

(2)预制裂纹倾角大小对应力门槛值的影响是显著的,预制裂纹倾角 α 越大,则 σ_{cd} 及 σ_f 越高。且预制裂纹倾角变化对 σ_{cd} 及 σ_f 的影响较为稳定,而对 σ_{ci} 的影响则比较复杂,这可能与预制裂纹两裂隙面间的相互作用力有关。因此 σ_{cd} 更能反映岩石本身的材料特质。

(3)预制裂纹倾角 $\alpha < 45^\circ$ 时,由应变片记录的径向应变有明显的压缩阶段,并且这种压缩趋势随着预制裂纹倾角的上升迅速减小消失。

(4)穿透型裂纹以翼裂纹扩展形式为主进行扩展。预制裂纹倾角大小对裂纹扩展方式有显著影响。倾角 α 越小,以预制裂纹为扩展中心的裂纹数目越多。特别的,由岩石本身内部结构所决定的内摩擦角对裂纹的扩展方式亦有决定性作用。

(5)目前岩石实验所得出的实验数据均具有很大的局限性,大多只能表现表面和局部的变化。然而岩石的很多损伤是发生在内部的,虽然应变片可以比较精确传输出岩石在受压过程中的应变变化,但受粘贴位置及粘贴点数的限制,所测得实验数据只能代表局部的变化过程,并不能很好的反映试样

整体的变化过程,更无法给出岩石体上某点的应力状态。

参考文献:

- [1] 郭彦双,黄凯珠,朱维申,等. 辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):525-531.
- [2] Cook N. G. W. The failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science,1965,(2):389-403.
- [3] 张晓平. 岩石单轴压缩条件下裂纹扩展试验研究——以片状岩石为例[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(9):1772-1781.
- [4] Martin C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium - the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal,1997,34(5):698-725.
- [5] Martin C D, Chandler N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1994,31(6):643-659.
- [6] Wawersik W R, Brate W F. Post-Failure Behavior of a Granite and Diabase[J]. Rock Mechanics,1971,(3):61-85.
- [7] 樊鸿,张盛,王启智. 用应变片法确定混凝土动态起裂时间的研究[J]. 振动与冲击,2010,29(1):153-156.
- [8] 杨更社,谢定义,张长庆,等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2):250-253.
- [9] 李银平,曾静,陈龙珠,等. 含预制裂隙大理岩破坏过程声发射特征研究[J]. 地下空间,2004,24(3):290-293.
- [10] 刘招伟,李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学,2010,27(8):133-139.
- [11] 滕春凯,尹祥础,李世恩,等. 非穿透裂隙平板试件三维破裂的试验研究[J]. 地球物理学报,1987,30(4):371-378.
- [12] 尹祥础,李世恩,李红,等. 闭合裂隙面间相互作用的试验研究[J]. 地球物理学报,1988,31(3):307-314.
- [13] 尚晓吉,张智镇,田智力,等. 基于声发射测试的岩爆倾向性预测研究[J]. 金属矿石,2011,(8):56-59.
- [14] Tapponier, Brace W F. Development of stress induced microcracks in Westerly granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,1976,13(4):103-112.
- [15] Hudson, J. A., Brown, E. T., Fairhurst, C. Shape of the complete stress-strain curve for rock[Z]. 13th U. S. Symposium on Rock Mechanics, Urbana, American Society of Civil Engineers. New York, 1972. 773-795.
- [16] 奚正志,周占波,陈洪. 岩石断裂和损伤的研究现状[J]. 山西建筑,2008,34(5):173-174.
- [17] 唐辉明. 节理的断裂力学机制研究进展[J]. 地质科技情报,1991,10(2):17-26.
- [18] [英]B. K. 阿特金森. 岩石断裂力学[M]. 北京:地震出版社,1991.
- [19] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.