

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0644-06

纵向裂隙对砂岩力学特性影响试验研究

苏海健, 靖洪文, 赵洪辉, 王迎超

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 将西部矿区高水平应力岩层巷道顶板受力特征简化为含纵向裂隙的岩石单轴压缩问题, 选取砂岩材料为试验对象, 并对其强度、变形及破坏形态进行试验研究。试验结果表明: 纵向裂隙砂岩随着裂隙长度的增大, 峰值强度和峰值应变先逐渐减小后又有所增大, 裂隙长度为 42 mm 时达到最小值; 砂岩试样沿预制裂隙尖端发生纵向劈裂, 但非均质性对主要次生裂纹的数目和扩展路径具有很大的影响。与无充填相比, 石膏充填对裂隙砂岩强度的提升并不明显, 而高强水泥具有较好的加固效果, 与无充填相比峰值强度平均值增大 22.27%。研究成果对西部矿区的岩石力学和围岩稳定性控制理论的发展具有积极意义。

关键词 顶板; 纵向裂隙; 力学特性; 裂隙长度; 充填料

中图分类号 TD 315

文献标志码 A

Experimental study on the influence of longitudinal fissure on mechanics characteristic of sandstone

SU Haijian, JING Hongwen, ZHAO Honghui, WANG Yingchao

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract The roof mechanical characteristics in high horizontal stress roadway in the western mining area is simplified as a problem of rock sample containing the lengthways fissure under uniaxial compression. The strength, deformation and failure mode of sandstone which is chosen are discussed. The results show that, with the increasing of fissure length, peak strength and peak strain of sandstone containing a lengthways fissure first decreases and then rises slightly, and reaches the least value when the fissure length is 42 mm. Lengthways splitting failure in sandstone samples occurs along the prepared fissure tip, but the heterogeneity has an obvious influence on the number of main secondary crack and crack extending path. Comparing with the no-filling sandstone, gypsum filling is not apparent to the promotion of sandstone strength containing lengthways fissure; while the high strength cement has a good reinforcement effect with average peak strength increasing by 22.27%. The research achievement has a positive significance on the development of rock mechanics and the surrounding rock stability controlling theory in the western mining area.

Key words roof; lengthways fissure; mechanics characteristic; fissure length; filling

收稿日期: 2013-02-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB036003); 国家自然科学基金项目(51134001, 51309222); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0935); 国家级大学生创新训练计划项目(201210290009)

作者简介: 苏海健(1988—), 男, 江苏省启东市人, 博士研究生, 从事岩石力学与工程等方面的研究。

E-mail: 631441969@qq.com

Tel: 13645225046

岩石是组成地壳结构的基本物质,经过几千年的搬运、沉积,岩石内部存在各种裂隙、孔洞等缺陷^[1-2],这些缺陷的存在为地下工程稳定性设计增加了不少困难;正因如此,近年缺陷岩石的力学特性也越来越受到岩石力学工作者的重视,深入地研究含缺陷岩石材料的强度、变形规律及破裂行为具有重要意义。

对于含缺陷岩石的力学特性国内外学者进行了许多试验和模拟工作,取得诸多成果,为同行及后人的继续探索奠定了很好的基础。杨圣奇^[3]对含2条共面预制裂隙脆性砂岩的裂纹扩展特征进行了试验研究,建立了岩石破裂扩展过程与宏观应力应变的关系;张波等^[4]通过对预制单裂隙脆性岩石进行单轴压缩试验,探讨了裂隙充填与否对节理岩体峰值强度及峰后塑性变形能力的影响;李元海等^[5]基于自行研制的 PhotoInfor 软件系统,获得了含双孔岩石在单轴压缩作用下的表面变形场演化规律;蒲成志等^[6]对预制多裂隙水泥砂浆试件进行室内压缩试验,分析了裂隙角度和分布密度与多裂隙类岩石材料断裂破坏强度的关系;李慎举等^[7]采用 Monte-Carlo 随机模拟方法考察了岩体节理裂隙分布规律对巷道围岩稳定性的影响;陈新等^[8]基于单轴压缩试验和分形理论,研究了倾角和连通率对节理岩体破碎特征的影响规律。

对于预制裂隙岩石强度与破裂行为的探讨目前多数是基于裂隙与加载方向存在一定倾角的情况下,此时在压缩作用下裂隙也最易扩展,而对于实际工程中含特殊裂隙类型岩石力学特征的研究却鲜有报道。本文基于西部高水平应力岩层巷道顶板的受力简化模型,对含纵向裂隙砂岩在单轴压缩作用下的强度及变形破坏特征进行试验研究,并进一步探讨不同充填料对砂岩力学特性的影响规律。

1 问题简化

随着我国中东部地区煤炭资源的逐渐枯竭,煤炭开发逐渐向西部地区发展。西部地区高海拔、岩层高水平应力现象普遍存在,这与中东部地区浅部岩层内应力特征存在很大的差异,如内蒙古自治区鄂托克前旗榆树井煤矿8煤层最大水平主应力为垂直应力的1.70~1.76倍,新上海一号煤矿5煤层最大水平主应力为垂直应力的1.51倍左右,这就为西部矿区的巷道围岩稳定性控制带来新的问题。

西部浅埋高水平应力岩层内巷道开挖后顶板受力特征可以简化为如图1所示。在岩层层理近似

水平的情况下,节理、裂隙方向同样也可以认为近似为水平,因此顶板内为长短不一的水平裂隙。忽略覆重的情况下(浅部岩层),只有两端承受地层构造产生的水平方向均布荷载,而此时即可以看成一块含有纵向裂隙长方形岩石的单轴压缩状态。基于此,开展一些相关的岩石力学试验研究非常有必要,可以为西部矿区高水平应力巷道顶板的失稳预警与控制提供一定理论依据。

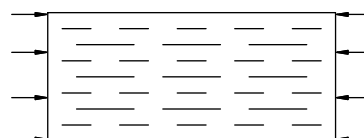


图1 高水平应力岩层顶板受力特征
Fig.1 Roof mechanical characteristic with high horizontal stress

2 试验方案

以图1模型中的一个含单一裂隙的岩体单元为研究对象,选取脆性砂岩为试验材料,平均密度为 2.43 g/cm^3 ,细晶结构,质地均匀,外观呈暗红色。将砂岩加工成 $120\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 的长方体板状试样,采用高压水枪在试样中部切割一条平行于岩样最长边的贯通裂隙,裂隙长度分别为0(完整岩样),12,22,32,42,52 mm,每种裂隙长度试样加工2~3块。预制裂隙内部采用普通石膏粉进行充填,用以模拟真实的岩层充填裂隙;石膏粉与水的质量比为5:3,石膏内加入少量微膨胀剂,以增加石膏与裂隙界面的黏结效果。此外,14#和26#岩样为裂隙无充填,12#和27#岩样为高强度水泥充填,用以比较不同充填形式对裂隙砂岩力学特性的影响。其中,水泥为42.5级高强度微膨胀水泥,黏结力 $\geq 1.2\text{ MPa}$,与裂隙界面具有较好的黏结效果。

砂岩试样的单轴压缩试验过程在中国矿业大学的YNS2000伺服机上进行,如图2所示。

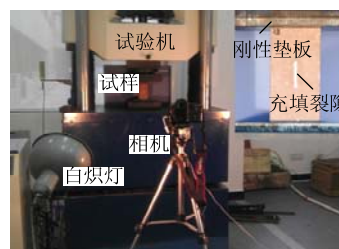


图2 试验设备
Fig.2 Experimental facilities

在岩样上下端面各加设1块刚性垫板,并在垫板和岩样的接触面均匀地涂1层凡士林,以减小端

部摩擦对试验结果的影响。采用数字相机对试样的破裂形态进行采集,并增加 2 个白炽灯以提高拍摄效果。单轴压缩过程采用位移加载方式,加载速率为 0.1 mm/min;加载过程中计算机自动采集轴向荷载和轴向位移数据。

3 试验结果与分析

3.1 应力应变曲线

单轴压缩作用下完整试样的应力应变曲线及破坏形态如图 3a 所示。曲线的压密阶段相对较短,而线弹性阶段持续时间较长,达到峰值前后应力会发生短暂的波动,随即轴向应力在短时间内便很快跌落为零,试样完全失去承载能力。完整砂岩破坏形式以剪切错动为主,外带一定的竖向崩裂,试样表面形成许多剥落块体。

完整试样的宏观力学参数如表 1 所示。其中: L 为纵向裂隙长度, σ_0 为峰值强度, ε_0 为峰值应变, E 为弹性模量。完整砂岩峰值强度、峰值应变和弹性模量的离散系数(标准差)分别为 3.07 MPa,0.74‰ 和 0.28 GPa,说明选取的砂岩材料均质度较高,可以满足本次试验的要求。

含纵向裂隙砂岩全程应力应变曲线如图 3b 所示。曲线压密阶段依旧较短,这与完整岩样类似;但是线弹性阶段也明显缩短,曲线后期出现较长范围的上下波动阶段,个别岩样(05#, 06#, 07#, 13#)还出现了峰值前应力跌落的现象,这主要归咎于加

载过程中预制裂隙岩样的裂纹扩展和贯通^[9]。

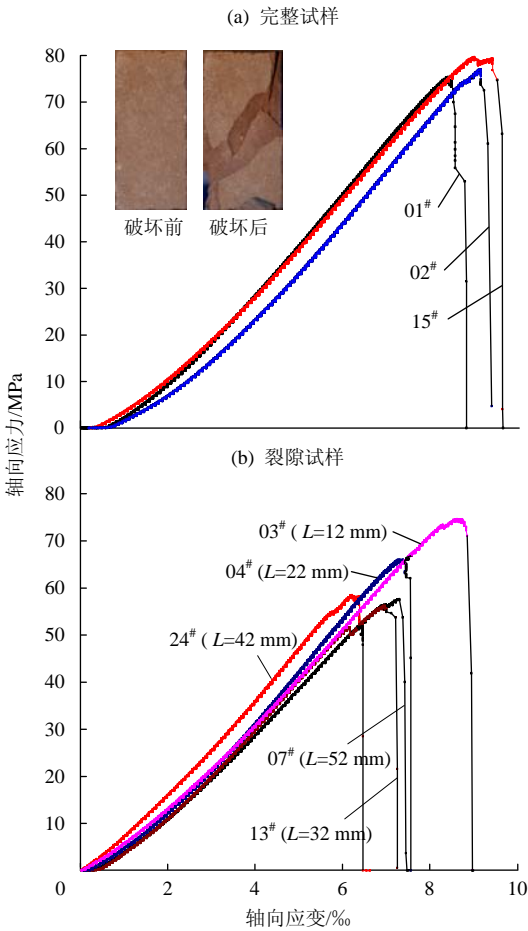


图 3 砂岩应力应变曲线
Fig.3 Axial stress-strain curves of sandstone

表 1 砂岩力学参数
Table 1 Mechanics parameters of sandstone sample

| 编号 | L/mm | σ_0/MPa | $\varepsilon_0/\text{‰}$ | E/GPa | 充填 |
|---------------|---------------|-----------------------|--------------------------|---------------------|----|
| 01#, 02#, 15# | 0 | 75.37, 77.00, 79.67 | 8.38, 9.12, 9.39 | 11.00, 10.96, 10.64 | 石膏 |
| 03#, 21# | 12 | 74.60, 67.62 | 8.63, 7.29 | 10.08, 10.53 | 石膏 |
| 04#, 22# | 22 | 66.00, 65.67 | 7.28, 6.78 | 10.90, 11.04 | 石膏 |
| 05#, 13#, 23# | 32 | 60.58, 56.21, 63.67 | 7.54, 6.98, 6.20 | 10.17, 10.22, 12.18 | 石膏 |
| 06#, 24# | 42 | 55.18, 58.44 | 7.15, 6.22 | 9.61, 11.03 | 石膏 |
| 07#, 25# | 52 | 57.54, 60.97 | 7.31, 6.49 | 9.54, 10.92 | 石膏 |
| 14#, 26# | 32 | 61.94, 56.59 | 7.12, 6.25 | 9.96, 10.02 | 无 |
| 12#, 27# | 32 | 75.57, 69.36 | 8.83, 7.43 | 10.19, 10.56 | 水泥 |

3.2 砂岩强度和变形特性

纵向裂隙砂岩单轴压缩宏观力学参数变化特征如图 4 所示,具体数值如表 1 所示。与完整试样相比,含纵向充填裂隙砂岩的峰值强度和峰值应变均有一定的劣化,峰值强度平均值劣化范围为 8.06%~26.55%,而峰值应变平均值劣化范围为

11.19%~25.42%;裂隙长度为 42 mm 时峰值强度和峰值应变最小,平均值分别为 56.81 MPa 和 6.69‰。由试验结果可以看出:纵向充填裂隙的存在对砂岩试样的弹性模量基本没有多大影响,普遍在平均值 10.63 GPa 上下波动,标准差为 2.46 GPa。

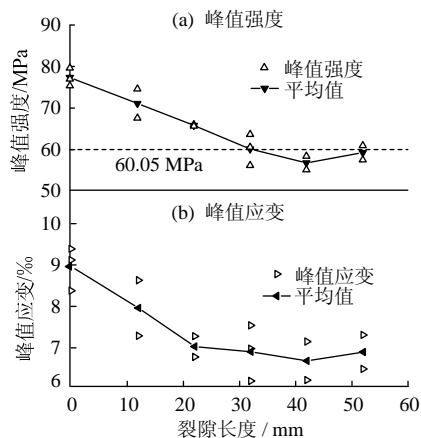


图4 砂岩强度和变形参数

Fig.4 Strength and deformation parameters of sandstone

随着裂隙长度的增大, 裂隙砂岩峰值强度和峰值应变总体上呈逐渐减小的趋势: 当裂隙长度由 12 mm 增大为 42 mm 时, 峰值强度平均值由 71.11 MPa 减小为 56.81 MPa, 减小了 20.11%; 而峰值应变平均值由 7.96‰ 减小为 6.69‰, 减小了 15.95%。这种随裂隙长度增大力学参数逐渐减小的特征与文献 [10] 中倾斜裂隙脆性岩石的强度变化规律类似。

然而随着纵向裂隙长度的继续增大, 为 52 mm 时, 砂岩峰值强度和峰值应变反而出现反弹的趋势, 与裂隙长度为 42 mm 砂岩试样相比, 峰值强度和峰值应变平均值分别增大了 4.30% 和 3.22%。分析其原因, 主要是由于裂隙长度为 52 mm 时, 裂隙

长度达到了试样总长的 43.33% (文献 [4, 10-11] 中裂隙沿应力加载方向的长度分别仅占试样总长度的 20.48%, 14.73% 和 17.32%), 结构效应对裂隙试样的承载力具有一定的影响。考虑极限情况, 当裂隙长度等于试样总长 (120 mm) 时, 相当于 2 个单独的柱状试样共同承载轴向压力, 破坏形态如图 5 所示。对图 5 这种组合承载结构进行了 2 次压缩试验, 承载力分别为 58.10 MPa 和 61.99 MPa, 平均值为 60.05 MPa, 比裂隙长度为 42 mm 时提高了 5.70%。由此可以说明: 随着裂隙长度的增大, 结构效应逐渐明显, 结构效应一定程度上缓和了纵向裂隙给试样带来的承载力劣化。

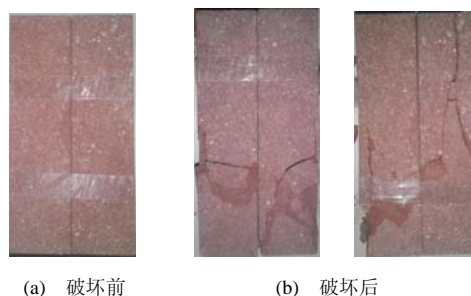


图5 组合结构破坏形态

Fig.5 Composite structure failure mode

3.3 裂隙砂岩破坏形态

单轴压缩作用下不同长度纵向预制充填裂隙砂岩破坏形态如图 6 所示。

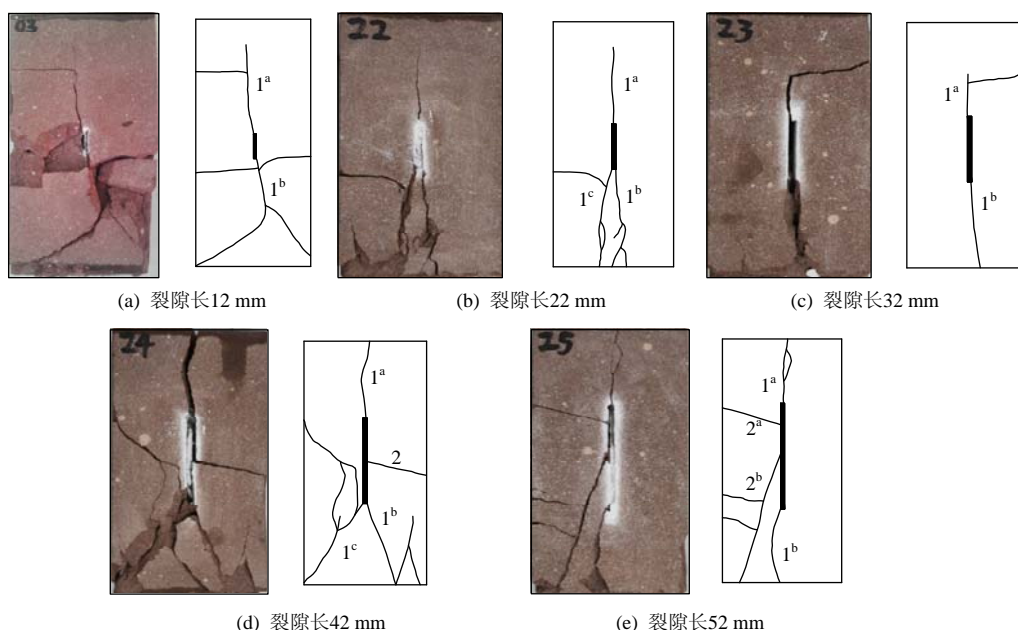


图6 裂隙砂岩破裂形态

Fig.6 Failure mode of sandstone sample

加载前期砂岩表面很难观察到次生裂纹的出现;当轴向应力达到峰值的瞬间,由预制裂隙尖端萌生出一系列的次生裂纹,并在短时间向远处扩展,试样瞬间发生破坏,同时伴随巨大的崩裂声,这与轴向应力应变曲线峰值时的突然跌落相对应。

裂隙砂岩主要次生裂纹基本都是沿着轴向应力方向发生扩展,受拉破坏占主导地位,如试样 23[#],由预制裂隙尖端萌生的上下 2 条裂纹 1^a和 1^b,呈近似直线沿轴向应力方向扩展。但由于非均质性的影响,岩石内部存在许多微裂纹和孔洞,从而使次生裂纹扩展过程产生一定的随机性,如:03[#]试样的裂纹 1^a及 25[#]试样的裂纹 1^b,初始萌生方向与轴向应力方向呈一定倾角,扩展一段距离后逐渐与轴向应力平行;而 24[#]试样的裂纹 1^a,初始扩展与轴向应力平行,中间受微缺陷的影响出现一定弯折,后又逐渐回归原始的扩展方向。

而岩石非均质性对裂纹扩展的影响并不局限于对扩展方向的影响,对预制裂隙尖端初始萌生裂纹条数的影响也很巨大,如试样 22[#]和 24[#],预制裂隙下部尖端均萌生出 2 条主裂纹 1^b和 1^c,呈一定夹角沿试样下边缘各自扩展。预制裂隙较长时,在非均质性的影响下纵向裂隙中部也可能会萌生少数的次生裂纹,如 24[#]试样的裂纹 2,及 25[#]试样的裂纹 2^a和 2^b。由此可见,岩石材料的非均质性是普遍存在的,对裂隙砂岩的裂纹扩展和破裂形态都具有很大的影响,这也正与杨圣奇^[12]和程龙^[13]对于岩石非均质性的相关说法所吻合。

4 充填料对砂岩力学特性的影响

原生岩体节理内部充填物的强度与胶结能力较弱,这是导致岩体强度劣化的主要原因。注浆作为裂隙岩体加固的重要手段,在岩石工程中得到普遍应用。注浆后岩体裂隙内充填物的强度等力学特性明显提升,而提升幅度则与注浆材料、浆液水灰比等有关,充填物性能的优劣直接影响岩体的加固效果。本文对无充填、石膏充填和水泥充填 3 种不同充填下纵向裂隙砂岩(裂隙长度均为 32 mm)的强度与变形特征进行了试验分析和对比,部分试样应力应变曲线及破坏形态如图 7 所示。

石膏的强度和黏结力相对较弱,与无充填相比变形与破裂形态并没有较大的变化,次生裂纹较少,都是以一条由预制裂隙尖端沿轴向应力方向扩展的主裂隙发生破坏,部分试样存在少量的斜剪或拉剪组合微裂纹。高强度水泥充填下应力应变曲线

线弹性阶段明显变长,而前期积累的弹性应变能也越多,当达到峰值点发生破坏时瞬间产生许多次生裂纹,试样破坏程度较为剧烈。

不同充填形式下纵向裂隙砂岩的峰值强度和峰值应变如图 8 所示,与无充填相比,石膏充填后砂岩的峰值强度和峰值应变的变化较小,平均值分别仅增大了 1.49%和 3.31%,这与试样的应力应变行为及破裂特征相吻合。高强度水泥充填下砂岩峰值强度的提升较为明显,与无充填相比,平均值增大了 22.27%,而峰值应变平均值也增大了 21.62%。由此可以说明,水泥注浆对高水平应力岩层裂隙围岩的加固具有较好的成效。

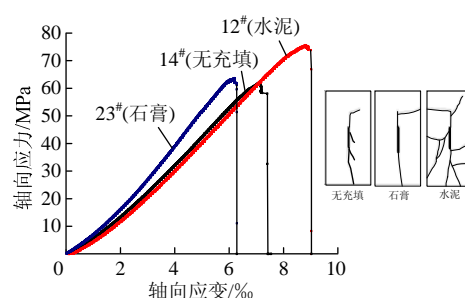


图 7 不同充填料砂岩应力应变曲线及破坏形态
Fig.7 Axial stress-strain curve and failure form of sandstone with different filling material

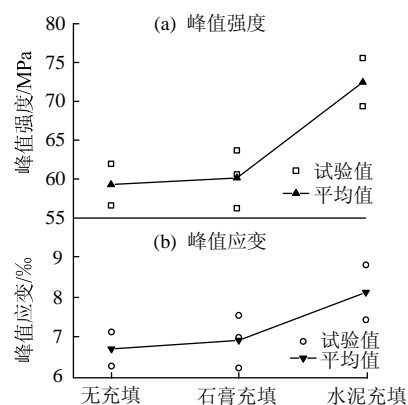


图 8 充填料对峰值强度和峰值应变的影响
Fig.8 Influence of filling material on peak strength and peak strain

需要指出的是:不管是水泥充填还是石膏充填,虽然在充填料内均加入一定的微膨胀剂,但实验过程中充填料与砂岩间仍出现明显的界面效应。含纵向裂隙岩石单轴压缩作用下裂纹扩展及承载力的变化不仅受裂隙长度的影响,还与充填料抗拉强度以及充填料界面的黏结性能有关;如何进一步增大界面的黏结效果从而定量研究不同黏结力下纵向裂隙岩石的力学特性,是下一步探索的重点。

5 结 论

1) 西部矿区高水平应力浅埋岩层顶板受力特征与传统力学模型存在较大差异, 通过对其简化可以转化为含纵向充填裂隙的岩石单轴压缩问题, 由此进行一定的室内试验研究, 可以为西部矿区围岩稳定性控制提供一定的理论依据。

2) 裂隙砂岩峰值强度和峰值应变随着裂隙长度的增大呈现先减小后又增大的趋势, 裂隙较长时受结构效应的影响较大; 纵向裂隙砂岩主要由裂隙尖端沿应力加载方向发生劈裂破坏, 非均质性对主裂纹条数和裂纹扩展路径均存在较大的影响。

3) 充填料黏结力较低(石膏充填)时, 对纵向裂隙砂岩承载力的提升并不明显, 与无充填相比仅增大了 1.49%; 而高强度水泥充填下砂岩强度显著上升, 与无充填相比峰值强度平均值增大了 22.27%, 具有较好的加固效果。

致谢: 在本文书写过程中, 中国矿业大学茅献彪教授给予了诸多指导和帮助, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 靖洪文, 苏海健, 杨大林, 等. 损伤岩样强度衰减规律及其尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 543-549.
JING Hongwen, SU Haijian, YANG Dalin, et al. Study of strength degradation law of damaged rock sample and its size effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 543-549.
- [2] 陈旭光, 张强勇. 岩石剪切破坏过程的能量耗散和释放研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 179-184.
CHEN Xuguang, ZHAN Qiangyong. Research on the energy dissipation and release in the process of rock shear failure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(2): 179-184.
- [3] YANG Shengqi. Crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing two coplanar fissures in the process of deformation failure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(17): 3059-3081.
- [4] 张波, 李术才, 张敦福, 等. 含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1647-1652.
ZHANG Bo, LI Shucan, ZHANG Dunfu, et al. Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1647-1652.
- [5] 李元海, 林志斌, 靖洪文, 等. 含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1060-1069.
LI Yuanhai, LIN Zhibin, JING Hongwen, et al. High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1060-1069.
- [6] 蒲成志, 曹平, 赵延林, 等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3661-3666.
PU Chengzhi, CAO Ping, ZHAO Yanlin, et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3661-3666.
- [7] 李慎举, 王连国, 陆银龙. 破碎岩体巷道变形破坏特征的数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 39-44.
LI Shenju, WANG Lianguo, LU Yinlong. Numerical simulation for deformation failure characters in roadway with broken rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 39-44.
- [8] 陈新, 王仕志, 李磊. 节理岩体模型单轴压缩破碎规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 898-907.
CHEN Xin, WANG Shizhi, LI Lei. Characteristics of fragments of jointed rock mass model under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 898-907.
- [9] 杨圣奇. 断续三裂隙砂岩强度破坏和裂纹扩展特征研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 31-39.
YANG Shengqi. Study of strength failure and crack coalescence behavior of sandstone containing three pre-existing fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 31-39.
- [10] YANG Shengqi, JING Hongwen. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression [J]. International Journal of Fracture, 2011, 168(2): 227-250.
- [11] 谢其泰, 郭俊志, 王建力, 等. 单轴压缩下含倾斜单裂纹砂岩试件裂纹扩展量测研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2917-2922.
HSIEH Chitai, KUO Chuhchih, WANG Cheinlee, et al. A study of crack propagation measurement on sandstone with a single inclined flaw under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2917-2922.
- [12] 杨圣奇, 吕朝辉, 渠涛. 含单个孔洞大理岩裂纹扩展细观试验和模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 38(6): 774-781.
YANG Shengqi, LYU Chaohui, QU Tao. Investigations of crack expansion in marble having a single pre-existing hole: experiment and simulations[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 38(6): 774-781.
- [13] 程龙, 杨圣奇, 刘相如. 含缺陷砂岩裂纹扩展特征试验与模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 719-724.
CHENG Long, YANG Shengqi, LIU Xiangru. Experimental and numerical investigation on crack expansion of sandstone containing flaws[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 719-724.