

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221620

高应力卸荷条件下硬岩能量演化研究

胡宝文^{1,2,3}, 吕聪瑞¹, 宿 辉¹, 南博文¹, 宋金科¹, 李江哲¹

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为探究引水隧洞在开挖过程中岩石破坏过程的能量演化规律, 选取磁铁矿石开展了常规三轴及三轴峰前恒轴压卸围压试验。结果表明, 在常规三轴试验中, 岩石在峰值应力前以弹性应变能存储和耗散应变能消耗为主, 在峰值应力后以弹性应变能释放和耗散应变能消耗为主; 随着围压的增加, 峰前剪切断裂能高于峰后; 在卸围压试验中, 耗散应变能均以指数函数趋势增加, 卸荷速率越快, 卸荷段经历时间较短, 卸荷点与跌落点之间的耗散能在单位时间内能量增量变化速率越高; 基于岩爆动力学 M-C 准则及卸荷路径下岩石内聚力丧失与岩石耗散应变能, 新定义了岩石卸荷过程中的损伤变量, 从能量角度揭示了岩石变形破坏的损伤程度。

关键词: 能量演化; 剪切断裂能; 能量变化速率; 损伤变量

中图分类号: TV3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)06-0114-05

1 引言

处于不同应力状态的岩石对应着不同的能量状态, 因此基于岩石力学试验, 获得岩石不同变形阶段应变能的变化规律, 从能量角度分析岩体卸荷破坏过程中应变能转化的动态过程具有重要意义^[1]。目前, 针对引水隧洞的开挖稳定性、岩石的破裂机制及其力学特性已进行较多研究^[2]。如何满朝等^[3]通过真三轴试验运用声发射监测技术研究不同应力路径下岩石破坏程度, 得到 AE 累积能量释放从岩石样品的卸载状态到其破坏状态迅速增加; HUANG D 等^[4]对大理岩开展三轴卸围压试验, 发现初始围压和卸荷速率会影响岩石的破坏模式和应变能转换, 卸载速率增加, 应变能峰前转换速率增加, 并且岩石的破坏模式由剪切破坏逐渐过渡到张拉破坏。基于已有研究可得不同加载条件下岩石能量演化机制, 但对卸荷点与跌落点之间的能量变化率研究较少, 为深入研究开挖引水隧洞的卸荷过程中能量演化与损伤的相关规律, 本文选择磁铁矿石进行不同速率下峰前卸围压试验, 并基于岩石内部损伤与耗散应变能的关系, 定义损伤变量, 最终结合试验结果进一步分析了岩石损伤的非线性动态特征。相关研究可为确定硬岩在卸围压损伤破坏过程中的能量演化规

律, 以及理解高应力岩体卸荷引起的岩石损伤机理提供参考。

2 试验方案及试样

2.1 试验条件与试样选取

岩样主体为表征黑色的磁铁矿石, 且含有 30% 的条带状石英岩。根据相关规范^[5], 岩样制成 50 mm × 100 mm 标准岩石试件, 选择裂纹较少且无明显缺陷的样品, 设定 3 个岩石试样为一组进行试验。

试验加载设备为 TAW-2000 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪, 能提供最大轴向压力为 2 000 kN, 最大围压为 70 MPa; 轴向变形和环向变形采用 LVDT 轴向、环向位移引伸计传感器采集, 灵敏参数分别为 0~5、0~2 mm, 分辨率为 0.000 1 mm, 测量误差 ≤ ± 1%。

2.2 试验方案

根据引水隧洞开挖过程中采空区围岩的动态演化特征, 共开展两类试验, 分别为岩石常规三轴压缩试验和高应力下的卸围压试验。

常规三轴试验方案为拟定 10、20、30、40、50 MPa 共 5 类围压、试样组装在 Hoek 压力室底座上, 在经历密封、充油过程后, 将围压保持在某一设定值; 轴向加压采用 LVDT 位移变形控制, 加

收稿日期: 2022-08-06, 修回日期: 2022-08-27

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2019402256); 河北省自然科学基金项目基础研究专项(E2020402087)

作者简介: 胡宝文(1986-), 男, 副教授, 研究方向为岩土结构工程, E-mail: hubaowen1984@gmail.com

通讯作者: 宿辉(1972-), 男, 教授, 研究方向为地下洞室稳定分析, E-mail: suh-26@163.com

载速率为 0.1 mm/min,直至试样破坏,试验结束。

高应力卸围压试验方案为拟定 30、40、50 MPa 共 3 类围压,试样组装与轴向加载方式同常规三轴试验,加载速率为 0.1 mm/min,当试样轴向应力达到单轴峰值强度的 85% ± 5%,开始围压卸载;围压卸载采用负荷控制,试验共拟定两类卸荷速率,分别为 0.01、0.05 MPa/s,围压卸载过程中轴向应力 σ_1 保持不变;当应力-应变曲线出现突降,表明试样发生破坏,此时停止力学试验。

3 岩石变形破坏过程中的能量分析

3.1 应变能计算方法

高应力卸围压试验过程中,岩样仍处于三向应力状态,因此常规三轴应变能计算方法适用于三轴卸围压试验。假设岩石在一个与外界没有热交换的封闭系统中,试验机对岩样所做的功、岩石损伤耗散应变能和弹性应变能满足能量守恒定律。图 1 为试验过程中应力-应变曲线示意图,

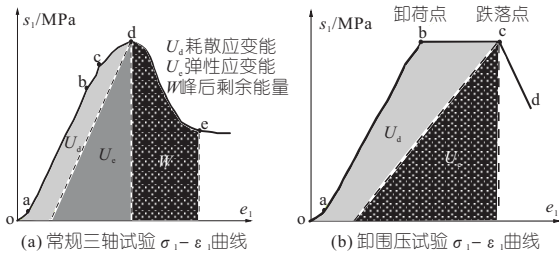


图 1 应力-应变曲线示意图

Fig. 1 The schematic diagram of stress-strain curve

岩石在各个阶段吸收的总能量 $U^{[6]}$ 为:

$$U = U_e + U_d = U_1 + U_3 = \int \sigma_1 d\epsilon_1 + 2 \int \sigma_3 d\epsilon_3 \quad (1)$$

$$U_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + 2\nu_3^2 - 2\mu\sigma_3(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3)] \quad (2)$$

式中, U_e 为岩样单位体积的弹性能; U_d 为岩样单位体积的耗散能; U_1 为 σ_1 轴向压缩岩样所吸收的应变能密度; U_3 为 σ_3 做负功岩样所消耗的应变能密度; σ_1 、 σ_3 分别为轴向应力和围压; E 、 μ 分别为轴向卸载弹性应变能、岩石泊松比。

经观察岩石损伤断裂的宏观破裂面主要为剪切破坏,剪切带变形在单位面积上所需要的能量为剪切断裂能,峰前、峰后剪切断裂能密度 U_{cpre} 、

U_{cpost} 计算方法^[6]分别为:

$$U_{cpre} = \int_0^{\epsilon_c} (\sigma_1 - \sigma_3) d\epsilon_1 - \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (3)$$

$$U_{cpost} = \frac{\sin 2\theta}{2} \left[\int_{u_c}^{u_d} (\sigma_1 - \sigma_3) du - (\sigma_d - \sigma_3)(u_d - u_c) \right] \quad (4)$$

式中, σ_c 、 ϵ_c 分别为应力-应变曲线中的峰值应力强度和峰值应变; θ 为剪切力与最大主应力之间的角度; u_c 、 u_d 分别为岩石峰值强度对应的滑动应变和残余应力对应的滑动应变,其中滑动应变 u 与轴向应变 ϵ_1 的关系式为:

$$u = [\epsilon_1 - (\sigma_1 - \sigma_3)/E] / \cos \theta \quad (5)$$

所以岩石全部剪切断裂能 U_{ts} 为:

$$U_{ts} = U_{cpre} + U_{cpost} \quad (6)$$

3.2 常规三轴试验岩石能量演化分析

图 2 为常规三轴试验得到的不同围压条件下岩石能量演化曲线。由图 2 可知,不同围压下岩石能量演化曲线具有相似的性质。其中 oa、ab 段岩石内部微裂纹加密,岩样处于弹性阶段, U 与 U_e 基本重合,岩石内部裂隙闭合有极小 U_d 发生(忽略不计),该阶段岩石吸收的能量几乎转化为弹性能 U_e ; bc、cd 段为岩石裂纹发展阶段,即岩石进入塑性变形直至破坏阶段,内部微裂纹随着偏应力增大不断累积性发展,并有新裂纹产生,因此岩石吸收的能量一部分转化为 U_e ,另一部分转化为 U_d 用于岩石内部微裂纹萌发扩展; de 段岩石应力迅速跌落,岩石内部微裂纹不断开展汇合并贯通形成宏观剪切主裂纹,该阶段岩样储存的 U_e 跌落并转化为剪切裂纹需要耗散的能量。

根据式(3)、(4)计算得到常规三轴试验中不同围压下岩样剪切破坏耗散能密度,结果表明总剪切断裂能与耗散能比值 U_{ts}/U 随着围压的增加迅速增加,达到一定围压(如 30 MPa),其比值开始下降,在围压为 40、50 MPa 时,比值分别为 69.8%、65.0%,较 30 MPa 分别降低了 5.3%、6.9%; U_{cpre}/U_{ts} 与 U_{cpost}/U_{ts} 随着围压的增加,两者曲线增长趋势相反,可见初始围压对剪切断裂能影响显著,耗散能主要是以剪切裂纹贯通产生大的宏观断裂能释放出来,最终导致岩石劣化损伤。

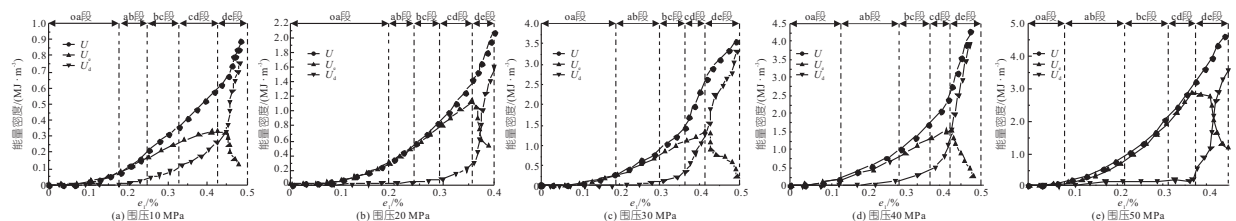


图 2 不同围压条件下岩石 U 、 U_e 、 U_d 的能量密度曲线

Fig. 2 Energy density curve of rock under different confining pressures

4 卸荷路径下岩石能量演化特征分析

4.1 卸围压条件下岩石能量演化特征

根据能量计算原理,结合室内物理试验,可得到30、40、50 MPa围压条件下岩石吸收的总能量 U 、弹性应变能 U_e 和耗散应变能 U_d ,如图1(b)所示,将卸围压曲线分为4个阶段,其中oa段为岩石内部微裂纹加密阶段、ab段为岩石线弹性阶段、bc段为岩石裂纹发展阶段、cd段为应力迅速跌落阶段。本文所选磁铁矿脆性极强,在卸载围压过程中,岩体承载能力丧失时应力-应变曲线迅速跌落,历时极短(本文称岩体失稳破坏的临界点为跌落点,开始卸载围压对应为卸荷点)(图3),因此着重分析岩石裂纹发展阶段的能量演化过程。

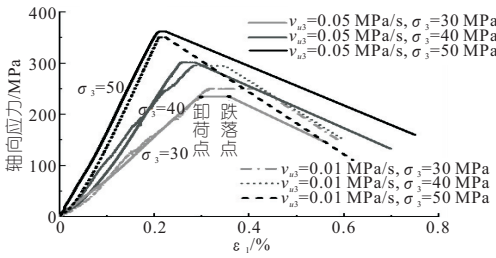


图3 卸荷速率0.01、0.05 MPa/s条件下应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of 0.01 MPa/s and 0.05 MPa/s unloading rates

图4为岩石应变能转化时程曲线。由图4可知,oa、ab段岩样吸收的总应变能 U 主要转化为

弹性应变能 U_e ,且 U_e 的增加趋势均为上凹型,岩样内部出现新裂纹的萌生和扩展,在裂纹发展过程中消耗部分能量, U_d 增加, U_e 与 U_d 之间的差值逐渐减小;bc段试验机对岩石持续做功,径向应力逐渐卸除, U_e 曲线趋于缓和。同时还可看出, U 、 U_d 继续增加,此阶段 U_d 逐渐呈指数函数趋势增加,利用SAS软件对耗散能进行指数曲线回归,得到非线性回归模型($y = ae^{x+b}$)即:

$$U_d = \exp(a\epsilon_1 + b) \quad a > 0; b < 0 \quad (7)$$

取 $U_d = 1$ 作为岩石耗散能临界点,由图4可知,该临界点均处于围压卸荷过程中,当围压为50 MPa时,卸荷速率0.01、0.05 MPa/s的 a 值分别为87.23、97.23,表明岩石在三向受压状态中, U_d 增长速率与外界开挖卸荷速率成正比, U_e 的平衡阶段愈短,在主应力空间,能量主要沿着最小主应力或拉应力方向释放。

4.2 卸荷点和跌落点处岩石能量对比分析

为了更充分地反映岩石在不同卸围压速率下的能量变化特征,图5给出了岩石不同卸围压速率下的能量统计对比,得到卸荷点与跌落点之间的能量增量差 ΔU ($\Delta U = U_{\text{跌落点}} - U_{\text{卸荷点}}$)和能量增量的转化速率 $V_{\Delta U}$ ($V_{\Delta U} = \Delta U / \Delta t$)。

在卸荷点至跌落点的围压卸荷阶段,除弹性能增量 ΔU_e 外,耗散能增量 ΔU_d 、剪切断裂能增量 ΔU_{ts} 及总能量增量 ΔU 均随围压的增加而增加。而不同卸荷速率下各能量增量的转化速率 $V_{\Delta U}$ 有所不同。由图5可看出,对于不同围压条

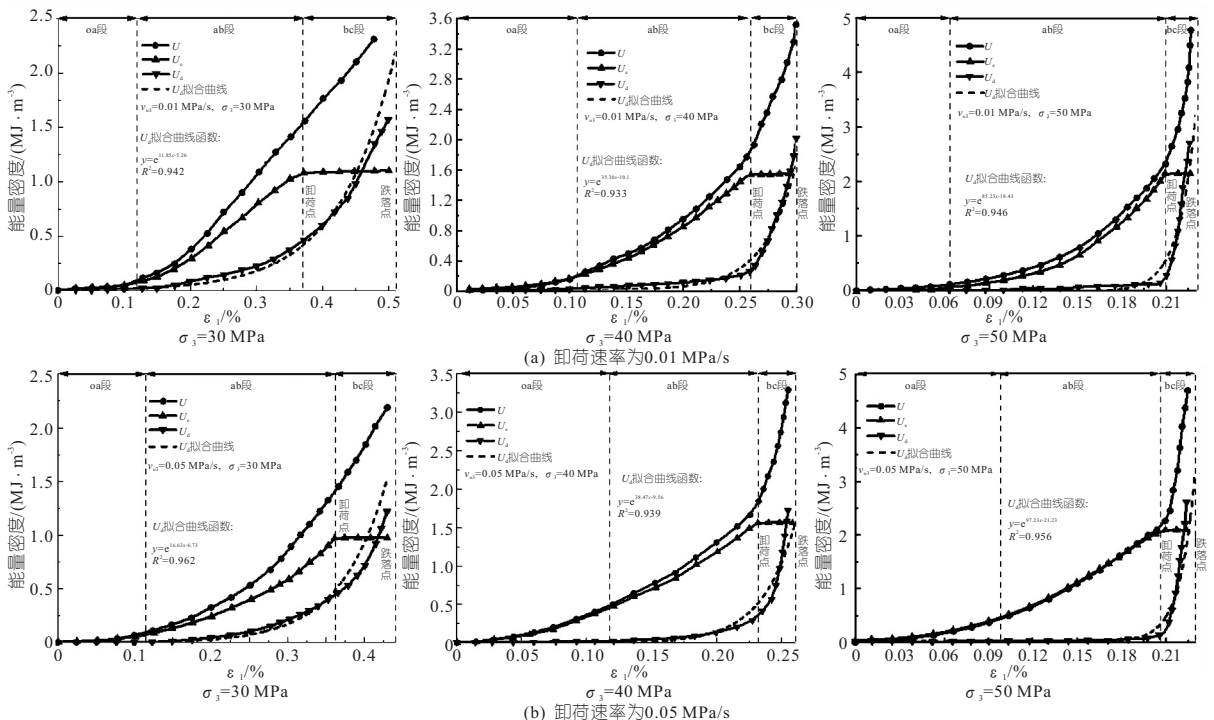


图4 岩石应变能转化时程曲线图

Fig. 4 Time history diagram of rock strain energy conversion

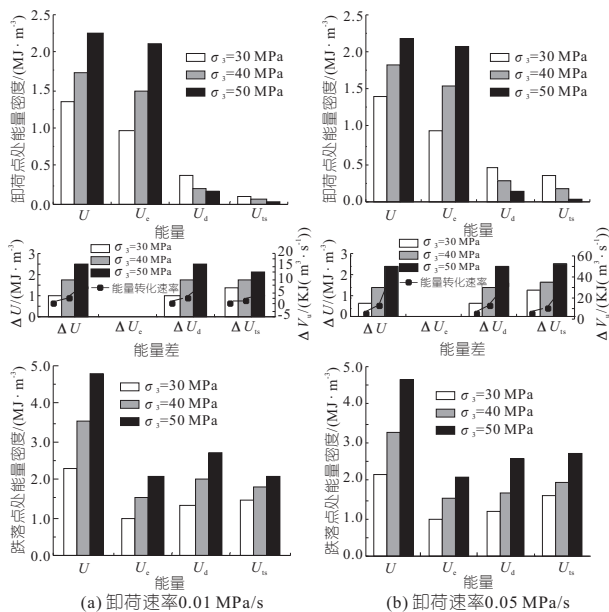


图 5 不同卸荷速率条件下卸荷点和跌落点处能量对比
Fig. 5 Comparison of energy statistics at unloading point and drop point under different unloading rates

件下的能量指标来说,卸围压速率对其影响程度有所不同,在 3 种围压条件下的能量指标中,卸荷速率对高围压条件下能量指标影响程度最大,可见围压越大,岩石内部聚集能量越大,卸荷瞬间, U_e 逐渐转化为 U_d , 岩石裂纹逐渐发育扩展,卸荷速率越快,耗散能在单位时间内能量增量变化速度较高。

根据岩石破裂形态分析可知,岩石损伤劣化均由剪切破裂带贯通导致,围压为 50 MPa 时,岩样两端脱落岩块呈碎屑状态,表明在开挖过程中过高的卸荷速率导致弹性能释放更加剧烈,大量弹性应变能转化为动能,岩块以碎屑形式脱离岩体进而发生岩爆现象。

5 损伤变量与演化

5.1 损伤变量定义

由损伤力学描述岩石内部结构劣化的程度,并根据岩石的宏观力学特性定义具体的损伤变量和损伤演化方程,损伤变量可用于研究不同加载路径下非线性动态变形特征^[7]。基于岩爆动力学破坏准则^[8],并运用传统摩尔应力圆的分析方法,建立了岩石破坏过程中动态应力 $\tau_n = f(\sigma_n)$ 方程,可得到卸围压致岩石损伤劣化的阈值点 (σ_n, τ_n) 。以卸荷速率 0.01 MPa/s 岩石试样为例与常规三轴分析比较,结果见图 6。图 6 中实线表示常规三轴试验得到的 M-C 准则,其中 M 为实线与三轴试验岩样破坏的摩尔应力圆的切点 (σ_m, τ_m) 。卸围压过程由虚线摩尔应力圆^[9]表示,其切点 N

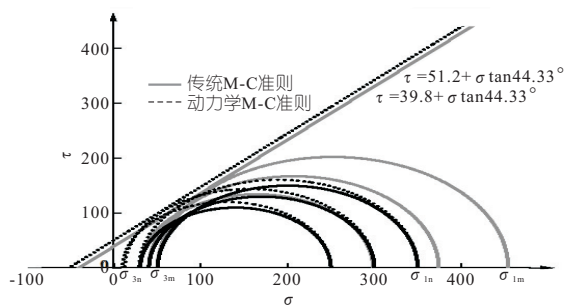


图 6 基于摩尔结构的动态 M-C 准则图示

Fig. 6 Dynamic M-C criterion based on molar structure
代表岩石破坏的动态应力点 (σ_n, τ_n) 。N 点表示的 (σ_n, τ_n) 及 M 点表示的 (σ_m, τ_m) 满足三角函数关系:

$$\tan \varphi = \frac{\sigma_{1m} + \sigma_{3m} - 2\sigma_m}{2\tau_m} = \frac{\sigma_{3n} + \sigma_{1n} - 2\sigma_n}{2\tau_n} \quad (8)$$

根据动态摩尔应力圆方程:

$$\tau_m^2 = (\sigma_n - \sigma_{1n}/2)^2 - (\sigma_{1n}/2)^2 \quad (9)$$

可得卸荷岩石破坏的动态应力点阈值 σ_n, τ_n 为:

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{\sigma_{1n}}{2} \left(1 - \frac{\sigma_{1m} + \sigma_{3m} - 2\sigma_m}{2\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1m} + \sigma_{3m}}{2}\right)^2 + \tau_m^2}} \right) \\ \tau_n = \sigma_{1n} \tau_m / \left[2\sqrt{\left(\frac{\sigma_{1m} + \sigma_{3m}}{2}\right)^2 + \tau_m^2} \right] \end{cases} \quad (10)$$

其中 $c_0 = \tau_n - \sigma_n \tan \theta$ (11)
式中, c_0 为岩石抵抗卸荷破坏所需要的粘聚力。

根据热力学定律,岩石能量耗散是其变形和破坏固有的本质属性,岩石从应力强度减弱到承载力最终损失,反映了岩石微观缺陷的扩展。因此,定义新的岩石损伤变量 D ^[10] 为:

$$D = U_d / U \quad (12)$$

根据卸载围压过程中,岩石抵抗卸荷破坏的内聚力丧失,基于式(10)~(12)损伤变量的新定义为:

$$D = (1 - c/c_0)U_d / U_{\max} \quad (13)$$

式中, c 为常规三轴试验数据得到的岩石内聚力; U_{\max} 为岩石跌落点吸收的总能量。

5.2 基于能量的岩石损伤演化特征

根据式(13),分别计算三轴卸围压速率为 0.01、0.05 MPa/s 岩石的损伤演化曲线,结果表明岩石损伤变量曲线趋势与耗散应变能随轴向应变的演化趋势大致相同。在试验初期,由于岩石处于加密阶段,损伤变量均小于 0.05,但由于轴向应力持续加载导致新生裂纹萌生与扩展,耗散应变能消耗量逐渐增大,卸荷前后耗散应变能快速升高,损伤变量均随应变呈指数函数增加,直至岩石损伤劣化。

6 结 论

a. 在常规三轴试验加载下,岩石破坏模式主要为剪切破坏,随着围压的增加,峰前剪切断裂能高于峰后剪切断裂能,岩石局部出现劈裂破坏,剪切断裂能占比降低。

b. 在卸围压试验中,耗散应变能均以指数函数趋势增加,卸荷速率越快,卸荷段经历时间较短,卸荷点与跌落点之间的耗散能在单位时间内能量增量变化速率越高。

c. 在能量耗散的基础上,考虑卸荷路径下内聚力丧失,提出了损伤变量新定义,损伤变量曲线变化与 U_d 相同,均随指数函数趋势增加,并且卸荷速率与损伤量增加速率成正比。

参 考 文 献:

- [1] 付建新,宋卫东,谭玉叶. 考虑卸荷应力路径的深部采空区失稳局部能量释放判别准则[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(2):217-224.
- [2] 李海宁,王尚,梁庆国,等. 层状岩体引水隧洞围岩稳定性数值模拟分析[J]. 水电能源科学,2021,39(9):145-148,144.
- [3] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics

- under true-triaxial unloading conditions[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2009,47(2):286-298.
- [4] HUANG D, LI Y R. Conversion of strain energy in triaxial unloading tests on marble[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2014,66(1):160-168.
- [5] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程:SL/T 264-2020[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [6] 朱泽奇,盛谦,肖培伟,等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1):2675-2681.
- [7] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. A non-linear model of creep-fatigue damage cumulation and interaction (for hot metallic structures)[J]. Mechanics of visco-elastic media and bodies,1975:291-301.
- [8] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报,2005(17):3003-3010.
- [9] 宫伟力,高霞,孙雅星,等. 基于动态莫尔圆的岩爆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊2):3321-3329.
- [10] YE D Y, WANG Z L. A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue [J]. International journal of fatigue 2001,23(8): 679-687.

Study on Energy Evolution of Hard Rock Under High Confining Pressure and Unloading Condition

HU Bao-wen^{1,2,3}, LV Cong-rui¹, SU Hui¹, NAN Bo-wen¹, SONG Jin-ke¹, LI Jiang-zhe¹

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, Beijing 100083, China;

3. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan 056038, China)

Abstract: In order to explore the energy evolution law of rock failure process in the excavation process of diversion tunnel, this paper selects magnetite ore and carries out conventional triaxial and triaxial pre-peak constant axial pressure unloading confining pressure tests. The results show that in the conventional triaxial test, the rock is dominated by elastic strain energy storage and dissipative strain energy consumption before the peak stress, and the elastic strain energy release and dissipative strain energy consumption after the peak stress. With the increase of confining pressure, pre-peak shear fracture energy is higher than post-peak shear fracture energy. In the unloading confining pressure test, the dissipated strain energy increases exponentially. The faster the unloading rate, the shorter the unloading period is, and the higher the rate of energy increment per unit time between the unloading point and the drop point. Based on the M-C criterion of rockburst dynamics, the loss of rock cohesion and the dissipated strain energy of rock under unloading path, the damage variable in the process of rock unloading is defined, and the damage degree of rock deformation and failure is revealed from the perspective of energy.

Key words: energy evolution; shear fracture energy; energy change rate; damage variable