

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0164

循环加卸载损伤大理岩的动力学特性*

蔚立元^{1,2}, 朱子涵¹, 孟庆彬¹, 靖洪文¹, 苏海健¹, 何明¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 利用 MTS 815 电液伺服岩石实验系统进行上限应力为 80%、85%、90%、95% 单轴抗压强度的大理岩单轴压缩循环加卸载实验, 每种上限应力条件分别设置 20、40、60、80 次循环。再利用分离式 Hopkinson 压杆对损伤岩样进行动力学实验。分析了循环加卸载上限应力及循环次数对大理岩塑性应变的影响, 揭示了大理岩动态力学参数和破碎吸收能随损伤变量的演化规律。实验结果表明: 塑性应变与循环次数呈正相关, 且上限应力越大, 塑性应变趋于稳定所需的循环次数也会增大; 动态单轴抗压强度、动态弹性模量随损伤变量增加呈指数衰减; 破碎吸能占比以损伤变量 $D=0.343$ 为临界点分为两个阶段, $D < 0.343$ 时, 破碎吸能占比稳定在 10% 左右, 数值约为 13 J, 当 $D > 0.343$ 时破碎吸能占比随损伤变量增加不断增大。研究结果可为岩体工程的设计、施工及支护参数的选取提供参考。

关键词: 岩石力学; 循环加卸载; 分离式 Hopkinson 压杆; 损伤变量; 动力学特性; 能量

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

地下工程施工过程中围岩体不可避免地会受到循环载荷扰动, 经循环荷载扰动围岩体的力学性能是决定围岩承载能力的重要因素。大量岩土工程实践表明, 岩体(如地下洞室群^[1])会受到多次开挖扰动等循环荷载作用, 导致岩体承受的荷载作用形式是多次的、循环的。在循环荷载作用下, 岩石的力学特性与静态荷载作用下有显著不同^[2]。经循环荷载扰动的围岩体仍将面临冲击地压^[3]、毗邻洞室爆破开挖^[4]等动荷载威胁, 因此研究经循环荷载损伤的岩体动态力学特性十分有意义。

以往的研究表明, 影响岩石疲劳寿命的主要因素是周期荷载的上限应力和幅值^[5]。谢和平等^[6]从能量的角度出发, 认为岩石的变形破坏过程实际上就是一个从局部损耗到局部破坏最终到整体灾变过程。张志镇等^[7]通过 4 种加载速率对红砂岩试件进行单轴不断增加荷载循环加、卸载实验, 得到能量的演化及转化规律。邓华锋等^[8]探讨频率和幅值变化对加卸载过程中动弹性模量、阻尼比和阻尼系数等动力参数的影响。郭印同等^[9]通过实验得出提高上限应力值和平均应力值, 盐岩初始轴向变形和循环轴向变形的比率都会提高, 疲劳破坏时的总循环次数显著减小。Shalev 等^[10]分析了体积应变、体积模量和加、卸载过程中的滞回效应及幅值的关系。周家文等^[11]利用砂岩的循环加卸载实验得到了利用应力应变曲线计算损伤变量的方法。张媛等^[12]对砂岩进行循环荷载作用下不同围压时的三轴压缩实验, 得到循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律。黎立云等^[13]通过对岩石试件进行了竖向循环加卸载直至破坏的双向压缩实验, 得出破坏时的总吸收能、总耗散能和总弹性应变能; 朱珍德等^[14]利用细观图像实验得到频率与岩石断口细观裂纹总数目、面积及分形维数关系。以上研究可以分为两大类, 一类是研究不同加载速率、不同偏应力、不同围压等因素对滞回曲线、能量、损伤等参数的影响, 一类是研究疲劳寿命与上限应力等因素的关系, 得到了一些有益的结论。

爆破等冲击荷载直接威胁地下工程的安全^[4], 章根德^[15]通过霍普金森压杆研究岩石的动态响应, 还分析讨论了影响动态强度的一些因素。黎立云等^[16]对砂岩试件进行了动态霍普金森杆冲击破坏实验和静态加压破坏实验, 对于动态冲击实验, 得到了不同冲击速度下岩石试件破坏时的总吸收能、总耗散

* 收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(51579239, 51704280, 51704279); 国家重点研究发展计划(2017YFC0603001)

第一作者: 蔚立元(1982—), 男, 博士, 教授, 博导, yuliyuan@cumt.edu.cn。

能。刘红岩等^[17]讨论了节理参数及载荷应变率等对岩体动态力学特性的影响,得到了岩体动态峰值强度及弹性模量则随着节理法向及切向刚度的增大分别减小或增大。宫凤强等^[18]分别利用 RMT-150C 和分离式霍普金森压杆试验系统对砂岩进行了不同应变率下的单轴压缩、三轴压缩和拉伸实验,给出了不同应变率范围内动态 Mohr-Coulomb 准则和动态 Hoek-Brown 准则的具体表达形式。胡柳青等^[19]研究了冲击荷载作用下岩石破裂损伤的耗能规律。刘军忠等^[20]得到了动态抗压强度、强度增强因子、比能量吸收与平均应变率之间的关系。李夕兵等^[21]研究了动静组合加载条件下岩石的力学特性与破坏模式。这些研究主要集中于率效应、节理对岩石力学行为的影响及率效应对冲击过程中能量分配的影响。

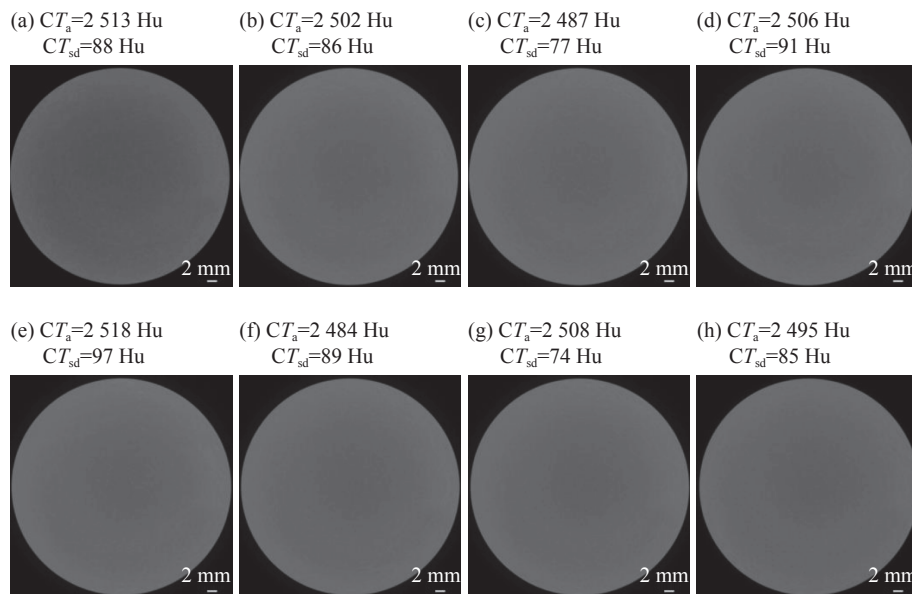
实际上地下工程的开挖,受循环荷载扰动后的损伤岩体力学性能是决定工程安全的重要因素,但对循环荷载损伤大理岩的动力学性质的研究鲜有报道。本文中在上述研究的基础上,通过设置循环荷载上限应力和循环次数,得到不同损伤变量的大理岩岩样。通过损伤岩样动力学实验,揭示损伤变量对大理岩动力学参数及能量分配的影响。

1 实验方案

1.1 试样制备

实验所用白色大理岩取自中国云南,所含矿物成分及其含量通过 X 射线衍射获得:主要由 CaO(33.4%)、MgO(19.1%) 和 SiO₂(11.5%) 组成。此外,还检测到其他矿物杂质,例如 Fe₂O₃(0.16%) 和 Al₂O₃(0.16%)。试样密度和孔隙率分别为 2.810 g/cm³ 和 0.596%。

所取大理岩的 CT 扫描如图 1 所示,从图中可以看出每个 CT 图像中所有像素的平均 CT 数(CT_a)没有显著差异,并且标准差(CT_{sd})非常小(在 100 Hu 内)。因此,所选大理石的均质性和完整性较好。考虑到岩样损伤后要采用分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)装置进行冲击实验,圆柱形试样的高径比定为 1:1,均为 50 mm。加工精度符合相关规定,并保持自然风干状态。岩样共计 51 块,包括测定静单轴抗压强度试样 U01~U03,以及等荷载循环加卸载试样 T01~T48(见表 1)。



注: CT_a 和 CT_{sd} 分别是每个图像中所有 CT 值的平均值和标准差。

图 1 大理岩 8 个等距横截面的 CT 图像

Fig. 1 CT images of eight equidistant cross-sections

1.2 实验设备及方案

实验分为两部分,单轴等荷载循环加卸载损伤实验和冲击实验。

循环损伤实验: 实验设备采用 MTS 815, 试样两端涂抹凡士林以减小端部效应对实验的影响。本次实验第一次循环加载段采用加载速率为 1 kN/s 的线性加载, 加载到上限应力处采用频率为 0.2 Hz 的正弦波进行加载, 直到达到设计的循环次数。上限应力 (σ_{uls}) 分别设置为单轴抗压强度 (σ_{ucs}) 的 80%、85%、90% 及 95%。

冲击实验: 采用分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB) 实验系统进行单轴冲击实验。该系统子弹、入射杆、透射杆的直径均为 75 mm, 长度依次为 0.6、5 和 3 m。经现场调试, 冲击气压设定为 0.14 MPa, 子弹速度 4 m/s 左右, 实验设备如图 2 所示。

表 1 等荷载循环加卸载试样
Table 1 Cyclic loading and unloading specimens under equal load

$\sigma_{uls}/\sigma_{ucs}$	循环次数			
	80	60	40	20
80%	T37	T40	T43	T46
	T38	T41	T44	T47
	T39	T42	T45	T48
85%	T25	T28	T31	T34
	T26	T29	T32	T35
	T27	T30	T33	T36
90%	T4	T1	T7	T10
	T5	T2	T8	T11
	T6	T3	T9	T12
95%	T13	T16	T19	T22
	T14	T17	T20	T23
	T15	T18	T21	T24



图 2 MTS 815、SHPB 实验系统
Fig. 2 MTS 815 and SHPB testing systems

2 单轴等荷载循环损伤实验

2.1 上限应力确定

单轴抗压强度曲线如图 3 所示, U01~U03 单轴抗压强度分别为 76、80、67 MPa, 平均单轴抗压强度取 74 MPa。本文中损伤强度 (σ_{cd}) 采用体积应变曲线的体积应变 (ϵ_v) 最大点对应的应力值^[22], 如图 4 所示。为了防止岩样循环过程中发生破坏, 最大上限应力设置为单轴抗压强度的 95% (70 MPa), 为了获取

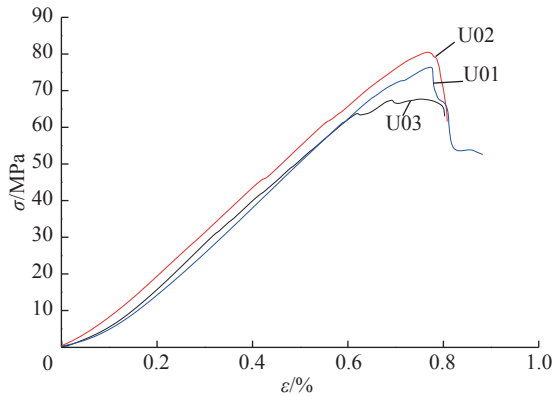


图 3 单轴抗压强度曲线
Fig. 3 Axial stress-axial strain curves

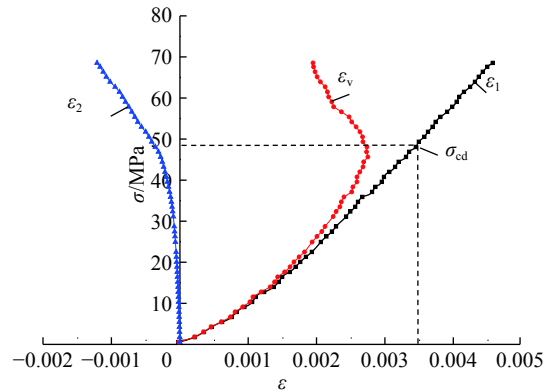


图 4 大理岩损伤强度
Fig. 4 Determination of the damage strength

损伤效果较好的岩样, 最小上限应力取单轴抗压强度的 80% (59 MPa, 高于图 4 所得的损伤强度)。

典型单轴循环加卸载应力应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 加载曲线与卸载曲线不重合, 形成滞回环并且随着循环次数的增加, 应力应变滞回环向应变增大的方向发展。发展趋势由疏到密, 最终趋于重合, 与文献 [12] 的结论一致。

2.2 耗散能分析

岩石在变形直至破坏过程中, 会伴随能量的耗散和释放。由能量守恒定律可知, 假设此物理过程中与外界没有热交换, 计算公式如下^[6]:

$$U = U_e + U_d \quad (1)$$

式中: U 为输入能, 即外界对试样所做的功; U_d 为耗散能, 即加载过程中耗散的能量, 主要用于岩石的内部损伤和塑性变形; U_e 为弹性应变能, 即加载过程中储存在岩石试样内部的能量, 卸载阶段会释放出去。其中能量密度计算公式如下:

$$\begin{cases} u_i = \int_0^{\varepsilon'} \sigma_i d\varepsilon_i \\ u_{i,d} = \int_0^{\varepsilon'} \sigma_i d\varepsilon_i - \int_{\varepsilon'}^{\varepsilon''} \sigma_i d\varepsilon_i \\ u_{i,e} = \int_{\varepsilon'}^{\varepsilon''} \sigma_i d\varepsilon_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε' 为卸载应力 σ' 处所对应的应变; ε'' 为应力卸载到 0 处所对应的应变, 即塑性应变。

图 6 所示为岩石在应力水平 σ' 处的加卸载应力应变曲线。循环加卸载实验过程中 (以 60 次循环为例) 耗散能密度如图 7 所示。

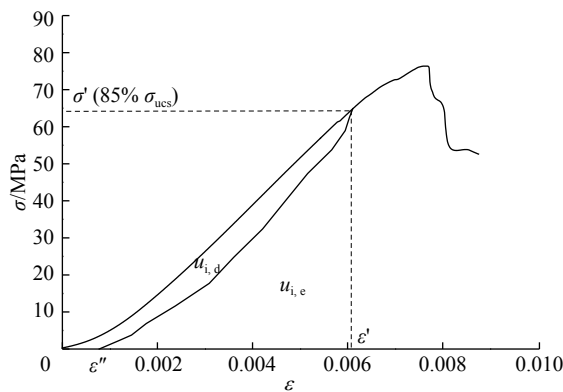


图 6 岩石在应力水平 σ' 处能量计算示意图
Fig. 6 Schematic diagram of energy calculation at σ'

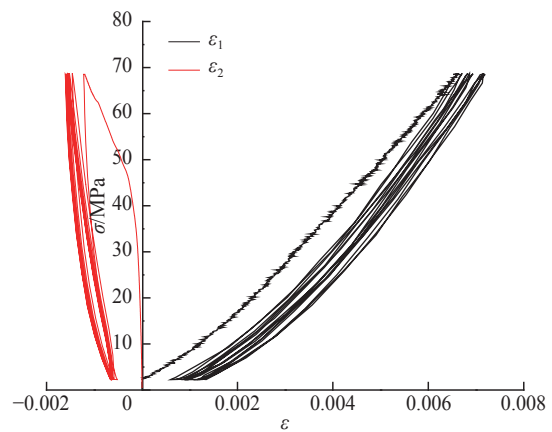


图 5 等荷载循环实验典型应力应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves for cyclic loading with constant amplitude

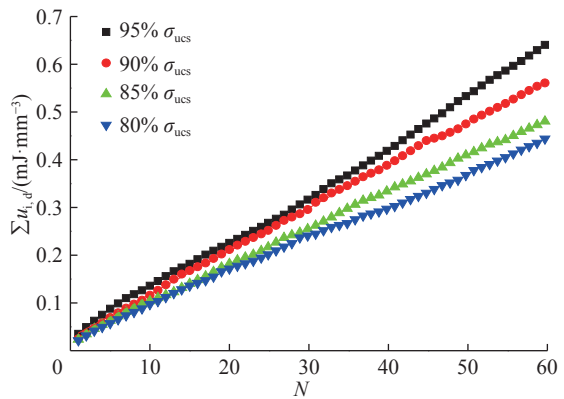


图 7 不同上限应力累积耗散能密度与循环次数关系曲线
Fig. 7 Relation between cumulative dissipation energy density and number of cycles under different upper limit stress levels

当加载到应力水平 σ' 时, 输入能密度为 u_i , 可由该应力点处加载曲线与横坐标的面积确定; 耗散能密度为 $u_{i,d}$, 可由该应力点处加载曲线与卸载曲线之间的面积确定; 弹性应变能密度为 $u_{i,e}$, 可由卸载曲线与横坐标轴之间的面积确定^[7]。

由图 7 可知, 累积耗散能密度随循环次数的增加呈线性增加, 上限应力越大累积耗散能密度增长速率越大。

2.3 塑性应变

塑性应变为不可逆应变, 即总应变与弹性应变的差值, 如下式所示^[11]:

$$\varepsilon''(i) = \varepsilon'(i) - \varepsilon_e(i) \quad (3)$$

式中: ε'' 为塑性应变, ε' 为卸载应力 σ' 处应变即总应变, $\varepsilon_e(i)$ 为弹性应变。

根据公式(3)得到塑性应变均值随上限应力和循环次数的演化规律, 计算结果如图 8 所示。由图 8 可知, 同等上限应力水平下, 随着循环次数的增加, 塑性应变先快速增大, 后缓慢增加, 最后趋于稳定, 且趋于稳定所需的循环次数与上限应力呈正相关。原因是随循环次数增加, 滞回环最终趋于重合, 即耗散能趋近于 0, 此时继续加卸载, 试样不会产生新的塑性变形, 即塑性应变最终会稳定在一定数值, 而上限应力越大, 累积耗散能密度越大, 岩样内部损伤和塑性变形也会增大, 如图 5、7 所示。

3 损伤大理岩动力学特性

为消除矩形波加载带来的弥散效应, 需进行入射波整形^[23-24], 本次实验入射波波形整形器选用直径 10 mm、厚 2 mm 的橡胶片^[25]。经整形器整形后应变波如图 9 所示, 由图 9 可知波形整形效果较好。损伤试样动弹性模量远远小于杆件的弹性模量, 因此忽略了试件横截面积的不匹配引起的二维效应^[26]。利用三波法计算出应变率均值为 48.69 s^{-1} , 标准差为 8.43 s^{-1} , 可以认为恒应变率加载, 忽略应变率对本次实验的影响。

本文中应力应变关系采用三波法^[27]计算, 动态弹性模量采用 ISRM 推荐的计算方法^[28]。

3.1 动力学实验结果

实验所得动态应力应变曲线如图 10 所示。由图 10 可知, 试样承受循环加卸载的上限应力和循环次数不同, 动态强度和破坏应变的差异性更为显著。试样所受循环次数越多、上限应力越大, 其强度越低, 破坏应变明显偏大。这是由于循环次数和上限应力的差异造成岩样内部微裂隙发育情况不尽相同, 循环次数越多、上限应力越大, 岩样内部微裂隙越多造成的。

动态强度与上限应力、循环次数之间的关系分别如图 11~12 所示。由图 11 可以看出, 动态强度随循环加卸载上限应力的增加呈负相关, 可以划分为两个阶段: $\sigma_{uls}/\sigma_{ucs}=0.80\sim 0.85$ 的快速下降阶段及 $\sigma_{uls}/\sigma_{ucs}=0.85\sim 0.95$ 的缓慢下降阶段。从图 12 可知, 动弹性模量随上限应力变化规律与动态抗压强度随上限应力变化规律类似, 动弹性模量随上限应力的变化也呈现出 2 个阶段: $\sigma_{uls}/\sigma_{ucs}=0.80\sim 0.85$ 的快速下

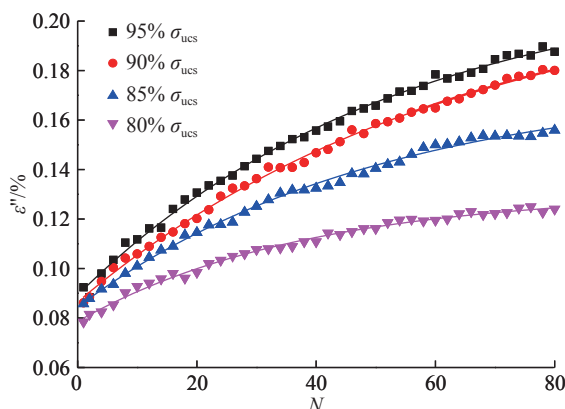


图 8 塑性应变与循环次数关系曲线

Fig. 8 Relationship between plastic strain and number of cycles

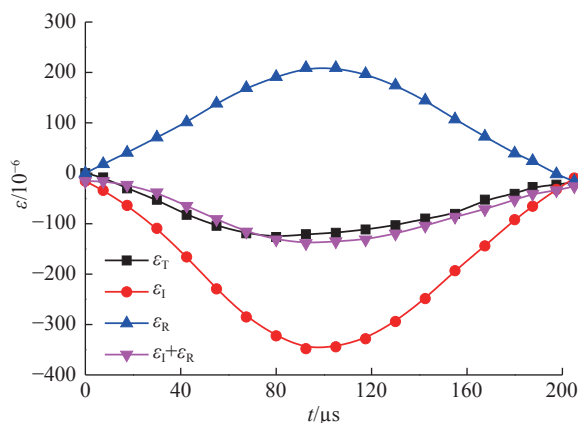


图 9 整形后的应变波

Fig. 9 Strain waves after shaping

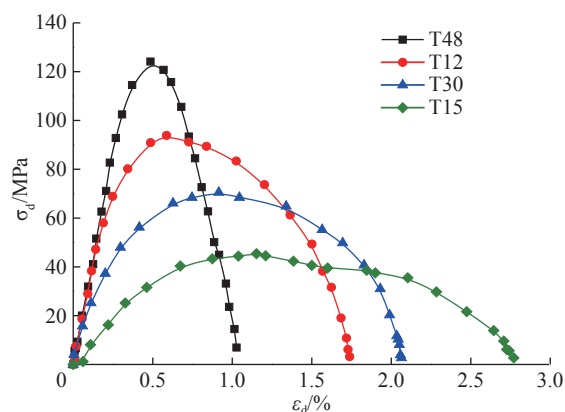


图 10 动态应力应变曲线

Fig. 10 Dynamic stress-strain curves

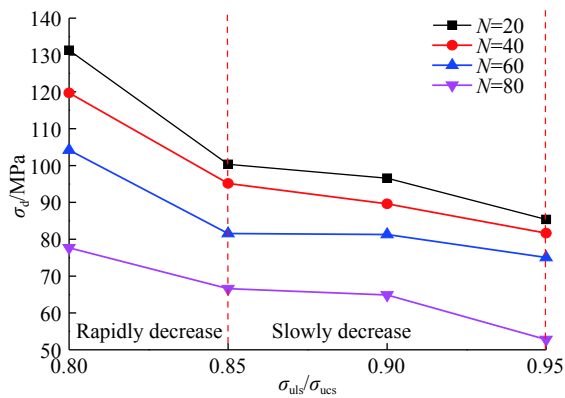


图 11 动态抗压强度随上限应力变化规律

Fig. 11 Relationship between dynamic compressive strength and upper limit stress

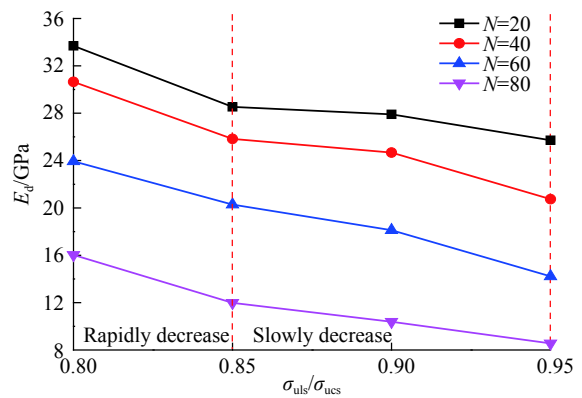


图 12 动态弹性模量随上限应力变化规律

Fig. 12 Relationship between dynamic elastic modulus and upper limit stress

降段和 $\sigma_{uls}/\sigma_{ucs}=0.85\sim 0.95$ 的缓慢下降段。

3.2 损伤变量对大理岩动力学特性影响

上文分析了循环加卸载实验上限应力、循环次数对大理岩动力学性质的影响,得到了动态抗压强度、动态弹性模量随循环加卸载上限应力、循环次数的变化规律。循环加卸载实验中上限应力和循环次数对大理岩的影响,从本质上来说是对大理岩造成了不同程度损伤。损伤变量定义如下^[29]:

$$D = 1 - \left(\frac{v_r}{v_0} \right)^2 \quad (4)$$

式中: D 为损伤变量, v_r 为受损岩石中的波速, v_0 为原始岩石中的波速。本文中通过康科瑞 NM-4A 非金属超声检测分析仪测得各个岩样的波速,如表 2 所示。

分析表 2 可知,上限应力越大(或循环次数越多),损伤岩样的波速越小,表明岩样的损伤越大,内部微裂隙越多。损伤变量随上限应力演化情况如图 13 所示。

由图 13 可知,同等循环次数下,上限应力越大,损伤变量随着上限应力的增加而增大。由上文可知累积耗散能密度与上限应力(循环次数)呈正相关,因此损伤变量也随着上限应力(循环次数)的增大而增大。

损伤变量增量随上限应力的增大而减小,这可能是由于岩石材料承受的上限应力达到损伤强度时,材料内部产生大量的微裂隙,当微裂隙达到一定数量时,上限应力的增大并不能使岩样内部裂隙数量持续快速增加。

表 2 不同上限应力及循环次数下波速

Table 2 Wave speed for different upper limit stress and number of cycles

$\sigma_{uls}/\sigma_{ucs}$	循环次数	平均波速/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	损伤变量
80%	20	4.951	0.124
	40	4.774	0.186
	60	4.605	0.242
	80	4.288	0.343
85%	20	4.639	0.231
	40	4.513	0.273
	60	4.288	0.343
	80	4.117	0.395
90%	20	4.513	0.273
	40	4.401	0.308
	60	4.178	0.377
	80	3.989	0.432
95%	20	4.362	0.320
	40	4.288	0.343
	60	4.083	0.405
	80	3.844	0.472
0	0	5.291	0

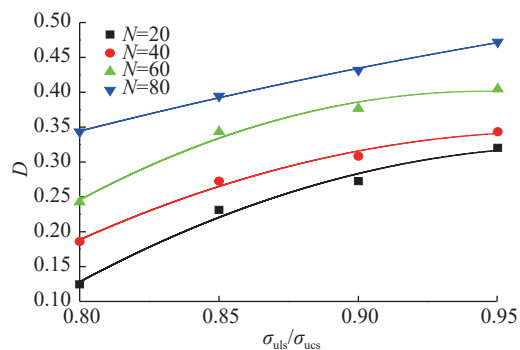


图 13 损伤变量与上限应力关系曲线

Fig. 13 Relationship between damage variable and upper limit stress

动态单轴抗压强度、动态弹性模量随损伤变量的演化过程如图 14~15 所示。

本文中采用指数函数拟合, 可以更好地拟合损伤变量为 1 时试样失去承载能力、动态强度和动弹性模量趋近于 0 的情况。由图 14~15 可知, 动态抗压强度和动态弹性模量均随损伤变量的增加呈指数衰减。这主要是由于随着损伤变量的增加, 内部微裂隙数目越多, 岩样劣化越严重, 在同一冲击气压下必然导致动态抗压强度的衰减。动弹性模量主要表征了岩样的轴向抗变形能力, 破坏应变是其主导因素之一, 从图 10 可以看出, 损伤变量越大破坏应变越大, 这也从另一方面验证了动态弹性模量随损伤变量增加而降低。

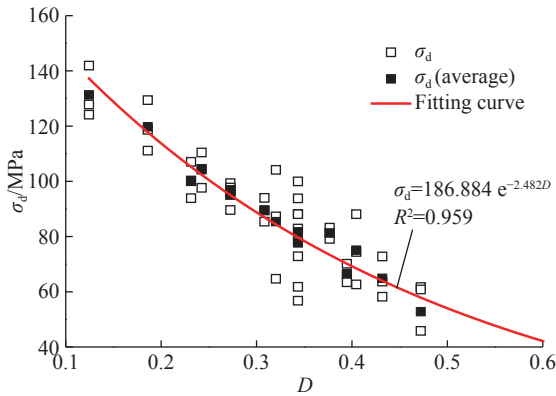


图 14 动态抗压强度随损伤变量演化过程

Fig. 14 Relationship between dynamic compressive strength and damage variable

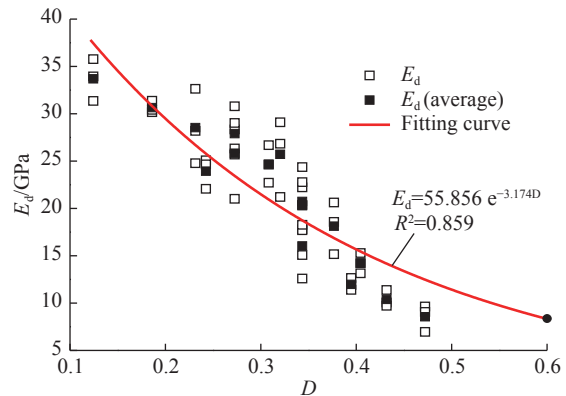


图 15 动态弹性模量随损伤变量演化过程

Fig. 15 Relationship between dynamic elastic modulus and damage variable

3.3 能量分析

冲击实验中, 入射波、反射波和透射波包含的能量依次为 W_I 、 W_R 、 W_T , 试样吸收能量为 W_L , W_L 主要由三部分构成: (1) 破碎耗能 W_{FD} , 主要用于产生新的断裂表面和裂纹扩展等; (2) 碎块弹射的动能 W_K ; (3) 其他能量 W_O , 主要指以其他如热能等各种形式耗散的能量。其中被耗散的能量很小可以忽略, 且碎块弹射速度的测定非常困难, 因此 W_K 的确定也存在一定难度。Zhang 等^[30] 利用高速相机对 SHPB 实验中岩石碎块的速度进行测定, W_K 约占 W_L 的 5.05%, 因此本文的研究中, 岩石的破碎吸能 W_{FD} 的计算直接以岩石总吸收能来近似替代^[31]。计算公式如下:

$$\begin{cases} W_I = \frac{A_0 c_0}{E} \int \sigma_I^2 dt = A_0 c_0 E \int \varepsilon_I^2 dt \\ W_R = \frac{A_0 c_0}{E} \int \sigma_R^2 dt = A_0 c_0 E \int \varepsilon_R^2 dt \\ W_T = \frac{A_0 c_0}{E} \int \sigma_T^2 dt = A_0 c_0 E \int \varepsilon_T^2 dt \\ W_L = W_{FD} = W_I - (W_R + W_T) \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_I 、 σ_R 和 σ_T 分别对应于压杆上的入射波、反射波和透射波的应力; c_0 和 E 为压杆中声波传播速度和弹性模量; A_0 为压杆横截面积。计算结果如图 16~17 所示。

由图 16 可知, 当 $D < 0.343$ 时, 透射能占比大于反射能占比, 且随着损伤增加, 透射能占比呈现出降低的趋势而反射能占比则不断增加, 破碎耗能占比稳定在 10% 左右; 而 $D > 0.343$ 时, 透射能占比小于反射能, 透射能占比持续降低反射能占比不断增加, 而破碎耗能占比情况与 $D < 0.343$ 时完全不同, 出现占比增大的趋势。这可以通过一维应力波理论进行解释, 根据一维应力波理论得到的试样应变和应力如式(6)所示:

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = -\frac{2c_0}{L} \int \varepsilon_R dt \\ \sigma(t) = \frac{A_0}{A_s} E \varepsilon_T \end{cases} \quad (6)$$

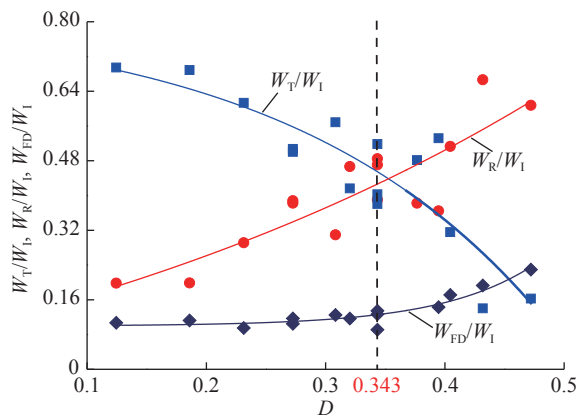


图 16 能量分配随损伤变量演化规律
Fig. 16 Evolution curves of energy under different damage variables

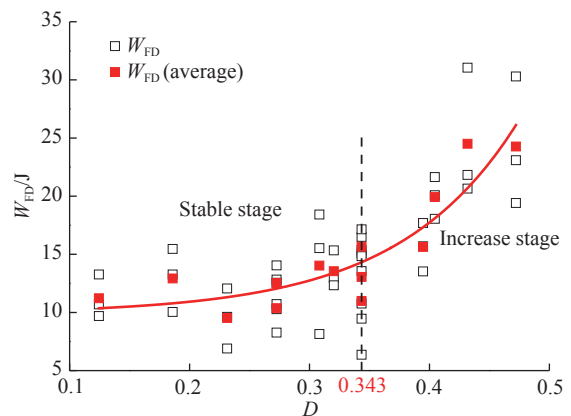


图 17 破碎吸能随损伤变量演化规律
Fig. 17 Relationship between W_{FD} and damage variable

式中: A_s 和 A_0 为试件和压杆横截面积, L 为试件长度。

由式(6)可知,反射波决定了试件的应变变化,透射波能够反映岩石试件中的平均应力变化情况。结合图 10 可得随损伤变量的增加,损伤大理岩破坏应变显著增大,而动态强度有所降低,因此反射波与损伤变量呈正相关而透射波随损伤变量增加不断减小。

由图 17 可知,在冲击载荷下,随着岩石损伤变量的增加,破碎吸能分为两个阶段,稳定阶段和增长阶段,临界损伤变量 $D=0.343$; 当 $D < 0.343$ 时,破碎吸能稳定在 13 J 左右,而 $D > 0.343$ 时,破碎吸能随着损伤变量增加持续增加。这是因为岩石破坏过程中的能量耗散特性与其内部损伤特征有十分密切的联系,裂纹的繁衍、扩展和贯通每一阶段都要从外部吸收能量,而且是不可逆的能量耗散过程。当 $D < 0.343$ 时,岩样内部的微裂隙较少导致岩样能量吸收较少;当 $D > 0.343$ 时,岩样内部微裂隙较多,因此在实验过程中容易吸收更多的能量用于内部微裂隙的扩展和贯通。

由于实验手段的限制,本次实验忽略了碎块弹射动能,因此当 $D > 0.343$ 时,碎块弹射动能是否是引起试样总吸收能增加的因素以及随损伤变量增加碎块弹射动能的演化规律仍然需要进一步的研究。

4 结 论

对大理岩进行了 4 级上限应力、4 种循环次数的等荷载循环加卸载实验,得到了 48 块不同损伤程度的大理岩试样,并对循环加卸载损伤岩样开展了 SHPB 冲击动力学实验,得到了如下主要结论:

(1) 相同上限应力下,随着循环次数的增加,塑性应变逐渐增大。上限应力越大,塑性应变趋于稳定所需的循环次数也会增大。

(2) 动态抗压强度、动态弹性模量随上限应力 σ_{uls} 的变化呈现出两个变化阶段: $(80\% \sim 85\%) \sigma_{ucs}$ 的快速下降段和 $(85\% \sim 95\%) \sigma_{ucs}$ 的缓慢下降段。

(3) 损伤变量随上限应力、塑性应变增加呈非线性增加,损伤变量增量随着上限应力、塑性应变的增大而减小。动态单轴抗压强度、动态弹性模量随损伤变量增大呈指数衰减。

(4) 当 $D < 0.343$ 时,反射能占比随损伤变量增加逐渐增大,透射能不断衰减,但透射能占比大于反射能占比,破碎吸能占比在 10% 上下浮动,其数值约为 13 J; 当 $D > 0.343$ 时,反射能和破碎吸能占比逐渐增加,透射能不断衰减,此时透射能占比小于反射能。碎块弹射动能随损伤变量的演化规律仍然需要进一步的研究。

感谢陆军军官学院姜锡权教授对 SHPB 实验给予的悉心指导与热情帮助。

参考文献:

- [1] 王刚,李术才,王书刚,等.节理岩体大型地下洞室群稳定性分析[J].岩土力学,2010,29(1):261-268.
WANG Gang, LI Shucai, WANG Shugang, et al. Stability analysis of huge underground cavern group in jointed rockmass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 29(1): 261-268.
- [2] 王者超,赵建纲,李术才,等.循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1888-1900.
WANG Zhechao, ZHAO Jiangang, LI Shucai, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subject to cyclic load and its constitutive model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(9): 1888-1900.
- [3] 潘一山,李忠华,章梦涛.我国冲击地压分布、类型、机理及防治研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.
PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rock burst in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [4] YU L, SU H, JING H, et al. Experimental study of the mechanical behavior of sandstone affected by blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 93(3): 234-241.
- [5] 葛修润,蒋宇,卢允德,等.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
GE Xiurun, JIANG Yu, LU Yunde, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(10): 1581-1585.
- [6] 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,2005,24(17):3003-3010.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [7] 张志镇,高峰.单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(5):953-962.
ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 953-962.
- [8] 邓华锋,胡玉,李建林,等.循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J].岩土力学,2017,38(12):3402-3409.
DENG Huafeng, HU Yu, LI Jianlin, et al. Effects of frequency and amplitude of cyclic loading on the dynamic characteristics of sandstone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(12): 3402-3409.
- [9] 郭印同,赵克烈,孙冠华,等.周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J].岩土力学,2011,32(5):1353-1359.
GUO Yintong, ZHAO Kelie, SUN Guanhua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1353-1359.
- [10] SHALEV E, LYAKHOVSKY V, QUGIER-SIMONINAUDREY A, et al. Inelastic compaction, dilation and hysteresis of sandstones under hydrostatic conditions [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 197(2): 920-925.
- [11] 周家文,杨兴国,符文熹,等.脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1172-1183.
ZHOU Jiawen, YANG Xingguo, FU Wenxi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading condition [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 1172-1183.
- [12] 张媛,许江,杨红伟,等.循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2):320-326.
ZHANG Yuan, XU Jiang, YANG Hongwei, et al. Effect of confining pressure on evolution law of hysteresis loop of sandstone under cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 320-326.
- [13] 黎立云,王荣新,马旭,等.双向加压下岩石能量规律的试验研究[J].煤炭学报,2010,35(12):2033-2038.
LI Liyun, WANG Rongxin, MA Xu, et al. Energy variety analysis of rock under biaxial compression [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(12): 2033-2038.
- [14] 朱珍德,孙林柱,王明洋.不同频率循环荷载作用下岩石尼比试验与变形破坏机制细观分析[J].岩土力学,2010,31(增1):8-12.
ZHU Zhende, SUN Linzhu, WANG Mingyang. Experiment and mesomechanical analysis of deformation failure mechanism on rock under different frequency cyclic loadings [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1): 8-12.

- [15] 章根德. 岩石对冲击载荷的动态响应 [J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(2): 1-9.
ZHANG Gende. Dynamic response of rock impulse loads [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1982, 2(2): 1-9.
- [16] 黎立云, 徐志强, 谢和平, 等. 不同冲击速度下岩石破坏能量规律的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2007-2011.
LI Liyun, XU Zhiqiang, XIE Heping, et al. Failure experimental study on energy laws of rock under differential dynamic impact velocities [J]. *JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY*, 2011, 36(12): 2007-2011.
- [17] 刘红岩, 李俊峰, 裴小龙. 单轴压缩下断续节理岩体动态损伤本构模型 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 316-323. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0261.
LIU Hongyan, LI Junfeng, PEI Xiaolong. A dynamic damage constitutive model for rock mass with intermittent joints [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 316-323. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0261.
- [18] 宫凤强, 陆道辉, 李夕兵, 等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2433-2441.
GONG Fengqiang, LU Daohui, LI Xibing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2433-2441.
- [19] 胡柳青, 李夕兵, 赵伏军. 冲击荷载作用下岩石破裂损伤的耗能规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2304-2308.
Hu Liuqing, Li Xibing, Zhao Fujun. Study on energy consumption in fracture and damage of rock induced by impact loadings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(S2): 2304-2308.
- [20] 刘军忠, 许金余, 吕晓聪, 等. 冲击压缩荷载下角闪岩的动态力学性能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2113-2120.
LIU Junzhong, XU Jinyu, LYU Xiaocong, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of amphibolites under impact compressive loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2113-2120.
- [21] 李夕兵, 宫凤强, 高科, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251-260.
LI Xibing, GONG Fengqiang, GAO Ke, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 251-260.
- [22] 汪斌, 朱杰兵, 严鹏, 等. 大理岩损伤强度的识别及基于损伤控制的参数演化规律 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3968-3973.
WANG Bin, ZHU Jiebing, YAN Peng, et al. Damage strength determination of marble and its parameters evaluation based on damage control test [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(S2): 3968-3973.
- [23] FREW D J, FORRESTAL M J, CHEN W. Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar [J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(1): 93-106.
- [24] 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 岩石 SHPB 测试中试样恒应变率变形的加载条件 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2445-2452.
ZHOU Zilong, LI Xibing, YAN Xiaoming. Loading condition for specimen deformation at constant strain rate in SHPB test of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(12): 2445-2452.
- [25] 蔚立元, 李光雷, 苏海健, 等. 高温后无烟煤静态压缩力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2712-2719.
YU Liyuan, LI Guanglei, SU Haijian, et al. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of anthracite after high temperature heating [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2712-2719.
- [26] 肖大武, 胡时胜. SHPB 实验试件横截面积不匹配效应的研究 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(1): 87-90. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)01-0087-04.
XIAO Dawu, HU Shisheng. Study of two-dimensional effect on SHPB experiment [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(1): 87-90. DOI: 10.11883/1001-1455(2007)01-0087-04.
- [27] 王礼立. 应力波基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 52-60.
- [28] ZHOU Y X, XIA K, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 49(1): 105-112.
- [29] 赵奎, 金解放, 王晓军, 等. 岩石声速与其损伤及声发射关系研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2105-2109.
ZHAO Kui, JIN Jiefang, WANG Xiaojun, et al. Study on rock damage and acoustic emission based on ultrasonic velocity test of rock specimen under uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2105-2109.
- [30] ZHANG Z X, KOU S Q, YU J, et al. Effects of loading rate on rock fracture [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000, 37(5): 745-762.
- [31] 洪亮. 冲击荷载下岩石强度及破碎吸能特征的尺寸效应研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.

Dynamic characteristics of marble damaged by cyclic loading

YU Liyuan^{1,2}, ZHU Zihan¹, MENG Qingbin¹, JING Hongwen¹, SU Haijian¹, HE Ming¹

(1. State key laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,
China University of Mining and technology, Xuzhou 221116, Jiangsu China;

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact,
Army University of Engineering, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract: The rock mass will bear the cyclic loading during the construction of underground engineering. Mechanical properties of the damaged rock mass under disturbance of cyclic loading are important for supporting capacity of the surrounding rock. Moreover, the disturbed rock mass is also potentially threatened by impact loads such as blasting. Therefore, it is necessary to investigate the re-bearing mechanical behavior of disturbing rock mass under cyclic loading. The cyclic loading experiments with four various maximum cyclic stress levels were carried out by using MTS 815 test system. The maximum cycling stresses are 80%, 85%, 90%, and 95% of uniaxial compressive strength respectively and the numbers of cycle are set to be 20, 40, 60 and 80 for each maximum cyclic stresses. The dynamic tests of the disturbed rock sample were conducted by using split Hopkinson pressure bar (SHPB). We analyzed the effects of maximum cyclic stress and the numbers of cycle on plastic strain and revealed the evolution law of dynamic strength and dynamic elastic modulus of marble with damage variable. The test results show that the plastic strain positively correlated with cycles, and the larger the maximum cycling stress, the more the cycles required to reach the stable plastic strain. The dynamic uniaxial compressive strength and dynamic elastic modulus decrease exponentially with the increase of the damage variable. The ratio of breakage energy divided into two stages and the critical point of damage variable is $D=0.343$. When $D<0.343$, the breakage energy ratio is stable at about 10%, and the value is about 13 J. When $D>0.343$, the ratio of breakage energy increases with the increase of damage variable. The findings of this research can provide guidelines for the selection of the mechanical parameters of the surrounding rock and the optimization of the support scheme.

Keywords: rock mechanics; cyclic loading; SHPB; damage variable; dynamic properties; energy

(责任编辑 曾月蓉)