

# 峰前卸荷损伤大理岩的动静力学特性试验研究

朱子涵<sup>1,2</sup>, 蔚立元<sup>1</sup>, 孟庆彬<sup>1</sup>, 靖洪文<sup>1</sup>, 苏海健<sup>1</sup>, 付安琪<sup>1,2</sup>

(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. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 深部巷(隧)道开挖将导致围岩卸荷损伤甚至破裂, 这类损伤破裂围岩还将承受后继采掘活动带来的静态扰动和动力冲击, 继续破裂甚至破坏失稳, 因此, 有必要开展损伤破裂围岩再承载力学行为的研究。首先开展 3 级围压(15, 25, 35 MPa)条件下的大理岩峰前卸荷试验, 每级围压分 4 个卸荷点, 共制备 72 个损伤破裂岩样; 然后, 分别采用 MTS815 试验机和分离式 Hopkinson 压杆对损伤岩样进行静、动态单轴压缩破坏试验。试验结果表明: 相同围压(或卸荷点)下, 岩样卸荷损伤变量与卸荷点(或围压)呈正相关关系; 卸荷损伤岩样的静、动态宏观力学参数均随损伤变量的增加而呈负指数函数衰减, 且脆性破坏特征趋于不明显。损伤变量小于其临界值  $D_c = 0.17$  时, 动态增强因子稳定在 1.5 左右, 动弹性模量快速下降而静弹性模量变化不显著; 损伤变量大于  $D_c$  时, 动态增强因子急剧增大, 而动、静态弹性模量则趋于一致。这种动静态的差异性是卸荷损伤效应和应变率效应复杂的耦合作用导致的。研究结论对深部巷(隧)道围岩力学参数的选取和支护方案的优化有一定借鉴意义。

**关键词:** 岩石力学; 峰前卸荷试验; 损伤破裂; 动静载; 力学特性

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)04 - 0747 - 10

## Experimental study on dynamic and static characteristics of marble considering pre-peak unloading damage

ZHU Zihan<sup>1,2</sup>, YU Liyuan<sup>1</sup>, MENG Qingbin<sup>1</sup>, JING Hongwen<sup>1</sup>, SU Haijian<sup>1</sup>, FU Anqi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** Excavation of tunnels under deep high stress environment will induce unloading damage or even cracking of surrounding rock and, then, the damaged surrounding rock will rupture or fail under static and dynamic loads caused by mining activities. Therefore, it is necessary to study the dynamic and static mechanical behavior of damaged surrounding rock. Pre-peak unloading tests on 72 damaged marble specimens were performed under three confining pressures of 15, 25 and 35 MPa with four unloading points respectively corresponding to 70%, 80%, 90% and 100% of each confining pressure, and then, static and dynamic uniaxial compression tests of the damaged samples were respectively carried out by MTS815 and split Hopkinson pressure bar(SHPB) test system. The test results show that the damage variable of the rock samples increases with increasing the unloading point/confining pressure under the same confining pressure/unloading point. The static and dynamic compressive strength and elastic modulus of the unloading damaged rock samples decrease with the damage variable in a

**收稿日期:** 2018 - 11 - 30; **修回日期:** 2019 - 01 - 15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51579239, 51704280, 51734009)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51579239, 51704280 and 51734009)

**作者简介:** 朱子涵(1996 - ), 男, 2017 年毕业于安徽理工大学城市地下空间工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学室内试验方面的研究工作。

E-mail: 1732273194@qq.com. 通讯作者: 蔚立元(1982 - ), 男, 博士, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工

作。E-mail: yuliyuan@cumt.edu.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1414

negative exponential function. When the damage variable is lower than the critical value  $D_c = 0.17$ , the dynamic enhancement factor keeps stable around 1.5. The dynamic elastic modulus decreases rapidly while the static elastic modulus does not change significantly. When the damage variable is greater than 0.17, the dynamic enhancement factor increases sharply while the dynamic and static elastic moduli tend to be the same. The dynamic and static differences are attributed to the complex coupling of unloading damage effect and strain rate effect. The findings of this research can provide a reference for the selection of the mechanical parameters of the surrounding rock and the optimization of the support scheme.

**Key words:** rock mechanics; pre-peak unloading; damage-fracture; dynamic and static loads; mechanical properties

## 1 引言

随着我国深部资源能源开采的日益增多<sup>[1]</sup>和西南山区交通、水利等基础设施建设发展<sup>[2]</sup>, 深部地下工程方兴未艾。深部高地应力环境下巷(隧)道开挖将诱发强烈的应力重分布, 导致围岩卸荷损伤甚至破裂。这类损伤破裂围岩在人工支护后还将承受毗邻采场或巷(隧)道采掘活动带来的静态扰动压力和动力冲击, 继续破裂乃至发生塌方冒顶<sup>[3]</sup>、劈裂片帮<sup>[4]</sup>及冲击地压<sup>[5]</sup>等灾害, 严重影响工程安全。因此, 开展开挖卸荷后损伤破裂岩体的静、动态力学行为研究十分必要。

针对岩石卸荷条件下的力学特性, 许多学者进行了细致的研究: 尤明庆和华安增<sup>[6]</sup>对大理岩进行卸围压试验, 分析了岩石强度与岩样弱化破坏间的关系, 以塑性变形量和本征强度统一研究了三轴压缩和卸围压 2 种力学过程; 邱士利等<sup>[7]</sup>进行了不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性, 试验研究得出随着卸围压速率的增大, 大理岩的极限承载强度不断提高; 周科平等<sup>[8]</sup>对卸荷后的大理岩岩样进行核磁共振测量, 得出大孔隙孔径不断增大, 数量不断增多, 对岩样的损伤程度起主导作用; M. Cai 等<sup>[9]</sup>用加载在岩石上的应力水平与岩石对应条件下峰值强度的比值来表征岩石的损伤程度, 得到岩石损伤演化规律; 张黎明等<sup>[10]</sup>对粉砂岩岩样进行了保持轴向变形不变的峰前、峰后卸围压试验, 对粉砂岩破坏特征、强度和变形特性进行了定性分析; 任建喜等<sup>[11]</sup>利用 CT 从细观上研究了卸围压过程中岩石损伤演化; 李天斌和王兰生<sup>[12]</sup>对卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征进行了试验研究; 刘建和李建朋<sup>[13]</sup>研究了砂岩卸荷过程中的变形特征、破坏形态、峰值强度与残余强度等参数演化特征。以上学者进行了大量的峰前、峰后卸围压试验, 对岩样卸荷过程中的宏观力学参数及破坏特征进行了详细分

析, 且从细观上揭示了卸荷过程中的损伤演化机制。

此外, 相关学者通过高温、冻融循环、干湿循环、饱水和化学腐蚀等手段对天然岩体进行不同程度的预损伤, 然后系统地研究损伤后岩体的力学特性。尹士兵等<sup>[14]</sup>研究了高温损伤后砂岩动态力学特性的变化规律。吴安杰等<sup>[15]</sup>对饱水泥质白云岩进行了不同冻融循环状态下的单轴压缩试验, 分析了应力-应变曲线变化特征以及抗压强度、峰值应变、弹性模量和泊松比的变化规律。王伟等<sup>[16]</sup>以锦屏水电站边坡大理岩为研究对象, 干湿循环处理后开展单轴和三轴压缩试验, 研究了其在不同干湿循环作用下强度、变形和破坏形式等力学特性。罗丹旋等<sup>[17]</sup>利用真三轴岩爆试验系统, 分析了不同饱水度下红色粗晶花岗岩岩爆破坏的强度与变形特征、破坏与弹射特征、声发射特性等, 探讨了岩石饱水度与岩爆弹射动能的定量关系以及水对岩爆的影响机制。李光雷等<sup>[18]</sup>研究了灰岩经化学腐蚀后的冲击动力学特性。

可见, 现有卸荷试验研究的主流思路为: 完整岩石岩样从天然初始状态加载到高应力状态后进行卸围压, 研究强卸荷作用导致的岩样横向变形、微裂纹萌生、扩展、贯通直至破坏的全过程及此过程中的静力学特性演化规律。而对于损伤后岩石力学性能的研究, 其岩石损伤的诱因主要局限于温度、湿度或化学腐蚀等环境因素。实际上, 深部高地应力下巷(隧)道开挖的强卸荷扰动将导致围岩的损伤劣化, 而开挖损伤区内的围岩作为承载体必将长期经受来自后继采掘活动的爆破冲击动荷载以及应力重分布静荷载, 继续损伤破裂甚至破坏失稳, 严重威胁深部地下工程的安全。虽然尤明庆等<sup>[19]</sup>利用卸载试验研究了卸载后损伤岩样纵波速度及静态力学参数的变化规律, 但目前对于这类卸荷损伤围岩体动、静态承载能力的系统研究还鲜有报道, 因此卸荷损伤岩体的再破坏力学行为研究十分有必要。

本文采用 MTS 815 电液伺服刚性试验机对大理

岩进行峰前卸围压试验以制备卸荷损伤岩样，然后分别利用液压伺服刚性试验机和分离式 Hopkinson 压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对损伤破裂岩样开展了单轴压缩条件下的破坏试验，以分析卸荷损伤对其静、动态力学行为的影响规律。

## 2 试验方案

### 2.1 岩样制备及总体方案

选取均质大理岩制备岩样，考虑到岩样卸荷损伤后还要采用 SHPB 装置进行动力学试验，圆柱形岩样的高径比定为 1 : 1，均为 50 mm。加工精度满足国际岩石力学学会的相关规定，并保持自然风干状态。

本文共制备大理岩试件 87 块，试验总体技术路线如图 1 所示。首先选取 9 个岩样(TS01~TS09)进行三级围压(15, 25, 35 MPa)下的三轴压缩试验，以获得特定围压下的抗压强度；然后，再进行特定围压下的卸荷试验，卸荷点为相应强度的 70%，80%，90%，100%(通过实时曲线峰值点确定峰值强度卸荷点)，累计 12 种工况，每种工况 6 块岩样，共得到卸荷损伤岩样 72 块(UC01~UC72)。最后，对损伤岩样进行单轴压缩破坏试验，每种工况下静、动态试验各 3 块岩样。此外，还有 6 块岩样(US01~US03 和 UD01~UD03)进行单轴压缩破坏试验，以获得天然状态无损伤岩样的静、动载单轴抗压强度。

验都采用 MTS815 试验机开展，见图 2(a)。加载阶段，先以 0.4 MPa/s 的加载速率加载至预定围压，然后以 0.003 mm/s 的速率加载轴压至卸荷点；卸载阶段，为了能获得仍有一定承载能力的损伤破裂岩样(下文统称为卸荷损伤岩样)，同时卸载轴压、围压，并保证围压卸载至 0 时轴压不低于单轴抗压强度的 60%，最后将轴压卸载至 0。常规三轴、峰前卸荷试验的典型曲线分别如图 3, 4 所示。



(a) MTS815 试验系统



(b) SHPB 动力学试验系统

图 2 MTS815, SHPB 试验系统  
Fig.2 MTS815 and SHPB test systems

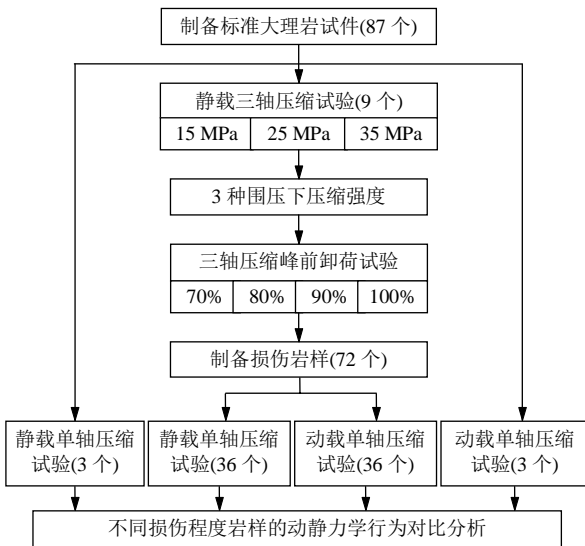


图 1 试验技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

### 2.2 卸荷损伤试验

静载三轴压缩试验(TS01~TS09)和峰前卸荷试

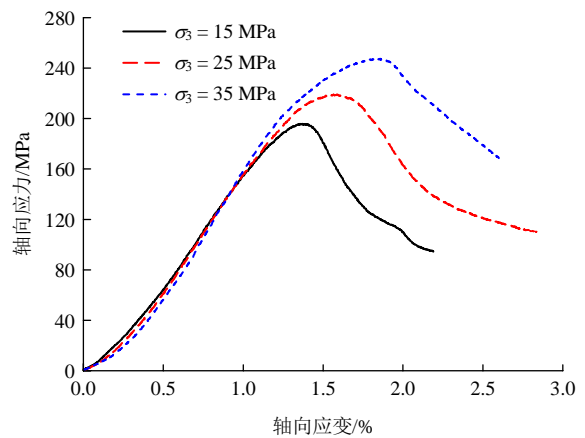


图 3 常规三轴压缩轴向应力 - 轴向应变曲线

Fig.3 Axial stress-strain curves under different confining pressures

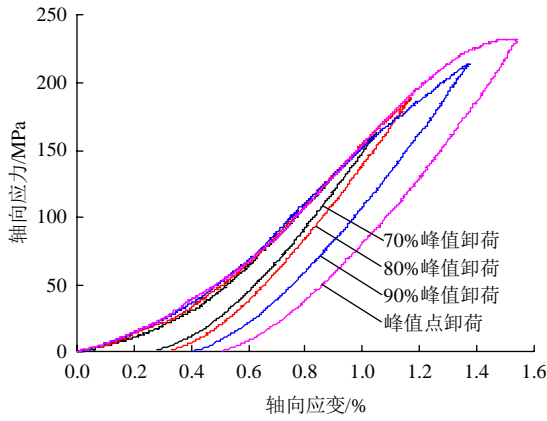


图4 峰前卸荷轴向应力 - 轴向应变曲线( $\sigma_3 = 35$  MPa)

Fig.4 Axial stress-strain curves under unloading( $\sigma_3 = 35$  MPa)

### 2.3 单轴压缩破坏试验

动载：采用 SHPB 试验系统进行动力学试验，见图 2(b)。该系统子弹、入射杆及透射杆的直径都为 75 mm，长度分别为 0.6，5 和 3 m。经调试，冲击气压设定为 0.14 MPa，子弹速度 4 m/s 左右。为消除矩形波加载带来的弥散效应，需进行入射波整形<sup>[20-21]</sup>，本次试验入射波波整形器选用直径 10 mm、厚 2 mm 的橡胶片<sup>[22]</sup>。利用灵敏度高达 120 的半导体应变片采集入射波、反射波及透射波，如图 5 所示。

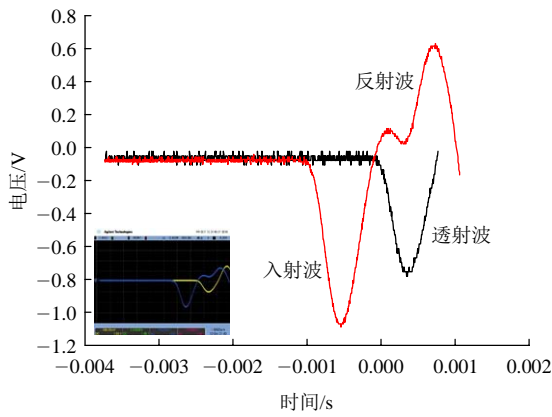


图5 SHPB 典型应力波波波形图

Fig.5 Typical stress waves for SHPB

静载：仍利用 MTS815 试验系统，加载方式为位移闭环控制，加载速率为 0.003 mm/s。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 损伤变量

本文损伤变量采用弹性模量法<sup>[23]</sup>进行计算，弹性模量法中弹性模量和应变参数反映岩样的自身性

质，可以较为准确地得到卸荷损伤岩样的损伤变量：

$$D = 1 - \left(1 - \frac{\epsilon^r}{\epsilon}\right) \frac{E^r}{E_0} \tag{1}$$

式中： $D$  为损伤变量， $\epsilon^r$  为残余应变， $\epsilon$  为总应变， $E^r$  为卸荷模量， $E_0$  为初始弹性模量。本文中弹性模量取值为 30%~70% 峰值强度段<sup>[24]</sup>。各参数的选取如图 6 所示。

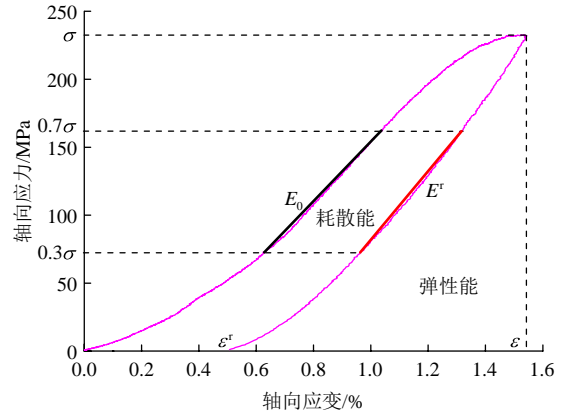


图6 参数取值示意图

Fig.6 Schematic diagram of parameter value

计算所得损伤变量详见表 1，损伤变量、残余应变与卸荷点关系如图 7，8 所示，其中，卸荷点为卸荷强度与峰值强度的比值。

表1 岩样损伤变量汇总

Table 1 Damage variables of samples

围压/ MPa	卸荷点 70%		卸荷点 80%		卸荷点 90%		卸荷点 100%	
	岩样 编号	损伤 变量	岩样 编号	损伤 变量	岩样 编号	损伤 变量	岩样 编号	损伤 变量
15	UC01	0.064	UC07	0.087	UC13	0.105	UC19	0.184
	UC02	0.056	UC08	0.073	UC14	0.114	UC20	0.144
	UC03	0.061	UC09	0.083	UC15	0.118	UC21	0.127
	UC04	0.058	UC10	0.091	UC16	0.136	UC22	0.201
	UC05	0.052	UC11	0.092	UC17	0.111	UC23	0.155
	UC06	0.068	UC12	0.076	UC18	0.125	UC24	0.173
25	UC25	0.074	UC31	0.095	UC37	0.111	UC43	0.219
	UC26	0.069	UC32	0.103	UC38	0.178	UC44	0.191
	UC27	0.092	UC33	0.117	UC39	0.172	UC45	0.176
	UC28	0.058	UC34	0.097	UC40	0.109	UC46	0.232
	UC29	0.067	UC35	0.095	UC41	0.140	UC47	0.195
	UC30	0.079	UC36	0.111	UC42	0.145	UC48	0.214
35	UC49	0.070	UC55	0.137	UC61	0.199	UC67	0.310
	UC50	0.082	UC56	0.137	UC62	0.177	UC68	0.298
	UC51	0.082	UC57	0.113	UC63	0.170	UC69	0.281
	UC52	0.169	UC58	0.161	UC64	0.162	UC70	0.123
	UC53	0.093	UC59	0.107	UC65	0.140	UC71	0.244
	UC54	0.108	UC60	0.167	UC66	0.214	UC72	0.262

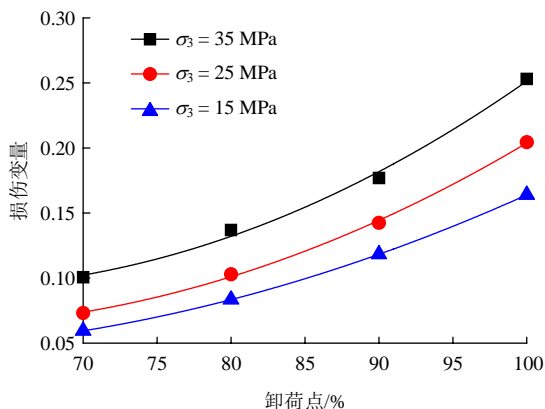


图 7 损伤变量(均值)与卸荷点关系曲线

Fig.7 Relationship between the average damage variable and the unloading point

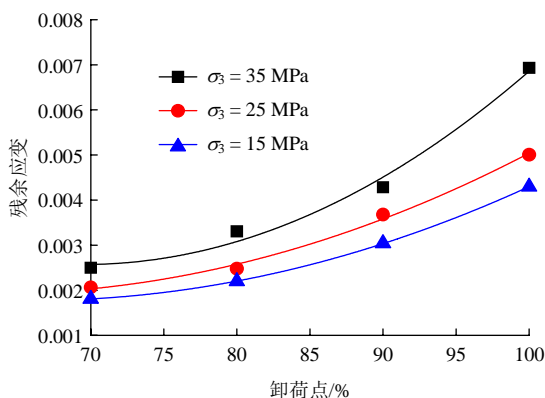


图 8 残余应变(均值)与卸荷点关系曲线

Fig.8 Relationship between the average residual strain and the unloading point

由图 7 可知，同一围压下，损伤变量与卸荷点呈正相关，以 35 MPa 为例，随卸荷点的增加，损伤变量依次为 0.108, 0.137, 0.177 和 0.253。同一卸荷点时，损伤变量与围压呈正相关，以 90%卸荷点为例，随围压增加，损伤变量依次为 0.118, 0.143 和 0.177。与图 8 对比，可见随卸荷点及围压变化，残余应变和损伤变量的变化趋势基本完全一致，由此验证了本文选择的损伤变量的可靠性。

### 3.2 静态单轴压缩破坏试验

卸荷损伤岩样的静载单轴抗压强度、弹性模量详见表 2。为了对比，在表 2 最后附加了天然未损伤岩样的相关参数，其单轴应力 - 应变曲线如图 9 所示。静态力学参数与损伤变量关系如图 10, 11 所示。由图 10 和 11 可知，随损伤变量增加，卸荷损伤岩样的单轴抗压强度和弹性模量均呈负指数函数衰减。试验中，天然或损伤较小的岩样破坏时发生爆裂现象并伴随着较大的声响，具有明显的脆性破坏特征；而损伤变量较大时，脆性特征不明显。

表 2 静态单轴压缩破坏试验数据汇总

Table 2 Uniaxial compression test data

岩样编号	损伤变量	静态强度/MPa	弹性模量/GPa
UC10		70	9.20
UC11	0.084	66	6.83
UC12		62	7.84
UC16		54	5.42
UC17	0.118	59	8.40
UC18		61	6.25
UC22		39	5.93
UC23	0.164	45	6.42
UC24		43	5.27
UC28		67	8.08
UC29	0.073	78	10.62
UC30		70	9.53
UC34		42	7.82
UC35	0.103	45	7.53
UC36		55	10.30
UC40		60	7.44
UC41	0.143	64	5.98
UC42		68	8.14
UC46		27	5.20
UC47	0.205	32	5.72
UC48		33	6.04
UC52		64	9.90
UC53	0.101	59	8.04
UC54		61	7.33
UC58		46	5.15
UC59	0.137	50	8.71
UC60		55	6.42
UC64		30	4.78
UC65	0.177	36	5.20
UC66		28	3.95
UC70		10	2.32
UC71	0.253	17	3.84
UC72		21	3.06
US01		78	11.25
US02	0	89	12.82
US03		84	13.41

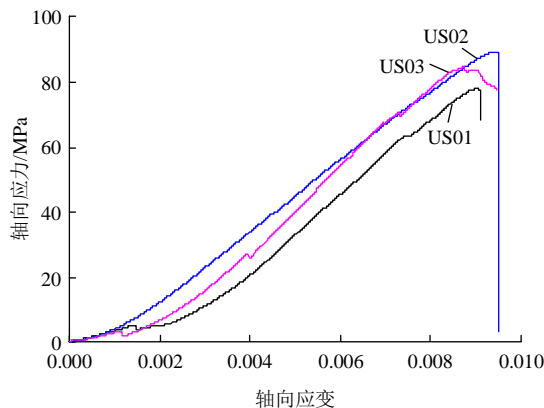


图 9 天然大理岩单轴压缩曲线

Fig.9 Uniaxial compression curve of natural marble



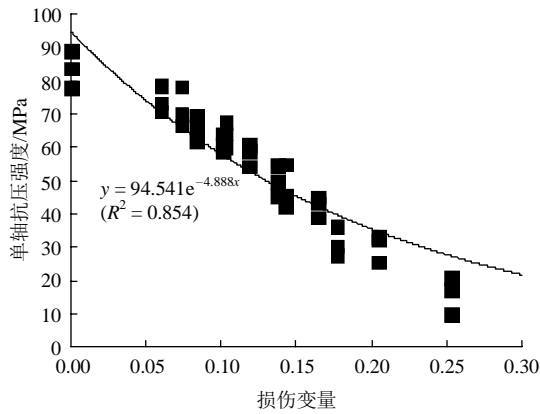


图 10 静态抗压强度与损伤变量关系曲线

Fig.10 Relationship between the uniaxial compressive strength and the damage variable

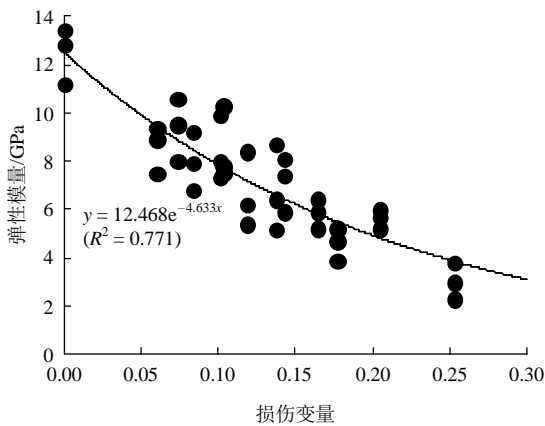


图 11 静态弹性模量与损伤变量关系曲线

Fig.11 Relationship between the elastic modulus and the damage variable

### 3.3 动态单轴压缩破坏试验

采用三波法<sup>[25]</sup>计算大理岩岩样的动态压缩应力-应变关系，典型曲线如图 12 所示。卸荷损伤岩样的动载单轴抗压强度、弹性模量结果详见表 3。为了对比，在表 3 最后附加了天然未损伤岩样的相关参数。宏观力学参数与损伤变量的关系如图 13 和 14 所示。

由图 12 可知，不同损伤程度岩样的动态应力-应变曲线有明显的区别，随岩样损伤变量增大，其峰值强度减小而破坏应变增加。究其原因，损伤变量是岩样内由卸荷诱发的微裂隙发育程度的宏观表征，损伤变量越大则微裂隙越发育，必然导致动态抗压强度的降低和破坏前变形量的增加。

由图 13, 14 可知，动态单轴抗压强度及弹性模量随着损伤变量的增加而降低，呈负指数函数形式衰减。这是因为损伤变量越大，则卸荷导致的岩样内微裂隙越发育，从而导致损伤岩样的动态承载能力和抗变形能力逐渐劣化。

表 3 动态单轴压缩破坏试验数据汇总

Table 3 Dynamic uniaxial compression test data

岩样编号	损伤变量	动态强度/MPa	动弹性模量/GPa
UC07		99	30.22
UC08	0.084	101	36.61
UC09		95	38.83
UC13		95	31.83
UC14	0.118	85	25.59
UC15		85	26.78
UC19		70	24.43
UC20	0.164	65	22.23
UC21		70	22.29
UC25		105	41.25
UC26	0.073	100	42.80
UC27		110	39.37
UC31		85	27.74
UC32	0.103	85	29.21
UC33		90	31.00
UC37		74	24.01
UC38	0.143	76	25.95
UC39		78	27.39
UC43		65	12.31
UC44	0.205	62	11.89
UC45		60	8.14
UC49		93	29.61
UC50	0.101	95	26.86
UC51		95	31.74
UC55		87	25.84
UC56	0.137	82	21.11
UC57		74	19.16
UC61		76	15.79
UC62	0.177	68	16.06
UC63		72	15.54
UC67		46	6.49
UC68	0.253	50	7.35
UC69		48	6.96
UD01		135	49.95
UD02	0	137	48.44
UD03		142	50.86

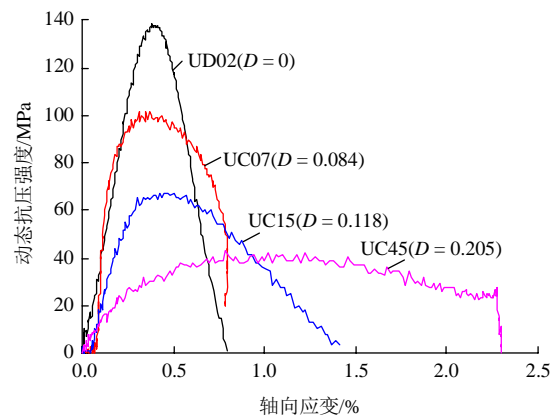


图 12 动态压缩应力-应变曲线

Fig.12 Dynamic compression stress-strain curves

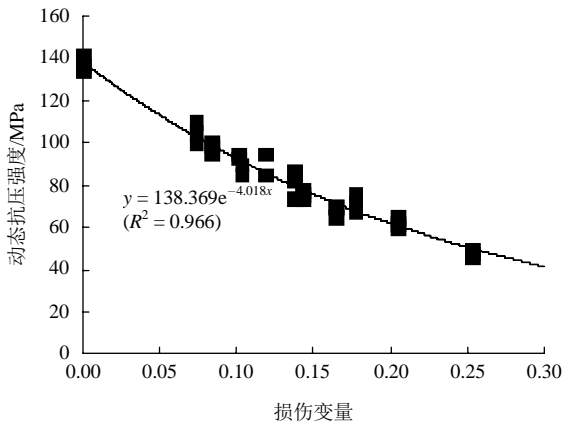


图 13 动态抗压强度与损伤变量关系曲线

Fig.13 Relationship between the dynamic compressive strength and the damage variable

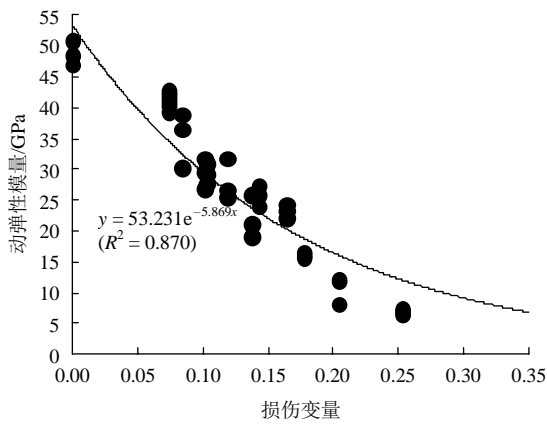


图 14 动弹性模量与损伤变量关系曲线

Fig.14 Relationship between the dynamic elastic modulus and the damage variable

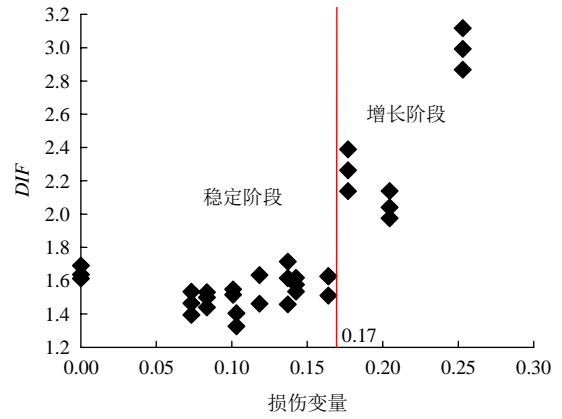


图 15 DIF 与损伤变量关系曲线

Fig.15 Relationship between DIF and the damage variable

动、静态弹性模量随损伤变量的变化对比情况如图 16 所示。

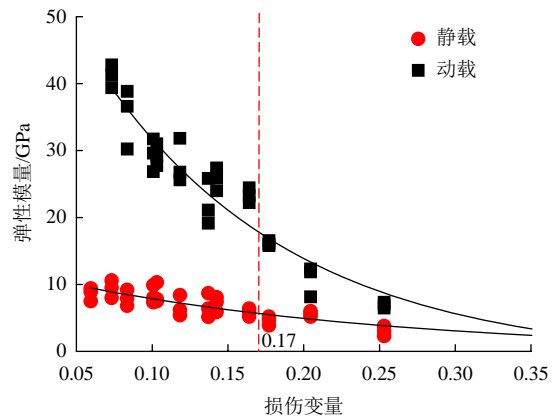


图 16 动静弹性模量随损伤变量变化曲线

Fig.16 Relationship between the elastic modulus and the damage variable

## 4 动静力学特性对比分析

### 4.1 试验结果对比分析

一般采用动态增强因子  $DIF$  来衡量岩石材料动、静态单轴抗压强度间的关系,  $DIF$  如下式<sup>[26]</sup>:

$$DIF = \frac{\sigma_d}{\sigma} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_d$  为动态抗压强度,  $\sigma$  为静态抗压强度。本文计算结果如图 15 所示。

由图 15 可见,  $DIF$  与损伤变量关系可以分为稳定和增长 2 个阶段。稳定阶段,  $DIF$  基本不受损伤变量影响, 而增长阶段  $DIF$  则随着损伤变量的增加快速增长。这是由于损伤变量较小(0~0.17)时, 动静态单轴压缩强度随损伤变量增加的降低速率大致相等; 而损伤变量较大(>0.17)时, 动态试验对卸荷损伤的敏感程度弱于静态试验, 即动态抗压强度的随损伤变量增加的降低速率小于静态抗压强度的降低速率。

从图 16 可见, 相较于静态条件, 动弹性模量随损伤变量增加而降低的趋势大大明显, 尤其是损伤变量  $D < 0.17$  时, 也即动态抗变形能力对卸荷损伤变量的敏感程度远大于静态条件。

图 17 展示了卸荷损伤岩样的动静载破坏形态。可见, 随损伤变量增加, 无论是静载还是动载, 岩样的破碎程度明显增加, 碎块数目增加而块度减小。这是因为当卸荷损伤岩样继续承受外部荷载时, 内部裂纹会继续扩展贯通而破坏失稳, 而损伤变量越大则表明原损伤岩样内部裂隙越多且发育越充分, 其破坏程度必然增加。另外, 相同损伤程度下, 动载破坏的破碎程度明显高于静载条件, 说明卸荷损伤岩样单轴压缩破坏的应变率效应比较显著。

### 4.2 讨论

节 4.1 从强度、变形及破坏模式的角度分析了动、静态力学行为随卸荷损伤变量的演化规律, 提

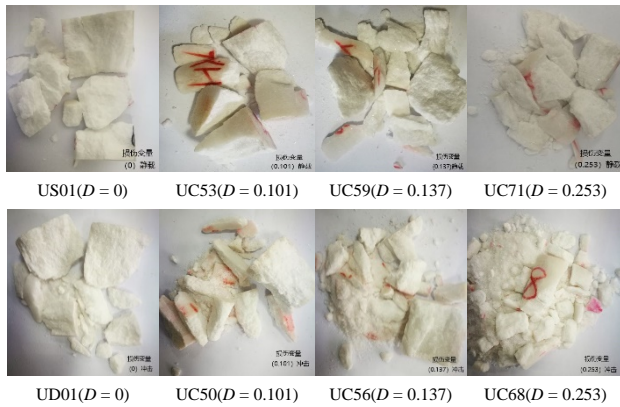


图 17 卸荷损伤岩样的动静载破坏形态

Fig.17 Dynamic and static failure modes of marble samples with different damage degrees

出了临界损伤变量  $D_c = 0.17$ 。临界损伤变量将岩样的动、静态力学参数的对比关系分为 2 个较明显的阶段：损伤变量较小时，动态增强因子  $DIF$  在 1.5 左右上下波动，动弹性模量快速下降而静弹性模量变化不显著；损伤变量大于 0.17 时， $DIF$  急剧增加，也即动态抗压强度的降低速率显著小于静载条件，而动静弹性模量则趋于一致。这应该与卸荷损伤岩样的内部裂隙发育特征及其力学行为对应变率的敏感程度相关。

众所周知，岩石受载变形直至破坏的过程必然伴随着能量的积聚、耗散和释放，由能量守恒定律，假设此物理过程中与外界没有热交换，则有如下关系<sup>[27]</sup>：

$$U = U^e + U^d \quad (3)$$

式中： $U$  为外界对岩样所做的功，即输入能； $U^e$  为加载过程中储存在岩样内部的能量，即弹性应变能，并在卸荷阶段释放； $U^d$  为加载中耗散掉的能量，耗散能主要用于岩石微裂纹的萌生、扩展以及内部摩擦，这也必然导致不可恢复的残余应变，详见图 6。由图 4 和 7 可知，同一围压下，卸荷点越大，卸荷损伤岩样的损伤变量越大而其耗散能也越大，则其内部裂隙也越发育。另外，由卸荷损伤岩样制备的力学试验过程可知，卸荷导致的内部裂隙优势发展方向与主应力方向(轴向)平行。

损伤变量较小时，岩样完整性较好，无论是动载试验还是静载试验，内部微裂隙在岩样破坏过程中都起次要作用。而当岩样损伤程度较高时，其内部裂隙数量较多，甚至可形成贯通的裂隙网络。此时，若进行静载破坏试验，加载时间较长，在此过程中损伤岩样由于受载而内部应力调整、转移，并沿着其损伤阶段已发育的主导裂隙面继续扩展，裂

隙在岩样破坏中占据主导作用；而在冲击条件下，加载时间极短，应力来不及在损伤破裂岩样内部调整转移，更多的是将可以作为轴向承载主体的较大块体进行进一步的破碎，裂隙仍处于从属地位。所以，卸荷损伤岩样的静态承载能力的降低必然比冲击情况下更加明显，且随着损伤程度的加剧而愈加显著。这也可以从图 17 中动静载条件下岩样的破坏程度对照得到验证。

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。为便于对比，图 18 给出了与图 12 中损伤变量相同岩样的静态单轴压缩应力 - 应变曲线。

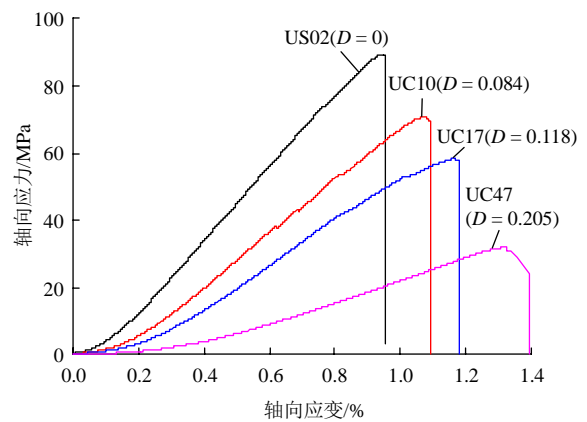


图 18 静态单轴压缩应力 - 应变曲线

Fig.18 Stress-strain curves of samples under axial static loading

对比可知，当损伤变量为 0 时，动态破坏应变(0.5%左右)小于静态条件(0.95%左右)，而当损伤变量高达 0.205 时，动态破坏应变(2.3%左右)却明显大于静态对应值(1.39%左右)。动态破坏应变随损伤变量的增大速率远大于静载条件，必然导致对应动弹性模量的急剧下降。

卸荷损伤大理岩的动、静态力学行为的差异性是由卸荷损伤效应和应变率效应复杂的耦合作用导致的。不同损伤程度岩样在动静态加载破坏过程中的微观机制，如内部微裂纹发育的时空特征、晶体破坏和晶间结构破坏所占的比例等，仍需要进一步深入的研究。

## 5 结 论

本文对大理岩进行了 3 级围压、4 个卸荷点的峰前卸荷试验，得到了 72 块不同损伤程度的大理岩试样，并对卸荷损伤岩样及天然无损伤岩样开展了



常规静态单轴压缩和 SHPB 冲击动力学试验, 得到了如下主要结论:

(1) 同一围压(同一卸荷点)条件下, 岩样残余应变和损伤变量均与卸荷点(围压)呈正相关关系。

(2) 卸荷损伤大理岩静、动态单轴抗压强度及弹性模量均随损伤变量增加而呈负指数函数衰减, 且脆性破坏特征趋于不明显。

(3) 临界损伤变量  $D_c = 0.17$  将大理岩的动、静态力学特性的对比关系分为 2 个阶段: 损伤变量较小时, 动态增强因子稳定在 1.5 左右, 动弹性模量快速下降而静弹性模量变化不显著; 损伤变量大于  $D_c$  时, 动态增强因子急剧增大, 而动静弹性模量则趋于一致。

(4) 卸荷损伤大理岩的动、静态力学行为的差异性是由卸荷损伤效应和应变率效应复杂的耦合作用导致的, 仍需要进一步深入的研究。

**致谢** 陆军军官学院姜锡权教授对卸荷损伤大理岩岩样的 SHPB 试验给予了悉心指导与热情帮助, 在此致以衷心的感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))
- [2] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1 999 - 2 009.(ZHANG Chunsheng, CHEN Xiangrong, HOU Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at JINPING II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1 999 - 2 009.(in Chinese))
- [3] 宁宇. 大采高综采煤壁片帮冒顶机理与控制技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 50 - 52.(NING Yu. Mechanism and control technique of the rib spalling in fully mechanized mining face with great mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 50 - 52.(in Chinese))
- [4] 朱维申, 杨为民, 项吕, 等. 大型洞室边墙松弛劈裂区的室内和现场研究及反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1 310 - 1 317.(ZHU Weishen, YANG Weimin, XIANG Lu, et al. Laboratory and field study of splitting failure on side wall of large-scale cavern and feedback analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1 310 - 1 317.(in Chinese))
- [5] 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): 1 844 - 1 851.(PAN Yishan, LI Zhonghua, ZHANG Mengtao. Distribution, type, mechanism and prevention of rockburst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 844 - 1 851.(in Chinese))
- [6] 尤明庆, 华安增. 岩石岩样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24 - 29.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Triaxial confining depressure test of rock sample[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 24 - 29.(in Chinese))
- [7] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1 807 - 1 817.(QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1 807 - 1 817.(in Chinese))
- [8] 周科平, 胡振襄, 李杰林, 等. 基于核磁共振技术的大理岩卸荷损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2): 3 523 - 3 530.(ZHOU Keping, HU Zhenxiang, LI Jielin, et al. Study of marble damage evolution laws under unloading condition based on nuclear magnetic resonance technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.2): 3 523 - 3 530.(in Chinese))
- [9] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 833 - 847.
- [10] 张黎明, 王在泉, 宋全锋, 等. 粉砂岩卸荷破坏全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 5 043 - 5 047.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SONG Quanfeng, et al. Experimental study on the total failure course of silt sand under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 5 043 - 5 047.(in Chinese))
- [11] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬, 等. 岩石卸荷损伤演化机制 CT 实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 697 - 701.(REN Jianxi, GE Xiurun, PU Yibin, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 697 - 701.(in Chinese))
- [12] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321 - 327.(LI Tianbin, WANG Lansheng. An experimental study on the deformation and failure features of a basalt under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 321 - 327.(in Chinese))

- [13] 刘建, 李建朋. 砂岩高应力峰前卸围压试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 473 - 479.(LIU Jian, LI Jianpeng. Experimental research on sandstone pre-peak unloading process under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 473 - 479.(in Chinese))
- [14] 尹土兵, 李夕兵, 王斌, 等. 高温后砂岩动态压缩条件下力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 777 - 784.(YIN Tubing, LI Xibing, WANG Bin, et al. Mechanical properties of sandstones after high temperature under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 777 - 784.(in Chinese))
- [15] 吴安杰, 邓建华, 顾乡, 等. 冻融循环作用下泥质白云岩力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3 065 - 3 072.(WU Anjie, DENG Jianhua, GU Xiang, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of argillaceous dolomite under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(11): 3 065 - 3 072.(in Chinese))
- [16] 王伟, 龚传根, 朱鹏辉, 等. 大理岩干湿循环力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1 175 - 1 184.(WANG Wei, GONG Chuangen, ZHU Penghui, et al. Experimental study on mechanical properties of marble under hydraulic weathering coupling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10): 1 175 - 1 184.(in Chinese))
- [17] 罗丹旎, 苏国韶, 何保焜. 不同饱和度花岗岩的真三轴岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2019, DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2432.(LUO Danni, SU Guoshao, HE Baoyu. True triaxial test on rockburst of granites with different water saturation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2432.(in Chinese))
- [18] 李光雷, 蔚立元, 苏海健, 等. 化学腐蚀灰岩 SHPB 冲击动力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2 075 - 2 083.(LI Guanglei, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Dynamic properties of corroded limestone based on SHPB[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2 075 - 2 083.(in Chinese))
- [19] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石岩样的力学特性与纵波速度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 458 - 467.(YOU Mingqing, SU Chengdong, LI Xiaoshuang. Study on relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 458 - 467.(in Chinese))
- [20] 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.
- [21] 周子龙, 李夕兵, 岩小明. 岩石 SHPB 测试中岩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): 2 445 - 2 452.(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): 2 445 - 2 452.(in Chinese))
- [22] 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): 2 712 - 2 719.(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): 2 712 - 2 719.(in Chinese))
- [23] 鞠杨, 谢和平. 基于应变等效性假说的损伤定义的适用条件[J]. 应用力学学报, 1998, 15(1): 43 - 49.(JU Yang, XIE Heping. A variable condition of the damage description based on hypothesis of strain equivalence[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1998, 15(1): 43 - 49.(in Chinese))
- [24] MENG Q B, ZHANG M W, HAN L J, et al. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(4): 969 - 988.
- [25] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 52 - 60.(WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 52 - 60.(in Chinese))
- [26] 宫凤强, 王进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1 586 - 1 595.(GONG Fengqiang, WANG Jin, LI Xibing. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1 586 - 1 595.(in Chinese))
- [27] 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): 3 003 - 3 010.(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): 3 003 - 3 010.(in Chinese))