

循环加卸载下岩样变形与强度特征试验

苏承东¹, 杨圣奇²

(1. 河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454159; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 基于在伺服试验机上对不同晶粒大理岩样进行单轴循环加卸载试验, 研究了岩石的变形与强度特征. 结果表明, 岩石材料具有明显的记忆性, 岩样循环加卸载过程的外包络线与单调加载的全程应力-应变曲线相吻合, 加卸载路径不能完全重复, 应力与应变之间不存在一一对应关系, 岩样的线性变形并不意味着弹性变形. 循环加卸载对岩石力学参数的影响不是很大, 其偏差在正常离散范围以内. 整个循环加卸载过程中, 岩样的杨氏模量及能耗并非常数. 弹性阶段加卸载的平均杨氏模量基本一致, 能够表征岩石材料的变形特性, 且在弹性阶段能耗较少, 而在裂隙压密、屈服和破坏阶段耗能较多. 软弱岩样在加卸载过程中需要消耗更多的能量.

关键词 岩石力学 循环加载 杨氏模量 强度特征 变形特征

中图分类号 :TU458 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)06-0667-05

岩样单轴压缩试验是进行岩石力学参数测定的基本方法, 岩样在加载过程中的全程应力应变曲线含有丰富的信息, 是研究岩石力学特性、确定其本构关系的物理基础, 也是评价岩石工程稳定性的重要依据之一. 在地下工程实践中, 经常遇到循环加、卸载荷的作用, 如地质构造运动、隧道洞室开挖与支护、桥墩基岩、放煤支架升降对顶煤的破碎、工程施工以及次生应力场作用等, 实际上都是岩体反复加卸载的过程. 岩石变形和强度特征与所受的应力状态以及加载历史密切相关, 因而研究循环加卸载条件下岩样的强度和变形特征具有一定的工程实践价值. 近年来, 随着岩石力学的迅速发展以及岩石工程的建设需要, 岩石的加卸载试验研究已在一定程度上得到发展, 岩石的强度和变形特征与应力状态及应力路径关系等方面也取得一些成果^[1-2]. 文献[3]的研究表明岩石峰后循环加载有助于能量逐步释放, 缓解岩石发生冲击倾向和危险程度; 文献[4, 5]的研究表明岩石杨氏模量随循环次数的增大而发生变化, 杨氏模量变化幅度主要在第二次循环加载之前, 卸载岩样放置一段时间后再次加载, 杨氏模量有所降低, 继续循环加载又回到放置前水平, 说明岩石材料本身具有明显的粘弹特性. 但目前对岩石峰值前后不同应力水平下循环加卸载试验过程中, 岩样的强度和变形特征以及能量耗散等尚不够清楚. 有鉴于此, 本文通过在 RMT-150B 岩石力学伺服试验系统上对不同晶粒大理岩样进行单轴循环加卸载试验, 分析在整个循环加卸载状态下岩样的强度和变形特征以及能量耗散特征, 从而为地下工程稳定性分析时不同加卸载应力状态下岩石力学参数的选取提供一定的参考依据.

1 岩性特征及试验方法

试验大理岩采自河南省南阳市南召县, 均为白色, 主要成分为方解石、白云石与菱镁矿, 依结晶颗粒的大小分为粗晶、中晶、细晶 3 种, 粒径平均分别为 5 mm, 1.5 mm 和 0.7 mm 左右, 按顺序将 3 种岩样分别用 A, B, C 表示, 岩块宏观上比较均质没有明显的缺陷. 笔者曾经用上述几种大理岩进行过晶粒及岩样尺寸对冲击倾向性^[6]、单轴压缩试验^[7-8]、三轴压缩试验^[9-10]、声学特征^[11]以及采用单一试样确定岩石强度参数^[12]等方面的试验研究. 本文对上述大理石各取一块, 分别加工成 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体, 每种晶粒各加工 8 个岩样, 为保证试验结果的真实性、可比性, 试验前对岩样的外观仔细观察, 确定没有明显的节理及裂纹等弱面, 并对岩样的纵波波速和密度进行了测定, 去掉波速和密度相差较大的岩样后, 试验所用粗、中、细晶粒大理岩的密度基本相同, 平均密度为 $2\,704 \text{ kg/m}^3$, 平均波速分别为 $4\,193 \text{ m/s}$, $5\,230 \text{ m/s}$ 和 $5\,034 \text{ m/s}$, 离散性系数均小于

3%,确保试验岩样之间宏观上没有明显的差异.然后在伺服试验机上对大理岩样分别进行循环加卸载试验,试验过程采用计算机自动控制,轴向载荷采用 1 000 kN 的传感器测量,纵向和横向变形分别采用 5 mm 和 2.5 mm 的位移传感器测量,试验数据由微机自动采集,实时显示,具体试验程序如下.试验程序:(a) A,B,C 3 种岩样进行常规单轴压缩试验,每种晶粒各做 4 个岩样,整个试验过程均采用位移控制加载,加载位移速率为 2×10^{-4} mm/s;(b) A,B,C 3 种岩样进行单轴循环加卸载压缩试验,每种晶粒各做 1 个岩样,加卸载位移速率均为 2×10^{-4} mm/s,加卸载试验过程中大约以破坏载荷的 1/4 ~ 1/5 进行分级,每个岩样峰值前加卸载 4 ~ 5 个循环,峰值后加卸载 1 ~ 5 个循环不等.

2 岩样试验的应力-应变全程曲线

单轴压缩试验是最简单的也是最先采用的用于确定岩石强度与变形等力学参数的方法,单轴压缩的应力-应变全程曲线含有丰富的信息,它反映岩样在整个压缩过程中的强度和变形特征,不同加载方式下岩样的强度和变形特征有所差异.

图 1 给出 A,B,C 3 种不同晶粒大理岩单轴循环加卸载的全程应力-应变曲线.由图 1 可见,岩石材料表现出明显的记忆性,岩样循环加、卸载过程的外包络线几乎与单调加载的全程应力-应变曲线相吻合,但岩样加、卸载路径不能完全重复,加、卸载的应力-应变曲线之间始终具有滞后环,也就是说应力和应变并不存在一一对应关系,这表明岩样的线性变形并不意味着弹性变形^[13].对于相对比较致密的中晶 B 和细晶 C 大理岩来说,应力较低时的加、卸载,岩样加载曲线几乎重合,而卸载曲线明显存在着差异,最终应力降至零时应变也基本完全恢复,没有出现明显残余应变,应力较高时,应力-应变曲线并不能完全回到原点,产生一定的残余应变.当加载应力达到极限应力的 70% 时进入屈服阶段,岩样内部强度较低的材料首先屈服弱化,随着应力水平的增加,屈服范围不断扩大,从而导致不可逆塑性变形逐渐增大.但对于颗粒较大的粗晶 A 大理岩来说,颗粒间裂隙较多,卸载过程中岩样压密的裂隙没有及时张开,因而岩样循环加载过程中始终存在一定的残余应变.当过峰值强度后岩样整体屈服弱化过程中卸载后再加载,承载能力有所降低.岩样屈服弱化破

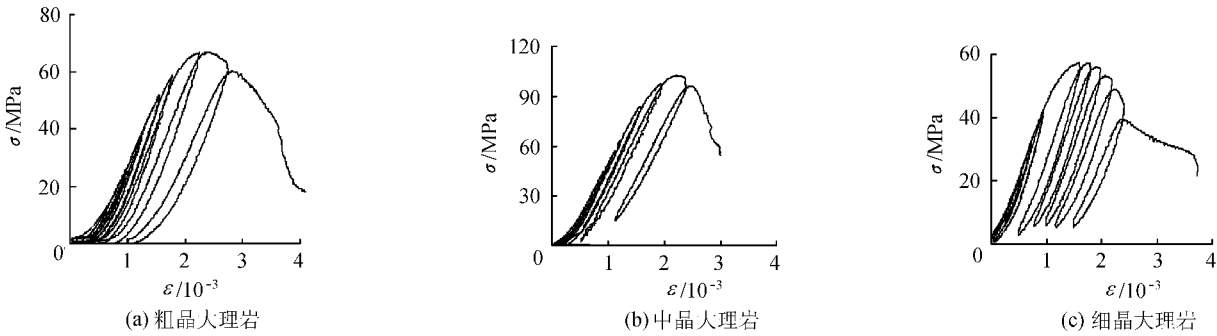


图 1 不同晶粒大理岩单轴循环加载应力-应变全程曲线

坏后仍然具有一定的承载能力,这时的承载力主要是靠裂隙之间的摩擦滑移来承载,表明裂隙在压应力作用下闭合后 不仅能承载正应力,而且也可以通过摩擦承载剪应力.随着循环加载应力水平及循环次数的增加,岩样弹性恢复应变量逐渐减小.

大理岩样典型的单轴循环加卸载下的试验结果如图 2 所示,从图 2 可以看出岩样在整个压缩过程的轴向、环向以及体积变形特征.在加卸载初期压密阶段轴向应变变化明显,环向应变很小,而体积应变明显增加,这主要是由于岩样内部裂隙发生闭合所致,卸载闭合的裂隙没有及时张开,因而岩样体积变形恢复很小.在弹性阶段,岩石应力与应变基本成线性关系,而且轴向与环向应变随着应力成线性增加,但体积应变增加缓慢,表明岩样在该阶段塑性变形很小,岩样变形主要是矿物颗粒的弹性变形,卸载后矿物颗粒的

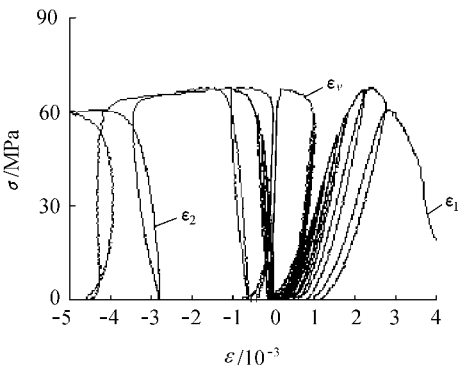


图 2 岩样典型的单轴循环加卸载全程曲线
Fig.2 Typical complete curve of rock specimens under uniaxial cyclic loading and unloading

弹性恢复使得岩样体积基本不变,当应力增加到岩样极限承载能力的 70% 左右时进入屈服阶段,岩样内部强度较低的材料逐步屈服,内部裂隙不断产生、发展和贯通,轴向应力-应变曲线偏离直线,环向应变迅速增加,体积应变由增加转为减小;当应力达到岩样的极限能力进入破坏阶段,环向应变急剧增大,环向与轴向应变比值大于 0.5,可以理解为岩样在该阶段轴向与环向变形的变化主要是由于岩样内部新裂隙沿主控破裂面的滑移和张开的综合作用所致,最终使岩样体积应变等于零,而后超过岩样原体积产生扩容现象,表明岩样裂纹发展汇合和贯通的结果,这源于岩样内部沿主控破裂面产生宏观滑移的结构效应。

为便于对比分析,表 1 给出了这 3 种晶粒大理岩两种不同加载方式的试验结果, L , V , E , E_{50} 和 σ_0 分别为岩样长度、平均波速、平均模量(即应力-纵向应变曲线上近似直线部分的斜率)、割线模量(原点与应力-应变曲线 50% 抗压强度点连线的斜率)和单轴抗压强度,需要说明岩样循环加卸载的平均模量是全程应力-应变曲线外包络线近似直线部分的斜率, $\bar{x}$ 和 ξ 分别为各参数的平均值及循环加载各参数与平均值的相对偏差。从表 1 可以看出,岩样循环加卸载对岩石力学参数影响不大,相对偏差都在 10% 以内,属于正常的离散范围。

3 岩样循环加载的变形特征

杨氏模量是岩石变形特征的重要参数之一,平均杨氏模量能够表征岩石材料的变形特征,岩样循环加卸载试验过程中,每次加卸载的路径不能完全重复,应力与应变不存在一一对应关系,也就是说加卸载过程的平均杨氏模量并不完全相同,在整个循环加卸载过程岩样的平均杨氏模量并非常数,各个阶段的平均杨氏模量存在着差异。图 3 为不同晶粒大理岩的不同应力水平循环加载杨氏模量试验结果,图 3 中杨氏模量表示每个加卸载过程中应力-应变曲线近似直线段的斜率。由图 3 可见,岩样在循环加卸载过程中各个阶段的平均杨氏模量存在着差异。轴向应力大约在极限承载能力的 40% 以前,随着循环应力水平的增加,加载和卸载时平均杨氏模量均有不同程度的增加;而后直到岩样屈服前加载平均杨氏模量稍有增加,但卸载平均杨氏模量基本保持不变,两者的差值不断减小。随着应力水平的继续增大,岩样进入屈服破坏阶段,加卸载的平均杨氏模量随着屈服应力的降低均有下降趋势。这可以理解为,在裂隙压密阶段,随着应力水平的不断增加,岩石材料内部原有微裂隙逐渐闭合,岩样的平均杨氏模量不断增加,而后进入弹性变形阶段岩样本身没有明显的塑性变形,只有组成岩石材料矿物颗粒的弹性变形,使得加卸载的平均杨氏模量基本保持恒定,其值大致相当,表明弹性阶段平均杨氏模量是岩石材料的参数,能够表征岩石材料变形特性。但当岩样进入屈服和破坏阶段,随着材料

表 1 岩样单轴压缩试验力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock specimens under uniaxial compression

岩样及结果	加载方式	L/mm	$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	E/GPa	E_{50}/GPa	σ_0/MPa
A1	单调	102.7	4 192	43.43	25.33	64.96
A2	单调	102.3	4 210	42.63	24.08	63.92
A3	单调	101.9	4 228	39.90	21.12	63.27
A4	单调	103.4	4 126	41.28	20.04	64.96
A5	循环	101.4	4 208	43.82	20.77	66.90
$\bar{x}$		102.3	4 193	42.21	22.27	64.80
ξ		0.01	0.40	3.81	6.72	3.24
B1	单调	101.6	4 980	56.79	35.98	99.12
B2	单调	102.5	5 311	63.70	37.95	93.54
B3	单调	101.2	5 244	63.96	38.30	91.33
B4	单调	101.9	5 392	63.59	40.86	88.34
B5	循环	101.7	5 225	69.21	39.59	101.70
$\bar{x}$		101.8	5 230	63.45	38.54	94.81
ξ		0	0.10	9.08	2.73	7.27
C1	单调	102.0	5 030	40.00	25.17	53.91
C2	单调	101.7	5 189	41.02	25.10	57.55
C3	单调	101.6	4 980	38.65	23.75	50.40
C4	单调	101.5	4 975	39.45	23.85	50.66
C5	循环	101.8	4 998	44.18	27.27	57.29
$\bar{x}$		101.7	5 034	40.66	25.03	53.96
ξ		0	0.72	8.65	8.95	6.17

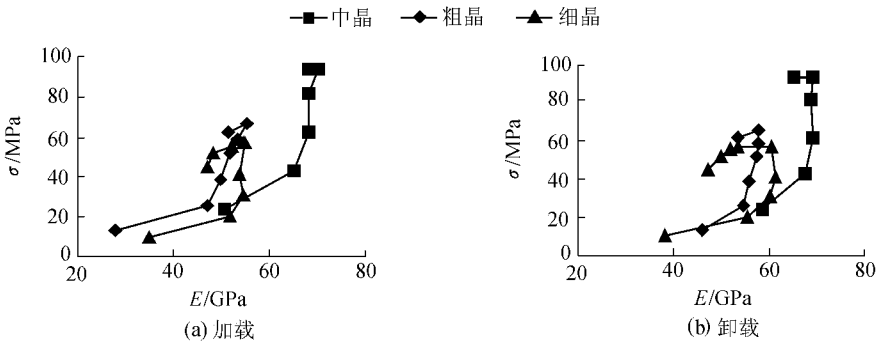


图 3 不同晶粒大理岩循环加载杨氏模量试验结果

Fig.3 Experimental results of Young's modulus of marble specimens with different grain sizes under cyclic loading

内部新裂隙的不断产生、扩展与汇合以及宏观滑移的结构效应,最终使得加卸载的平均杨氏模量有所下降.

4 岩样循环加载的能量特征

岩样在加、卸载过程中内部裂隙的闭合、材料的屈服、破坏、损伤、断裂以及裂隙面的宏观滑移摩擦实质上就是能量耗散的过程.岩样在循环加载试验实际是试验机和岩样之间相互反复做功的过程,从图 1 可以看出,岩石加、卸载曲线不能完全重合,卸载曲线总是滞后于加载曲线,两者相互做功并不相等,表明在此过程中存在能量损失.试验机和岩样相互做功 W 可用下式表示:

$$W = \int F du = \frac{1}{4} \pi D^2 L \int \sigma d\varepsilon$$

(1)

式中: D, L ——岩样的直径和长度.岩样加载是试验机对岩样做功的过程,若把岩样加载过程中载荷-变形曲线与变形轴所围成的面积称之加载功 W_1 ,而岩样卸载过程则是岩样储存的弹性能释放对试验机做功的过程,同样把岩样卸载过程中载荷-变形曲线与变形轴所围成的面积称之卸载功 W_2 ,前者往往大于后者,形成加、卸载滞回环,滞回环的面积为两者的差值,称之为塑性功 ΔW_{1-2} ,这部分塑性功可以理解为岩样在加、卸载过程中以内部裂隙的闭合、材料的屈服、破坏、损伤、断裂以及裂隙面的滑移摩擦等形式而消耗掉.

图 4 为 3 种不同晶粒大理岩不同应力 σ 水平条件下循环加卸载时塑性功与加载功($\Delta W_{1-2}/W_1$)比值的关系.由图 4 可见,塑性功与加载功的比值随着应力水平不同而发生变化,同时由于岩样存在晶粒的差异,塑性功与加载功之比值也会有所不同,但就能量变化总体趋势而言,3 种晶粒大理岩都大致经历一个先减小、基本稳定、再增加的非线性变化过程.在应力较低时,塑性功与加载功之比值相对较大,当应力增加到极限承载能力的 35% ~ 70% 之间,两者比值基本保持不变,约为 25% 左右,随着应力进一步增大进入屈服阶段,两者比值急剧增大,最终能够达到 55% 以上.两者比值随不同应力水平变化过程可理解为:岩样在加、卸载初期也就是压密阶段,岩样内部原有的裂隙的闭合和滑移过程,产生较大的塑性变形,该过程需要消耗较大的能量.随着应力水平的提高进入弹性阶段,岩样本身没有明显的塑性变形,其变形主要是组成岩石材料矿物颗粒的弹性变形和少量的裂隙滑移变形,因此消耗的能量相对较少.随着应力水平进一步提高进入屈服阶段,岩样内部强度较低的材料首先逐步屈服破坏,新的微裂隙不断产生、发展、汇合以及滑移,岩样承载结构得到破坏,承载能力达到极限,而后进入破坏阶段,新的裂隙还会不断产生、发展、汇合以及最终出现宏观滑移,岩样承载能力不断降低,在屈服阶段、破坏阶段过程中岩石材料经历屈服、破坏、损伤、断裂以及裂隙的宏观滑移摩擦需要消耗较多的能量.而且从图 4 还可以看出,组成岩石的颗粒不同,消耗的能量关系也有所不同,相对比较致密的中晶大理岩消耗的能量要比严重风化的细晶大理岩明显偏少,严重风化的细晶大理岩在临近破坏时其比值高达 0.62,也就是说试验机提供的能量主要消耗在此阶段岩样材料进一步破坏、损伤、断裂以及裂隙的宏观滑移摩擦的结构效应上,可见软弱岩样在加卸载过程中需要消耗更多的能量.

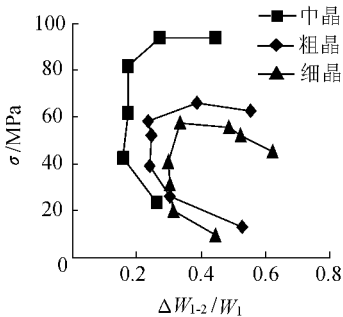


图 4 不同晶粒大理岩循环加载塑性功与加载功的关系

Fig.4 Relationship between plastic work and loading work of marble specimens with different grain sizes under uniaxial cyclic loading

5 结 论

- a. 岩石材料表现出明显的记忆性,岩石循环加卸载过程的外包络线几乎与单调加载的全程应力-应变曲线相吻合,岩样加卸载的路径不能完全重合,应力与应变之间不存在一一对应关系,这表明岩样的线性变形并不意味着弹性变形.岩样循环加卸载对岩石力学参数的影响不大,其偏差在正常的离散范围以内.
- b. 岩样屈服破坏后仍具有承载能力,当过峰值强度后岩样整体屈服弱化过程中卸载再加载,承载能力有所降低,表明岩样屈服弱化破坏后靠裂隙之间的摩擦仍然具有一定的承载能力.
- c. 在岩样整个循环加载过程中,各个阶段加卸载杨氏模量有所不同,弹性变形阶段加卸载杨氏模量基本保持恒定,其值大致相当,是岩石材料参数,能够表征岩石材料的变形特性.工程设计中选择岩石参数时,

采用弹性阶段平均杨氏模量比较合理,这样能够减小初期加载非线性变形对岩样平均模量的影响程度。

d. 在岩样整个循环加载过程中,各个阶段能量的消耗有所不同,岩石在弹性阶段耗能较少,而裂隙压密和屈服破坏阶段耗能较多,这主要是由于岩石材料中原有裂隙的压密和岩石材料的屈服、破坏、损伤、断裂以及宏观滑移摩擦的结构效应,软弱岩样在加卸载过程中消耗更多的能量。

参考文献:

- [1] 尤明庆. 复杂路径下岩样的强度和变形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 23-28.
- [2] 尤明庆, 苏承东. 岩石的非均质与杨氏模量的确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 757-761.
- [3] 臧士勇. 循环加载条件下的岩石全过程曲线[J]. 昆明工学院学报, 1994, 19(5): 28-32.
- [4] 许江, 大久保诚介, 鲜学福. 循环载荷对三城目安山岩变形特性的影响[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(6): 38-41.
- [5] 许江, 冯陶, 鲜学福, 等. 低应力水平下循环载荷对岩石杨氏模量影响的研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2001, 16(1): 14-16.
- [6] 苏承东. 大理岩颗粒及试样尺寸对冲击倾向影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3750-3753.
- [7] 尤明庆, 苏承东. 大理岩试样的长度对单轴压缩试验的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3754-3760.
- [8] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112-118.
- [9] 尤明庆. 两种晶粒大理岩的力学性质研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 91-96.
- [10] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 475-478.
- [11] 杨圣奇, 张学民, 苏承东. 岩块声学特性的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(6): 772-775.
- [12] 苏承东, 尤明庆. 单一试样确定大理岩和砂岩强度参数的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3055-3058.
- [13] 尤明庆, 苏承东, 徐涛. 岩石试样的加载卸载过程及杨氏模量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 588-592.

Experimental study on deformation and strength characteristics of rock specimens under cyclic loading and unloading

SU Cheng-dong¹, YANG Sheng-q²

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454159, China ;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Uniaxial cyclic loading and unloading experiments were performed on marble specimens with different grain sizes by use of servo-controlled testing machine to investigate the deformation and strength properties of rocks. Some conclusions are drawn as follows : the rock material shows distinct memorability ; the envelope curve for rock specimens under cyclic loading and unloading accords well with the complete stress-strain curve under monotonic loading ; the loading and unloading paths cannot be completely repeated, and one-to-one correspondence relationship does not exist between stress and strain, therefore, the linearity of rock specimens does not mean the elasticity ; cyclic loading and unloading has little influence on mechanical parameters of rock specimens, and the deviations of the parameters are within the normal range of dispersion ; the Young's modulus of rock specimens and energy dissipation vary in the whole process of loading and unloading ; the average values of Young's modulus of rock specimens during loading and unloading processes are almost the same at the elastic stage, which can reflect the deformation property of rock material, while the energy dissipation at this stage is less than that at fissure closure, yielding, and failure stages ; the energy dissipation of weak rock specimens is great during the loading and unloading processes.

Key words : rock mechanics ; cyclic loading ; Young's modulus ; strength property ; deformation property