

# 岩石卸荷破坏特征与岩爆效应

王贤能 黄润秋

(成都理工学院工程地质研究所 成都 610059)

**提 要** 岩爆是在地下洞室开挖卸荷过程中发生的,岩爆特征与岩石卸荷破坏特征密切相关。本文设计了模拟洞室开挖过程的三轴卸荷实验,探讨了岩石在不同卸荷速率条件下的变形破坏特征及其岩爆效应。

**关键词** 三轴卸荷实验 卸荷速率 岩爆效应

卸荷变形破坏现象在自然界中广泛存在。在岩质边坡中,卸荷将引起临空面附近岩体内部应力重分布,造成局部应力集中效应,并且在卸荷回弹变形过程中,还会因差异回弹而在岩体中形成一个被约束的残余应力体系。岩体在卸荷过程中的变形与破坏正是由这种应力变化引起的。在张应力集中带发展成拉裂面;在平行于临空面的压应力集中带发展而成平行于临空面的压致拉裂面或剪切破裂面<sup>[1]</sup>。卸荷回弹同样可以在岩体中形成残余剪应力,并导致剪切破裂。高地应力区钻进过程中所见到的岩芯饼裂的形成就是这种机制。我国长江葛洲坝大型机巢开挖过程中所观测到的沿平缓软弱夹层发生的向临空方向的剪切滑移,就是一种非常典型的差异卸荷回弹现象<sup>[1]</sup>。王兰生教授提出的“浅生时效构造”,也是一种与卸荷有直接关系的新概念<sup>[2]</sup>。孔德坊教授在研究成都粘土中的裂隙成因时,认为卸荷作用是产生这种裂隙的根本原因<sup>[3]</sup>。

处在地应力地区的地下工程开挖过程中发生的岩爆,也是一种典型的卸荷破坏现象。过去对岩爆的岩石力学试验研究一般都采用加荷试验方式,这与岩爆发生时的应力过程并不吻合,只有采用卸荷试验方式才符合实际。

由于试验条件限制和工程问题的复杂性,卸荷试验的实现比较困难。近十余年来,随着岩石力学的深入发展和工程实际的需要,我国逐步开展了岩体卸荷试验研究工作<sup>[4]</sup>。本文选取西(安)(安)康铁路秦岭深埋隧道的混合花岗岩、含绿色矿物混合花岗岩、攀枝花石灰矿的灰岩,探讨了岩石在两种卸荷速率条件下的变形破坏特征以及与岩爆的关系。

## 1 模拟洞室开挖卸荷过程的三轴试验设计

地下洞室在开挖过程中,围岩应力发生重分布。径向应力( $\sigma_r$ )随着向自由表面接近逐渐减小至洞壁处变为零;而切向应力( $\sigma_\theta$ )的变化有不同的情况,在一些部位越接近自由表面切向应力越大,并于洞壁处达到最高值(即产生压应力集中现象),在另一些部位,越接近自由表面切向应力越小,有时在洞壁处甚至出现拉应力(即产生拉应力集中现象)。由此看来,地下洞室的开挖在围岩中引起强烈的应力分异现象,使围岩应力差越接近自由

\* 国家杰出青年科学基金(编号 49525204)和教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助研究。

收稿日期: 1998-03-15, 改回日期: 1998-03-29。

表面越大,至洞壁处达最大值,所以,围岩的破坏必将从洞室周边开始。

假定围岩径向应力  $\sigma_r$  为最小主应力  $\sigma_3$ ,切向应力  $\sigma_\theta$  为最大主应力  $\sigma_1$ ,则在洞室开挖卸荷过程中,最小主应力  $\sigma_3$  一直减小;最大主应力  $\sigma_1$  的变化有三种情况,可能增大,可能减小,也可能不变。相比之下,当最大应力  $\sigma_1$  增大,而最小应力  $\sigma_3$  减小时,其应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  最容易达到岩体的破坏极限状态。基于此,这里将模拟岩体在这类应力路径下的卸荷破坏特征。本次试验是在成都理工学院地质灾害防治与地质环境保护国家专业试验室 MTS 岩石试验机上完成的。试验中选取两种卸荷控制方式:位移控制 (LVDT 控制) 和荷载控制 (FORCE 控制)。

位移控制 (LVDT 控制) 方式的过程是:对岩样称施加静水压力,然后使轴压略微升高(视岩石的强度而定);保持试验系统(由岩样和两端压头组成)的轴向位移不变(即 LVDT 控制),逐渐卸除围压,直至破坏。其典型的应力路径如图 1 所示。图中, S 点为静水压力状态, SU 为加荷阶段; U 点为卸荷开始点, UF 段为卸荷阶段; F 点为卸荷破坏点。

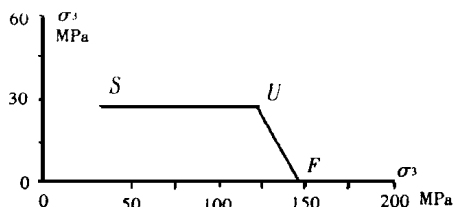


图 1 LVDT 控制方式的应力路径

Fig. 1 Stress path of LVDT control type for unloading process

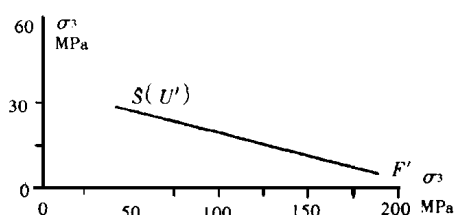


图 2 FORCE 控制方式的应力路径

Fig. 2 Stress path of FORCE control type for unloading process

荷载控制 (FORCE 控制) 方式的过程是:对岩样先施加静水压力,然后使轴压略微升高(视岩石的强度而定);保持试验系统的荷载不变(即 FORCE 控制),逐渐卸除围压,直至破坏。其典型的应力路径如图 2 所示。图中, S' 点为静水压力状态, S'U' 为加荷阶段; U' 点为卸荷开始点, U'F' 段为卸荷阶段; F' 点为卸荷破坏点。

两种卸荷方式的应力路径很相似,不同之处在于卸荷过程中围压  $\sigma_3$  的减少量  $\Delta \sigma_3$  与轴压  $\sigma_1$  的增加量  $\Delta \sigma_1$  的比率不同。位移控制 (LVDT 控制) 方式的比值  $\Delta \sigma_3 / \Delta \sigma_1$  为 1.13, 荷载控制 (FORCE 控制) 方式的  $\Delta \sigma_3 / \Delta \sigma_1$  为 0.14, 即位移控制方式的卸荷速率比荷载控制方式的卸荷速率快。

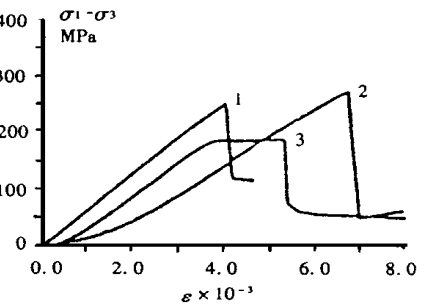
## 2 岩石的卸荷过程中的变形破坏特征

本次试验选取以下三种岩石:秦岭隧道工程的混合花岗岩、含绿色矿物混合花岗岩和攀枝花石灰矿的石灰岩。其中秦岭隧道混合花岗岩取自隧道进口端曾经发生过岩爆位置的岩石。为便于对比,每种岩石分别做了加荷试验。试验结果如图 3~5 和表 1 所示。图 4 为位移控制 (LVDT 控制) 方式卸荷试验曲线,图 5 为荷载控制 (FORCE 控制) 方式卸荷试验曲线。

从图 3 中可以看出,岩石在位移控制 (LVDT 控制) 方式下卸荷,其加荷段与卸荷段的变形特征明显不同(图中 U 点为卸荷开始点),加荷段的斜率明显比卸荷段的斜率大。

即岩石在加荷过程中的弹性模量比卸荷过程的弹性模量大(如表 1所示). 攀矿石灰岩加荷段的弹性模量为 41.63GPa, 而卸荷段的弹性模量为 40.73GPa. 与加荷试验相比, 位移控制(LVDT控制)方式下岩石卸荷破坏时的应力差明显减小(如表 1所示). 攀矿石灰岩加荷试验破坏时的应力差为 251. MPa, 而卸荷破坏时的应力差为 115. 62M Pa; 秦岭隧道混合花岗岩加荷试验破坏时的应力差为 273. 87M Pa, 而卸荷破坏时的应力差 155. 57M Pa. 这说明, 岩石在卸荷过程中其强度明显降低.

图 3岩石加荷试验曲线与 5卸荷试验曲线(荷载控制)相比, 同类岩石在卸荷过程中的变形量增大, 弹性模量降低(如表 1所示). 秦岭隧道混合花岗岩卸荷弹性模量为 44. 88GPa(图 5a所示), 而相应的加荷弹性模量为 53. 48GPa.

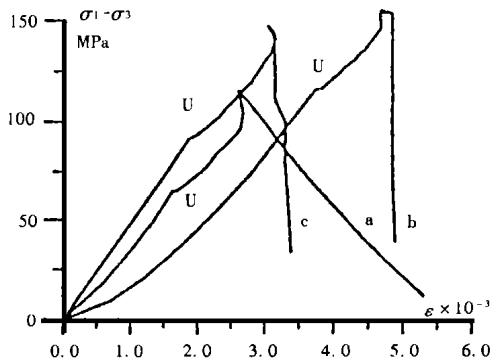


(1)灰岩 (2)混合花岗岩

(3)含绿色矿物混合花岗岩

图 3 岩石加荷试验曲线

Fig. 3 The strain-stress curves of rock sample under loading conditions



(a)石灰岩; (b)混合花岗岩;

(c)含绿色矿物混合花岗岩

图 4 岩石卸荷试验曲线(LVDT控制)

Fig. 4 Test curves of rock sample under unloading condition controlled by LVDT type

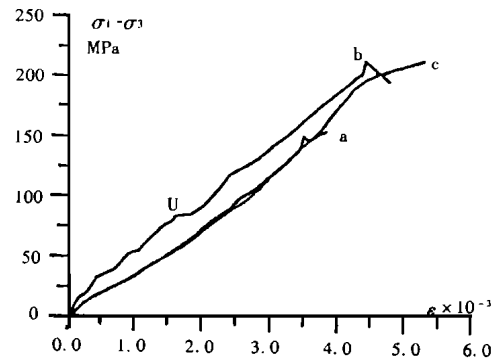
(a)石灰岩 ( $c_1 = 30.53\text{M Pa}$ ,  $c_3 = 30\text{M Pa}$ ), (b)石灰岩( $c_1 = 38.98\text{M Pa}$ ,  $c_3 = 30\text{M Pa}$ ), (c)混合花岗岩

图 5 岩石卸荷试验曲线(FORCE控制)

Fig. 5 Test curves of rock sample under unloading condition controlled by FORCE type

从表 1可以看出, 岩石卸荷速度越快, 其强度越低. 位移控制(LVDT控制)方式围压减小量与轴压增加量的比值为 1.13, 而荷载控制(FORCE控制)方式围压减小量与轴压增加量的比值仅为 0.14, 因此, 位移控制卸荷方式下岩石的强度将比荷载控制卸荷方式下岩石的强度低. 攀矿石灰岩, 位移控制方式卸荷破坏时的应力差为 115. 62M Pa(破坏时的围压为 2.43M Pa), 而荷载控制方式卸荷破坏时的应力差为 214. 40M Pa(破坏时的围压为 9.90M Pa). 秦岭隧道混合花岗岩, 位移控制方式卸荷破坏时的应力差为 155. 57M Pa(破坏时的围压为 5.41M Pa), 而荷载控制方式卸荷破坏时的应力差为 214. 30M Pa(破坏时的围压为 0.63M Pa). 这表明, 在地下工程的施工开挖过程中, 可以通过调整施工速度, 控制围岩的位移来减缓或降低岩爆的发生.

表 1 岩石力学试验结果表

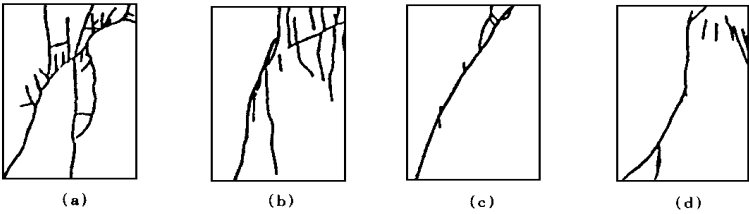
Table 1 Results of mechanical test of rock sample under loading and unloading conditions

岩性	应力控制方式	卸荷前应力状态		破坏时的应力状态及破坏特征					弹性模量	
		轴压	围压	轴压	围压	应力差	破裂角	破坏性质	加荷阶段	卸荷阶段
		M Pa	M Pa	M Pa	M Pa	$e_1 - e_3$	$U(^{\circ})$		G Pa	G Pa
攀矿灰岩	加荷实验	—	—	261.54	10	251.34	18	剪切破坏	67.05	—
	卸荷 LVDT控制	38.97	30	118.05	2.43	115.62	6	张性破坏	41.63	36.18
	卸荷 FORCE控制	38.97	30	226.66	12.26	214.40	20	剪切破坏	—	46.05
	卸荷 FORCE控制	30.53	30	165.41	9.97	155.44	15	剪切破坏	—	44.82
秦岭隧道混 合花岗岩	加荷实验	—	—	283.37	10	273.87	19	剪切破坏	53.48	—
	卸荷 LVDT控制	45.47	30	160.98	5.41	155.57	14	剪张复合型	42.85	40.73
	卸荷 FORCE控制	30.53	30	214.93	0.63	24.80	6	剪张复合型	—	44.88
	加荷实验	—	—	206.70	10	196.70	19	剪切破坏	51.13	—
含绿色矿物 混合花岗岩	卸荷 LVDT控制	42.22	30	148.24	0.76	147.48	11	张剪复合型	49.90	42.59

3 岩石卸荷破坏与岩爆效应

岩石在加荷破坏(具有一定围压)时容易发生剪切破坏,破裂角  $U$ (与最大主应力的夹角)较大;而卸荷破坏(若围压较低)时,容易发生剪张复合型破坏,其破裂角  $U$ 较小(如表 1所示)。

图 6为卸荷破坏迹线素描图。图中(a)(b)为攀矿石灰岩和秦岭隧道混合花岗岩在位移控制(LVDT控制)方式下卸荷破坏迹线;(c)(d)为石灰岩和混合花岗岩在荷载控制(FORCE控制)下卸荷破坏迹线。从图中可以看出,当卸荷破坏



a)攀矿灰岩, LVDT控制卸荷,张性破坏 ( $e_1= 118.05\text{M Pa}$ ,  $e_3= 2.43\text{M Pa}$ )  
b)秦岭隧道混合花岗岩, LVDT控制卸荷,剪张性破坏 ( $e_1= 160.98\text{M Pa}$ ,  $e_3= 5.41\text{M Pa}$ )  
c)攀矿灰岩, FORCE控制卸荷,剪切破坏 ( $e_1= 226.66\text{M Pa}$ ,  $e_3= 12.26\text{M Pa}$ )  
d)秦岭隧道混合花岗岩, FORCE控制卸荷,张剪性破坏 ( $e_1= 214.93\text{M Pa}$ ,  $e_3= 0.63\text{M Pa}$ )

图 6 岩石卸荷破坏迹线

Fig. 6 Failure characters of rock samples under unloading conditions

发生时的围压较低时, 则其破坏特征以张性或张剪复合型(图 6a b d); 若卸荷破坏发生时围压较高, 则其破坏特征以剪切破坏为主(图 6c)。

地下硐室在开挖卸荷过程中, 硐室周边围岩的侧压被卸除, 应力发生重分布。当调整后的应力状态达到岩体极限状态时, 岩体发生破坏。此处发生的岩体破坏应当是张性破坏或剪张复合型破坏。处在高地应力区的地下硐室开挖过程快速卸荷, 形成一系列平行于洞壁连通性较差的张裂隙, 这些张裂隙将围岩分割成板状, 甚至薄板状。这种板状破裂进一步发育, 向硐室突然溃决破坏, 从而导致岩爆的发生。

谭以安博士对天生桥二级水电站的岩爆断面做了电镜扫描(SEM)分析<sup>[5]</sup>, 断面有张性破坏, 也有剪切破坏。张性破坏的 SEM 形貌特征为沿晶粒拉花、穿晶拉花等; 剪切破坏的 SEM 形貌特征为沿晶擦花、切晶擦花及擦阶擦花, 这说明岩爆属于张性、剪切复合破

坏,与岩石卸荷试验结果相符.

## 4 结 论

岩石在卸荷条件下的变形破坏特征与在加荷条件下的变形破坏特征有很大的差异. 在卸荷条件下,岩石的弹性模量比加荷条件下的弹性模量小,破坏时的强度也随卸荷速率增大而明显降低,多呈张性、张剪性破坏,这表明,可以通过调整施工开挖的速度来控制或减缓岩爆的发生.

岩爆是在地下洞室开挖卸荷过程中发生的,其特征与岩石的变形破坏特征密切相关,岩爆的破坏也多呈张性、张剪性. 本文在探讨岩石卸荷破坏特征与岩爆效应方面仅做了定性分析,而深入研究岩石卸荷破坏理论及岩爆发生准则并应用于实际工程则是一个重要的研究课题.

## 参 考 文 献

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社,1981. 79~ 85.
- [2] 王兰生,赵其华,李天斌. 浅生时效构造与人类工程. 北京:地质出版社,1991. 3~ 19.
- [3] 孔德坊. 裂隙性粘土. 北京:地质出版社,1995. 1~ 4.
- [4] 吴 刚. 岩体在加荷卸荷条件下破坏效应对比分析. 岩土力学. 1997, 18(2). 13~ 16.
- [5] 谭以安. 岩爆形成机理研究. 水文地质与工程地质, 1989, 16(1), 34~ 38.

# ANALYSIS OF DEFORMATION AND FAILURE FEATURES CHARACTERISTICS OF ROCK UNDER UNLOADING CONDITIONS AND THEIR EFFECTS ON ROCK BURST

Wang Xianneng Huang Runqiu

(*Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059*)

## Abstract

There exists great difference of the deformation and failure characteristics between rock samples under loading and unloading conditions. In this paper, the triaxial test is designed to simulate the excavation of tunnel, and triaxial tests under loading and unloading conditions about three kinds of rock (migmatitic granite, migmatitic granite containing green mineral and limestone) have been done. It shows that the elastic modulus under unloading conditions is less than that under loading conditions, and the strength of rock sample descends with the developing of unloading ratio, and the failure format or pattern is tensile type or tensile-shear composite type. Rock burst occurs under the unloading conditions during the excavation of tunnel, its failure format is also tensile type or tensile-shear composite type, which is proved in the field.

**Key words** triaxial test under unloading conditions, unloading ratio, rock burst effects