

卸荷状态下岩爆分析综述及展望

崔栋梁 李夕兵 叶洲元

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

【摘要】 岩爆是在高地应力区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。在回顾用卸荷岩石力学研究岩爆历史的基础上分别从试验研究、理论研究方面提出了当前卸荷状态下岩爆研究中存在的问题, 并对今后的发展提出了一些看法。

【关键词】 岩爆效应; 三轴卸荷试验; 卸荷状态

【中图分类号】 TD 324

Development on the Analysis of Rockburst Under Unloading Conditions and Its Prospect

Cui Dongliang Li Xibing Ye Zhouyuan

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083 China)

【Abstract】 Rockburst is met under the unloading conditions during the excavation of underground cavity in high geostress areas whose characteristic relate closely with the characteristic of rock breakage in unloading conditions. On the base of reviewing current status of unloading rock mass mechanics for rockburst, the main problem are presented from experimental research and theoretical investigation. Some opinions are brought forward.

【Key Words】 rockburst effects; triaxial test under unloading conditions; unloading condition

0 引言

高地应力条件下隧道等地下工程洞室开挖过程中发生的岩爆是当前面临的一个新问题, 尤其在采矿工程中是一种非常严重的自然灾害^[1]。岩爆可能造成施工人员伤亡、毁坏施工设备、延缓施工进度, 导致施工综合成本增加^[2]。岩爆发生的充分必要条件是岩体本身储存有大量的弹性能^[3], 而岩体的开挖实质上是岩体的地应力释放的过程。开挖岩体应力的释放导致岩体应力的重新调整, 这一应力的调整导致岩体原始应力场变化很大, 某些地方可能还产生了拉应力。也就是说岩体的开挖是一种卸荷的力学过程^[4]。

当前, 人们通过大量的加载试验及理论分析, 已建立起了一系列能反映岩体在加载条件下发生变形破坏的理论, 并把这些理论应用到了工程实际之中。然而, 由于卸荷与连续加载具有完全不同的应力路径, 两者所引起的岩体的变形和破坏特性, 无论在力学机理还是在力学响应上都有很大差异(见表 1),

卸荷条件下的岩体的力学特性往往与常规加荷条件下的岩体力学特性是不同的^[5]。故沿用连续加载强度理论来分析岩爆效应或预测岩爆, 显然是不切实际的。因此, 无论从理论上还是从工程实际来看, 都很有必要开展卸荷状态下岩爆效应的研究。

表 1 卸荷岩体力学与加载岩石力学的区别^[5]

内 容	岩体卸荷力学	加载岩体力学
地质调查	强调岩体中结构面卸荷时物理力学的变化	不考虑结构面在卸荷与加载时物理力学的变化
力学动态	卸荷状态	加载状态
强度	岩体强度动态变化	岩体强度不变化
计算力学	各向异性卸荷非线性岩石力学	岩石力学
成果验证	与实际工程观测资料吻合	不吻合
结论	力学模型与物理模型一致	不一致

1 研究现状

岩爆是高地应力区地下洞室开挖过程中岩体突发性破坏的一种自然灾害。它常表现为片状剥落、严重片帮,常常伴有声响及岩片弹射,往往给人员、设备和建筑的安全带来巨大威胁。岩爆现象早已引起工程和科学技术人员的重视,已经开展了岩爆机制、发生条件、灾害防治等方面的工作^[6-10]。

岩爆是在地下洞室开挖卸荷的过程中发生的,其特征与岩石的变形破坏特征密切相关。为了研究岩爆,前人在加载破坏状态下的岩石破坏特征方面做了大量的工作,但是大量的现场经验表明,加载状态下模拟岩爆的破坏特征与实际的岩爆破坏特征相去甚远,并不能真正地反映岩爆的本质。这就需要我们在卸荷状态下进一步探讨它的破坏特征,找到一个真正与之力学路径相符的研究方法,进而提高对岩爆的预测的准确性。

由于试验条件的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,目前,主要是原中国长江三峡工程开发总公司总工程师哈秋^[11]教授、三峡大学李建林教授、刘国霖教授及重庆大学张永兴教授等为数不多的研究者,这些单位和研究者结合工程实际,积极从事卸荷岩体的理论研究,对卸荷岩体的工程地质基础、卸荷岩体的力学特性、卸荷岩体的力学参数、卸荷岩体的物理仿真及数值仿真等方面有了深入地研究^[11-15],形成了卸荷岩体力学理论的基本框架,并开发了一套完整的卸荷岩石力学实验方法和岩体卸荷试验设备。

在形成了卸荷岩体力学理论的基本框架之后,又有许多岩爆研究者做了大量的岩石卸荷破坏以及岩石卸荷破坏与加荷破坏对比条件下岩爆模拟的研究,目的在于研究对比真正的与岩爆力学路径相符的破坏形式。

1.1 卸荷破坏特征与岩爆效应的研究

王贤能、黄润秋首先开始了对卸荷破坏特征与岩爆效应的研究。他们在文献[4]中选取西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做了卸荷试验,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。他们认为地下洞室在开挖过程中,围岩应力发生重新分布。径向应力(σ_r)随着向自由表面接近逐渐减小到洞壁处变为零;而切向应力(σ_θ)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。

他们在试验中选取了两种卸荷控制方式:位移控制(LVDT控制)和荷载控制(FORCE控制)。这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的减少量与轴压的增加量的比率不同。位移控制(LVDT控制)方式的比值为1.13,荷载控制(FORCE控制)方式的为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。

为了便于对比,分别对每种岩石同时做了加荷试验。从中得出以下结论:岩石在位移控制方式下卸荷,其加荷段与卸荷段的变形特征明显不同,加荷段的斜率明显比卸荷段的斜率大,即表明岩石在加荷过程中的弹性模量比卸荷过程的弹性模量大,而变形量却小。同时得知岩石卸荷速度越快,其强度越低,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。

试验中得出卸荷破坏迹线素描图(见图1),从图中可以看出,当卸荷破坏发生时的围压较低时,则其破坏特征以张性或张剪复合型(见图1a 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(见图1c)。

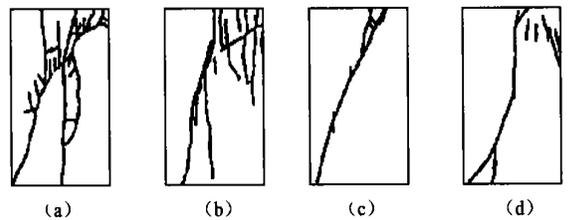


图1 岩石卸荷破坏迹线^[19]

地下洞室在开挖卸荷过程中,洞室周围围岩的侧压被卸除,应力发生重新分布。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者是剪张复合型破坏。处在地应力区的高地应力区地下洞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,这些板状破裂进一步发育,向洞室内突然溃决破坏,从而导致岩爆的发生。岩爆形成的破裂面有平行于洞壁的破

裂面和与洞壁斜交的破裂面2种类型。平行于洞壁的破裂面,岩爆片有的厚度均匀,厚5~20 cm;有的边缘薄中间厚,长宽相差不大。部分岩爆片长轴平行于洞轴方向。平行于洞壁的破裂面属张性破裂面,岩爆块爆裂断面由大致平行的多个平整面构成,面上附着极薄的小碎片,并常见垂直小陡坎,电镜扫描鉴定为沿晶拉花、穿晶拉花,沿化石表面拉开等几种形式,属于张性、剪切复合破坏。这与岩石卸荷试验结果相符。

1.2 卸荷状态下岩爆的岩石力学实验研究

为了研究卸荷状态下的岩爆效应,进一步揭示岩爆发生的正确力学路径,重庆交通学院的徐林生教授对卸荷状态下导致岩爆的岩石破裂机制进行了大量的力学实验研究^[17-18]。他也通过卸荷三轴试验方法,在美国产 MTS815 Teststar 程控伺服岩石力学试验系统上采用位移控制对取自通渝深埋特长公路隧道岩爆区的新鲜完整岩层中的岩石(粉砂岩(ZE2组)和灰岩(WP1组))进行了试验。研究结果显示,与常规三轴试验相比较,卸荷状态下的岩石更容易发生变形破裂现象。经综合对比分析后得出如下结论:

1)岩石在围压 $\sigma_3=0$ 时的加载压缩状态下全部发生与轴向基本平行的张性破裂、剥离现象,破坏时可听到岩石内部发出的破裂声,其结果与轻微岩爆现象较为相似。

2)一定围压下的卸荷破坏多显示出张剪性破坏的特征,其剪切破裂往往追踪部分张性破裂面发展,这与中等岩爆现象较为相似。

3)随着围压 σ_3 的增高,卸荷破坏的张剪性破裂角逐渐增大,破裂性质也就逐渐向剪切破裂过渡,破裂面上擦痕较为明显,类似强烈岩爆现象。

文献[18]最后指出,卸荷状态下岩石变形破裂体系较常规三轴加载试验更为发育,其破坏程度也更为严重一些,而这些测试成果,可为进一步正确分析研究岩爆形成的力学机制提供重要的实验依据。

之后张黎明等也做了卸荷条件下岩爆机理的试验研究,他在文献[19]中指出,处于三轴应力状态下的岩体,如果某一方向的应力突然降低造成的岩石在较低应力水平下破坏,那么原岩储存的弹性应变能会对外释放,释放的能量将转化为破裂岩块的动能,进而可能引起岩爆。

文献[19]同时阐述了卸荷破坏的突发性及其在岩爆中的应用,并且认为地下工程的开挖卸荷在洞室围岩中引起强烈的应力分异现象,使得围岩应力

差越接近开挖临空面越大,应变能大量聚集,具有岩爆倾向的岩体往往就是在这个应力转换过程中形成和发生岩爆的。最后作者得出结论,认为卸围压时岩石破坏具有突发性,其实是岩石发生了脆性破坏。

经对试验数据的分析推理,作者探讨了如何有效地降低岩爆发生几率的施工方法。其一是采用钻孔释放能量,将工作面前方围岩中的能量化整为零地逐步释放,在即将开挖的围岩前四周形成一个低应力的保护壳,然后再进行掘进,这个就能降低岩爆发生的几率;其二是可以通过调整施工速度,控制围岩的位移来预防岩爆的发生。

2 存在的问题

卸荷状态和加荷状态下岩体力学研究一样,在研究岩爆效应和机制方面是一个很大的系统工程。同时,用卸荷岩体力学研究岩爆作为一个新的领域,尽管在过去的研究中做了一定数量的物理和数值模拟研究,在一些重大的技术问题上取得了较大的突破,并且在工程界岩体卸荷特性已逐步得到认识,但过去的研究都存在工程局限性和岩石类型的单一性的缺点,对卸荷条件下的岩爆效应仍然只是停留在初步认识上和定性分析上,关于卸荷状态下的岩爆研究在很多方面远没有达到成熟的地步,因此作者认为在此领域尚存在很多问题有待进一步的研究。

2.1 在试验研究方面

1)现有的研究多局限于某种岩石(粉砂岩及灰岩)和仿真岩体力学的实验方面,实验数量非常有限,虽然不同的实验者获得的规律差异较小,但所得到的成果还不能真实反映自然界卸荷状态下岩爆效应和发生的机制。

2)现有研究多局限于岩石力学试验,而对自然界非贯通裂隙岩体在开挖卸荷下的变形破坏性质研究较少^[20]。

3)在试验方法及试验材料仿真方面还存在很多不足。如目前岩体的准三轴试验和少量真三轴试验如何真实反映岩爆发生的卸荷路径、模拟材料与真实岩体材料力学性质的相互关系、岩体力学显著的尺寸效应^[21]等方面都没有达到真正的模拟。

4)缺乏对不同施工方式对应的工程岩体在不同卸荷方式下岩爆效应的试验研究。

5)研究卸荷速率、卸荷程度对岩爆效应影响的试验还不多见。

6)岩体开挖卸荷后特性更为复杂,目前研究者涉及的方面较为单一,在今后可建立一个除上述方面以外的如渗流场、温度场、及动力特性等在内的综

合的系统分析方法。

2.2 在理论研究方面

1)卸荷力学从哈秋林教授提出至今,已有十余年的历史了,虽经众多学者深入研究,但目前卸荷力学特性在力学理论上仍然没有完整的力学分析方法,对岩体的卸荷力学特性大多还停留在定性的认识,在岩爆效应及岩爆发生机制方面更是没有达到完善的理论高度。

2)在不同卸荷方式下岩爆效应和机制的理论分析,包括对应的本构关系和破坏进程的描述较为缺乏。

3)对卸荷状态下工程岩体的岩爆效应、机制的揭示还不够明了。这不仅要应用常规的应力分析方法,而且要运用新兴的科学技术方法进行研究。

4)岩体卸荷物理仿真、数值计算方法等技术问题仍然没有完备。

3 展望

当前,许多研究者都开始关注卸荷状态和条件下的岩爆问题,并进行了大量的试验及理论分析,也取得了一定的成果,但是,由于受客观条件的限制,相对精确地模拟造成岩爆的卸荷环境仍然是个难题,所以该课题无论在研究广度还是深度上都有待进一步加强,主要有以下几个方面:

3.1 岩体卸荷本构关系的研究

目前研究岩爆所建立的各种本构模型都是基于加载岩体力学建立的,对卸荷工程岩体本构模型的研究甚少。由于工程岩体中存在大量的节理、断层,加之处于卸荷的特殊状态,所以这一课题的研究是个难题。

3.2 不同卸荷方式下岩爆机理的研究

开挖是一切工程(无论是地表工程还是地下工程)建设的前提。工程岩体是否产生岩爆取决于开挖产生的卸荷效应,这种卸荷效应将引起岩体产生一系列与加荷状态下不同的新的岩爆效应,而岩爆效应的产生又依赖于工程的开挖方式。因此,对待工程中的岩爆问题,应从卸荷效应去考虑,这样才能作出符合工程实际的决定。对于不同的施工方式,其卸荷效应的机理是值得深入探讨的,它是解决工程开挖中岩爆问题的基础。

3.3 卸荷与其它介质耦合作用下岩爆效应及机制研究

研究岩体工程中卸荷状态下的岩爆问题,不可避免地会牵涉到卸荷与渗流的耦合、卸荷与温度的耦合等问题。揭示上述耦合作用下的岩爆机理,是

一项十分重要而又艰巨的研究工作。

3.4 新兴科学理论和技术的应用^[22]

损伤力学、断裂力学、分形理论以及 BP 神经网络等新兴科学理论已显示出其巨大的潜能,在某些方面能够克服传统力学理论和方法的许多不足,现已被应用于岩体的破坏机制及岩石工程的研究中。而将这些理论应用于岩体卸荷条件下岩爆的研究,将是一项具有探索意义的工作。

3.5 实际工程中的应用

经过十余年的探索与发展,卸荷岩体力学不仅在理论上有所建树,而且在实际工程中也有所应用,例如在三峡工程永久船闸高边坡中的应用,但是,卸荷状态下岩爆机理的研究应用于实际工程仍有很长的路要走。

4 结论

卸荷状态下岩爆的研究作为一个新生事物,注定其还是一个很艰巨的过程。它的研究依赖于卸荷岩体力学的发展。随着研究的深入和工程实践的不断积累和印证,许多问题得到认识和提高,卸荷岩体力学的内容不断丰富,并已初步形成了比较完整的学科系统,且随着工程实践的不断应用正日趋完善。然而,由于开展工程岩体卸荷破坏机制研究的复杂性和艰巨性,一些实质性的基本问题还尚未解决,已有的卸荷条件下的岩爆理论距离工程应用还有较大的距离。这些都要求岩石工作者们要不断拓宽视野,与时俱进,对卸荷条件下岩爆问题进行更全面而深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Linkov A M Rockburst and instability of Rock masses [J]. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci, 1996, 33(7): 727.
- [2] 徐成光. 岩爆预测及防治方法综述[J]. 西北水电, 2005(2): 14-17.
- [3] 姜晨光, 等. 地下采矿岩爆原因的新认识[J]. 矿业研究与开发, 2004, 8(4): 54.
- [4] 李建林. 卸荷岩体力学. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [5] 王 飞, 杨学堂. 工程岩体卸荷力学特性的研究与发展[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(1): 32-35.
- [6] 陶振宇. 高地应力区的岩爆及其判别[J]. 人民长江, 1987(5): 25-32.
- [7] 侯发亮, 刘小明, 王敏强. 岩爆成因再分析及烈度划分探讨[J] //中国岩石力学与工程学会岩石动力学专委会. 第三届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992: 448-457.

[8] 谭以安. 模糊数学综合评判在地下洞室岩爆预测中的应用[C] //中国岩石力学与工程学会. 第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集. 北京: 知识出版社, 1989: 247-253.

[9] 彭 祝, 王元汉, 李廷芥. Griffith 理论与岩爆的判别准则[J]. 岩石力学与工程学报, 1996. 15(增): 491-495.

[10] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998. 17(5): 493-501.

[11] 李建林. 卸荷岩体力学的理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[12] 李建林, 哈秋 . 节理岩体拉剪断裂与强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 259-266.

[13] 李建林, 哈秋 . 卸荷岩体宏观参数的三维数值模拟[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 1997(3): 1-6.

[14] 李建林, 袁大祥. 岩体卸荷分析的基本方法[J]. 三峡大学学报, 2001, 23(1): 1-6.

[15] 李建林, 熊俊华, 杨学堂. 岩体卸荷力学特性的试验研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(5): 48-51.

[16] 王贤能, 黄润秋. 岩石卸荷破坏特征与岩爆效应[J]. 山地研究, 1998. 16(4): 281-285.

[17] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 卸荷状态下岩爆岩石变形破裂机制的试验岩石力学研究[J]. 山地学报, 2000. 18(4): 102-107.

[18] 徐林生. 卸荷状态下岩爆岩石力学试验[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(1): 1-4.

[19] 张黎明, 王在泉, 等. 卸荷条件下岩爆机理的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005. 24(增 1): 4769-4773.

[20] 沈军辉, 王兰生, 王青海, 等. 卸荷岩体的变形破坏特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003. 22(12): 2028-2031.

[21] 李建林, 王乐华. 卸荷岩体的尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2032-2036.

[22] 吴 刚. 工程岩体卸荷破坏机制研究的现状及展望[J]. 工程地质学报, 2001, 9(2): 174-180.

收稿日期: 2006-03-10

(上接第 153 页)

分析后认为, 碎石桩处理前大部分试验点均会液化, 但碎石桩处理后, 这些试验点将不会发生液

化, 这说明碎石桩挤密效果较好, 提高了砂土的密实度. 典型孔的砂土地震液化判别结果见表 4.

表 4 B1 孔砂土地震液化判别表

层号	标贯深度 /m	标贯击数 N		干重度 $\gamma_d / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$		近震标准贯入锤击数临界 N_{cr}	工前地震液化判别	工后地震液化判别
		工前	工后	工前	工后			
1b	0.8	4	8	14.3	14.9	5.7	液化	不液化
	1.8	7	8	14.5	15.0	6.3	不液化	不液化
2a	2.8	4	17	14.1	15.9	6.9	液化	不液化
2b	3.8	7	20	15.4	16	7.5	液化	不液化

注: 地下水埋深统一为 0.5 m

6 结 论

1) 碎石桩处理前后的检测结果表明, 处理后的地基土物理力学性质指标均大幅提高, 碎石桩挤密效果较好, 并消除了砂土地震液化。

2) 振动碎石桩成桩过程中, 孔隙水压力变化有如下规律: 沉管时孔隙水压力增加迅速, 最大值在深度 6 m 左右, 之后孔压减小, 拔管时孔压再次增大, 其值约为沉管时的 60%~80%。

3) 对比分析认为, 碎石桩桩间距越小, 加密效果越好。

参 考 文 献

[1] 郑建国. 碎石桩复合地基液化判别方法的探讨[J]. 工程勘察, 1999(2): 5-7.

[2] 邱 钰, 刘松玉, 黄 卫. 沉管干振碎石桩对土层振动效应的试验研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 33-36.

[3] 赵电宇, 蒋忠信. 黎平机场软塑红粘土地基的碎石桩处理[J]. 路基工程, 2005(5): 83-86.

收稿日期: 2006-03-02