

文章编号:1000-582X(2003)07-0116-05

地下工程中岩爆灾害的成因及防治措施

王青海^{1,2}, 李晓红¹, 顾义磊¹, 艾吉人³, 唐伯明³, 杨君³, 胡世斌³

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 新疆马兰63653部队, 新疆马兰 841700; 3. 重庆公路局, 重庆 400048)

摘要:岩爆是地下工程掘进过程中所遇到一种动力地质灾害,其危害较大。根据当前国内外大量岩爆的统计资料,结合在二郎山隧道和锦屏二级水电站勘探洞所遇到的岩爆现象,提出了岩爆是由构造、浅表生改造、围岩的岩体强度、岩层产状、围岩应力状态、变形特性、地下工程布置等多种影响因素综合作用的结果。就岩爆的力学机制问题,认为岩爆力学机制的实质属于压致拉裂破坏。

关键词:岩爆; 地质灾害; 力学机制; 影响因素

中图分类号:TD324

文献标识码:A

岩爆是高应力条件下,由于地下工程掘进造成的围岩应力重分布而引起的硬脆性岩体在短时间内产生的储备弹性应变能突然、快速释放,并发生岩块剥落、弹射甚至抛掷的一种动力地质灾害。由于岩爆对地下工程造成了不同程度的危害,如影响地下采掘和开挖工程的施工进度,破坏支护、损坏施工设备并危及到工作人员的生命安全,因此,岩爆已经成为人类地下采掘和开挖过程中普遍关注的一种地质灾害。

随着人类科技的进步,地下工程掘进设备的日趋先进,人类交通需求的增大,矿产资源开发的需要以及水电资源的广阔开发前景,“长度大、埋深大、跨度大”特点的地下工程数量逐渐增多。在这种形势下,加强岩爆地质灾害的分析和研究,并在此基础上探讨合理的防治措施,对保障地下工程的顺利实施,保护施工人员的生命安全,避免施工设备遭受损失等方面都有着重要的意义。

1 岩爆灾害的成因条件分析

从能量的观点来看,岩爆的形成过程是岩体能量从弹性储存到快速释放直至最终形成不等大小的扁平状岩体碎块并脱离母岩的过程。因此岩爆是否发生及其表现形式就主要取决于岩体是否能储存足够大的能量,是否储存了高能量以及是否具有能量释放的能量和能量释放方式等。国内外专家的研究结果表明,岩

爆是由围岩的岩体强度、岩层产状、围岩应力状态、变形特性、岩体构造环境、浅表生改造强度^[1]、地下工程布置和施工工艺等多种因素综合作用的结果。

1.1 地层岩性

由于硬岩的弹模、抗压强度和抗剪强度都很高,在加载过程中,其应力-应变曲线近似为直线型,塑性变形很小,主要表征具有很明显的弹性变形特征,因此,在构造改造和浅表生改造过程中能储备很高的弹性应变能^[2]。一旦应力环境发生剧烈的改变,如地下工程开挖,储备在硬岩中的应变能就会释放出来,从而可能引发岩爆^[3]。而软岩的弹模、抗压强度和岩石内部 c 、 φ 都低,在加载过程中,其应力-应变曲线为非直线形,其变形包括弹性变形和大幅度的塑性变形,因此,在构造改造和浅表生改造过程中储备弹性应变能的能力很低。在这类岩体中,出现岩爆的几率很小。如在我国的天生桥隧洞中,岩爆主要发生在坚硬的石灰岩中,而相对软弱的页岩则无岩爆现象^[4-5]。

在软岩和硬岩相间的地段,由于应力调整过程可能导致硬岩层的局部应力集中和增高现象,因此在硬岩中也将发生岩爆。太平峰电站引水隧道中,岩爆仅发生在干燥无水的花岗岩中,而在洞线的闪长岩和石英岩富集的岩带中均不发生岩爆,且岩爆最频繁的发生地段就是闪长岩、石英岩与花岗岩的交界处的花岗岩中^[6]。在二郎山隧道中,也出现了在泥岩夹层中的

• 收稿日期:2003-03-15

作者简介:王青海(1970-),男,湖南祁东人,重庆大学博士后,副教授,主要从事岩土力学、隧道工程 and 环境影响评价研究。

砂岩和粉砂发生岩爆的现象^[7]。这两个事例说明在高地应力环境条件下,岩性突变部位是岩爆关注的重点部位。

但是即使都是硬岩,不同的岩体由于成岩建造和构造改造的差异,相同应力环境条件下发生岩爆的强度也有区别^[8]。一般情况下,由定向矿物组成的硬岩如片麻岩,其储存弹性应变能的潜力小于矿物颗粒随机分布的岩石,因此在这类岩体中出现的岩爆烈度相对较低。对于胶结物质坚硬的岩石,如硅质胶结,弹性应变能的储存能力强于钙质胶结的岩石,因此其岩爆强度也高于钙质胶结的岩石^[9]。

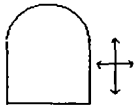
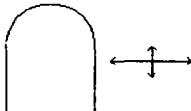
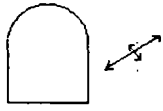
总之,如果岩石越坚硬,岩石抗压强度越大,在构

造改造、浅表生改造过程中储存弹性应变能的能力越大,在相同的环境条件下,其发生岩爆的可能性和岩爆烈度等级也就越高,反之则低。这是因为岩石质地愈坚硬,则其强度愈大,可能蓄积的弹性应变能就越大^[10-11]。当岩石破坏后,耗散后剩下的弹性应变能转化为较大的动能,使其弹射甚至抛出。

1.2 岩层产状

同样的地应力环境和地下工程布置条件下,不同的地层产状,其出现岩爆的可能部位亦有区别^[12-13]。表 1 讨论了水平层状岩层和垂直地层产状情况下岩爆发生的部位。

表 1 不同地层产状情况下岩爆的发生部位^[14]

岩层			
水平层状岩层	在边墙和起拱部位产生劈裂破坏型岩爆或剪切破坏型岩爆	当岩层为厚层状或巨厚层状时,在拱顶出现劈裂破坏型岩爆或剪切破坏型岩爆。当岩层为薄层状时,出现弯折内鼓型岩爆	在掌子面部位出现岩爆
直立岩层	1)当岩层与地下工程轴线平行且岩层厚度不大时,在边墙和起拱部位将出现弯折内鼓型岩爆,当岩层为巨厚层状时,在边墙和起拱部位将出现劈裂破坏。 2)当岩层与地下工程轴线垂直时,岩爆将主要表现为劈裂破坏型。	1)当岩层与地下工程轴线平行且厚度大时,在拱顶发生劈裂破坏型岩爆。 2)当岩层与地下工程轴线垂直时,岩爆发生的概率较低。	1)当岩层与地下工程轴线平行时,岩爆将表现为劈裂破坏。 2)当岩层与地下工程轴线垂直且岩层不厚时,在掌子面将发生弯折内鼓型岩爆。

1.3 构造作用

在断层破碎带和节理十分发育的部位和地段,由于在其形成过程中,已经产生了能量释放。即使后期再次经历构造作用和强烈的浅表生改造作用,这些部位由于岩体比较破碎,已经不具备储存大能量的条件,因此在断层破碎带和节理十分发育的部位不会出现岩爆^[15]。而在断层带附近的完整岩体中,由于断层形成过程中的应力分异和后期可能的构造活动造成的应力集中效应,其储存弹性应变能的较大,在地下工程掘进到这个位置时有可能发生岩爆。

岩体的结构面如节理、层理、劈理等对岩爆的方式和强度有一定的影响^[16]。当这些薄弱的结构面与地下工程洞壁平行时,在围岩切向应力的作用下,岩体将

沿薄弱结构面发生压致拉裂,并表现为向洞室内弯折变形。而当围岩的切向应力很高时,这种变形可演变成强烈的岩爆。

另外,在一些特殊的构造部位,如向斜和背斜核部,在构造过程中积累和封存着大量的弹性应变能^[17],一旦地下工程掘进到这个部位,蓄积的能量就会猛烈释放,造成岩爆地质灾害。如重庆通渝隧道进口掘进至向斜核部时,出现了岩爆。

1.4 浅表生改造

在现代地貌形成史中,如果发生过大幅度的地壳抬升和强烈的剥蚀作用,则应力分异和集中现象比较严重,如一般所见到的深切峡谷。当地下工程的轴线平行于这种深切河谷的陡坡布置时,在靠近陡坡一侧

的边顶容易发生岩爆。如挪威的峡弯公路隧道和我国岷江太平峰水电站的水工隧道,它们都是沿河谷方向布置的,在施工过程中,都遇到了强烈的岩爆现象^[6]。

另外,浅表生改造对岩爆的影响还表现为通过改变岩体初始应力状态的分布来影响到地下工程岩爆的烈度。在挽近期以来,由于构造作用而强烈抬升同时,又发生区域性大厚度剥蚀的地区,剥蚀过程中,由于垂直应力和水平应力的不断调整,岩体垂直应力降低,而水平应力不断增大,其结果导致水平应力大大高于垂直应力。在岩体发生卸荷回弹变形过程中,如果岩体的强度和完整程度都很高,则其储存的弹性应变能是相当可观的,在这种地区进行地下工程掘进,如果发生岩爆,则岩爆的烈度将明显高于浅表生改造前的岩爆烈度^[18]。

1.5 地下工程横断面形状的影响

对于横断面为圆形的地下工程,其周边上的最大压应力点位于岩体初始最大主应力 σ_1 和地下工程周边相交的部位(设为 A 点),而二次应力重分布产生的最大拉应力点则位于位于岩体初始最小主应力 σ_3 和地下工程周边相交的部位(设为 B 点)。图 1 是岩体不同初始应力状态下,地下工程最大拉应力点和压应力点的切向应力分布情况。

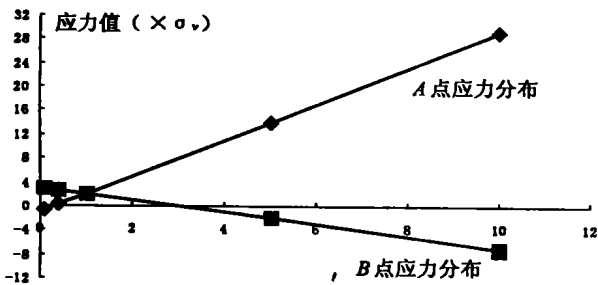


图 1 圆形地下工程切向应力 σ_θ 分布图^[19]

当地下工程横断面为圆拱直墙式时,其周边的二次应力分布与圆形地下工程有很大的差别,表 2 是直墙高为圆拱半径的 1.8 倍情况下,不同初始应力条件下地下工程周边典型部位点的应力分布状况。

表 2 圆拱直墙式地下工程(见图 2)不同点围岩应力分布^[20]

σ_H/σ_0	A 点应力 ($\times \sigma_0$)	B 点应力 ($\times \sigma_0$)	C 点应力 ($\times \sigma_0$)	D 点应力 ($\times \sigma_0$)	E 点应力 ($\times \sigma_0$)
10	39	11.47	-8.72	-7.54	26.2
5	19	5.21	-3.22	-2.64	12.6
1	3	0.37	1.1	1.38	1.72
0.4	0.6	-0.36	1.74	1.87	0.1
0.1	-0.6	-0.72	2.07	2.16	-0.73

从图 1、图 2 和表 2 可以看出:

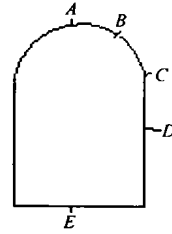


图 2 圆拱直墙式地下工程应力点分布

1) 在岩体初始应力场中,当垂直应力很大,而水平地应力很小时,地下工程开挖引起的二次应力重分布,将造成边拱部位和直墙部位压应力的集中,因此,在这些部位易产生岩爆。

2) 当水平地应力很大,而垂直地应力很小时,地下工程开挖引起的二次应力重分布,其压应力集中部位主要是地下工程的拱顶和底板,因而在拱顶和底板部位容易出现岩爆。

3) 在同样的应力环境条件下,圆形洞室应力集中效应小于直墙圆拱形洞室,因此圆形洞室发生岩爆的烈度和概率都要低于直墙圆拱形洞室。

2 岩爆力学机制分析

就岩爆机理方面的研究,国内外很多学者认为是张性破裂和张剪性破坏的结果。潭以安博士提出岩爆形成过程可以分为 3 个阶段:首先是劈裂成板,再剪断成块,最后表现为块片的弹射。王兰生教授在二郎山岩爆研究的基础上,认为岩爆机理的基本表现形式是压致拉裂、压致剪切拉裂和弯曲鼓折^[7]。

从岩爆的力学机制角度上看,其实质都是在高压应力条件下出现的压致拉裂破坏,即相对于地下工程洞室而言的切向应力作用下的一种剧烈破坏形式。因此无论是劈裂成板,还是弯曲鼓折,都是压致拉裂破坏的结果。而弹射现象和抛射现象只是压致拉裂破坏后,岩体内蓄积的弹性应变剩余能量进一步释放的结果,因此这些只是岩爆烈度划分的一个依据,不影响岩爆的力学机制问题。

然而由于不同的地下工程,其所处的最大应力、围压环境、围岩类别、岩层分布等不一样,因此岩爆的表现形式有区别,在围压较低的情况下,岩爆破坏表现为压致拉裂,而当围压较高时,压致拉裂过程中具有一定的剪切破坏迹象。为此笔者提出按岩爆形成的力学表现形式,可以将岩爆分为劈理破坏型、剪切破坏型和弯折内鼓型 3 种形式。

2.1 劈理破坏型

在厚层状地层分布地区,岩爆的破坏形式主要表现为劈理破坏型。岩爆事前未发现明显展露的裂纹,

但是由于处于二次应力状态下的局部围岩在高压条件下,岩石内部存在的微裂隙在应力集中效应下失稳、扩展、相互贯通,并最终发展为与最大主应力呈小角度相交的宏观劈裂面^[21]。在整个破坏过程中,由于岩体积蓄的弹性应变能很高,因此其能量在卸荷状态下释放速率很快,导致岩爆的发生,即表现为劈裂破坏型岩爆。这种类型的岩爆一般发生在最小主应力与最大主应力的比值较小的情况下^[22]。

2.2 弯折内鼓型

区域最大主应力与岩层层面或节理面垂直情况下,地下工程掘进过程中表现出来的岩爆主要是弯折内鼓型。其中当区域最大主应力与地下工程拱顶相垂直时,弯折内鼓型岩爆出现在两帮,表现为两帮岩石向掘进静空的弯曲鼓折。而当区域最大主应力与地下工程拱顶相平行时,则在地下工程的顶部出现类似的弯曲鼓折型岩爆。

2.3 剪切破坏型

当岩体的三维应力状态差别不很大,即最小主应力与最大主应力的比值较大的情况下,地下工程开挖过程出现的岩爆将显示压致剪切破坏型。破裂面与最大主应力的夹角明显增大,很多学者室内实验测试的结果也已经证明了这一点。

3 岩爆灾害的防治措施

针对岩爆灾害发生的成因和环境条件,其防治措施主要表现在2个方面:一方面通过改善和调整岩体的应力状态,以达到降低围岩二次应力分布过程中的切向应力集中效应,另一方面,通过控制地下工程选址和调整地下工程轴线方向、控制开挖和掘进方式、采用合理支护措施并作好超前的预测预报工作等来减少岩爆发生的概率。具体措施主要是有以下几个方面:

1) 地下工程尽量布置在地应力分布比较均匀的地段,避免地下工程围岩应力集中效应带来的岩爆地质灾害。

2) 地下工程轴线方向尽可能与该工程布置区域的 σ_1 方向保持平行或小角度相交($\leq 30^\circ$),以降低掘进后围岩应力分布的不均匀性^[23]。

3) 碰到不利的情况下,可以通过改变地下工程横断面的形状,如采用圆形、椭圆形、帐篷形或其它有利于稳定的多边形断面来达到减少应力集中效应。

4) 打超前应力释放孔,让高应力得以提前释放,从而有效地降低地下工程掘进过程中的岩爆作用。

5) 在可能发生岩爆的地段尽量采用短进尺掘进,减少爆破炸药的用量,必要时采用分布开挖掘进方式,

同时搞好光面爆破,严格控制爆破效果造成的超挖和欠挖现象,以减少掘进程序本身造成的地下工程围岩表层应力集中效应^[24]。

6) 在岩爆可能发生的地段,爆破后立即向工作面新出露围岩表面进行喷水,降低地下工程表部岩体储备应变能的能力。在工作面喷水时,由于进入到岩石孔隙中的水能与岩石矿物中的一些离子发生作用,从而造成岩石软化、膨胀以及溶蚀作用,使得岩石的强度降低。表3是一些容易发生岩爆的脆性岩石的软化系数。

表3 部分脆性岩石的软化系数^[25]

岩石名称	软化系数	岩石名称	软化系数
闪长岩	0.6~0.74	玄武岩	0.71~0.92
花岗岩	0.75~0.97	石灰岩	0.58~0.94
		砂岩	0.44~0.7

软化系数越小,说明采用喷水方式对岩石的强度影响越大,其效果越好。而对于软化系数很高的脆性岩石,采用喷水的方式往往不能达到预期的效果。在采用高压喷水的情况下,水的劈裂作用可以在岩石内部产生新裂缝并使岩石内原有的裂缝进一步扩展,从而降低岩体储备弹性应变能的能力。

7) 对地下工程采用柔性支护,在岩爆发生的地段,支护必须能够承受大的位移并且能够吸收岩块向开挖面外运动趋势的部分能量,为此采用喷射混凝土层加上挂网和菱形方式布置的锚杆,可以有效地防止岩爆。

8) 作好岩爆的超前预测预报工作,以提前准备相应的防范和应对措施。岩体中的初始地应力是由构造应力、岩体自重应力和浅表生改造产生的分异应力的综合结果,因此对于地下工程的岩爆判别依据而言,在了解地下工程所在区域的地应力分布的基础上,作好岩爆的超前预测预报工作,可以减少施工过程中突如其来的岩爆灾害带所造成的经济损失,保护施工人员的生命安全。

参考文献:

- [1] 王兰生,李天斌,赵其华. 浅生时效构造与人类工程[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [2] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京:水利水电出版社,1990.
- [3] 马建秦. 地下工程中岩爆作用的主要特征[J]. 现代隧道技术,2002,39(4):37-40.
- [4] 谭以安. 岩爆烈度分级问题[J]. 地质论坛,1992,38(5):441-445.
- [5] 谭以安,邹成杰,汪泽斌. 天生桥二级水电站引水隧洞岩爆破

- 坏特征及原因分析[J]. 水力发电, 1990, 12(9): 22-26.
- [6] 周德培, 洪开荣. 太平峰隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 171-178.
- [7] 王兰生, 徐进, 李天斌, 等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级[J]. 公路, 1999, 8(2): 37-43.
- [8] 刘正雄. 岩爆预防与防治技术研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(4): 74-76.
- [9] 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.
- [10] 许东俊, 章光, 李廷芥, 等. 岩爆应力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 169-172.
- [11] 姜彤, 李华畔, 刘汉东. 岩爆理论研究现状[J]. 华北水利水电学院学报, 1998, 19(1): 45-47.
- [12] 谷明成, 侯发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1325-1328.
- [13] 杨宝忠. 浅谈隧道施工中岩爆发生的机理及预防措施[J]. 铁道工程学报, 1999, 64(4): 63-65.
- [14] 陈明祥, 侯发亮. 岩石损伤模型与岩爆机理[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [15] 唐宝庆, 曹平. 引起岩爆因素的探讨[J]. 江西有色金属, 1995, 9(4): 1-3.
- [16] 马少鹏. 加拿大岩爆灾害的研究现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(4): 107-112.
- [17] 宋春青, 张振春. 地质力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [18] 贾愚如, 范正绮. 水工洞室中岩爆机制与判据[A]. 岩石力学在工程中的应用——第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集[C]. 北京: 知识出版社, 1989.
- [19] 侯发亮. 圆形隧道中岩爆的判据及防治措施[A]. 岩石力学在工程中的应用[C]. 北京: 知识出版社, 1989.
- [20] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [21] 钱波. 原始应力对大型冻洞室位置的影响[J]. 凉山大学学报, 1999, 3(1): 17-21.
- [22] 尹国铭. 穿越坚硬围岩隧道的施工技术及其对策[J]. 铁路隧道及地下工程, 1995, 19(2): 118-123.
- [23] 唐宝庆, 曹平. 评岩爆的有关应力判据[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(2): 4-8.
- [24] 宋岳. 岩爆问题[J]. 天津地质学会志, 1991, 9(3): 50-53.
- [25] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.

Rockburst Hazard and Its Forecast and Treatments in Underground Engineering

WANG Qing-hai^{1,2}, LI Xiao-hong¹, GU Yi-lei¹,
AI Ji-ren³, TANG Bo-ming³, YANG Jun³, HU Shi-bin³

- (1. Key Laboratory for the Exploitation of South West Resources & the Environmental
Diaster Control Engineering under the state Ministry of Eclucation,
Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. 63653troops Malan, Malan, Xinjiang 841700, China;
3. Chongqing Road Bureau, Chongqing 400048, China)

Abstract: Rockburst is a serious damage geologic hazard. According to the rockburst phenomenon in Erlangshan tunnel and the Jinping 2nd hydropower station and a large of rockburst data, this paper proposes that rockburst is a result that many factors synthesize. These factors include teconics, epigenetic and superficial structure, wall-rock intensity, attitude of rocks, wall-rock state of stress, wall-rock deformation and underground engineering arrangement, etc. It is given that the mechanism of rockburst is a tension fracture damage under press.

Key words: rockburst; geologic hazard; mechanics; influencing factor

(编辑 姚飞)