

地下工程施工中 岩爆的形成机理及控制措施

第二工程有限公司 谢文清

【摘要】 岩爆是高地应力环境下地下工程开挖过程中容易产生的一种突发性地质灾害,直接威胁施工人员和设备安全,文章针对岩爆的形成原因和机理,结合工程实例,提出了岩爆硐室开挖的施工防治措施、组织原则及工艺流程,为高地应力条件下地下工程的开挖提供了借鉴和经验。

【关键词】 地下工程 岩爆 机理 控制 措施

1 岩爆的形成机理及分级

岩爆是地下工程开挖过程中,硬脆性围岩受地应力(自重应力和构造应力的总和)分异和集中的影响(径向约束卸除,环向应力骤然增加,能量进一步集中),而致使储存于岩体中的弹性应变能突然释放,因而产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳地质灾害。在施工中,岩爆直接威胁施工人员、设备的安全,影响工程进度,已成为世界性的地下工程难题之一。

隧道开挖过程中,开挖打破了原有的围岩地应力平衡关系,使原有的平衡地应力分异为开挖后坑道周边的切向应力和径向应力,切向应力值在坑道边线处最大,随着与坑道边线的距离增加而减小,径向应力在坑道周边最小,随着与坑道边线的距离减小而增加(切向应力和径向应力分异见图1)。在硐室开挖后,对高强度岩石而言,其弹性模量大,因而应力释放时位移变形小,释放能量非常有限,大部分能量需要突然释放,从而导致岩体快速破裂并与母岩分离,产生岩爆。

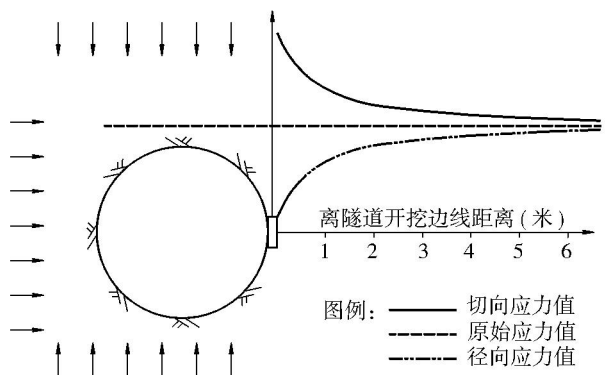


图1 隧道开挖地应力分布与隧道关系示意

一般认为,有五大因素影响或控制岩爆的发生: 岩石干燥无水; 岩石抗压强度较高($>80\text{MPa}$); 岩石完整性好; 隧道埋深较大; 最大初始地应力/岩石单轴抗压强度 $>1/7$,施工中若具备三个因素以上便容易产生岩爆,在具备岩爆条件的情况下,其发生的概率同时与硐室跨度相关。

施工中,可根据岩石的完整性、单轴抗压强度指标、围岩的应力水平等进行岩爆的预测、预报。围岩的完整性、干燥程度和埋深可以通过超前地质预报(包括地质素描与调查、物探和钻探)进行判断,围岩的岩石力学指标可以通过岩石取样进行实验室室内试验获得,围岩的地应力水平值可以通过隧硐埋深进行自重应力计算或采用地应力孔进行测试,目前我国采用的主要判定依据见表1。

表1 岩爆强度综合分级表

分 级 \ 分 项 指 标	c (MPa)	围岩级别	埋深 H (m)	岩石脆性指数 I_b	σ_1 / c
无岩爆	< 80	级	< 50	< 4	< 0.15
微弱岩爆	$80 \sim 120$	、级	$50 \sim 200$	$3.5 \sim 5.5$	$0.15 \sim 0.24$
中等强度岩爆	$120 \sim 180$	、级	$200 \sim 700$	$5.0 \sim 7.5$	$0.20 \sim 0.35$
强烈岩爆	> 180	、级	> 700	> 7.5	> 0.30
σ_1 ——地应力的最大主应力; c ——岩石单轴抗压强度; 岩石脆性指数 $I_b = \text{岩石达到峰值强度前的总变形 } S_1 / \text{岩石的永久变形 } S_0$					

一般来说,轻微岩爆对施工的危害不大并且比较容易控制,而中等岩爆和极强岩爆则对施工人员和设备的危害极大且不易控制,稍有不慎易酿成灾难性后果。

2 岩爆各种防治措施

岩爆作为一种灾害性不良地质现象,有其自身的发生、发展的条件和规律,在施工中,防治必须从预报开始抓起,只有在较为准确预报的基础上,才能针对预报的结论,提前制定相应的岩爆防治预案,以便在地下工程开挖过程中逐步实施、稳步推进。

对岩爆的防治,重点应注重超前性和及时性,岩爆一旦发生,将对施工的人员和设备构成直接的安全威胁,同时处理起来将是事倍功半。就是说,在具备岩爆条件的地下工程开挖过程中,应提前针对围岩特性及地应力条件,评估其岩爆发生的概率和强度等级,并根据预报的结果,提前或及时采取措施加以防治,通过相应手段和措施的处理,尽量减少岩爆的发生,并杜绝因岩爆引发的大规模坍塌,避免地下工程开挖过程中灾难性事故的发生。一般来讲,应在预报的基础上,针对不同岩爆诱因,采取不同的防治措施,以达到“对症下药、药到病除”的效果,岩爆防治措施分主动措施和被动措施,主动措施包括:超前地应力驱除爆破、钻设地应力释放孔、爆破作业后对坑道掌子面及周边进行喷洒水;被动措施包括:喷射混凝土支护、打设预应力锚杆及格栅钢架支护。

2.1 围岩特性为主要诱因的岩爆防治

从岩爆形成机理和诱发岩爆发生的五大因素可以看出,岩石干燥无水、岩石单轴抗压强度较高($> 80\text{MPa}$)及围岩完整性好是受围岩特性控制的,在施工中,若能判定围岩特性是诱发岩爆的主导因素,那在施工中,就应该采取相对应的措施进行防治,其措施主要有:爆破作业后对坑道掌子面及周边进行喷洒水、在爆破作业中适当增加孔底炸药用量。

2.1.1 喷、洒水的作用及方法

在地下工程爆破作业后,及时对坑道掌子面及周边进行喷、洒水是最常用并且较简单的一种方法,其主要目的在于:

(1) 软化周边围岩,降低岩石单轴抗压强度,从而有效降低岩爆发生的几率和等级;

(2) 在具备岩爆的高埋深条件下,坑道地温一般较高,同时炸药爆破将导致坑道温度的进一步提高,围岩与一般物质一样,具有热胀冷缩的特性,及时喷洒冷水,可以及时降低坑道周边围岩的地温场,从而控制岩石在开挖后的过度膨胀,以达到降低岩爆发生的几率和等级的目的。

喷、洒水在地下工程开挖爆破后及时实施,喷水最好选用高压水,喷射距离大于 10m。施工时,在隧道边墙左右侧一定高度(设置高度以爆破石碴堆积高度以上 1m 为宜)设置两个喷嘴,与后方高压水管相连,在爆破后,及时开启水龙头,向掌子面喷、洒水,喷水角度以尽量湿润岩面为宜,喷射时间 10 ~ 30min。之后为避免喷水对出碴造成影响,可改为雾状喷水。

2.1.2 加强孔底装药的作用及方法

在具备岩爆条件的完整围岩洞段,开挖爆破过程中加强底部装药主要目的在于利用围岩正常爆破剩余的能量,适当炸裂掌子面前方围岩,在未开挖洞段围岩内,形成不规则裂缝,提前诱发围岩应力的调整和释放,从而降低岩爆发生的几率及等级。

在进行开挖底部加强装药设计时,必须以正常钻爆设计装药为基准,在正常装药量的基础上,单孔增加 5 ~ 10% 的炸药量,增加炸药的炮孔为二圈眼以内,以尽量不破坏坑道周边围岩为宜。

2.2 高地应力条件为主要诱因的岩爆防治

岩爆形成和产生的另外两大因素,就是坑道埋深(H)和最大初始地应力/岩石单轴抗压强度($R_c/1$)的比值,从根本上说,坑道的埋深大小直接关系到围岩自重产生的地应力高低,也就是说,在围岩条件一定的情况下,坑道处地应力场(包括围岩自重应力和场地内构造应力的总和)的高低,在一定程度上直接决定岩爆产生几率和强度等级。

对于以高地应力为主要诱因的岩爆,重点因放在有意识的进行超前围岩地应力调整上,目前,国内外通用的方法主要有超前地应力驱除爆破和钻设应力释放孔两种。

2.2.1 超前地应力驱除爆破的作用和工艺

超前地应力驱除爆破是通过超前预爆破,致使掌子面前方待开挖洞段及对应的隧道周边一定范围内岩体产生裂隙,从而使很高的原始地应力提前进行分异和调整,从而降低待开挖洞段的地应力水平值,最终降低岩爆发生的概率和等级。

应力调整爆破的主要施工工艺包括超前应力驱除炮孔的布置,装药量设计。一般来说,要求炮孔在掌子面较均匀布置,炮孔间距离 2m 左右,钻孔深度按单循环进尺的 2 倍进行控制,同时炮孔向隧道周边设置一定外插角,外插角度以满足炮孔底落在隧道开挖线外 1 ~ 2m 左右为宜;单孔装药长度 1.5 ~ 2.0m,装药量 1 ~ 2kg,实际施工以爆破能形成将岩体致裂而不破碎为宜。炮孔布置见图 2。

在进行应力解除爆破后,围岩主应力将在破裂围岩周边开始分解成径向应力和切向应力,围岩内部的原始应力集中区(一般为构造裂隙附近)也因爆破振动得到调整,围岩整体地应力分布得到改善,整体地应力水平得到有效降低。

以上方法在锦屏水电枢纽工程西端辅助洞 BK6 + 050 ~ BK6 + 100 进行实验,取得了很好的效果,在 BK6 + 015 ~ BK6 + 050 段,因未采取超前应力驱除爆破,曾发生三次 ~ 级岩爆,之后,在加拿大专家威尔逊和加拿大籍华人博士朱焕春的指导下,在 BK6 + 050 后进行了超前应力驱除爆破实验,通过不断调整爆破参数,使后期的岩爆强度在同等条件下降低了 1 ~ 2 级。

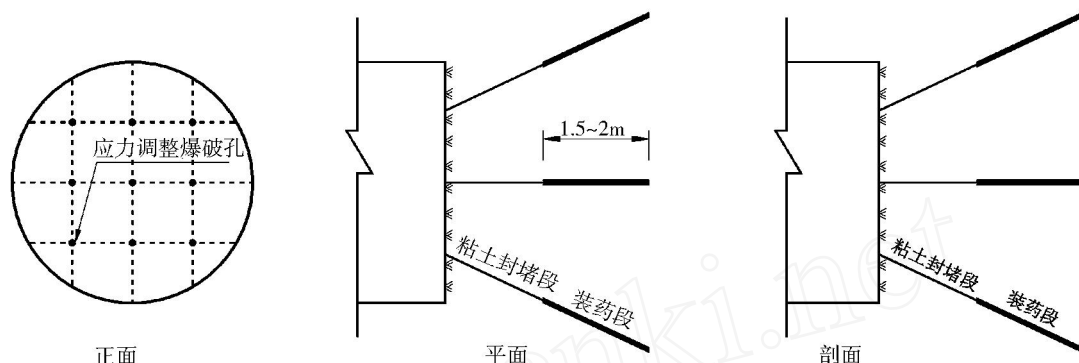


图 2 超前应力调整爆破炮孔布置示意

2.2.2 应力释放孔的作用及方法

应力释放孔包括超前应力释放孔和周边围岩应力释放孔,其作用均为有效改善坑道周边围岩的应力状况,使坑道周边围岩地应力重新调整和分配,亦即利用分布于坑道周边的大矢跨比小孔,将原本很高的地应力部分转移集中于小孔周边,而对于小孔而言,地应力适当提高不会导致小孔内岩爆的产生,但却能很大程度上改善已开挖或待开挖洞段的坑道受力状况,有效降低岩爆的发生。

超前围岩应力释放孔在隧道开挖前向掌子面前方钻设,释放孔主要分布于隧道开挖轮廓周边,中部可按 $2 \sim 3\text{m}$ 间距均匀布置,周边应力释放孔宜设置一定外插角,但角度不宜太大,一般孔底位于开挖轮廓线外 $30 \sim 50\text{cm}$ 较为合适,过大则容易在开挖后切向应力的作用下沿钻孔线脱落而诱发岩爆。钻进深度大于隧道单循环进尺的 2 倍,采用凿岩台车钻孔即可。对中等岩爆有一定的削弱作用。

周边围岩应力释放孔在隧道爆破喷护后实施,应力释放孔沿隧道周边布置,钻孔深度以 $0.3D \sim 0.5D$ (D 为隧道洞径)为宜,一般布置间距为孔深的 $0.6 \sim 0.8$ 倍,在主应力方向取小值,次应力方向取大值。周边应力释放孔布置及应力改善示意图 3。

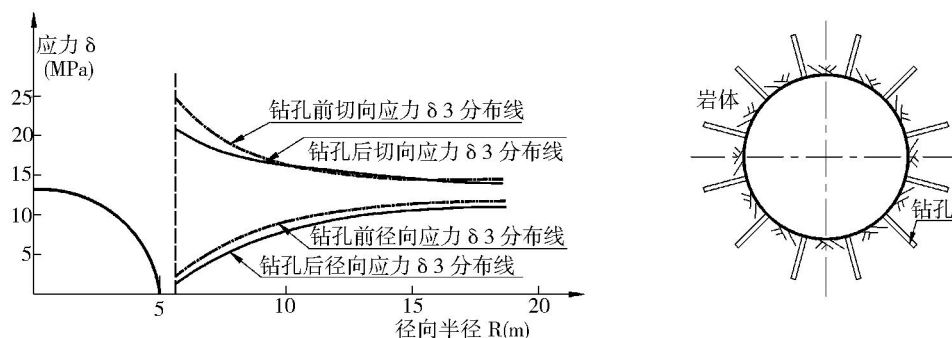


图 3 周边应力释放孔布置及应力改善示意

2.3 岩爆的被动防治措施

对于岩爆的防治而言,应采取综合治理的指导思想,即不限于围岩性状的改善和地应力条件的降低,对于上述两种措施而言,根本的出发点是降低岩爆发生的概率和等级,而不能从根本上克服

在措施条件下突然岩爆对施工生产的危害,要想真正有效的防治岩爆,还必须在坑道开挖后,及时采取有效的支护措施进行被动防治,换句话说,就是在地应力未完全释放以前,从外界及时给开挖的岩面施加一个力,去改善和平衡坑道周边分异的地应力,从而从根本上实现对岩爆的防治。

一般来说,被动防治最有效的措施包括:喷射混凝土、打设预应力锚杆及安装格栅钢架。

防岩爆喷射混凝土与一般普通喷射混凝土相比,初喷选择在爆破后及时进行,混凝土内需要参加钢纤维和纳米级新喷锚添加剂,钢纤维能提高混凝土的抗剪、抗折性能,纳米级新喷锚添加剂能缩短混凝土的初凝、终凝时间,同时提高混凝土的强度增长速度、与岩面的粘结力和改善混凝土的终期强度。该两种外加剂的加入能大大提高喷射混凝土的支护效果和支护能力,对岩爆的防治起到积极作用。

预应力锚杆以水力膨胀锚杆为宜,其施作时间尽量选择在坑道开挖后岩爆出现前实施。该类锚杆施工简单、快捷,安装一根锚杆不超过 2min,锚杆安装后便能提供全长的锚固力和粘结力,同时杆体能随应力的释放适应 5~30cm 的围岩变位,且其锚固力能随着杆体的拉伸而增加,在治理岩爆方面有意想不到的效果。

格栅钢架在洞碴出完后及时安装,安装完成后复喷混凝土进行覆盖,钢架和锚杆、喷射混凝土一起,形成一个弹性规则支撑圈,该支撑圈不但能对围岩提供一定的支撑力,同时还能承受一定的围岩变形,改善坑道周边的受力状况,避免应力集中诱发岩爆的发生。

另外,减小硐室单循环开挖爆破进尺,从而减小硐室纵向跨度,提高围岩自承能力,也是防治岩爆的有效措施之一,该方法可以很大程度上避免因小型岩爆而诱发的大型岩爆和大型坍方发生。

3 岩爆防治工程实例

3.1 工程简介

锦屏水电枢纽工程西端辅助洞进口位于雅砻江的二级电站闸址上游约 1000m 处,全长约 17.50km,一般埋深为 1500~2000m,最大埋深达 2375m,由二条平行、中心距为 35m 的单车道隧道组成。工程区范围内地质条件复杂,高埋深洞段主要为白山组(T2b)大理岩,脆性,抗压强度高(80~210MPa),部分洞段完整性好。

洞轴线最大主应力(σ_1)约 70.1MPa,最小主应力(σ_3)最大值约 3.1MPa;回归分析结果表明,隧洞区域地应力场的主要因素是自重和近东西向的水平挤压构造,其次是近南北向的水平挤压构造。最大主地应力为围岩自重应力和构造应力的合力。

从隧道围岩强度、岩性特征、硐室埋深和地应力分析,该隧道具备岩爆发育的良好条件。

3.2 施工情况

该项目 2004 年 1 月挂齿进洞,采用钻爆法施工,单口掘进 9.8km。施工期间,曾遭受不同强度等级岩爆的影响,由于工程经验缺乏,项目部为此付出了惨重代价,多次造成设备砸坏和人员受伤的安全事故,致使进度受阻,成本增加,07 年 1 月,在多次强岩爆的困扰下,单洞仅完成了 10m 的施工进度。在血的教训面前,项目部联合设计和业主共同攻关,并聘请加拿大 Itasca 咨询集团公司高级岩石力学专家朱焕春博士、美国超前地应力驱除爆破之父威尔逊教授、西南交通大学陈寿根教授进行现场指导,在各方的积极参与和不懈努力下,不断总结经验教训,最终摸索出一套岩爆防治的成功经验,攻克了该项目岩爆治理难题,为最终项目的顺利完成奠定了基础(见图 4、图 5)。



图 4 水涨式锚杆施工



图 5 BK6+040强烈岩爆砸坏凿岩台车

3.3 施工工艺流程

在具备岩爆发育条件的地下工程开挖中,通过辅助洞工程的探索和实践,摸索出一套简单有效的岩爆洞室开挖施工方法和工艺流程,其组织工艺流程见图 6。

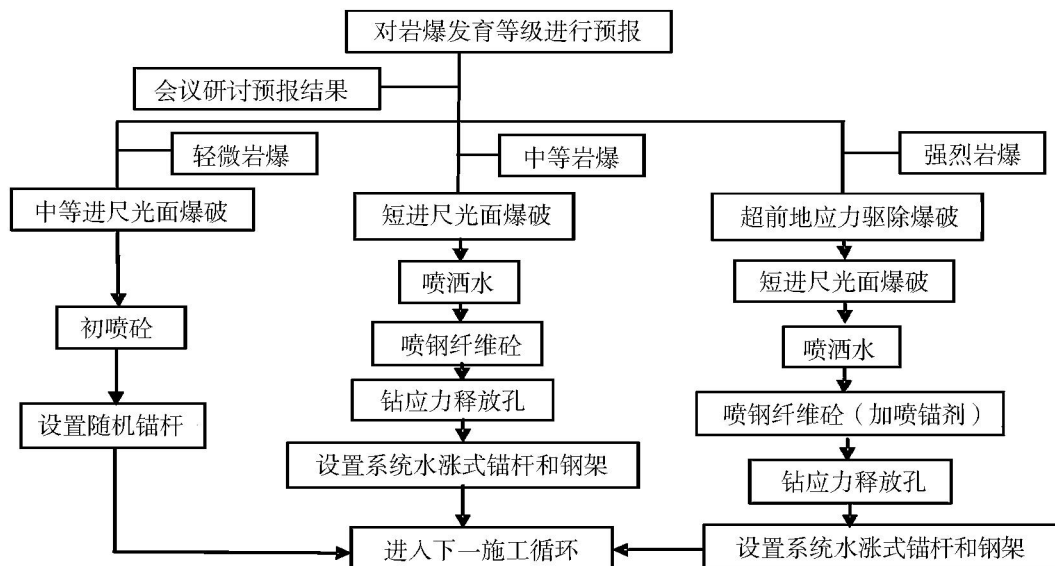


图 6 施工工艺流程

3.4 施工组织原则

由于岩爆的发生具有很强隐蔽性、破坏性和危害性,因此施工中必须谨慎对应,方能对岩爆进行有效控制而使在有条件发生岩爆洞段不发生岩爆或降低岩爆发生的等级。因此施工中必须遵循:“预测超前、准确定性;方案合理、措施得力;刚柔并举,宁强勿若”的原则组织施工。

“预测超前、准确定性”是指在隧道开挖前,应充分利用现有的地质超前预报手段,预测、预报前方隧道围岩的完整性和强度等级,在此基础上,根据隧道埋深自重应力及构造应力水平值,分析岩爆发生的可能性及可能发生的等级,为制定合理的施工方案奠定基础。

“方案合理、措施得力”是指在已经明确判定隧道掌子面前方岩体具备岩爆发生的条件并基本判定其可能发生岩爆等级的基础上,制定合理的岩爆应对方案,在合理方案的前提下,细化各施工步骤的技术措施,及时、快速地有效遏制岩爆发生或降低岩爆的发生强度。

“刚柔并举,宁强勿若”是指在隧道开挖后,应根据预测岩爆强度等级情况,选择合适的支护方式,一方面,应在一定程度上允许集中的高地应力有条件适当释放,另一方面,又必须遏制其过度释放而导致岩爆,因此,在支护方式上,一般采取刚性支护和柔性支护相结合的支护方式。就支护强度而言,则应比预测的岩爆强度等级加强一级进行支护,避免在后期爆破作业过程中,因地应力重新分配和调整发生岩爆并诱发大体积坍塌而酿成灾难性后果。

4 结 论

岩爆是脆、硬性完整围岩在高地应力条件下坑道开挖后由于地应力重新调整的产物,其发生发展具有很强的突发性和破坏性,但同时也具有规律性。施工组织中,管理人员必须树立岩爆防治意识、理清岩爆防治思路、坚持岩爆防治原则、贯彻岩爆防治方案,并针对岩爆的主要诱因和可能发生岩爆的强度等级,采取综合措施进行有效治理,只要防治及时(包括防治的时机把握和措施实施的效率,亦即“早、快”原则)、方法得当、组织有力,是能够进行有效防治的。

参 考 文 献

- 1 陶振宇,朱焕春,李广平,高延法.岩石力学的地质与物理基础[M].武汉:中国地质大学出版社,1996
- 2 朱焕春,陶振宇.河谷走向与河谷地应力分布[J].岩石力学与工程学报,14(1):17-24
- 3 谭以安.岩爆形成机理研究.水文地质工程地质,1989.1
- 4 朱江棚.长大引水隧洞岩爆机理分析及防治研究[D].河海大学,2007
- 5 杜子建.岩爆预测理论与应用研究[D].武汉科技大学,2007
- 6 不良地质隧道的开挖及支护技术研究.中铁二局股份有限公司,2001.7