

四川锦屏山隧道岩爆综合防治施工技术

侯景德

(中铁十四局集团有限公司,山东 济南 250014)

摘要:锦屏山隧道工程是锦屏水电枢纽工程的关键性控制施工项目,隧道地处我国西南高地应力区,全长约 17.5 km,隧道最大埋深约为 2375 m,埋深大于 1500 m 的地段长度约 12875 m。通过对锦屏山隧道现场岩爆特征的分析总结和研究所,介绍了锦屏山隧道岩爆独特的工程特点和综合防治施工技术。

关键词:特长深埋隧道;岩爆;综合防治;施工技术

中图分类号:TV554 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)06-0075-06

Construction Technology of Comprehensive Prevention for Rock Burst in the Jinpingshan Tunnel in Sichuan/HOU Jing-de (China Railway Shisiju Group Corporation, Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: The Jinpingshan tunnel project is the key of Jinping hydropower complex, which is located in the high geo-stress area of south-west China with a whole length of about 17.5km and the maximum depth of the tunnel is about 2375m. The length of the section with buried depth over 1500m is about 12875m. The paper introduces the unique characteristics of the project and the comprehensive prevention construction technology by the analysis and study on the rock burst characteristics in Jinpingshan tunnel.

Key words: extra-long deep tunnel; rock burst; comprehensive prevention; construction technology

1 工程概况

锦屏山隧道是锦屏水电枢纽工程的关键性控制施工项目,其作用是沟通东、西雅砻江的交通运输,并作为锦屏二级水电站引水隧洞的施工辅助隧道,集交通、科研、试验等多种功能于一身。锦屏山隧道由 2 条相互平行、中心距为 35 m、洞断面尺寸分别为 5.5 m×5.7 m(宽×高)、6 m×6.25 m 的单车道隧道组成,围岩主要由三叠系(T)地层组成,岩性主要为碳酸岩,隧道特长(达 17.5 km,独头掘进 9.5 km)与埋深大(达 2400 m,最大地应力可达 54 MPa)的特点决定了岩爆是其主要工程地质难题之一。在施工开挖过程中产生了中等强度岩爆,部分洞段为强岩爆,岩爆对施工安全、工程质量、工期和环境具有重大影响,施工中对岩爆的综合防治施工技术是本工程的重点和难点。

2 锦屏山隧道东端岩爆前兆与特征

锦屏山隧道埋深大、地应力高、岩石坚硬以及岩体结构完整造就了锦屏山隧道独特的岩爆工程特征。锦屏山隧道自开工,发生了规模不等的岩爆数百次。

(1)岩爆多发生在右侧边墙及起拱线部位,部

分强烈岩爆多全断面发生,并向深部扩展。

(2)岩爆多发生在围岩为片层状结构的类型中,且干燥无水。横通道与主洞相交的交叉口、洞室群等应力集中区、加宽带开挖断面较大的洞段亦为岩爆多发地段。

(3)岩爆的运动特征以松脱、剥离为主,在岩爆发生前并无明显的征兆,一般认为不会坍塌的地方,也会突然发生岩石爆裂声响,石块有时应声而下,有时仅听到巨大的爆裂声而无岩块坠下,2~3 h 后岩块剥落甚至几天后岩块才会剥落。

(4)岩爆与岩石的单轴抗压强度联系不太明显,隧道岩石单轴抗压强度大多集中在 60~110 MPa 之间,但在单轴抗压强度 60 MPa 左右的洞段,依然存在岩爆的发生。

(5)根据隧道发生岩爆实例统计显示,岩爆可分为活跃期及持续期;活跃期即岩爆多在新开挖的工作面附近发生,距掌子面 3~20 m 左右,在爆破后的 3~20 h 最为活跃;持续期即掌子面推进数天乃至数月后发生过岩爆的部位仍可能再次剥落或发生岩爆。

(6)根据隧道已发生岩爆实例统计显示,锦屏山隧道东端岩爆以 I、II 级岩爆为主,个别洞段发生

收稿日期:2010-05-02

作者简介:侯景德(1967-),男(汉族),山东郓城人,中铁十四局集团有限公司工程管理部副部长、高级工程师,机械设计与制造专业,从事工程施工管理工作,山东省济南市和平路 1 号,ztssjgcb@126.com。

Ⅲ、Ⅳ级岩爆。Ⅰ、Ⅱ级岩爆的破坏方式主要以层状/片状剥落,呈薄片或板状。层/片状剥落岩石呈薄片或板状,单层厚度0.5~10 cm,破裂面大多平直。Ⅲ级岩爆的破坏方式主要为弯曲折断和楔状爆裂,弯曲鼓折在临空面中部发生折断,破裂面中间较平直,在边缘部位呈参差阶梯状。Ⅳ级岩爆的破坏方式极为剧烈,岩爆向围岩深处发展,大块岩片出现剧烈弹射,震动强烈。

锦屏山隧道东段A洞首次岩爆发生在AK16+410~400的左肩部位,岩爆破裂面平整光滑,但边缘断口参差不平整,是弯状爆裂为主的张剪性破坏,属于应变型Ⅰ级岩爆,岩爆发生时有清脆的爆裂声。该段岩性为灰黑色薄层泥质灰岩,围岩类别Ⅱ类偏强,无地下水,仅发育一组裂隙。其中AK15+871~861、AK14+886~841、AK14+283~191和AK15+822~804等处发生Ⅰ级岩爆,无弹射,声音响度中等,碎片状剥落,坑深10~20 cm,坑面及边缘呈不规则、不平整状。锦屏山隧道东段B洞首次岩爆发生在AK16+292~257.5的洞顶左壁,岩爆的破裂面和边缘断口平整光滑,是弯状爆裂为主的张剪性破坏,属于应变型Ⅰ级岩爆。该段岩性为黑灰色薄层泥质灰岩夹中厚层细晶大理岩,围岩类别Ⅱ类偏强,无地下水,发育二组裂隙。在靠近洞口的BK16+244~BK15+713洞段主要发育Ⅰ级岩爆,BK15

+713~095洞段发育Ⅰ~Ⅱ级岩爆,BK14+642~734洞段发育Ⅱ~Ⅲ级岩爆,特别是BK14+642~672和BK14+672~713洞段发育Ⅲ级岩爆(见图1)。再往深处,岩爆的发育又以Ⅰ~Ⅱ级为主。



图1 BK14+672~713段右壁岩爆照片

3 锦屏山隧道岩爆变形破坏模式

锦屏山隧道岩爆变形破坏地质力学模式有以下6种基本模式:张裂—剥落、张裂—倾倒、张裂—滑移、张裂—剪断、弯曲鼓折以及穹状爆裂。

4 锦屏山隧道岩爆类型划分与烈度分级

针对锦屏山隧道东段岩爆实际情况,利用围岩应力强度比 σ_0/R_b (其中 σ_0 为洞室开挖后二次应力场最大切向应力, R_b 为岩石单轴抗压强度)、强度应力能指数 W_{ei} 、强度应力比 R_b/σ_m (其中 σ_m 为初始地应力状态下,岩石最大主应力和临界埋深 H_{cr})大小进行岩爆等级的定量判别,同时,用岩爆的一些主要表现特征作为定性判别依据。两者结合见表1。

表1 锦屏山隧道岩爆烈度分级方案

岩爆分级	主要现象							弹性应变能指数 W_{ei}	围岩强度应力比 (R_b/σ_m)	对工程的影响	支护类型
	声响特征	运动特征	时效特征	波及深度	岩块形态特征	断口破坏性质	应力强度比 (σ_0/R_b)				
轻微岩爆(Ⅰ级)	噼啪声、撕裂声	剥离、外鼓	零星间断爆裂	<0.5 m	薄片状、薄透镜体状	张性破坏为主	0.3~0.5	<2.0	4~7	很小	不支护或局部锚杆或喷混凝土。大跨度时,喷混凝土、系统锚杆加钢筋网
中等岩爆(Ⅱ级)	噼啪声、清脆的爆裂声	剥离现象严重,弯折破裂,少量弹射	持续时间较长,有随时间累进性向深部发展特征	0.5~1.0 m	透镜状、棱板状	张剪破坏并存	0.5~0.7	2.0~5.0	2~4	有一定的影响	喷混凝土、加密锚杆加钢筋网,局部格栅钢架支撑。跨度大于20 m时,并浇混凝土衬砌
强岩爆(Ⅲ级)	强烈的爆裂及闷响声	大片爆裂,出现强烈弹射	具有延续性,并迅速向围岩深部扩展	1.0~2.0 m	棱板状、块状、板状	剪张破坏并存	0.7~0.9	2.0~5.0	1~2	较大	应力释放孔,喷混凝土、加密锚杆加钢筋网,并浇混凝土衬砌或格栅钢架支撑
极强岩爆(Ⅳ级)	剧烈的闷响爆裂声	大片连续爆裂,大块岩片出现弹射	具突发性,并迅速向围岩深部扩展	>2.0 m	块状、板状或散体	剪张破坏并存	>0.9	>5.0	<1	很大	

注:① W_{ei} 为能量倾向性指数;② σ_0/σ_R 与 W_{ei} 均满足时才发生该等级岩爆。

5 锦屏山隧道岩爆综合防治施工技术

5.1 岩爆防治的应力解除与纳米喷涂柔性支护体系

5.1.1 改善围岩受力状态方案

岩爆地段采用钻爆法施工时,通常采用短进尺掘进,减少药量和减少爆破频率,控制光爆效果,以减少围岩表面层应力集中。轻微岩爆(I级)、中等岩爆(II级)区:一般进尺控制在2~2.5 m,尽量全断面开挖,一次成形,以减少围岩应力平衡状态破坏。施工后,主要措施是立即向掌子面及附近洞壁喷洒高压水或利用炮眼及锚杆孔向岩体深部注水,降低岩爆的剧烈程度。

5.1.2 应力解除法

应力解除法就是在施工中,边释放应力边掘进,使岩体原始应力提前释放,主要采用钻孔解除法和对已开挖围岩的纵向切槽法。

5.1.3 水胀式锚杆控制法

锚杆和钻孔压力注水是加固和治理中等岩爆最有效的方法之一,及时施作水胀式锚杆不仅可以加固岩体,改善围岩应力状态,还可以应用钻孔水力向孔内进行高压注水,造成岩体产生裂缝,达到缓减应力集中、减弱岩爆的目的。

5.1.4 加固围岩法

对不同烈度的岩爆一般采用不同的加固处理措施。加固围岩法在施工实践中取得了良好的效果,尤其是锚杆、喷纳米砼挂网等。通过设预应力锚杆、水胀式锚杆、加长锚杆、挂钢筋网喷混凝土、喷钢纤维或纳米混凝土、加设钢拱架等措施来有效加固围岩。

5.1.5 爆破方式

采用“短进尺、弱爆破”的施工方式,控制诱发岩爆发生的条件。

5.2 岩爆防治原则与措施

(1)针对锦屏山隧道的地质特征,在施工中可能出现岩爆的地段采取积极主动的预防措施和强有力的施工支护,确保岩爆地段的施工安全,将岩爆发生的可能性及岩爆的危害降到最低。

(2)做好隧道潜在岩爆洞段的岩爆预测工作,在充分认识隧道工程区的地形地貌、地质情况,并掌握隧道岩爆发生规律和岩爆特征的基础上,对隧道沿线未开挖洞段作出岩爆宏观预测。

(3)综合运用围岩岩性分析预测法等对岩爆的发生进行预报。

(4)对已经发生的岩爆破坏方式、岩体应力水

平、岩石强度、结构面发育特征进行分类总结,获得岩爆发生条件的认识,建立经验判断方法。

(5)隧道岩爆防治主要采用控制爆破和锚喷支护,即短进尺控制爆破开挖,强烈与极强岩爆洞段要求配合应力解除爆破开挖—危石清理及高压水冲洗—及时喷射混凝土覆盖岩面—及时实施防岩爆锚固措施(包括快速锚杆、挂网、钢拱架等)—后续实施系统锚杆支护。严格按照岩爆洞段施工程序进行。

①在岩爆频发洞段隧道开挖,要求采用短进尺开挖掘进措施,每次开挖进尺<1.5 m。强烈和极强岩爆洞段应将应力解除爆破作为日常性爆破作业的一部分。

②出渣后即针对开挖掌子面和周边洞壁进行危石清除作业,并随后进行高压水冲洗。

③在新开挖洞室的边顶拱和掌子面及时采用5~10 cm厚CF30钢纤维混凝土进行初次喷护。

④若爆破开挖后揭示开挖掌子面或新开挖边顶拱岩面岩爆情况特别严重,为了保证施工安全,可以考虑先不进行出渣,利用爆破石渣防护掌子面和开挖边壁,然后采用先顶拱防护,后边壁和掌子面防护的顺序分序进行,具体如下:

(a)先对顶拱进行危石清除作业,并随后进行高压水冲洗,再采用10 cm厚CF30钢纤维混凝土进行初次喷护;

(b)接着出渣,完成出渣作业后再针对开挖掌子面和隧道边壁进行危石清除作业,并随后进行高压水冲洗,最后及时采用10 cm厚CF30钢纤维混凝土进行初次喷护。

⑤强烈和极强岩爆洞段开挖前应考虑超前锚杆预支护措施和掌子面的喷护。

⑥隧道开挖后及时采用喷护钢纤维混凝土(必要时采用超细粉磨无机纳米材料喷射混凝土)的措施封闭开挖裸露面,初喷层厚度一般在5 cm,为安全考虑,必要时应将初喷混凝土厚度增至10 cm。

⑦在掌子面和周边洞壁喷护完成后,在顶拱范围内进行防岩爆锚杆施工,防岩爆锚杆要求设置钢垫板,并通过锚杆垫板固定挂网钢筋网片。锚杆可采用机械涨壳式锚杆或水胀式锚杆,锚杆长度3.5~4.5 m,间排距1.5~1.0 m,同时架设钢筋网片,采用锚杆外垫板快速固定钢筋网片,并根据岩爆强度随机布置钢筋拱肋或格栅拱架。

⑧架设钢筋网片范围为顶拱并延伸到两侧拱肩以下1 m。每个钢筋网片事先焊接,尺寸为2.0 m×2.0 m,网片之间在布设中重叠不小于45 cm,采用

1.5 m × 1.5 m 间距, $L = 3.5 \sim 5$ m 带外垫板的水胀式锚杆快速固定钢筋网片。

⑨在钢纤维混凝土初次喷护与钢筋网片、水胀式锚杆的保护下,及时进行系统锚杆的安装,顶拱部位系统锚杆的布设要错开初期水胀式锚杆的位置,隧洞的系统支护距离开挖掌子面不宜大于 10 m。

⑩最后及时进行 C25 二次喷混凝土层施工,厚度 8 ~ 15 cm,使洞壁喷层总厚度达到 13 ~ 20 cm,形成永久支护体系。

⑪在强烈 ~ 极强岩爆洞段,若上述第 7 条措施中的挂网施工难度较大,则可以采用 40 cm 宽的螺旋钢筋拱肋代替钢筋网。钢筋拱肋采用 3 根 $\varnothing 25$ mm 的纵向钢筋和间距 30 cm、 $\varnothing 16$ mm 的横向钢筋

焊接加工而成,钢筋拱肋横断面形状与洞顶拱开挖断面形状相似,钢筋拱肋间距为 150 cm,并通过水胀式锚杆快速固定螺纹钢拱肋。

(6)在施工质量和工艺得到保障的情况下,隧道防岩爆的柔性支护体系,首选普通螺纹钢及喷射混凝土,Ⅲ级及以上岩爆地段应快速施工机械涨壳式锚杆,也可以选择水胀式锚杆,但只能作为临时锚固帮助控制岩爆,锚杆外端头均需配置钢垫板(200 mm × 200 mm × 8 mm)和相应的配件,并应满足岩爆控制的施工技术要求。

(7)针对锦屏山隧道岩爆特征与规律,采用如表 2 所示的岩爆防治措施。

表 2 锦屏山隧道东段岩爆防治措施

岩爆等级	预防措施	治理措施	爆破方式
轻微岩爆 (Ⅰ级)	一般进尺控制在 2 ~ 3 m;尽可能全断面开挖,一次成形,以减少围岩应力平衡状态的破坏;及时在掌子面和洞壁经常喷撒水;某些Ⅱ级岩爆段必要时可以用超前钻孔应力解除法来释放部分应力,而一些岩爆连续发生段在施工后可以进行适当的待避,等岩爆高峰期过后再作业	局部岩爆段可以通过初喷 5 cm 厚的 CF30 钢纤维混凝土来防止洞表面岩体的剥离;对岩爆频繁段,边顶拱范围,随机安设钢筋网片 $\varnothing 6.5 @ 15 \times 15$ cm + 随机布置 $\varnothing 25$, $L = 3.5$ m 长的涨壳式预应力锚杆或水胀式锚杆,后期边拱顶范围,二次喷混凝土 C25 厚 8 cm	光面爆破
中等岩爆 (Ⅱ级)	一般进尺控制在 1.5 ~ 2 m 以内;采用打超前应力孔法来提前释放应力、降低岩体能量;及时在掌子面和洞壁经常喷撒水,必要时可均匀、反复地向掌子面高压注水,以降低岩体地强度;在一些岩爆连续发生段施工后可以适当的进行待避,等岩爆高峰期过后再作业	采用边拱顶网锚喷支护法,喷 7 cm 的 CF30 钢纤维混凝土(或纳米混凝土) + 挂网 $\varnothing 6.5 @ 15 \times 15$ cm,采用 $\varnothing 25$, $L = 3.5$ m 长涨壳式预应力锚杆或水胀式锚杆,间距 1.5 m × 1.5 m。后期边拱顶范围,二次喷混凝土 C25 厚 8 cm	光面爆破,局部采用应力解除爆破
强烈岩爆 (Ⅲ级)	一般进尺控制在 1.5 ~ 2 m 以内;采用打超前应力孔法来提前释放应力、降低岩体能量;及时在掌子面和洞壁经常喷撒水,必要时可均匀、反复地向掌子面高压注水,以降低岩体地强度;在一些岩爆连续发生段施工后可以适当的进行待避,等岩爆高峰期过后再作业	采用边拱顶网锚喷支护法,喷 7 cm 的 CF30 钢纤维混凝土(或纳米混凝土) + 挂网 $\varnothing 8 @ 15 \times 15$ cm,采用 $\varnothing 32$, $L = 4.5$ m 长涨壳式预应力锚杆或水胀式锚杆,间距 1.0 m × 1.0 m。视岩爆强度随机增设钢筋拱肋。后期边拱顶范围,二次喷混凝土 C25 厚 8 cm	光面爆破为主,在岩爆烈度大、连续距离长地段采用一定的预裂爆破,局部采用应力解除爆破
极强岩爆 (Ⅳ级)	一般进尺控制在 1.5 ~ 2 m 以内;采用打超前应力孔法来提前释放应力、降低岩体能量;及时在掌子面和洞壁经常喷撒水,必要时可均匀、反复地向掌子面高压注水,以降低岩体地强度;在一些岩爆连续发生段施工后可以适当的进行待避,等岩爆高峰期过后再作业	采用边拱顶网锚喷支护法,喷 7 cm 的 CF30 钢纤维混凝土(或纳米混凝土) + 挂网 $\varnothing 8 @ 15 \times 15$ cm,采用 $\varnothing 32$, $L = 4.5$ m 长涨壳式预应力锚杆或水胀式锚杆,间距 1.0 m × 1.0 m。局部配合 120 型钢拱架或格栅拱架,拱架间距 0.8 m,后期二次喷混凝土 C25 厚 8 cm	采用应力解除爆破技术

锚杆根据实际情况采用普通螺纹锚杆、摩擦锚杆、水胀式锚杆、锥形锚杆或机械式涨壳锚杆,锚杆均需带垫板,梅花形布置,局部岩爆强烈部位随机布置加强锚杆,零星岩爆段可随机布置锚杆和钢筋网片,钢筋网片尺寸为 2.0 m × 2.0 m,网片之间在布设中重叠不小于 45 cm。

5.3 钻孔应力解除爆破

(1)应力解除爆破主要针对隧道遇到的强和极强型岩爆,中等到强的应变型岩爆也可以采用应力解除爆破,以降低支护工作量,同时减缓对加固施工安全和及时性方面的压力。

(2)应力解除爆破设计中应注意孔深、孔距、孔斜、装药量等几个方面的参数要求。

(3)在明确掌子面前方具有诱发强裂震动的地质构造以后,应力解除孔应穿过该地质构造。

(4)在极强岩爆条件下,应力解除爆破孔深度应该达到爆破进尺的 2 倍以上,或者孔底位于新掌子面前方至少 3.0 m 处,新掌子面是指解除爆破和开挖爆破完成后形成的掌子面。

(5)在强岩爆条件下,应力解除爆破孔深度应基本达到 2 倍进尺深度,在应力解除孔深度为 4.8 m 的情况下,爆破进尺 ≥ 2.5 m。

(6)在强岩爆和极强岩爆条件下,掌子面前方解除部位的解除孔孔距应保持在 2 m 左右的间距,极强岩爆条件下应力强烈集中部位可考虑降低到 1.8 m 左右,应力集中不强的部位可以放宽到 2.2 m

左右。

(7) 根据现场试验总结,在极强岩爆条件下应力集中区的装药量(装药量与被解除范围岩体质量之比)按不超过 0.07 kg/t 考虑,其他部位应考虑在 0.03 ~ 0.07 kg/t 之间。

(8) 孔斜的设计是考虑装药部位尽可能有效地解除应力,同时不至于使岩体损伤到需要增加加固工作量的程度。当潜在岩爆很强、应力集中突出时,

解除孔可以超出开挖边界进入围岩中,原则上顶拱部位超出的深度不应超过 0.5 m。

(9) 边墙孔深度一般应小于其他孔,边墙孔装药段与边墙的最小距离应该在 1.2 m 以上,但一般也不宜超过 2.5 m。

(10) 极强岩爆(B洞)和强岩爆(A洞)条件下的应力解除爆破施工方案如图 2 和图 3 所示(考虑的进尺长度为 2.5 m,最大不超过 3 m)。

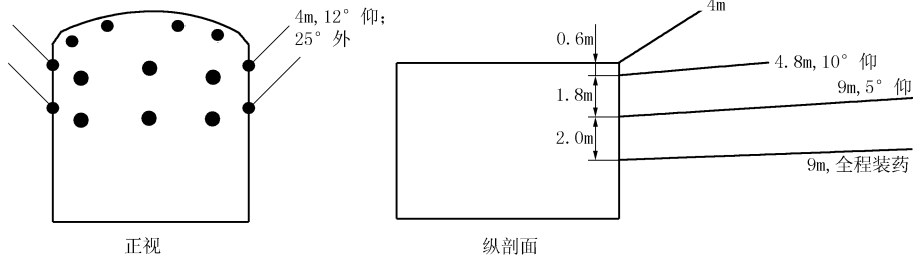


图 2 极强岩爆条件下的应力解除爆破施工方案

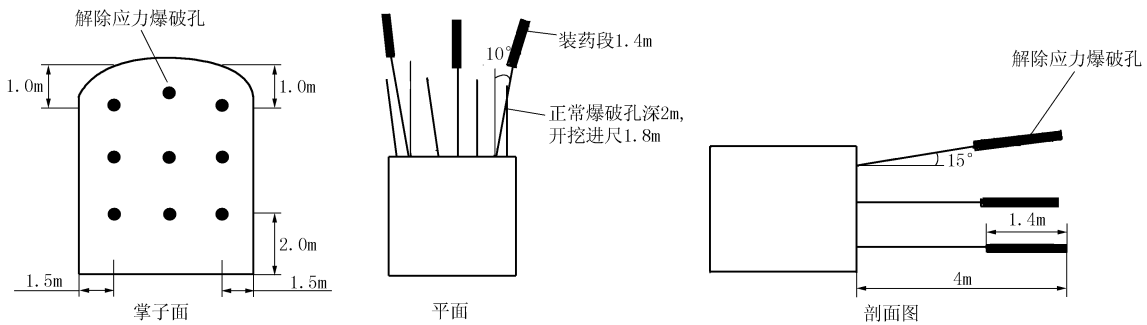


图 3 强岩爆条件下的应力解除爆破施工方案

(11) 在该施工方案基础上,在实施过程中:

- ①取消侧墙的下方应力解除孔;
- ②在上一步基础上,根据效果取消全部侧孔;
- ③在取消了侧孔的基础上,也可以将顶孔深度加深到 9 m,这样可以在台车加长钻杆后一次完成全部应力解除孔的钻孔和全部应力解除爆破工作,并将爆破进尺提高到 3.0 m 的水平,提高工作效率。

(12) 装药量与围压应力水平和岩体质量直接相关,现场把握的准则是最大装药量不至于破坏围岩。

(13) 对于类似 A 洞的应变型强岩爆,可以采用 9 个均匀且平行布置的钻孔作为解除孔,其中解除的重点是顶拱,因此,顶孔距离顶拱的距离原则上应在 1 m 以内。解除孔长度大约为 2 倍开挖进尺,底部 1 ~ 1.4 m 深度范围装药。

(14) 锦屏山隧道应力解除爆破方案在 II、III 级岩爆洞段布设应力解除孔 10 个:外环 5 个,距离顶拱 1 m,23°仰角布置,孔深 5.25 m,装药段 1.0 m;内

环孔 3 个,距离中排孔 1.5 m,与洞轴平行布置,孔深 5.25 m,装药段 1.0 m;底孔 2 个,距离上排孔 1.5 m,与洞轴平行布置,孔深 5.25 m,装药段 1.0 m。应力解除孔全部装 $\varnothing 40$ mm 药卷,填塞 1.0 m 锚固药卷做炮泥。具体参数根据实际情况进行调整和改进。

应力解除爆破与正常掘进爆破同时进行,超前正常掏槽眼 3 段起爆,如图 4 所示。

(15) 锦屏山隧道应力解除爆破方案在 III、IV 级岩爆洞段布设应力解除孔 13 个:外环孔 7 个,距离顶拱 1 m,径向偏前 60°外插布置,孔深 5.25 m,装药段 1.4 m;内环孔 3 个,距离中排孔 1.5 m,与洞轴平行布置,孔深 5.25 m,装药段 1.4 m;底孔 3 个,距离上排孔 1.5 m,孔深 5.25 m,装药段 1.4 m。应力解除孔全部装 $\varnothing 32$ mm 药卷,填塞 1.0 m 锚固药卷做炮泥。具体参数根据岩爆区的实际情况进行调整和改进。

应力解除爆破与正常掘进爆破同时进行,超前

正常掏槽眼3段起爆,如图5所示。

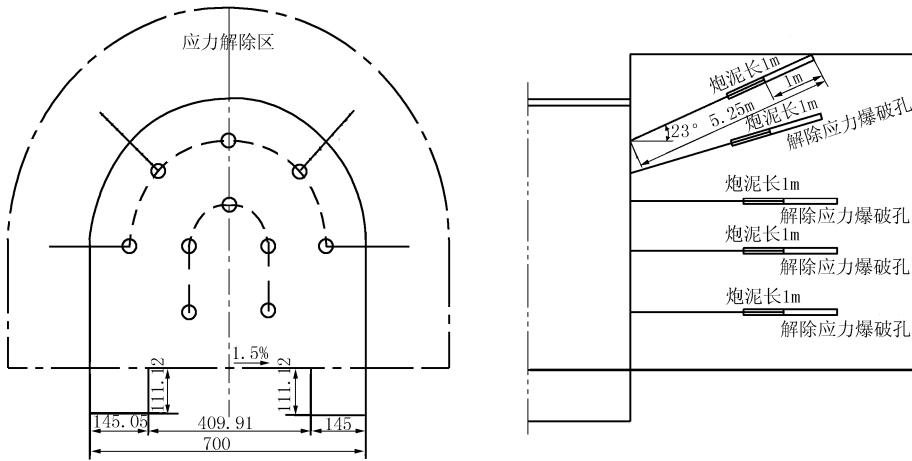


图4 B洞Ⅱ、Ⅲ级岩爆应力解除爆破方案

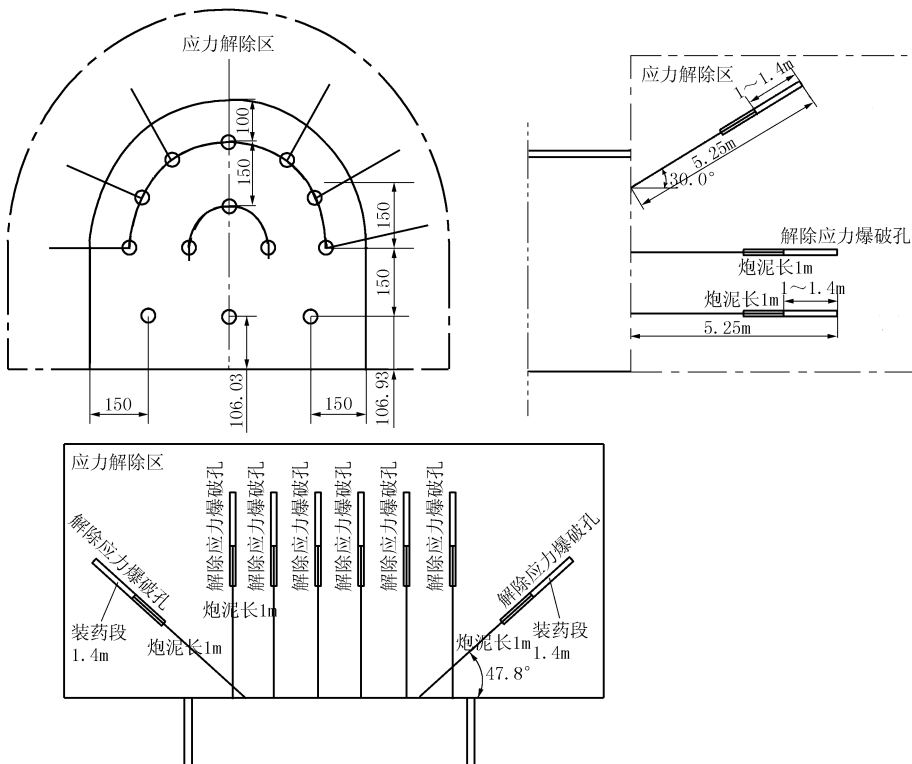


图5 B洞Ⅲ、Ⅳ级岩爆应力解除爆破方案

6 结语

通过对锦屏山隧道现场岩爆特征的分析总结和研究,在重点岩爆地段,采用了岩爆防治的以钻孔应力解除和纳米材料为主的柔性支护体系联合防治措施,利用及时的“先初喷、后挂网加锚、再复喷”的柔性支护系统可保护围岩的完整性和保持有利于围岩稳定的围压条件,有效的防止和减少了岩爆的危害,所取得的成果在锦屏山二级水电站引水隧洞工程施工中得到了应用,对于类似工程具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 吕庆,孙红月,尚岳全,等.深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J].岩土力学,2005,(6).
- [2] 徐林生,王兰生,李永林.岩爆形成机制与判断研究[J].岩土力学,2002,(3).
- [3] 梁圣彬,阳文通.岩爆形成的力学机理与施工防治浅谈[J].重庆建筑,2009,(2).
- [4] 徐则民,黄润秋,范柱国,等.长大隧道岩爆灾害研究进展[J].自然灾害学报,2004,(2).
- [5] 李天斌,肖学沛.地下工程岩爆预测的综合集成方法[J].地球科学进展,2008,(5).