

# 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆洞段开挖技术措施

李金辉, 徐茂华

(四川二滩国际工程咨询有限责任公司, 四川 成都 611130)

**摘要:**大理深、高地应力区地下工程施工普遍会遇到岩爆问题。如何预防和防止岩爆对施工人员造成伤害、对工程造成破坏是大理深、高地应力地区地下工程施工中的难点,一直没有成熟可靠的施工措施避免岩爆造成的危害。锦屏二级水电站引水隧洞群埋深普遍达1 500~2 520 m,地应力达到70 MPa,岩爆发生频繁。通过工程参建单位和科研机构的共同努力,采取了“主动预防、被动治理相结合”的方式,总体顺利完成了引水隧洞的开挖贯通,其施工技术措施和经验可供类似工程参考。

**关键词:**锦屏二级水电站;引水隧洞;岩爆;开挖技术

**中图分类号:**TV7;TV52;TV554;TV554+.2

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2015)增2-0058-03

## 1 工程概述

锦屏二级水电站引水系统采用4洞8机布置形式,四条平行布置的引水隧洞平均洞线长度约为16.7 km,隧洞中心距60 m。引水隧洞开挖直径为12.4~14.4 m。

## 2 岩爆发生的特点

锦屏二级水电站引水隧洞沿线地层岩性主要为三迭系(T)中、上统的大理岩、灰岩及砂岩、板岩。引水隧洞线路区地处西南高地应力区,洞群沿线上覆岩体一般埋深为1 500~2 000 m,最大埋深约为2 525 m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点。隧洞线高程的最大和最小主应力值分别为70.1 MPa和30.1 MPa。

岩爆发生具有以下规律和特点:

(1)岩爆以轻微岩爆、中等岩爆为主,次为强烈岩爆和少量极强岩爆。受其影响围岩破坏较严重,洞室坍塌普遍。在高地应力作用下的岩体多呈层状劈裂破坏,破坏方式有片/层状剥落、弯曲鼓折破裂、穹状/楔状爆裂三种,破坏深度以15~40 cm居多,最深达2~2.5 m,个别大于2.5 m以上。

(2)引水隧洞洞室开挖采用TBM与钻爆开挖相结合的方式,在洞室开挖掘进至约10 km时进入潜在强岩爆洞段,随着掘进埋深的增加,岩爆频发、等级越来越高。

(3)白山组大理岩地层是锦屏二级水电站引水隧洞岩爆强度最大、岩爆洞段最长的岩层。岩爆发生部位主要包括:埋深大、应力集中洞段;岩

体完整干燥、致密细粒结构岩石部位;软弱围岩及裂隙密集带与完整围岩过渡带附近;洞室交岔部位附近和长大贯通性刚性结构面附近;洞室的北侧起拱线附近,局部拱顶以及底板、掌子面也常发生强烈岩爆。

(4)岩爆一般在爆破后2~5 h发生(约占70%),多发生在距掌子面2倍洞径范围内。极强岩爆滞后爆破可达5~20 h,有时间歇10 d至数天不等,甚至几个月,距离掌子面达20~30 m。

(5)岩爆具有突发性,岩爆前一般无明显的征兆,岩爆经常引发应力型的坍塌,致使其破坏性也增大。

## 3 开挖采用的施工技术措施

针对锦屏二级水电站引水隧洞开挖岩爆具有的特点和施工环境,现场组织相关人员收集、整理、分析、比较了国内外有关岩爆治理的相关文献资料,对各种技术方案进行了分析、比较、论证,通过专家咨询、参建各方充分讨论研究,确定了隧洞岩爆段施工专项方案。

锦屏二级水电站引水隧洞在岩爆洞段开挖施工采取了主动预防、被动治理相结合的方式,遵照“预防为主、防治结合”原则,采取了有针对性的施工方法与处理措施,以解决和保证施工安全、工程安全并在实施中不断地改进和完善。

### 3.1 主动预防技术措施

(1)地质预报技术。

在引水隧洞施工过程中,坚持预报在前,先探后掘,最大限度地查明前方地质状况,以指导施

收稿日期:2015-07-20

工,规避安全风险。岩爆预报采用宏观地质预测、TSP 中长距离预报、短距离表面雷达等方法进行综合地质预报。

采用工程地质法对地面不良地质体进行预报,TSP 技术进行隧洞内 150 m 的长距离探测,每 100 m 预报一次,重复段为 50 m,必要时采用超前钻探方法,同时辅助采用 HSP 技术作为 TSP 预报成果的对比验证手段。短距离超前地质预报是在长期超前地质预报的基础上进行的,预报距掌子面前方 50 m 范围内的工程地质条件,判断围岩类别等。

### (2) 微震监测技术。

在大的应力和岩爆地带,应力集中范围始终难以确定,更无法确定在何部位会出现岩爆。锦屏工程在多次研究高地应力下的围岩状态后,引进了微震监测技术,对有潜在岩爆的洞段进行监测,对掌子面前方 40 m 的应力范围及程度做出了描述。

2010 年 10 月 23 日~2011 年 11 月 21 日,共获得现场岩爆信息 237 次。其中 191 次提前进行了比较准确的岩爆范围和等级预测,占 80.6%;22 次预测等级偏低,占 9.3%;10 次预测范围偏离,占 4.2%;14 次未能提前预测(其中有 9 次主

要是由于设备被盗、线缆受损过多无法定位事件、设备故障等原因造成,5 次由于岩爆没有出现明显的岩爆前兆或监测设备没有采集到岩爆前兆信息)。

根据岩爆预测和发生情况,大多数岩爆具有前兆信息,通过微震监测系统拾取并经技术人员及时合理分析处理后大部分可提前预测。不少预测有岩爆风险的区域,在监理工程师督促承包人采取及时有效的支护措施后,避免了岩爆发生或降低了岩爆造成的破坏程度。只有少数岩爆前兆信息不明显,加之设备线缆等出现意外原因,造成少数实际发生的岩爆未能被提前预测或预测的等级或范围不准确。

### (3) 爆破控制技术。

引水隧洞开挖断面较大,采用上下台阶法开挖,先进行上半断面开挖,然后再进行下半断面开挖。

引水隧洞开挖施工采用光面爆破控制,尽可能使开挖面平顺,可以避免因开挖面不平顺引起围岩局部应力高度集中而导致的岩爆发生。

强~极强岩爆洞段采用短进尺、弱爆破,减少每个开挖循环的进尺,尽量减小发生岩爆的尺寸效应,具体爆破参数见表 1。

### (4) 应力解除爆破技术。

表 1 上断面爆破参数对比表

炮孔名称	围岩类别	孔数	孔深 /m	每孔药量 /kg	总装药量 /kg
周边孔	Ⅱ类	45	4	0.6	27
	Ⅲ类	49	3.8	0.5	24.5
	Ⅲ破碎Ⅳ、Ⅳ <sub>b</sub> 类	63	2.5	0.4	25.2
辅助孔	Ⅱ类	60	4	1.8	108
	Ⅲ类	60	4	1.8	108
	Ⅲ破碎Ⅳ、Ⅳ <sub>b</sub> 类	60	3	1.4	84
掏槽孔	Ⅱ类	12	5	4.4	52.8
	Ⅲ类	12	5	4	48
	Ⅲ破碎Ⅳ、Ⅳ <sub>b</sub> 类	12	4.5	2	24
底孔	Ⅱ类	20	4	1.8	36
	Ⅲ类	20	4	1.8	36
	Ⅲ破碎Ⅳ、Ⅳ <sub>b</sub> 类	20	3	1.4	28

应力解除爆破的目的是解除或降低应力集中区部位的高应力。通过微震监测判断前方有应力集中时,应力解除爆破是最为有效的减轻或解除岩爆的手段。由于应力解除爆破技术在锦屏二级

水电站引水隧洞岩爆及潜在强岩爆洞段开挖施工中防岩爆效果较好,因此是被较普遍采用的技术。应力解除爆破技术即在掌子面开挖钻孔的同时,施打应力解除爆破孔,孔深至少保证在 2 倍循环

进尺以上,根据实际使用效果,孔深在2.5倍循环进尺以上应力解除效果更好。钻孔以 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 角向外成扇形分布,孔底接近但不超过开挖边界,以爆破后不对开挖边界造成破坏为宜。装药位置在2.5~3.5 m位置,封堵50 cm左右。

强~极强岩爆洞段开挖后根据现场实际情况采用多臂钻在岩爆部位施工径向应力释放孔,用以释放较高的地应力,减轻岩爆强度。

### (5) 开挖后掌子面形态修正技术。

隧洞开挖后掌子面一带的应力集中区空间形态为“涡壳状”区域,当开挖面形态适应这种应力分布形态时,有利于维持围岩的围岩水平和围岩强度,达到利用围岩强度控制岩爆的目的。为此,监理工程师建议承包人在岩爆多发地段将掌子面形态也修正为“涡壳状”,中心部位凹进,从中央到周边平顺过渡,形成总体上的弧形形态。但该开挖技术对测量、现场施工人员操作技术、钻孔质量要求较高、精细化管理程度要求较高且需施工人员在掌子面内凹部位作业,危险系数较大,故不宜大规模普及应用。

## 3.2 支护防护技术措施

### (1) 锚杆支护。

水胀式锚杆具备快速发挥作用的优点,但其缺点是抗拉力、抗剪力较弱。因此,本工程在轻微、中等岩爆开挖洞段开挖完成后及时采用水胀式锚杆临时支护,能快速发挥稳定围岩的作用。

涨壳式预应力中空注浆锚杆在施加应力后即能发挥作用,同时比水胀式锚杆具有更好的抗拉

和抗剪能力。中等及以上强岩爆洞段开挖施工,采用同系统普通砂浆锚杆等长度、等直径、等间距涨壳式预应力中空注浆锚杆进行岩爆治理,并将预应力锚杆布置在掌子面后方15 m范围内。

锚杆均配套安装锚垫板,锚垫板的大小根据微震监测所测到的应力大小进行调整,垫板尺寸一般采用20 cm × 20 cm,最大达到30 cm × 30 cm。垫板与钢筋网或柔性网连为一体,在岩爆或应力释放时,垫板起到保护效果,网片兜住塌落的岩石,以缓解应力释放的冲击力度,可以有效地增加抗岩爆的能力。

### (2) 喷混凝土。

纳米钢纤维混凝土的应用。在高地应力岩爆坍塌洞段,对出露的围岩需及时进行封闭,以尽快起到支护效果。初喷混凝土强度需要尽快达到支护强度,纳米混凝土在30 min内强度可达到至少15 MPa以上。钢纤维具有增加喷混凝土的抗剪和抗折能力的作用,纳米钢纤维喷混凝土能够承受围岩较大的变形而不致破坏。在岩爆强烈部位采用纳米钢纤维混凝土进一步加强支护,以起到保证现场安全、快速开挖的作用。

仿钢纤维混凝土的应用。钢纤维的刚性大于仿钢纤维,其拌制和长距离运输后输送泵送困难,极易堵管,并且优质的仿钢纤维性能不低于钢纤维,为减少对现场施工造成不必要的影响,在岩爆等级不高且引水隧洞内长距离的部位,采用喷仿钢纤维混凝土取代钢纤维混凝土进行支护。

现场喷射混凝土性能检测结果见表2。

表2 现场喷射混凝土性能试验成果统计表(大板试验)

强度等级	坍塌度/cm	抗压强度	抗拉强度	抗折强度	弹性模量	喷射混凝土与围岩粘结强度	弯曲初度指数 I5	弯曲初度指数 I10	弯曲初度指数 I30	初度系数 R30/10	
		/MPa 28 d	/MPa 28 d	/MPa 28 d	( $\times 10^4$ MPa) 28 d						
喷混凝土试验要求	/	$\geq 30$	$\geq 2$	$\geq 3$	$\geq 2.3$	$\geq 1.2$ MPa $\geq 1$ MPa	$\geq 3$ (仿钢纤维喷混凝土)	钢纤维喷混凝土			60~80
C30 纳米钢纤维混凝土	22.1	46.1	3.16	/	/	1.92	/	/	/	/	/
CF30 纳米仿钢纤维混凝土	21	43.4	3.25	10	3.41	1.6	3.84	6.04	13.11		35.35
CF30 纳米钢纤维混凝土	21	44.7	4.27	/	/	1.55	4.01	8.2	28.81		103.05

### (3) 施工作业安全防护。

引水隧洞岩爆洞段的开挖爆破、支护钻孔设备采用机械造孔,如三臂钻,并对三臂台车采用钢板进行加固防护并严禁采用人工手风钻造孔。所

有装药人员均佩戴钢盔、身穿防弹背心等措施以尽量减小岩爆发生时带来的危害。

### (4) 严格落实施工程序。

(下转第77页)

标号混凝土的要求。

## 5 人工骨料抗磨耗试验

试验采用室内小型球磨机,按《水工混凝土砂石骨料试验规程》DL/T5151—2001 规定的骨料试验级配进行,各料场同级配骨料相同转数时磨耗率的平均值统计结果见表 6。

表 6 人工骨料磨耗试验结果平均值汇总表

料场	级配	损失率 /%		损失率 /%	
		100 转	500 转	200 转	1 000 转
河口	a	\	\	12	39.8
	b	\	\	10.7	39.2
	c	\	\	12.9	43.6
	A	13.3	39.9	\	\
	B	14.5	41.1	\	\
	C	20.1	44	\	\
	D	21.2	52.5	\	\
	a	\	\	14.9	37.4
	b	\	\	10.6	39.6
飞水岩	c	\	\	12.2	54.7
	A	15.3	50.9	\	\
	B	17	53.9	\	\
	C	20.9	53.3	\	\
	D	21.7	47.8	\	\
	a	\	\	8	29.4
	b	\	\	8.2	29.8
	c	\	\	8	30.6
	A	9.3	27.2	\	\
色龙沟	B	9.3	27.7	\	\
	C	13.3	34.2	\	\
	D	14.5	36.8	\	\
	《水工混凝土砂石骨料试验规程》	<10	<40	<10	<40

从表 6 可以看出,河口料场和双江口料场各

(上接第 60 页)

在轻微~极强等级岩爆段,其中强岩爆、极强岩爆一旦发生,破坏性较大,对工程影响较大,是岩爆段掘进施工防治的重要监控点。为保证强岩爆、极强岩爆段安全掘进,研究制定了强岩爆、极强岩爆段安全施工流程,即岩爆预测预报、超前锚杆支护、应力解除爆破、危石清理及其它、初喷纳米钢纤维混凝土、防岩爆临时锚固支护、系统支护。在开挖施工过程中,监理工程师要求承包商现场施工必须按照工序流程开展,上道工序未经验收签字确认,不得进入下道工序施工,以保证工序环环紧扣及支护的及时性、完整性,最大程度降低了岩爆危害。

## 4 结 语

个级配磨损率均超过规程的要求,表明两个料场骨料的抗磨损能力均较差。色龙沟料场 a、b、c 级配的人工粗骨料在 200 转和 1 000 转时,磨耗率均满足规程要求。对于 A、B、C、D 级配粗骨料 100 转的磨耗率也仅是 C、D 级配的磨耗率超过规程要求,其余磨耗率均满足规程要求。

## 6 结 语

(1)三个料场原岩性能指标和粗、细骨料性能指标均能满足配制 C<sub>90</sub>35 及以下的混凝土;

(2)从骨料的压碎指标看,色龙沟料场骨料可满足配制 C<sub>90</sub>40~C<sub>90</sub>55 标号的混凝土,河口料场和飞水岩料场骨料均不满足配制高标号混凝土的要求,故可针对这两种骨料进行高标号混凝土的试验研究;

(3)从骨料的抗磨耗指标看,色龙沟料场骨料满足规程要求,河口料场和飞水岩料场骨料均不满足规程要求,故可针对这两种骨料进行改性冲磨混凝土试验研究。

### 参考文献:

- [1] 水电水利工程天然建筑材料勘察规程, DL/T5388 - 2007 [S].
- [2] 水工混凝土砂石骨料试验规程, DL/T5151 - 2001 [S].
- [3] 水工混凝土施工规范, DL/T5144 - 2001 [S].

### 作者简介:

李 静(1963-),女,四川井研人,高级工程师,从事水电工程地质勘测技术工作;

袁国庆(1979-),男,湖北团风人,高级工程师,学士,从事水电工程地质勘测技术工作。 (责任编辑:李燕辉)

在锦屏二级水电站引水隧洞开挖过程中,通过采取上述技术措施,在参建各方的共同努力下,四条引水隧洞均较合同工期提前实现了贯通,施工过程中未发生安全责任事故,开挖质量满足设计规范要求。

锦屏二级水电站引水隧洞开挖过程表明,在强岩爆洞段开挖过程中采用“事前预控、事中过程控制、事后纠偏控制”的科学控制手段,主动预防与被动防护相结合,有效降低了岩爆造成的危害,最大程度地减少了岩爆对现场施工的影响。

### 作者简介:

李金辉(1983-),男,河北邢台人,工程师,学士,从事水利水电工程监理工作;

徐茂华(1972-)男,四川蒲江人,副总监理工程师,工程师,学士,从事水利水电工程建设监理工作。 (责任编辑:李燕辉)