

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.010

高应力开挖卸荷条件下大型地下洞室岩壁梁 开挖爆破施工工艺*

王红彬,沈德虎,石焱炯,李 毅
(中国三峡建设管理有限公司,成都 610000)

摘 要: 依托于白鹤滩水电站地下厂房工程,通过不断优化与调整岩壁梁开挖爆破程序和方法,以减小爆破扰动、促进应力分区释放、降低卸荷破坏程度。地下厂房开挖采取竖向分层、水平分区,针对岩壁梁区域及其上、下层围岩分别制定精细化开挖爆破措施,分区、分序实施,研发岩台区临时面喷射钢纤维混凝土、设置树脂锚杆等预支护技术、岩台及时支护等防卸荷破坏技术,保证了岩台成型质量,形成一整套适用于跨度大、地应力高、卸荷破坏严重的大型地下洞室岩壁梁开挖爆破施工工艺。

关键词: 白鹤滩水电站;岩壁梁;开挖爆破;卸荷破坏

中图分类号: TV731.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0072-06

Excavation Blasting Construction Technology of Crane Beam Under High Stress and Unloading Failure Conditions in Large Underground Caverns

WANG Hong-bin, SHEN De-hu, SHI Yan-jiong, LI Yi
(China Three Gorges Corporation, Chengdu 610000, China)

Abstract: Reducing blasting vibration and the degree of damage by unloading relaxation and promoting divisional stress release are the main purpose of this paper which is supported by Baihetan underground powerhouse project. The goal is achieved by through constant optimization and adjustment of the blasting procedures and methods in the crane beam excavation. The underground powerhouse excavation adopted the method of vertical layering and horizontal zoning. Refined blasting measures were developed for the crane beam and the upper and lower surrounding rock respectively and implemented according to partition and time order. A construction technology was developed by spraying steel fiber concrete, setting resin anchor in advance on the temporary rock bench and timely support on permanent rock face for reducing unloading relaxation. This guaranteed the quality of shape of the rock wall. Finally a kind of blasting excavation construction technology for the large-span underground caverns crane beam under high stress and unloading failure conditions was established.

Key words: baihetan hydropower station; crane beam rock wall; excavation blasting; unloading failure

国内外大中型水电工程地下厂房、检修闸间室

等地下洞室大多采用岩壁梁作为桥式起重机的“牛腿”,以充分利用围岩的自身承载能力。而岩壁梁岩台是水电工程地下洞室开挖爆破质量要求最高、工艺要求最严格、成型后变形控制最为严格的部位。近年来国内外一些大型水电站地下厂房根据不同工程特点,对于岩壁梁的爆破开挖工艺进行了

收稿日期:2019-07-09

作者简介:王红彬(1986-),男,高级工程师、硕士学位,主要从事水电工程建设管理工作,(E-mail)330658891@qq.com。

通讯作者:沈德虎(1990-),男,工程师、硕士学位,主要从事水电工程建设管理工作,(E-mail)946592405@qq.com。

基金项目:中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(JG/18037Y)

大量实践研究,研究内容多见于对钻孔、装药或支护等某一工序的优化,整体的分层分区、爆破参优化及支护技术应用等整套的开挖爆破工艺相对少见,比如老挝南公 1 水电站岩壁梁爆破开挖时采用了“套管法”钻孔施工,保证了钻孔精度,提高了施工效率^[1];长龙山抽水蓄能电站针对地下厂房的坚硬围岩条件,采取了“密孔打眼、隔孔装药、特性化设计、个性化装药”等措施,不断细化管理,岩壁梁取得良好开挖体型^[2];黄登水电站岩壁梁开挖采用了双向光面爆破技术^[3];杨房沟水电站借助数值计算,对岩壁梁稳定及锚杆受力进行了模拟分析,优化了施工工艺^[4];雅砻江两河口水电站及河北丰宁抽水蓄能电站针对岩壁梁区不良地质条件,采取了开挖前预支护及动态调整爆破参数等施工技术^[5,6]。

区别于以上水电站工程,白鹤滩水电站左、右岸地下厂房各布置 8 台 1000 MW 的水轮发电机组,总装机容量 16 000 MW,建成后将成为世界上第二大水电站。地下厂房长 438 m,高 88.7 m,岩壁梁以下宽为 31.0 m,以上宽为 34.0 m,为目前跨度最大的长廊型地下洞室。白鹤滩水电站首次采用了单机功率为 1000 MW 的水轮发电机组,机组体积和重量更大;地下厂房区域围岩以Ⅲ₁类玄武岩为主,岩体隐微裂隙发育,岩质坚硬、脆性特征显著,且发育有大型层间层内错动带、缓倾角長大节理裂隙等不良地质构造;地应力以构造应力为主,水平应力明显大于垂直应力,实测初始最大应力达 33.39 MPa,属于典型高地应力区^[7-9]。基于白鹤滩水电站地下厂房跨度大、地应力高、卸荷破坏严重的工程特点,在岩壁梁开挖过程,从开挖分层分区精细化控制、爆破参数优化到新型支护技术的应用,形成一套完整的岩壁梁开挖爆破施工工艺。

1 施工难点分析

传统地下洞室岩壁梁的开挖爆破方法是岩壁梁所在层中部拉槽开挖爆破完成后^[6-10],通过钢管样架搭设、造孔、装药等工序的工艺确保岩壁梁的开挖爆破质量。科研分析成果和现场开挖爆破实践表明(图 1),白鹤滩水电站地下厂房开挖爆破过程中,岩壁梁部位围岩经历了应力集中到松弛的应力路径,开挖爆破卸荷松弛现象极为严重,尤其是下游侧岩壁梁会产生大范围破裂破坏现象,导致岩壁梁成型困难。在如此大跨度、高地应力、强卸荷等复杂地质条件下进行岩壁梁的开挖爆破,是开挖爆破过程中遇到的一大难题。因此,在岩壁梁开挖

爆破重点分析时,应首先确保有岩台可控,其次才是开挖爆破成型质量控制。

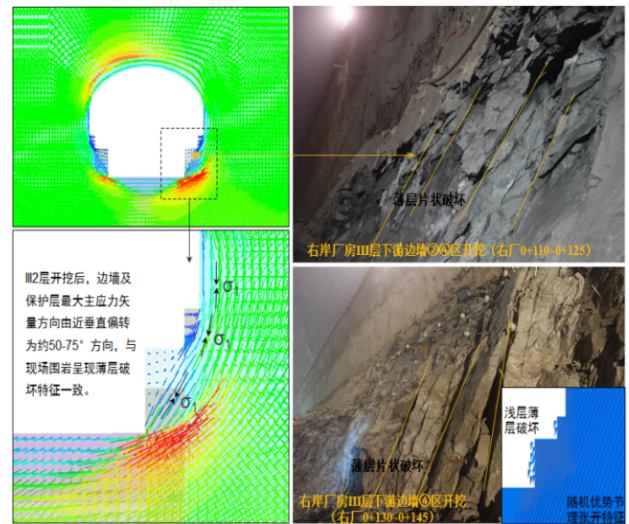


图 1 岩壁梁层围岩应力集中与卸荷破坏图

Fig. 1 Stress concentration and unloading failure at the crane beam

2 施工技术研究

本施工工艺的核心要点是结合科研分析成果、安全监测资料及现场围岩破坏形式,及时优化施工方法,减少围岩松弛变形及结构破坏。主要措施:一是通过优化与调整开挖爆破程序和方法,制定了地下洞室岩壁吊车梁层上一层“中间抽槽、两侧预留保护层竖向光面爆破”、下一层薄层光面爆破或深层预裂、左右半幅开挖爆破;岩壁吊车梁层分为“中部拉槽、保护层、岩台”三区六序的精细化开挖爆破方案,有利于围岩应力分区释放、减弱爆破扰动、降低卸荷松弛程度;二是研发岩台区临时面外侧“喷射钢纤维混凝土+设置树脂锚杆”预支护、岩台及时支护等防卸荷松弛技术,防止岩台区开挖后卸荷松弛而发生开裂破坏、围岩垮塌,提高岩台成型质量。

2.1 岩壁梁上部相邻层

如图 2 所示,岩壁梁上部相邻层开挖爆破分层高度以 4~5 m 为宜,采用中间施工预裂抽槽梯段爆破、两侧预留保护层光面爆破,以降低爆破振动速度,减少岩壁梁层卸荷松弛。

2.2 岩壁梁下部相邻层

岩壁梁下部相邻层开挖分层高度以 4~8 m 为宜,采用薄层光面爆破或深层预裂爆破、左右半幅开挖爆破,以减少爆破飞石和爆破振动对已浇筑完

成的岩壁梁混凝土的影响。

2.3 岩壁梁层

(1) 岩壁梁层开挖爆破分层高度 11 m，顶部开挖爆破高程应超过上拐点 1.5 m 和第一排受拉锚杆与岩面交点高程 1.0 m，底部开挖爆破高程应便于岩壁梁锚杆施工，便于斜面钻孔样架搭设和钻孔作业。

(2) 岩壁梁层分三大区开挖爆破(图 2)：中部拉槽区(Ⅲ₁、Ⅲ₃区)、保护层区(Ⅲ₂、Ⅲ₄、Ⅲ₅区)、岩台区(Ⅲ₆区)。其中，中部拉槽分上、下两层，保护层分上、中、下三层，岩壁梁下拐点应控制在保护层第二层中部。具体开挖施工工艺流程如图 3 所示。

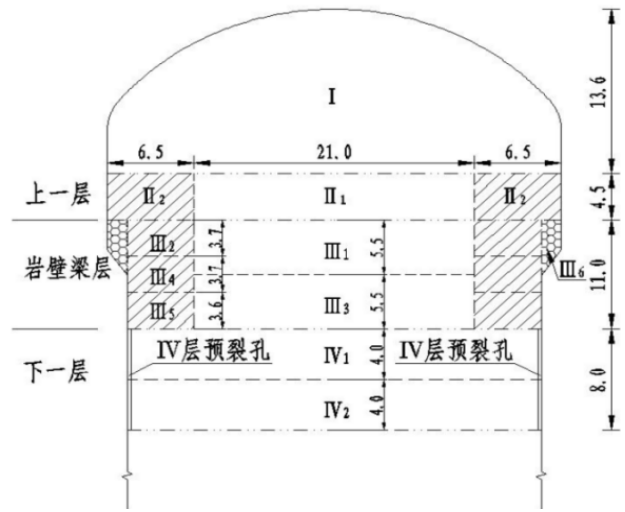


图 2 岩壁梁区开挖分层图(单位:m)

Fig. 2 Excavation layer in crane beam area(unit:m)

(3)对于一般地质洞段,岩壁梁层的中部抽槽采取两

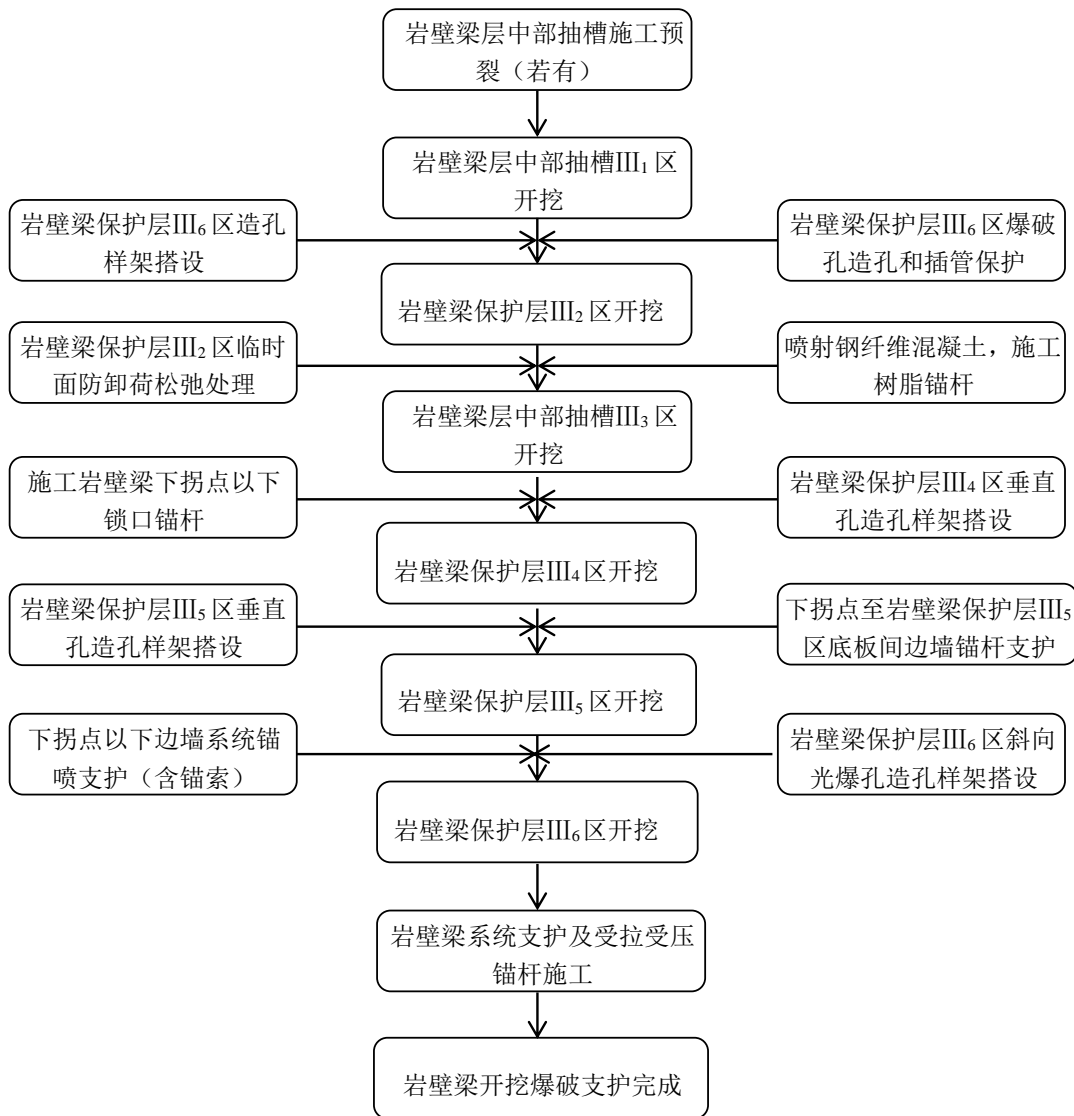


图 3 岩壁梁层开挖爆破施工工艺流程图

Fig. 3 Excavation blasting construction technology process of crane beam layer

侧施工预裂、梯段开挖爆破;对于岩体破碎、应力集中程度高、卸荷松弛严重的不良地质洞段,取消中部抽槽施工预裂,分为左、右半幅水平钻孔开挖爆破。

(4)两侧预留保护层开挖爆破采用光面爆破,岩台区采取采用竖向和斜向双向钻孔、同时起爆、一次成型的光面爆破。

(5)中部拉槽区与两侧预留保护层岩体开挖爆破之间的错距控制在30~50 m。

2.4 岩台区临时面支护防卸荷破坏

(1)岩壁梁Ⅲ₂、Ⅲ₄区开挖爆破后,在岩台区(Ⅲ₆区)外侧临时面及时喷射一定厚度(8 cm)的钢纤维混凝土封闭岩体,尽快形成“壳”效应,抑制岩台区围岩表层开裂和垮塌。

(2)在岩台区(Ⅲ₆区)外侧系统设置三排全螺纹纤维增强树脂锚杆,抑制围岩卸荷松弛和内部开裂。其中,全螺纹玻璃纤维增强树脂锚杆除杆体与普通砂浆锚杆不同外,其余所用施工材料、施工工艺均与普通砂浆锚杆相同,施工简便。全螺纹纤维增强树脂锚杆的关键特性是在岩台区开挖爆破时,能够沿岩台开挖爆破结构面断开,留在岩体内的部分杆体可以继续限制开挖爆破后产生较大的应力调整,防止围岩进一步卸荷,避免了开挖爆破后岩台松弛、垮塌^[10,11]。

(3)在岩壁梁Ⅲ₂、Ⅲ₄区开挖爆破后48 h内完成对应部位的喷射钢纤维混凝土施工,全螺纹纤维增强树脂锚杆施工滞后Ⅲ₂区开挖爆破掌子面时间上不超过72 h、距离上不超过30 m。见图4。

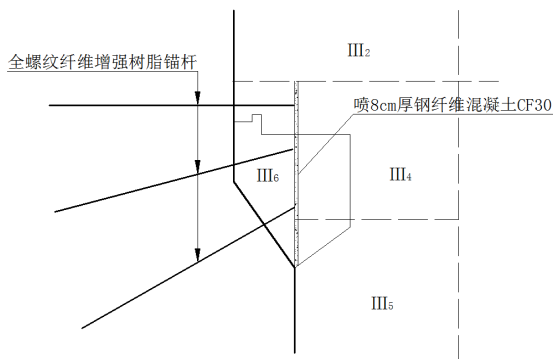


图4 岩台区临时面防卸荷破坏处理图

Fig. 4 Measures for preventing unloading failure on rock bench temporary face

2.5 岩台及时支护防卸荷松弛

(1)预留保护层(Ⅲ₅区)开挖爆破后及时进行岩壁梁下拐点的锁口锚杆施工,岩台区(Ⅲ₆区)开挖爆破后及时进行上拐点的系统砂浆锚杆施工,尽快向

岩台面提供约束力,防止继续卸荷松弛。

(2)岩壁梁下拐点锁口锚杆滞后Ⅲ₅区开挖爆破掌子面不超30 m,上拐点系统砂浆锚杆滞后Ⅲ₆区开挖爆破掌子面不超过50 m。

3 施工工艺要点

(1)岩壁梁开挖爆破实施前,应根据设计文件、地质情况、爆破材料性能及钻孔机械等条件进行爆破设计,应选择合适部位进行各项爆破工艺试验。

(2)岩壁梁开挖爆破过程中,围岩地质条件往往不是一成不变的,为了得到最好的开挖爆破效果,需根据不同洞段的岩性、地质情况对爆破设计进行动态调整,编制个性化爆破设计,一炮一设计。

(3)对于一般地质洞段,岩壁梁层的中部抽槽采用先施工预裂,再分上、下两层梯段开挖爆破,两侧预留保护层采用光面开挖爆破;中部拉槽区与两侧预留保护层岩体开挖爆破之间的错距控制在30~50 m,保护层厚度不宜小于3 m,保护层开挖爆破梯段高度不宜大于4 m。

(4)对于岩体破碎、应力集中程度高、开挖爆破卸荷松弛严重的不良地质洞段,为减少爆破振动、卸荷松弛对预留保护层的破坏,对施工方法和程序进行适当调整:适当增加岩壁梁保护层厚度,或在原岩壁梁保护层外侧再增加一个4.0~5.0 m宽的保护层;取消岩壁梁层的中部抽槽施工预裂,将其上、下两层开挖爆破分别分为左、右两个半幅钻水平孔开挖爆破,开挖爆破循环进尺不超过4 m。

(5) 钻孔样架搭设

如图5所示,岩壁梁部位设置钻孔样架和导向管,以确保爆破钻孔质量。钻孔样架应采用无变形的优质钢管,Ⅲ₆区样架随岩壁梁Ⅲ₄区保护层开挖爆破进度进行搭设,滞后Ⅲ₄区开挖爆破至少100 m。导向管设计长度1.2 m,端头距岩面3~5 cm,其中,斜向导向管在孔口设置20 cm长的对中套管,用铁丝绑扎在导向管上以防滑落。

(6) 钻孔作业

(1)岩壁梁层均应采用手风钻造孔。为保证岩壁梁成型,减少因欠挖处理对已成型岩壁梁基岩面造成次生破坏,在Ⅲ₆区垂直与斜面光爆孔造孔时,分别按按孔口超挖5 cm、孔底超挖10 cm进行控制。

(2)Ⅲ₆区的垂直光爆孔、爆破孔与Ⅲ₂区保护

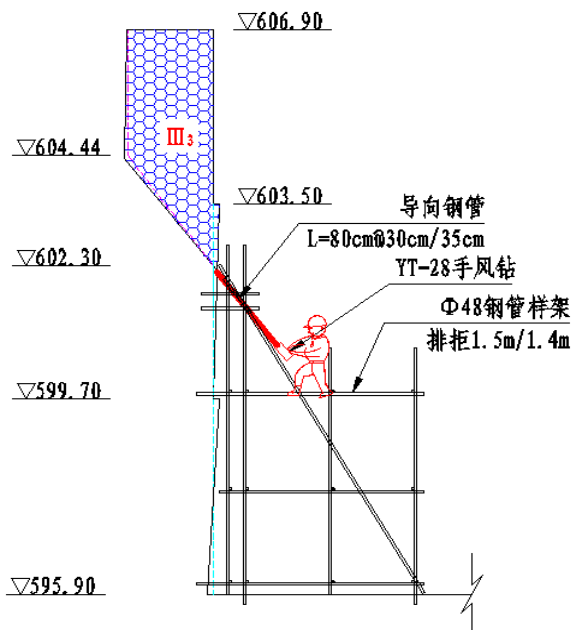


图5 岩台区钻孔施工示意图(高程单位:m)

Fig. 5 Drilling construction at rock bench(elevation unit:m)

层的造孔同时施工,并在Ⅲ₂区保护层爆破前插入PVC管进行防护。

3)造孔前对孔位进行编号,填写钻孔责任分区表,将每孔的钻孔质量落实到个人。钻杆为标准长度,孔深由限位杆控制。开孔30 cm对孔位、孔向进行第一次检查复核,开孔50 cm对孔位、孔向进行第二次检查复核,开孔100 cm对孔位、孔向进行第三次检查复核,及时纠正钻孔偏差,钻孔过程三检员旁站监督,并做好每孔的钻孔记录。

4)钻孔验收主要检查孔深、孔向和孔距三项指标,按照“三检”制对每个孔进行检查,填写岩壁梁光爆孔终孔检查记录表和钻孔质量检查表。如果钻孔超深,超深部分采用砂浆封堵,如果孔位、孔向超标,采用砂浆封孔后重新造孔。若出现塌孔现象,可采用低压(0.1~0.3 MPa)注浆固壁再扫孔方式处理。废孔处理应采用预缩砂浆回填密实。钻孔质量检查验收合格后方可装药。

(7)主要爆破设计参数

两侧预留保护层上、中、下三层(即Ⅲ₂、Ⅲ₃、Ⅲ₄区)均采用光面爆破。在岩台区(Ⅲ₅区)正式开挖爆破前,选取地质条件相一致的非岩壁梁洞段进行岩壁梁开挖爆破1:1模拟试验,试验成功后方可正式进行岩壁梁的开挖爆破:岩台区采用竖向和斜向双向钻孔、同时起爆的光爆开挖方式,炮孔的孔径均为42 mm,孔距为

25~35 cm,竖向孔线装药密度48~58 g/m,斜向孔线装药密度65~85 g/m;主爆孔孔距90 cm,抵抗线90 cm,采用Φ32炸药连续装药,堵塞长度0.61~0.81 m;岩壁梁岩台最大单响药量按照60~70 kg进行控制(起爆段长约15 m)。

(8)爆破质点振动速度要求

岩壁梁层开挖爆破质点振动速度 ≤ 10 cm/s,岩壁梁层下部相邻层开挖爆破质点振动速度 ≤ 7 cm/s。

4 施工质量控制标准

4.1 钻孔质量控制标准

岩壁梁钻孔按如下标准进行控制:

- (1)钻孔孔位偏差,周边孔不大于2 cm,主爆孔和缓冲孔不大于5 cm;
- (2)钻孔角度偏差,周边孔不大于 1.0° ,主爆孔和缓冲孔不大于 2.0° ;
- (3)钻孔孔深偏差,周边孔不大于3 cm,主爆孔和缓冲孔不大于5 cm。

4.2 爆破质量控制标准

岩壁梁爆破效果按如下标准进行控制:

- (1)半孔率Ⅱ类、Ⅲ₁类围岩应达90%以上,Ⅲ₂类围岩半孔率应达60%~90%,Ⅳ类围岩半孔率应达到40%~60%;
- (2)相邻两排炮之间台坎不大于10 cm,相邻两周边孔之间不平整度不大于10 cm;
- (3)孔壁不应有明显的爆震裂隙;
- (4)平均超挖值 ≤ 5 cm,最大超挖值 ≤ 10 cm,不允许有欠挖。

5 结论

(1)通过对岩壁梁部位及上下相邻层区域分别制定个性化开挖爆破措施、爆破参数的试验优化、过程中各工序的精细化管控及岩台区支护技术的创新应用,实现了岩壁梁平均超挖7.25 cm、半孔率95.9%、成型率91%的较高质量目标。

(2)本工艺技术简洁可靠,尤适用于大跨度、高地应力卸荷破坏条件下的大型地下洞室岩壁梁开挖爆破施工,其他大、中型地下工程岩壁梁、关键结构部位开挖爆破施工可参照执行。

参考文献(References)

- [1] 张必军. 地下厂房岩壁吊车梁层采用的施工质量控制方法[J]. 四川水力发电, 2019, 38(S1) : 124-127.
- [1] ZHANG Bi-jun. Construction quality control method applied for rock wall crane beam layer of underground powerhouse[J]. Sichuan Water Power, 2019, 38(S1) : 124-127. (in Chinese)
- [2] 苏展昭, 王 丰, 胡兴汉, 等. 坚硬围岩条件下地下厂房岩壁吊车梁精细化开挖[J]. 人民长江, 2019, 50(S1) : 208-210.
- [2] SU Zhan-zhao, WANG Feng, HU Han-xing, et al. Individual excavation of rock wall crane beam in underground powerhouse under hard surrounding rock conditions [J]. Yangtze River, 2019, 50(S1) : 208-210. (in Chinese)
- [3] 蔡 彬, 黄鹏辉. 黄登水电站地下厂房岩壁吊车梁基础开挖技术[J]. 云南水力发电, 2017, 33(2) : 94-97.
- [3] CAI Bin, HUANG Peng-hui. Foundation excavation technology of rock wall crane beam in underground powerhouse of Huangdeng Hydropower Station[J]. Yunan Water Power, 2017, 33(2) : 94-97. (in Chinese)
- [4] 蔡 波, 周 勇, 潘 兵. 大型地下厂房岩壁吊车梁开挖支护设计与稳定性分析[J]. 四川水利, 2019, 4(4) : 42-47. (in Chinese)
- [4] CAI Bo, ZHOU Yong, PAN Bing. Design and stability analysis of excavation support of rock wall crane beam in large underground powerhouse [J]. Sichuan Water Resources, 2019, 4(4) : 42-47. (in Chinese)
- [5] 黄 辉, 叶秋强. 雅砻江两河口水电站复杂地质情况下地下厂房岩壁吊车梁开挖质量控制施工技术[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12) : 48-51.
- [5] HUANG Hui, YE Qiu-qiang. Construction technology for quality control of excavation of rock-bolted crane beam in underground powerhouse of Lianghekou Hydropower on Yalongjiang River under complicated geological condition [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12) : 48-51. (in Chinese)
- [6] 马雨峰, 刘双华, 王兰普. 复杂地质条件下地下厂房岩壁吊车梁开挖质量控制措施[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(2) : 27-30.
- [6] MA Yu-feng, LIU Shuang-hua, WANG Pu-lanl. Quality control measures of rock wall crane beam excavation in underground powerhouse under complex geological conditions [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2018, 4(2) : 27-30. (in Chinese)
- [7] 樊启祥, 王义锋, 裴建良, 等. 大型水电工程建设岩石力学工程实践[J]. 人民长江, 2018, 49(16) : 76-86.
- [7] FAN Qi-xiang, WANG Yi-feng, PEI Jian-liang, et al. Engineering practice of rock mechanics in large-scale hydropower projects[J]. Yangtze River, 2018, 49(16) : 76-86. (in Chinese)
- [18] 董 源, 裴向军, 张 引. 白鹤滩水电站左岸主厂房洞室稳定性及主要变形破坏模式分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(10) : 96-135.
- [8] DONG Yuan, PEI Xiang-jun, ZHANG Yin. Research on the stability and main deformation failure mode of the main plant in the left bank of Baihetan Hydropower Station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(10) : 96-135. (in Chinese)
- [9] 林 宏, 汪 浩, 刘俊松. 中高地应力玄武岩地下洞室开挖成型研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(2) : 11-14.
- [9] LIN Hong, WANG Hao, LIU Jun-song. Study on excavation shaping of basalt underground chamber under medium-high ground stress[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(2) : 11-14. (in Chinese)
- [10] 姚强岭, 王伟男, 孟国胜, 等. 树脂锚杆不同锚固长度锚固段受力特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4) : 643-649.
- [10] YAO Qiang-ling, WANG Wei-guo, MENG Guo-sheng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of resin bolt anchoring section with different anchorage lengths [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(4) : 643-649. (in Chinese)
- [11] 王 伸, 李化敏, 李东印, 等. 横肋对螺纹钢树脂锚杆荷载传递的影响[J]. 岩土学, 2018, 39(8) : 1-10.
- [12] WANG Shen, LI Hua-min, LI Dong-yin, et al. The effect of rib on load transfer around thread steel resin bolt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8) : 1-10. (in Chinese)