

富含云母围岩隧洞开挖爆破掏槽参数探索

林伟¹, 吴常波²

(1. 绵阳佳成建设有限公司, 四川 绵阳 621054; 2. 丹巴洁尔美水电开发有限公司, 四川 成都 626399)

摘要:磨子水电站位于四川省甘孜州丹巴县境内, 地处革什扎河左岸一级支流磨子沟下游河段。电站装机 2 台, 单机容量 35 MW, 总装机容量 70 MW, 引水隧洞全长 8 931.65 m, 采用“一坡到底”的布置形式, 其围岩主要为二云英片岩, 岩石中云母含量高, 岩石软硬变化大。结合现场情况, 对多种隧洞爆破掏槽的型式进行了试验、总结, 得出了适合富含云母的小断面隧洞爆破开挖参数, 可供同类工程参考。

关键词:富含云母; 隧洞小断面开挖; 爆破; 掏槽

中图分类号: O643.2+23

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)06-0125-05

Exploration on Blasting Cutting Parameters for Tunnel Excavation in Mica-rich Surrounding Rock

LIN Wei¹, WU Changbo²

(1. Mianyang Jiacheng Construction Co., Ltd., Mianyang Sichuan 621054;

2. Danba Jieermei Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 626399)

Abstract: Mozi Hydropower Project is located in Danba County, Ganzi Prefecture, Sichuan Province, in the lower reaches of Mozigou, in the first-class tributary on the left bank of Geshizha River. The project has 2 installed units, with a single unit capacity of 35 MW and a total installed capacity of 70 MW. The total length of the diversion tunnel is 8931.65 m, and the layout form of "one slope to the bottom" is adopted. Its surrounding rock is mainly two-mica quartz schist, with high mica content and great changes in rock hardness. Combined with the field situation, various types of tunnel blasting cut are tested and summarized, and the blasting excavation parameters suitable for mica-rich small-section tunnel are obtained, which can be used as reference for similar projects.

Key words: Rich in mica; Small section excavation of tunnel; Blasting; Cutting

1 概述

磨子水电站位于四川省甘孜州丹巴县境内, 地处革什扎河左岸一级支流磨子沟下游河段, 是磨子沟“一库三级”水电开发方案中的最末一级。电站采用闸坝引水式开发, 属三等中型工程。水库正常蓄水位 2 907.00 m, 相应总库容 8.21 万 m³, 死水位 2 904.00 m, 调节库容 3.65 万 m³, 具有日调节性能。磨子水电站装机容量 2×35 MW, 引用流量 20.8 m³/s, 引水隧洞全长 8 931.65 m, 进口底板高程 2 894.00 m, 利用落差 428.00 m。采用“一坡到底的高压引水隧洞+气垫式调压室+水平压力管道”的布置型式, 隧洞断面型式为城门洞形, 主要以 III 类围岩为主, 断面尺

寸为(4.0 m~4.5 m)×(4.1 m~4.5 m)(宽×高), 断面面积为 15.01~18.08 m²。引水隧洞设置 4 条施工支洞进行辅助施工, 开挖施工工期 25 个月。

2 爆破试验的背景及目的

引水隧洞围岩主要为石英岩、二云英片岩, 节理发育, 岩石中云母含量高底不等, 导致围岩软硬程度变化较大, 爆破参数极难控制^[1]。参照类似围岩参数的初步设计爆破方案对应的 II、III 类围岩洞段单耗应在 1.20 kg/m³ 左右, 而实际实施的 II、III 类围岩平均单耗超过了 2.54 kg/m³, 且补炮频率较高、进尺较短, 基本单循环有效进尺在 1.6~1.9 m 之间。鉴于在此类富含云母岩体中的钻爆开挖施工还没有很成熟的经验可以参考,

收稿日期: 2024-10-18

结合该工程的实际情况,针对富含云母复杂岩性条件下的隧洞开挖,开展相关的爆破试验进行钻爆方案的优化探索^[2]。

3 岩石物理力学及云母含量测量成果

根据四川省内江水利电力建筑勘察设计研究

表1 钻孔岩芯样物理力学试验成果统计表

岩土名称	试验组数及统计方法	比重 Δs	干密度 ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙率 n /%	吸水率 ω_a /%	饱和抗压强度 R_w /MPa	烘干抗压强度 R_s /MPa	软化系数 K_d	弹性模量 E_{50} /GPa	泊松比 μ_{50}	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	凝聚力 c /GPa
	试验组数	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
弱风化石英岩	最大值	2.69	2.59	3.72	1.32	86.9	107.3	0.85	15.40	0.33	46.0	1.95
	平均值	2.67	2.58	3.32	1.19	83.3	101.1	0.82	12.10	0.31	44.3	1.26
	最小值	2.65	2.56	3.02	1.08	78.5	93.5	0.81	8.90	0.29	43.0	0.96
	试验组数	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
弱风化二云英片岩	最大值	2.82	2.72	3.93	1.34	54.7	68.4	0.80	11.50	0.32	42.0	1.12
	平均值	2.81	2.70	3.74	1.27	52.4	66.3	0.79	9.70	0.31	41.0	0.99
	最小值	2.80	2.69	3.55	1.20	50.9	64.4	0.78	7.80	0.28	39.0	0.85

爆破试验前委托四川大学分析测试中心对现场不同部位抽取的岩样进行了云母含量的测定,测定结果表明:三个岩石样本云母含量分别为18.0%、80.0%、18.0%,平均含量为39.3%,最高含量达到80%,主要为铁云母和金云母,进行云母含量测试的岩样见图1。



图1 进行云母含量测试的岩样
(从左至右分别为1、2、3号)

4 爆破试验方案的制定和实施

根据已有的岩性检测成果和前期爆破效果情况,针对磨子水电站富含云母软硬变化较大的围岩特性,爆破掏槽的成功与否对工效和炸材单耗影响较大,所以重点针对掏槽方式和参数开展试验。炸药采用乳化炸药,起爆材料采用非电毫秒雷管^[3]。

(1)掏槽试验。根据工程地质条件和现场实际采用的掏槽方式,在对比双向楔形(桶形)掏槽、空孔直眼掏槽和多层楔形掏槽的基础上,选取楔形掏槽和空孔直眼掏槽开展爆破试验,共进行三种掏槽形式试验。

(2)全断面试验。在上述掏槽试验基础上,优

院可研阶段进行的磨子水电站主要岩石物理力学试验成果(表1)可看出:弱风化石英岩饱和抗压强度83.3 MPa,软化系数0.82,属坚硬岩类;弱化二云英片岩饱和抗压强度52.4 MPa,软化系数0.79,属中硬岩类。

选掏槽方式,结合现场施工,开展隧洞全断面开挖爆破试验,并对爆破单耗、进尺等进行分析评价。

爆破试验方案根据现场实际爆破效果不断进行优化调整,每次试验结束后即针对掏槽和爆破效果进行分析评价,并开展下一次试验的详细的布孔和装药设计。

4.1 楔形掏槽试验参数及效果

(1)爆破参数。针对围岩小断面爆破开挖的特性,首先选用双向楔形掏槽进行试验,增大崩落区的临空面,楔形掏槽炮孔布置见图2,楔形掏槽炮孔布置参数见表2。

(2)试验结果及分析评价。根据现场爆破试验效果观察,该次试验结果不理想,各排掏槽孔出现一定炸深的沟槽,左侧楔形掏槽部位岩体开裂痕迹明显,但未形成完整的槽腔,实测中部进尺约60 cm,只占设计深度2.5 m的24%(图3)。

4.2 菱形掏槽试验参数及效果

(1)爆破参数。考虑围岩的可塑特性,菱形掏槽依然选择中间空孔四周装药的装药方式,增加掏槽爆破区的临空面,菱形掏槽炮孔布置见图4,菱形掏槽炮孔布置参数见表3。

(2)试验结果及分析评价。该次掏槽效果相对楔形掏槽有一定改进,但总体仍然很不理想,整体槽腔未形成,实测进尺约1 m,只占设计深度3 m的33%,孔底残孔明显(图5)。进行现场观察分析后,认为掏槽孔间距虽然缩小到15 cm,但炮

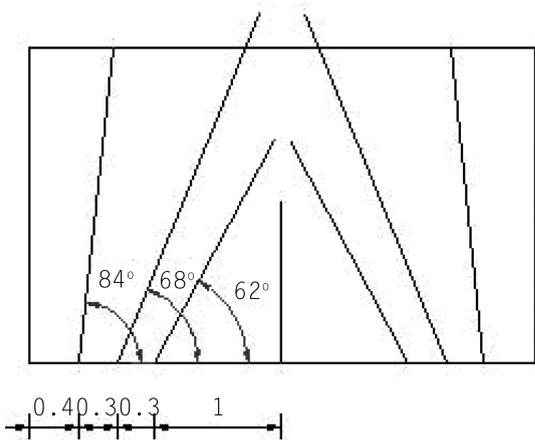
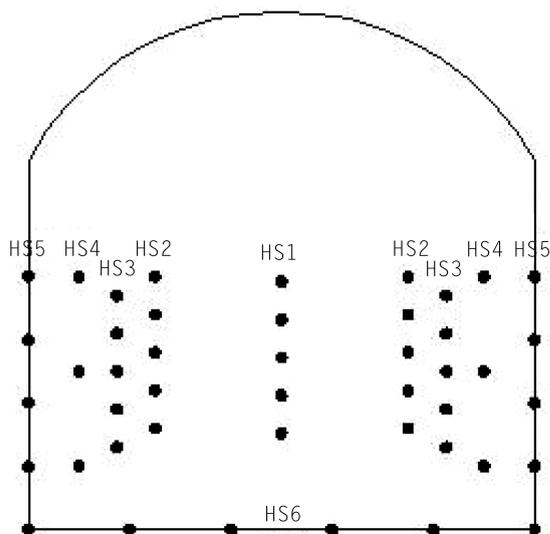


图 2 楔形掏槽炮孔布置图(长度单位为 m)

表 2 楔形掏槽炮孔布置参数

炮孔类型	孔数 / 个	排距 / m	孔深 / m	孔距 / m	装药量 / kg	雷管段别
掏槽孔 1	5	1.0	1.3	0.30	4.0	HS1
掏槽孔 2	10	0.3	2.0	0.30	12.0	HS2
掏槽孔 3	10	0.3	3.0	0.30	20.0	HS3
辅助孔	6	0.6	2.5	0.75	8.7	HS4
光爆孔	8	—	2.5	0.50	6.4	HS5
底孔	6	0.7	2.5	0.80	7.2	HS6
总计	45	—	—	—	58.0	—

孔密集度仍然不够,下一步试验将进一步缩小掏槽孔孔距。

4.3 多空孔密集孔直眼掏槽试验参数及效果

根据前两次爆破试验情况,发现对于引水隧洞富含云母岩石,掏槽爆破中炮孔密集度很关键。基于上述考虑,重点针对多空孔直眼掏槽开展了试验。



图 3 楔形掏槽爆破效果

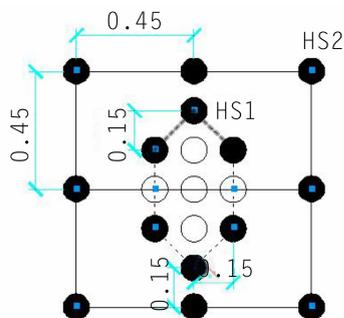


图 4 菱形掏槽炮孔布置图(尺寸单位为 m)

表 3 菱形掏槽炮孔布置参数

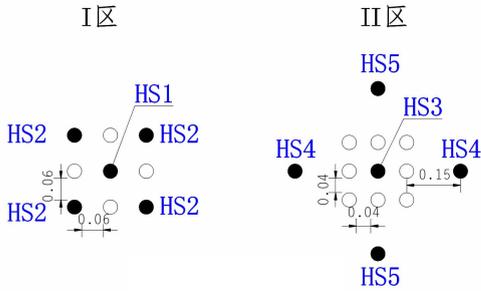
炮孔类型	孔数 / 个	排距 / m	孔深 / m	孔距 / m	装药量 / kg	雷管段别
掏槽孔 1	6	0.15	3	0.15	HS1	13.2
掏槽孔 2	8	0.15	3	0.15	HS1	17.6
合计	14	—	—	—	—	30.8



图 5 菱形掏槽试验效果

(1)掏槽爆破参数。该次试验部位位于引水隧洞 2 号支洞下游掌子面,在下半断面左(I 区)、

右(II区)各布置一个试验区进行对比试验,中心孔孔壁距离分别为6 cm和4 cm,孔深均为3 m,两个试验区同网起爆,但使用不同段别的雷管,多空孔密集孔直眼掏槽孔布置见图6,多空孔密集孔直眼掏槽孔布置见表4。



注:1. 尺寸单位以 m 计;2. 炮孔间距为孔壁间距。

图6 多空孔密集孔直眼掏槽孔布置图

表4 多空孔密集孔直眼掏槽孔布置参数

试验分区	炮孔类型	孔深 /m	单孔装药量 /kg	孔数 /个	雷管段别	装药量 /kg
I 区	掏槽孔	3	2.8	1	HS1	2.8
	掏槽孔	3	2.4	4	HS2	9.6
	空孔	3	—	4	—	—
II 区	掏槽孔	3	2.8	1	HS3	2.8
	掏槽孔	3	2.4	2	HS4	4.8
	掏槽孔	3	2.4	2	HS5	4.8
合计	—	—	—	13	—	24.8

(2)试验结果及分析评价。左侧(I区)试验进尺60 cm,只达到设计深度3 m的20%,效果较差,且爆破后下部2孔可见明显的残药存留于炮孔中(图7);右侧(II区)试验形成了一个孔口宽40 cm、高60 cm的空腔,进尺2.5 m,达到设计深度3 m的83%(图8)。试验表明:掏槽孔孔壁间距4 cm的掏槽效果要明显优于孔壁间距6 cm的掏槽爆破。

5 爆破试验成果及分析

5.1 爆破试验成果

针对该工程围岩富含云母及断面尺寸较小的特性,经过对爆破孔、辅助掏槽孔的间距、起爆顺序等进行了多次调整、试验,爆破试验总结的掏槽孔布置见图9,爆破试验总结的掏槽孔布置参数见表5,结合掏槽参数的成果进行了各部位的全断面爆破,爆破试验总结的全断面炮孔布置见图10,爆破试验总结的全断面炮孔布置参数见表6,全断面爆破试验效果见图11。

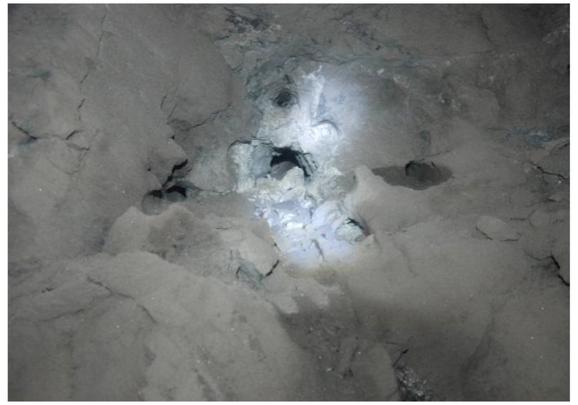
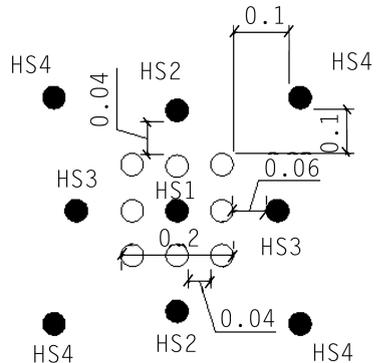


图7 I区爆破试验效果



图8 II区爆破试验效果



注:1. 尺寸单位以 m 计,图中所示距离均为孔壁距离;

2. ●为装药炮孔,○为空孔,HS1为雷管段别。

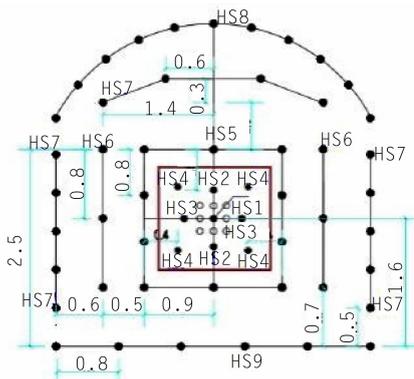
图9 爆破试验总结的掏槽孔布置图

表5 爆破试验总结的掏槽孔布置参数

炮孔类别	孔深 /m	单孔装药量 /kg	孔数 /个	装药量 /kg	雷管段别
掏槽孔	3	3.0	1	3.0	HS1
掏槽孔	3	2.6	2	5.2	HS2
掏槽孔	3	2.6	2	5.2	HS3
掏槽孔	3	2.4	4	9.6	HS4
空孔	3	—	8	—	—
总计	—	—	17	23.0	—

5.2 爆破成果分析

遵循持续改进优化的思路,选择3种掏槽类



注：图中尺寸单位以 m 计。

图 10 爆破试验总结的全断面炮孔布置图

表 6 爆破试验总结的全断面炮孔布置参数

炮孔类型	孔数 / 个	孔深 / m	单孔装药量 / kg	装药量 / kg	雷管段别
掏槽孔	1	3	3.0	3.0	HS1
	2	3	2.6	5.2	HS2
	2	3	2.6	5.2	HS3
	4	3	2.4	9.6	HS4
辅助孔	10	3	2.0	20.0	HS5
	6	3	2.0	12.0	HS6
	4	3	2.0	8.0	HS7
	光爆孔 1	10	3	0.8	8.0
光爆孔 2	11	3	0.8	8.8	HS8
底孔	6	3	2.0	12.0	HS9
空孔	8	3	—	—	—
合计	64	—	—	91.8	—



图 11 全断面爆破试验效果

型，共开展了 7 场次爆破试验，并通过全断面爆破试验及后续施工的验证，有如下认识：

(1)磨子电站引水隧洞围岩主要为二云英片岩，云母含量高，岩性较特殊，隧洞断面小，常规的楔形或中空孔菱形掏槽方式及参数对该工程不太适用。现场试验时爆破后出现了大量残孔和扩孔现象，说明富含云母岩石塑性较强、岩性偏软，钻

孔爆破时，炸药爆炸对周围岩体破碎的范围有限，一般楔形掏槽钻孔密集度不够，可能会导致掏槽效果不佳^[4]。

(2)第二阶段爆破试验中，重点针对九孔布置、中心孔装药的掏槽形式开展了试验，通过不断优化调整，获得了较理想的掏槽爆破参数。试验结果表明：掏槽孔的密集度必须得到保证，孔边距（孔与孔之间岩壁厚度）4 cm 及以下是相对合适的，周围辅助掏槽孔与中部九孔的孔边距保持在 4~6 cm 为宜。

(3)除掏槽孔的密集度外，掏槽部位用于容纳爆破后岩石膨胀的空腔也很重要，中部九孔仅中心孔装药，周围辅助掏槽孔上下、左右应分段起爆^[5]。

(4)根据试验总结参数进行的全断面开挖爆破结果，实测进尺 2.4~2.7 m，单耗约 2.26~2.54 kg/m³，基本无需补炮且掌子面相对平整。

6 结 语

经过对磨子水电站掏槽爆破参数的试验、分析和总结，最终得到了较为适合该工程的爆破参数，解决了单循环进尺短（不到 2 m）、补炮次数多、成本浪费大的问题。虽然炸材单耗未明显减少，但循环有效进尺得到了保障，单循环进尺达到了 2.4~2.7 m，对磨子水电站的关键线路最终顺利完成起到了非常关键的作用，为同类型地质特性的工程施工提供一些借鉴作用。

参考文献：

[1] 段会平, 王志强. 富含云母岩体隧洞开挖爆破技术[J]. 四川水力发电, 2013, 32(6): 8-10, 32.

[2] 胡子健, 周勇, 朱建群, 等. 隧道开挖过程中软弱围岩的爆破技术研究[J]. 河北工程大学学报, 2012, 29(3): 73-76.

[3] 陈燕, 魏春景, 张景森, 等. 大别山南部高压——超高压变质体中云母片岩和片麻岩的相平衡研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1657-1668.

[4] 陈斌. 福建平潭—东山变质带夕线石榴云母片岩中两期变质作用的岩相学证据及其构造意义[J]. 岩石学报, 1997, 13(3): 380-394.

[5] 张修政, 董永胜, 施建荣, 等. 羌塘中部龙木错——双湖缝合带中硬玉石榴石二云母片岩的成因及意义[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 93-103.

作者简介：

林 伟(1986-), 男, 四川绵阳人, 中级工程师, 专科, 从事水电站施工管理工作;

吴常波(1985-), 男, 四川成都人, 中级工程师, 本科, 从事水电站施工管理工作.

(编辑: 吴永红)