

# 高寒区混凝土拱坝坝肩开挖爆破技术研究

贾兴龙

新疆水发建设集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 严寒区特高拱坝坝肩槽开挖过程中总结的爆破技术和管理成果, 实现了特高拱坝坝肩槽高效、安全开挖, 对陡倾石英片岩和片麻状花岗岩地层开挖爆破技术优化和完善, 将措施经验进行总结, 指导坝肩槽和其他部位的爆破开挖, 旨在达到坝肩槽成型良好, 将开挖爆破对保留岩体的危害减小到最低程度的目的。

[关键词] 特高拱坝; 坝肩槽; 边坡; 施工技术; 爆破优化

DOI: 10.33142/hst.v7i12.14686

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

## Research on Blasting Technology for Excavation of Concrete Arch Dam Abutment in High Cold Regions

JIA Xinglong

Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** The blasting technology and management achievements summarized during the excavation process of the abutment groove of a super high arch dam in a severe cold area have achieved efficient and safe excavation of the abutment groove of the super high arch dam. The blasting technology for excavation of steeply dipping quartz schist and gneiss granite formations has been optimized and improved. The experience of the measures has been summarized to guide the blasting excavation of the abutment groove and other parts, aiming to achieve good formation of the abutment groove and minimize the harm of excavation blasting to the preserved rock mass.

**Keywords:** extra high arch dam; abutment groove; slope; construction technology; blasting optimization

### 1 研究目的

鉴于工程区石英片岩的变形特性和破坏机理有待进一步认识, 需结合施工开展爆破技术分析研究, 为边坡稳定性评价、围岩支护开挖爆破安全提供依据。同时可借助试验研究成果, 对混凝土拱坝的变形、坝肩稳定安全进行合理的评价, 提出能够应用于施工的爆破振动控制标准和减弱爆破振动和损伤的控制方案。

### 2 工程特性

某特高拱坝坝址位于高寒地区, 为混凝土双曲拱坝, 最大坝高 240m, 坝顶宽 10m, 最大拱冠厚度 65m, 工程施工总工期 9 年。工程区绝对最高温度 36.6℃, 绝对最低温度 -45.0℃, 最大温差 81.6℃。

坝址处河谷呈“V”字型, 两岸边坡地形较陡、地质结构复杂、风化卸荷严重, 地表岸坡 40~45°, 主要为黑云母石英片岩, 基岩裸露局部为片麻状花岗伟晶岩岩脉, 岩石饱和单轴抗压强度 94.1~122.7MPa。岩体主要发育 IV、V 级结构面, 左岸边坡发育有多种小规模结构面不利组合, 右岸边坡稳定性相对较好。受地表浅层卸荷松弛影响, 开挖爆破易引起地表岩体松动变形, 继而诱发小规模蠕变滑动破坏及崩塌现象。已有工程实践表明, 石英片岩和片麻状花岗岩开挖预裂爆破成型难度很大。

### 3 坝肩开挖爆破难点

#### 3.1 爆破器材供应受限

工程所在地处偏远山区, 属地对爆破物品管理严格,

数码雷管虽已普及使用, 但炸药规格型号有限、导爆索供应量不足, 乳化炸药仅有直径 80mm 和 32mm 药卷, 相对现场直径 90mm 炮孔, 前者送药易堵孔, 后者在节理发育岩体中轮廓控制爆破时药径偏大。此外受地域限制当地竹子匮乏, 在轮廓孔间隔装药绑扎管材种类受限、成本较高。由于爆破器材种类限制, 需对爆破工艺及设计方案动态调整。

#### 3.2 爆破设计及振动监测不够规范

施工现场爆破设计、生产性爆破试验和专项爆破方案编制缺乏专业爆破技术人员参与, 往期爆破设计内容不详、方案落后、图表缺失、不规范、不具备指导现场施工的目的。施工现场缺少有资质第三方爆破振动监测机构对供料平台、槽挖置换、坝肩槽重点部位测振。施工单位自有安全监测在点位、频次和技术配备方面, 均不能指导最大单段药量修正及振动损伤控制。

#### 3.3 施工现场匮乏专业管理人员

因工程开挖面众多, 同一时间范围内左右坝肩边坡和洞室群面临爆破施工的可能。爆破技术人员难以覆盖到整个工作面, 现场工作人员普遍没有爆破作业证, 无法到爆破作业区检查, 对应检查的爆破控制措施缺少主次概念。在确保钻孔作业、验孔装药、联网检测工作遵循设计要求的同时, 根据地质岩性变化有针对性实时调节爆破设计, 是现场开挖方面最大的挑战。

#### 3.4 支护与开挖工作的矛盾

工程开挖与支护矛盾显著, 爆破开挖后岩体未及时支

护。爆破扰动极易引起围岩掉块和边坡滑塌，梯段爆破多级支护滞后、没有合理的炮区设计与资源规划，使爆破开挖、支护加固和清渣运输之间不能形成流水作业，将导致工期滞后、资源利用率低、工人收入下降，还对工程建设的安全质量和稳定性造成一定影响。

#### 4 坝肩开挖

##### 4.1 爆破方式和内容确定

坝肩爆破试验方式为预裂爆破试验、梯段爆破试验、保护层开挖爆破试验。

(1) 预裂爆破试验：确定预裂孔孔距、线装药密度、装药量和缓冲孔孔排距及装药量。

(2) 梯段爆破试验：确定堆石料、排水料、次堆石料及过渡料的孔排距、单耗及装药量，联网方式等爆破参数。

(3) 保护层爆破试验：确定保护层厚度、保护层开挖方式、光面爆破施工参数、浅孔爆破参数和工艺。

##### 4.2 爆破试验工艺流程

试验地点、规模确定→试验参数确定→爆破方案确定→测量放样→钻孔→验孔→装药→爆破→外观检查、监测数据分析→清理运输→效果检查→参数校正、优化→下一组试验。

##### 4.3 爆破类型和相关参数

###### 4.3.1 爆破类型

(1) 预裂爆破。拱肩槽边坡台阶高 15m，边坡坡比 1:0.3~1:0.6，沿边坡轮廓布设一排预裂爆破孔，用不耦合装药结构，预裂爆破孔直径  $\phi 90\text{mm}$ 、孔深 16.7m。药卷直径  $\phi 32\text{mm}$ ，不耦合系数 2.8，预裂爆破孔孔距 0.8m。

(2) 梯段爆破。梯段爆破台阶高 8m，钻孔孔径  $\phi 90\text{mm}$ 、倾角  $74^\circ$ 、孔深 8m，采用散状硝铵炸药，孔距 3m、排距 2.5m。岩石爆破单位耗药量按  $0.45\text{kg/m}^3$ 、 $0.47\text{kg/m}^3$ 、 $0.5\text{kg/m}^3$  试验，最终单耗根据爆破试验确定。

(3) 缓冲爆破。缓冲孔直径 90mm，孔深 8m 采用  $\phi 30\text{mm}\times 3$  药卷，孔距 1.5m、排距 2.5m。缓冲孔单孔药量为梯段爆破单孔药量 1/2。

###### 4.3.2 爆破参数

拟定三组爆破试验，每组均包括预裂爆破、缓冲孔爆破和梯段爆破，爆破试验参数如下表 1：

#### 4.4 爆破布置、装药结构和起爆网络

##### 4.4.1 爆破布置

###### (1) 预裂孔

预裂孔采用 100B 钻机钻孔、孔径  $\phi 90\text{mm}$ 。预裂孔钻在轮廓面上，开孔点在轮廓线上，误差小于 4cm，钻孔孔底最大偏差  $\pm 1.5\%$  孔深，孔深高程偏差不大于 5cm。

施钻前按间距参数放出预裂孔位，现场标识后对钻孔人员出示钻孔任务书，根据钻孔任务书角度将钻机就位，钻机就位后用罗盘配合坡面坡度尺、水平尺检查钻孔倾角和孔向，钻进 0.2~0.3m 时需调校钻孔偏差，确保钻孔位于设计轮廓面内。

###### (2) 梯段孔和缓冲孔

梯段孔及缓冲孔采用 351 钻机钻孔、孔径  $\phi 90\text{mm}$  孔深 8m；缓冲孔径  $\phi 90\text{mm}$ 、孔深 8m，钻孔程序同预裂孔一致。

钻孔质量标准如下：a. 孔位偏差：不大于 5% 孔距（或排距）；b. 倾角与方向偏差：不大于  $\pm 2.5\%$  孔深（+为超，-为欠）；c. 终孔高程偏差：0~20cm。

##### 4.4.2 装药和装药结构

###### (1) 预裂孔

采取不耦合装药结构，选用  $\phi 32\text{mm}$  乳化炸药，线装药密度和装药结构按设计要求控制，线装药密度按孔底加强段、中部平均段和孔口减弱段分布。

预裂孔底部装药量（约 1.5m）为平均线装药密度的 5 倍，孔口部分（长 2m）装药量为平均线装药密度 1/2，孔口堵塞段长 1.5m。用  $\phi 32\text{mm}$  乳化炸药均匀绑扎在宽约 3cm 竹片上，导爆索紧挨炸药与竹片绑在一起。堵塞段以破布、编织袋和沙土为堵塞材料。

###### (2) 梯段孔

梯段孔为连续装药结构，用散状硝铵炸药连续装药，孔口堵塞段长 3m。

表 1 爆破试验参数

爆破试验组次、高程			孔径 (mm)	倾角	孔深 (m)	孔距 (m)	排距 (m)	线装药密度 (g/m)	单孔药量 (kg)	最大单响药量 (kg)
预裂爆破		V1005~990 左	90	$74^\circ$	16.7	0.8	/	260	5.252	暂按 <25kg 控制
	II	V1005~990 左		$74^\circ$	16.7	0.8	/	290	5.858	
	III	V1020~1005 右		$74^\circ$	16.7	0.8	/	320	6.464	
爆破试验组次、高程			孔径 (mm)	倾角	孔深 (m)	孔距 (m)	排距 (m)	单位耗药 (kg/m)	单孔药量 (kg)	最大单响药量 (kg)
缓冲孔		V1005~990 左 V1020~1005 右	90	$74^\circ$	8	1.5	1.5/ 2.5	0.235	14.4	暂按 <50kg 控制
梯段孔	I	V1005~990 左	90	$74^\circ$	8	3	2.5	0.47	28.2	暂按 <200 kg 控制
	II	V1005~990 左				3	2.5	0.45	27	暂按 <300kg 控制
	III	V1020~1005 右				3	2.5	0.5	30	暂按 <100kg 控制

### (3) 缓冲孔

缓冲孔为连续装药结构，用  $3 \times \phi 32\text{mm}$  乳化炸药绑扎后连续装药，用以减少装药直径，孔口堵塞段长 3m。

#### 4.4.3 起爆网络

预裂爆破起爆采用导爆索传爆，电子数码雷管进行孔外延时分段起爆的方式。在爆破试验中，预裂孔单独起爆，爆破孔、缓冲孔在同一起爆网络中起爆。根据实践经验，采用梅花形布孔一字型起爆网络。

### 4.5 爆破设计优化

#### 4.5.1 左右岸坝肩爆破设计优化

2023 年 8 月 9 日优化右岸坝肩 (EL990-975m) 爆破设计中钻孔参数表、岩石类别、岩体等级；注意缓冲孔装药与进孔注意事项，避免孔底炸药堆积；在对应的装药结构图中补充相关装药措施说明 (如有管材支撑或绳索吊入)。

2023 年 8 月 23 日优化右岸坝肩 (EL 975-960m) 爆破设计中预裂孔绑扎药卷所用的管材，如采用“U”型槽护壁装药；在设计文件中补充相关技术要求，确保孔内各段间隔药卷绑扎牢靠、不移位；标定主爆孔内每米实际装药量，避免孔底药量过大；缓冲孔装药严禁抛掷入孔底；起爆网络进一步结合爆破影像资料优化排间时差，减少漏气泄能现象。

#### 4.5.2 右岸坝肩槽爆破设计优化

2023 年 8 月 7 日对左右岸坝肩槽开挖爆破设计图优化，坝肩槽预裂孔药卷直径需减小，建议采购 32mm 厚壁 PVC 塑料管，实行药卷轴向切分方法；保证坝肩槽预裂爆破范围 20m 为宜，合理规划坝肩槽前沿开挖；进一步提高钻孔精度，保证钻孔辅助设备设施到位；如果增大爆破梯段高度，必须用数据验证钻孔精度已达标，预裂缓冲配套设计，超深缓冲爆破由于前排厚层岩体的夹制作用，引起的爆破振动势必增大，可能导致爆破裂隙向预裂面方向发展。建议缓冲孔分两层爆破。

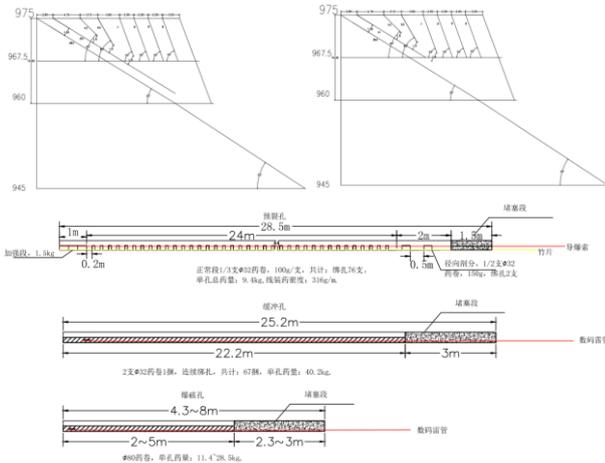


图 1 右岸坝肩槽边坡爆破设计

#### 4.5.3 左岸坝肩槽爆破设计优化

2023 年 9 月 9 日对左岸坝肩槽爆破设计优化，结合左

岸坝肩槽岩体质量，提出一次梯段爆破开挖优化建议：预裂孔间隔装药采用径向分切  $\phi 32\text{mm}$  药卷，分段长度为 1/3 节；考虑到药卷过短不利于发挥稳定爆轰作用，建议采用轴向切分药卷；通过调整轴向间隔距离，保证整体线装药密度。

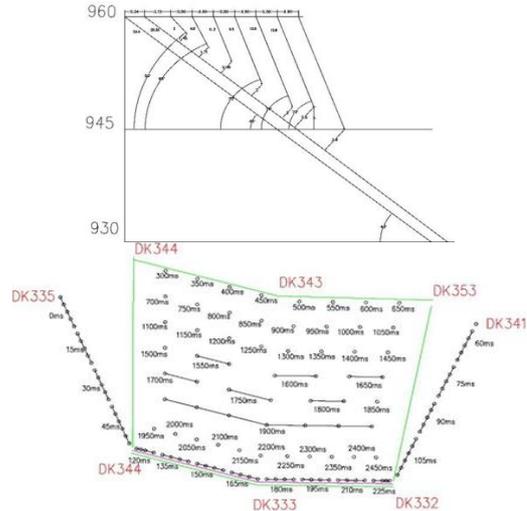


图 2 左岸坝肩槽爆破设计

#### 4.5.4 右岸坝肩槽前沿范围预裂爆破试验设计优化

根据坝肩槽第一次预裂爆破成果分析专题会要求，选择右岸 EL975m 高程坝肩槽 20m 范围区域进行预裂爆破试验，对右岸坝肩槽前沿预裂爆破试验初始设计方案，提出以下优化：(1) 爆破试验验证爆破孔孔底耦合装药对槽底的破坏影响，建议减小主爆孔和缓冲孔分段时间在 20ms 内、排间时差在 100ms 内，避免漏气问题。(2) 建议预裂孔药卷改为  $1/2 \phi 32\text{mm}$  直径装药，实现  $1/4 \phi 32\text{mm}$  直径连续装药，采购粉质乳化药卷彻底解决预裂面质量问题。(3) 初始试验方案目的有：不同预裂孔间距爆破效果；双排缓冲孔爆破效果。根据钻机工作性能，调整主爆孔钻孔倾角 (如图 3~4)，但缓冲孔与主爆孔间排距过大，一方面造成爆后大块存在，另一方面引起缓冲孔振动增大，建议在缓冲孔与主爆孔间补充一排斜向爆破孔/缓冲孔。(4) 主爆孔与缓冲孔间初设延期时差较小 (排间 30ms、孔间 7ms)，建议主爆与缓冲孔延期时差调整为 17ms。(5) 由于现场采购的竹片，预估预裂孔 32mm 药卷轴向剖开、改为  $1/2 \phi 32\text{mm}$  药径的绑扎难度增大，因此本次爆破试验无法达到“减小预裂孔药卷直径”的目的。

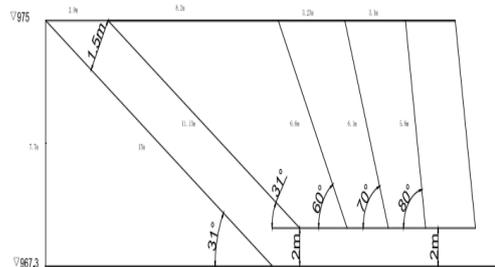


图 3 炮孔分布图 (申报设计)

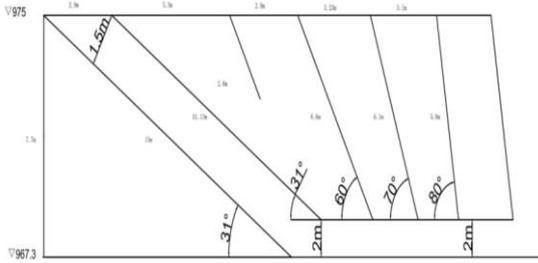


图4 炮孔分布图(修改后设计)

### 5 坝肩槽开挖爆破效果巡查

2023年9月11日对右岸EL975m坝肩槽预裂爆破效果进行巡查,如图5槽底爆渣尚未清除,下游侧边坡半孔率80%以上,岩体卸荷裂隙发育,但坡面整体平整度有明显改善,验证了轴向切分药卷方法(减小预裂孔药卷直径)对提高破碎岩体开挖爆后半孔率和平整度有明显作用。



图5 EL975m以下高程下游侧边坡

2023年9月13日对左岸EL960~945m高程坝肩槽爆破效果进行巡查,如图6预裂孔采用竹片间隔绑扎轴向剖药卷,爆破后上游侧边坡开挖较为平整,半孔率达到80%以上,钻孔精度控制水平有提升,坝肩槽半孔率清晰可见(图6)。



图6 左岸EL960~945m槽底边坡

### 6 爆破振动分析

(1)对右岸坝肩槽(EL975~960m)开挖爆破振动监

测,爆区岩体为III类、岩性属于石英片岩,预裂孔4孔1段,单孔装药量10.2kg,主爆单孔最大药量28.5kg单孔单响,缓冲孔单孔药量19.8kg单孔单响,采用电子雷管网络爆破。

本次爆破测振在爆区后冲方向布置1个地表测点1#,爆区下游侧上方平台布置了1个测点2#,每个测点均测试水平径向、竖直向和水平切向三个方向的质点振动速度。

表2 预裂爆破振动监测结果

编号	水平距离 m	垂直距离 m	水平径向 R		水平切向 T		垂直向 V	
			速度 cm/s	频率 Hz	速度 cm/s	频率 Hz	速度 cm/s	频率 Hz
1#	2.0	15	6.71	23.6	4.61	22.1	6.58	21.9
2#	2.0	17	1.26	22.1	1.76	22.8	0.81	22.8
备注	监测时间为2023年9月9日20时29分。							

根据本次振动测试结果,最大质点振动速度为下游侧边坡EL990m高程处1#监测点,水平径向速度6.71cm/s,垂直向4.61cm/s,水平切向6.58cm/s。爆破后巡视周边建筑物无明显破坏,控制点的最大质点振动速度小于爆破安全控制标准值。预裂孔的振动较小,表明预裂孔单段药量选择合理,后续1s波形(洞室爆破)幅值较小,推测最大振动速度发生在坝肩槽前排主爆破区。

(2)对左岸坝肩高程EL.960~945m开挖进行爆破振动监测,爆区岩体为III类、岩性属于石英片岩,采用电子雷管网络爆破。

本次爆破测振在爆区共布置了5个地表测点(测点编号1#~5#),爆区后冲上方1~2个梯段高度布置了3个测点(1#~3#),爆区上下游侧各布置一个测点,每个测点均测试水平径向、竖直向和水平切向三个方向的质点振动速度。

表3 预裂爆破振动监测结果

编号	水平距离 m	垂直距离 m	水平径向 R		水平切向 T		垂直向 V	
			速度 cm/s	频率 Hz	速度 cm/s	频率 Hz	速度 cm/s	频率 Hz
1#	48	30	7.16	9.0	5.05	22.8	6.11	22.9
2#	48	30	1.76	13.9	1.74	22.9	1.08	22.9
3#	44	28	3.46	22.8	4.91	22.1	6.34	22.8
4#	3.5	1	8.56	8.3	8.73	8.3	8.65	8.8
5#	22	0	12.52	22.4	8.01	22.3	8.29	22.4
备注	1. 试验部位位于右岸坝肩DK412~413,高程EL.975~960m处。 2. 监测时间为2023年8月30日21时0分。							

根据测试结果,最大质点振动速度为爆区同高程下游侧5#监测点,由于测点极近且不具普适性,仅供研究爆破近区振动衰减规律所用,按照安全规程推荐评判标准,爆区同高程上游侧22m爆心距处4#测点的最大质点振动速度为8.73cm,在标准规定范围(频率10Hz~50Hz以内,质点振动速度要求8~12cm/s)以内,但坝肩槽EL980m附近测点垂直向振动速度达到6.34cm/s,略超拱坝基础

开挖施工要求 (5cm/s)。

建议控制坝肩槽预裂爆破实际规模,减少前排主爆孔的排数,根据现场爆破手持机记录实际爆区起爆时间,推测最大振动速度发生时刻对应的爆区与炮孔,进而控制优化设计装药量,降低爆破振动及对保留岩体的损伤范围。

## 7 结语

结合施工现场坝肩槽开挖爆破效果,依据爆破振动监测数据、物探检测成果、钻孔过程记录和爆破后影像资料调整优化坝肩槽开挖爆破设计参数。通过采取合理分区和分块规划、控制预裂爆破前排主爆孔排数、设置有效保护层厚度和缓冲孔、预裂孔精细化装药和严格控制预裂孔开孔、校钻、纠偏、验孔等措施。通过加强爆破专项技术培训,精细化管控各工序施工,减小爆破振动对建基面岩体的破坏,实行钻孔、爆破设计、现场技术专人专岗专责制,

保证坝肩槽开挖质量。使拱肩槽开挖爆破取得了成功,在工程缆机平台、进水口边坡、厂房边坡开挖爆破中,也不同程度地采用了拱肩槽边坡开挖的技术,同样取得了良好的爆破效果。

## 【参考文献】

- [1]洪松,王伟,陈端,等.高寒地区高拱坝基础保护性开挖技术研究[J].水利规划与设计,2020,03(31):141-144.
- [2]李国建,张传虎,胡浩.乌东德水电站大坝拱肩槽开挖施工创新技术研究与应用[J].施工技术,2019(1):1393-1396.

作者简介:贾兴龙(1994.6—),毕业院校:新疆农业大学,所学专业:水利水电工程,当前就职单位名称:新疆水发建设集团有限公司,就职单位职务:新疆水发建设集团有限公司主办,职称级别:工程师。