

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.018

## 紧临重要建筑物碍航双曲拱桥爆破拆除

李贵阳,熊英建

(中交第二航务工程局有限公司,武汉 430040)

**摘要:** 艳洲电站大桥位于艳洲枢纽工程新建船闸、电站及泄水闸拟建坝址上,根据工程建设进度安排,对该桥予以拆除。艳洲电站大桥为双曲拱桥,桥梁全长 180.0 m,桥面宽 8 m,其地处彭山旅游风景区,周边有多处名胜古迹、企业厂房,环境复杂,与紧临既有电站大坝最近处为 8 m,与电站大坝箱梁桥紧接并共用一个桥台。限于现场作业条件,最终决定采用爆破拆除工艺。为确保整个桥体可靠倒塌且解体充分、钢筋混凝土分离,采取抛掷爆破装药炸碎拱肋、拱柱、连梁等构件,单耗为 1.2~1.5 kg/m<sup>3</sup>。采用加强松动爆破炸毁桥墩,最大单墩药量为 480 kg,按照左重右轻的原则,使整桥似骨牌式向右岸方向倒塌。采用孔内延时孔外接力传爆网路,即孔内雷管采取 MS12 段,孔外工业电子雷管并联,起爆顺序为由左岸向右逐跨、墩起爆,保证桥体平稳逐跨有序垂直塌落,且不会对左岸桥台形成挤压冲击。通过在靠近左岸电站、滚水坝沿线 100 m 水下,预先敷设漏气 PVC,用空压机向管内打压形成气泡帷幕,有效减小水击波超压,从而降低了爆破振动和水击波对周边建(构)筑物的影响。

**关键词:** 双曲拱桥;爆破拆除;紧临建筑物;抛掷爆破;气泡帷幕

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)02-0123-09

## Explosive Demolition of Double Arched Bridge Obstructing Navigation in Close Proximity to Important Buildings

LI Gui-yang, XIONG Ying-jian

(CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** The Yan Zhou power station bridge was built on the proposed structure site of the Yan Zhou hub project, which included construction of a new ship lock, power station, and spillway gate. Due to the progress of the engineering construction, the bridge was dismantled. The Yan Zhou power station bridge is a hyperbolic arch bridge with a total length of 180.0 m and a width of 8 m. It is located in the Pengshan tourist scenic area, surrounded by many famous historical sites and enterprise factories. The environment was complex, and the nearest distance from the bridge to the existing power station dam was 8 m. The reinforced concrete box girder bridge of the power station dam was adjacent and shared a bridge pier with it. Due to the working conditions on-site, blasting demolition was adopted. In order to ensure the reliable collapse and complete disassembly of the entire bridge, as well as the separation of steel bars and concrete, the components such as arch ribs, arch columns, and connecting beams were pulverized through throwing explosive devices, with a powder factor of 1.2~1.5 kg/m<sup>3</sup>. Reinforced loose blasting was used to destroy the bridge piers, and the maximum explosive charge for a single pier was 480 kg. According to the principle of heavy left and light right, the entire bridge was collapsed toward the right bank direction like a domino. An inner-hole delay and out-hole relay initiation network was used. The MS12 detonator was used for the inner-hole delay, and the industrial electronic detonators were used in parallel out of the holes. The blasting order was from left bank to right

收稿日期:2023-01-11

作者简介:李贵阳(1991-),男,工程师、学士,从事水运工程施工技术管理,(E-mail)1085247473@qq.com。

bank, and then from pier to pier, to ensure that the bridge collapsed orderly and vertically, without causing crushing impact to the left bank bridge pier. A leaky PVC was pre-laid underwater along a 100m line near the left bank power station and water roller dam. An air compressor was used to press the air into the pipe to form an air bubble curtain, which effectively reduced the water shock wave overpressure, thereby reducing the impact of blasting vibration and water shock waves on surrounding buildings and structures.

**Key words:** double-curved arch bridge; demolition by blasting; adjacent building; throwing blasting; bubble curtain

成熟于20世纪60年代的双曲拱桥<sup>[1]</sup>,限于当时的技术水平及建设规模,多已无法满足当今大交通量运输服务需求,逐步成为危旧桥梁或碍航桥梁,此类桥梁面临拆除已是大趋势。为保护紧临构筑物安全,通常采用需要搭设支架的机凿法和吊移法拆除此类桥梁<sup>[2]</sup>。以艳洲枢纽工程碍航双曲拱桥(艳洲电站大桥)为例,采用抛掷爆破和加强松动装药相结合的装药方式,成功实现爆破拆除,有效保护了紧临重要建筑物,可为类似工程提供借鉴和参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程环境

湖南省澧县艳洲电站大桥始建于20世纪90年代,为三跨钢筋混凝土双曲拱桥,单跨跨径53 m,全长180 m,桥面宽8 m,河中共有2个桥墩,右岸为一个独立桥台,左侧桥台位于河中鱼咀处与现有泄水闸相连。艳洲电站大桥属澧水石门至澧县航道建设工程艳洲枢纽工程中的碍航桥梁,为满足Ⅲ级航道通航标准,需对此桥进行拆除重建。

大桥地处彭山旅游风景区,古澧州外八景之一的“思王祠”坐落于彭山山顶,千年古寺“彭山寺”雄踞于此,澧县烈士陵园原址亦在彭山,为本县爱国主义教育基地之一。该桥西距常德远超塑业建筑群270 m、艳洲水利水电工程管理局525 m、彭山寺845 m,南距腾飞化工厂办公楼80 m,西南距东鹏陶瓷厂办公楼140 m,东南距金源化工厂废弃厂房(危房)180 m,桥北端与电站大坝相距8 m,与电站大坝箱梁桥紧接并共用一个桥台,桥底河流施工期水位约为32 m,水深约3.5 m,周边环境十分复杂。见图1。

### 1.2 桥梁构造

桥梁净跨50 m,净高8.33 m,矢跨比1/6,设计拱顶标高47.46 m、河床标高28.5 m。每跨设4根矩形钢筋混凝土拱肋,混凝土标号为C20,截面为42 cm×60 cm,间距1.92 m(净间距1.32 m),每跨拱肋间等间距设置6道钢筋混凝土系梁,系梁截面尺寸为30 cm×60 cm,主拱圈顶上为预制安装的弧形钢筋混凝土盖板,弧形盖板上浇筑一层素混凝土。

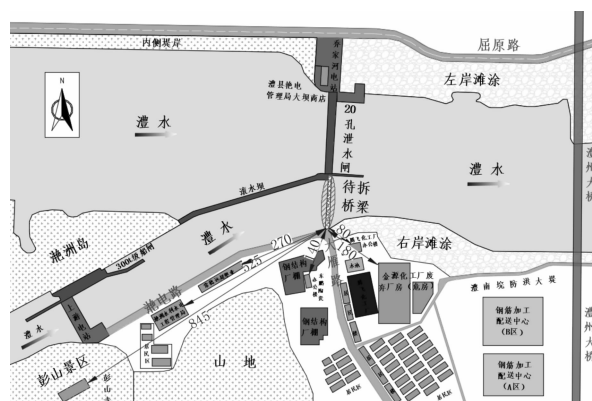


图1 爆破环境平面示意图(单位:m)

Fig. 1 Surrounding environment of the blasting site(unit:m)

中间腹拱为六孔,为立柱加系梁加预制拱圈结构,每孔设四根现浇钢筋混凝土立柱,断面尺寸为60 cm×65 cm,立柱高度分别为7.5 m、4.2 m、1.2 m;4根柱上部连为T型门字结构,厚度为36~76 cm;相邻的4根门字形立柱框架上压盖厚30 cm厚弧形预制砼拱波板;拱顶填料为水泥砂浆和石灰三合土,厚度40 cm,桥面为沥青混凝土桥面。

桥墩为外围浆砌混凝土预制块,内部150#埋石砼填心桥墩,桥墩底宽4.0 m、顶宽3.0 m,长11.88 m,高10 m;承台直接落于河床上,断面为T形结构,上层宽5.2 m、长13.08 m,下层宽6.4 m、长14.28 m、高1.5 m;河床设100#砼护底,河床标高为28.5 m,承台埋入河床1.5 m。见图2。

## 2 拆除方案

根据设计单位的建议,原拆除工艺拟采用桥下搭设满堂支架,机械、人工拆解,浮吊吊运的施工工艺。经过现场踏勘,待拆桥梁上游艳洲老船闸(300 t)闸室净宽为12 m,下游引航道底高程为28.33 m,

大型浮吊设备无法驶入;待拆桥梁下游为断流航道,浮吊亦无法通行;因双曲拱桥结构受力复杂,为避免拆除过程中发生意外险情,故不考虑起重设备停放于桥面进行作业。经综合研判分析,决定在复杂环境下对此桥梁实施爆破拆除,爆破完成后,填筑临时通道,采用后退法将爆破残渣及填筑料同时挖除。

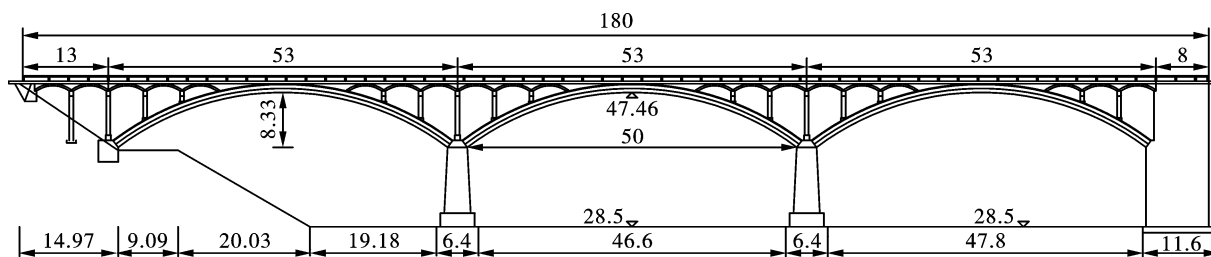


图2 桥梁结构示意图(单位:m)

Fig. 2 The bridge structure(unit:m)

### 3 爆破方案设计

#### 3.1 技术难点

(1) 预处理难。双曲拱桥的主要受力和承重构件是桥墩(台)和拱肋,而上部结构为非受力结构构件。但预拆除这部分构件会影响甚至改变下部结构的受力状况,且该桥建造年久,禁止大型机动车通行。

如果不进行预处理,爆后增加水下破碎清运工作量,延长施工作业时间。因此,应在保证绝对安全的前提下进行必要的预拆除,限拆除照明、防撞护栏和路面铺装层等非承重受力构件,且应对称、平衡、均匀、分段、逐层拆除,同时加强安全监测。

(2) 桥北端紧连的水电设施防护难。双曲拱桥受力结构特点决定,爆后桥梁坍塌,左岸桥台受推拉、挤压作用,可能影响紧临的箱梁桥稳定。

(3) 钻孔、装药、安全防护难。一是要加大爆破构件的量。适当加大需水下清理打捞的非受力、承重构件加大破坏范围。二是加大炸药单耗,变加强松动为弱飞散爆破,使构件钢筋、混凝土分离。三是水上、桥上垂直运送爆炸物品和防护材料困难,防护作业难。

(4) 爆后破碎打捞清运难。由于双曲拱桥跨度大、构件截面小,钻孔爆破不易破碎分离,桥下水深流急,爆后水下破碎难、切割钢筋难、打捞清运难,周期长、风险大、成本高。

(5) 水中冲击波控制难。水下桥墩爆破和桥梁坍塌会形成水中冲击波,可能对水运航道停泊船只、紧临的水电枢纽设施,以及水生物造成不利影响。

(6) 起爆网路复杂,盲炮排除难。由于加大了爆破力度,钻孔量、装药量、雷管量增加,起爆网路复杂,一旦出现盲炮,水下排除难度大、风险高。

#### 3.2 总体爆破方案

为保证爆区周边景区、工厂、电站大坝箱梁桥安全,便于爆后清运,结合本桥结构特点并参考国内有关双曲拱桥成功拆除爆破案例<sup>[3,4]</sup>,采用精细爆破拆除和机械切割破碎等相结合施工方案。为确保整

个桥体定向倒塌且解体充分、钢筋混凝土分离,采取抛掷爆破装药炸碎拱肋、拱柱、连梁等构件<sup>[5]</sup>,加强松动装药炸毁桥墩<sup>[6]</sup>,同时设计不同的起爆顺序,使整桥似骨牌式向右岸方向倒塌。

#### 3.3 预处理

##### 3.3.1 拆除前准备工作

(1) 提前发布公告,设置警示标识,封闭交通,在待拆桥梁两头,设置护栏封闭施工区域。

(2) 预先拆除桥体管线、管道、灯杆、水管道、燃气管道等附属设施。严格按设计要求进行钻孔和防护标定。主要包括:围挡搭设,钻孔标定等。

(3) 用切割机或小型破碎机械将桥面与桥墩对应的位置分别对应拱肋开 30 cm 天窗,以便潜孔钻或三角钻向桥墩对应钻孔。另分别在各跨靠近拱顶的腹拱顶开设 1.0 m × 1.5 m 的天窗,方便拱肋、拱柱爆破作业、爆破器材和防护材料运送。

##### 3.3.2 预处理

(1) 采取小型吊车配合切割拆除桥上灯杆和铁制护栏,拆除搭(铺)设在桥外侧的各种电线、电缆。

(2) 用液压切割机切断桥两侧钢筋混凝土防撞护栏,用吊车或机械将其搬运至桥端运离。或用液压破碎锤由外向内破碎防撞护栏,用气割切割分离回收钢筋。

(3) 为保证爆破后桥体顺利按预定方向倒塌,防止左岸端桥上部坍塌后座影响其相连的发电站箱梁桥稳定,在起爆前将上部结构北侧第一排拱面板切断(保留钢筋)。

#### 3.4 爆破参数

##### 3.4.1 桥墩爆破参数

(1) 孔距:左跨桥墩对桥墩全部进行爆破,右跨桥墩仅对上半部位进行爆破。每个桥墩体布 2 排,每排 3 个孔,孔间距  $a = 3$  m;排间隔 0.5 m,两排错开 1.0 m;另在两排孔中间两端各布置 1 个炮孔。

(2) 炮孔深度: $H_{左墩} = 13.3$  m; $H_{右墩} = 7.7$  m。

(3) 炸药单耗: $q = 0.8$  kg/m<sup>3</sup>。

(4) 装药量: $Q_{左墩} = qV = 0.8 \times 600 = 480$  kg;

$Q_{右墩} = qV = 0.8 \times 315 = 252 \text{ kg}$ 。

(5) 单孔装药量:  $Q_{左墩单} = 480 \div 8 = 60 \text{ kg}$ ;

$Q_{右墩单} = 252 \div 8 = 31 \text{ kg}$ 。

(6) 装药结构: 装药长度 9.6 m, 采取分三段间隔装药见图 3, 即下部耦合段 4.6 m、间隔 1.0 m, 中间耦合段装药 3.0 m、间隔 1.0 m, 上段耦合段装药 2.0 m。

(7) 堵塞长度:  $L = 13.3 - 4.6 - 1.0 - 3.0 - 1.0 - 2.0 = 1.7 \text{ m}$ 。见表 1。

### 3.4.2 拱肋爆破参数

(1) 孔距: 最小抵抗线  $W = B/2 = 42/2 = 21 \text{ cm}$ , 炮孔间距  $a = 35 \text{ cm}$ 。分别在右跨第 1、6 孔拱肋, 中跨第 7 孔、拱顶、第 10、11、12 孔拱肋, 以及左跨拱顶和左跨第 10、11、12、13、14、15、16、17、18 孔拱肋段分别布置 10 个炮孔, 每段 3.15 m。如图 4 所示。见表 2、表 3。

(2) 炮孔深度: 拱肋高 66 cm, 拱肋上拱波交木板厚 40 cm, 炮孔深度取 85 cm, 其中肋梁内深 45 cm。

(3) 炸药单耗: 肋梁  $q = 1.5 \text{ kg/m}^3$ , 拱肋上拱波  $q = 0.5 \text{ kg/m}^3$ 。

(4) 单孔装药量:  $Q_{肋} = 1.5 \times 0.42 \times 0.66 \times 0.35$ ,

取 150 g。

(5) 拱肋装药量:  $Q = 560 \times 0.150 = 84 \text{ kg}$ 。

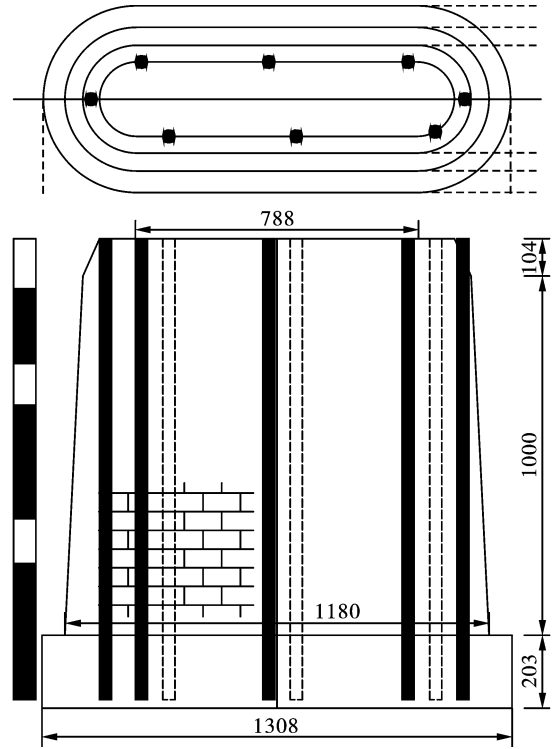


图 3 桥墩装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 3 Scheme of bridge pier charge structure(unit:cm)

表 1 桥墩爆破参数表

Table 1 Parameter table of bridge pier blasting

爆破部位	孔距/m	排距/m	孔数/个	孔深/m	单耗/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单孔药量/kg	单墩药量/kg
左墩	3	1.0	8	13.3	0.8	60	480
右墩	3	1.0	8	7.7	0.8	31	252

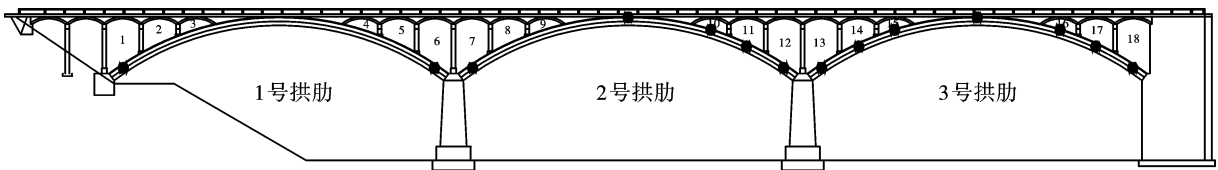


图 4 拱肋布孔示意图(单位:cm)

Fig. 4 Arch rib hole diagram(unit:cm)

表 2 拱肋炮孔数量表

Table 2 Number of arch rib holes

爆破部位	右跨		中跨						左跨						合计/个
	1#肋	6#肋	7#肋	拱顶	10#肋	11#肋	12#肋	13#肋	14#肋	15#肋	拱顶	16#肋	17#肋	18#肋	
数量	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
合计	80		80		120		120		80		80		560		

### 3.4.3 拱柱爆破参数

左侧一跨半所有拱柱均布孔爆破。7.5 m 柱在上下两端各布 5 个孔, 4.2 m 柱上下两端各布 4 个

孔, 1.2 m 柱上下两端各布 2 个孔。如图 5 所示。见表 4、表 5。

(1) 孔距: 最小抵抗线  $W = B/2 = 60/2 = 30 \text{ cm}$ ,

炮孔间距  $a = 45 \text{ cm}$ 。

(2) 炮孔深度: 拱柱边长  $66 \text{ cm}$ , 炮孔深度取  $43 \text{ cm}$ 。

(3) 炸药单耗: 肋梁  $q = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

(4) 单孔装药量:  $Q_{\text{柱}} = 1.2 \times 0.6 \times 0.66 \times 0.45$ , 取  $200 \text{ g}$ 。

(5) 拱柱装药量

7.5 m 墩上柱:  $Q_{\text{柱}} = 10 \times 200 = 2.0 \text{ kg}$ , 墩上柱装药:  $4 \times 2.0 = 8.0 \text{ kg}$ 。

4.2 m 肋上柱:  $Q_{\text{柱}} = 8 \times 200 = 1.6 \text{ kg}$ , 3 排 12 根装药:  $12 \times 1.6 = 19.2 \text{ kg}$ 。

1.2 m 肋上柱:  $Q_{\text{柱}} = 4 \times 200 = 0.8 \text{ kg}$ , 3 排 12 根装药:  $12 \times 0.8 = 9.6 \text{ kg}$ 。

左岸一跨半立柱装药量:  $36.8 \text{ kg}$ 。

表 3 拱肋装药量统计表

Table 3 Arch rib charge

爆破部位	孔距/cm	排距/m	孔数/个	孔深/cm	单耗/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单孔药量/g	单元药量/kg
1#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
6#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
7#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
拱顶	35	1.95	40	85	1.5	150	6
10#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
11#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
12#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
13#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
14#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
15#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
拱顶	35	1.95	40	85	1.5	150	6
16#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
17#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
18#肋	35	1.95	40	85	1.5	150	6
合计			560				84



图 5 拱柱布孔示意图(单位:cm)

Fig. 5 Blast holes on the arch column(unit:cm)

表 4 拱柱炮孔数量表

Table 4 Number of arch column holes

爆破部位	中跨			左跨				合计/个
	11#柱	12#柱	13#柱	14#肋	15#肋	16#肋	17#肋	
数量	16	32	40	32	16	16	32	
合计		88		48		48		184

表 5 拱肋装药量统计表

Table 5 Statistical table of arch rib charge

爆破部位	孔距/cm	排距/m	孔数/个	孔深/cm	单耗/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单孔药量/g	单元药量/kg
11#柱	45	1.95	16	43	1.2	200	3.2
12#柱	45	1.95	32	43	1.2	200	6.4
13#柱	45	1.95	40	43	1.2	200	8.0
14#柱	45	1.95	32	43	1.2	200	6.4
15#柱	45	1.95	16	43	1.5	200	3.2
16#柱	45	1.95	16	43	1.2	200	3.2
17#柱	45	1.95	32	43	1.2	200	6.4
合计			184				36.8

3.4.4 盖、连梁爆破参数

仅对左一跨半即图6中11、12、13、14、15、16、17、18孔的7根盖梁和其对应的6根连梁布孔爆破。每根梁长8m,分别在T型上下交叉处布孔3个。如图6所示。见表6、表7。

(1)孔距: $a = 45\text{ cm}$ 。

- (2)炮孔深度:梁厚60cm,炮孔深度取40cm。
- (3)炸药单耗:肋梁 $q = 1.2\text{ kg/m}^3$ 。
- (4)单孔装药量: $Q_{\text{梁}} = 1.2 \times 0.6 \times 0.4 \times 0.45$ ,取130g。
- (5)盖梁、连梁装药量: $130 \times 156 = 20.28\text{ kg}$ 。

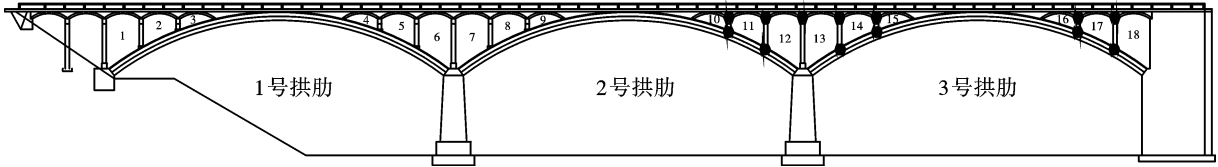


图6 盖、连梁布孔示意图(单位:cm)

Fig. 6 Holes in the cover and connecting beam (unit:cm)

表6 盖、连梁炮孔数量表

Table 6 Number of cover and connecting beam holes

爆破部位	中跨			左跨			合计/个
	11#梁	12#梁	13#梁	14#梁	15#梁	16#梁	
数量	24	24	12	24	24	24	24
合计	60		48		48		156

表7 盖、连装药量统计表

Table 7 Charge for the cover and connecting beam

爆破部位	孔距/cm	排距	孔数/个	孔深/cm	单耗/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单孔药量/g	单元药量/kg
11#梁	45	/	24	40	1.2	130	3.12
12#梁	45	/	24	40	1.2	130	3.12
13#梁	45	/	12	40	1.2	130	1.56
14#梁	45	/	24	40	1.2	130	3.12
15#梁	45	/	24	40	1.5	130	3.12
16#梁	45	/	24	40	1.2	130	3.12
17#梁	45	/	24	40	1.2	130	3.12
合计	156					20.28	

3.5 爆破网路设计

为减小爆破振动危害,本工程网路设计应保证:一是控制最大一次齐爆药量,满足振动安全要求;二是网路传爆雷管全部传爆后,首响炮孔开始起爆,以确保网路的安全;三是爆破由桥左岸向右岸顺序传爆,保证桥体平稳逐跨有序垂直塌落,且不会对左岸桥台形成挤压冲击。故采用孔内延时孔外接力传爆

网路,即孔内雷管采取MS12段,孔外工业电子雷管并联<sup>[7]</sup>,每15~20发为簇,每一簇为一个节点,每节点使用两发同段电子雷管,由左岸向右岸依次排段,节点间电子雷管段差10ms,整体网路形成50个节点,起爆共需1050ms。起爆顺序为由左岸向右逐跨、墩起爆。起爆网路如图7所示。

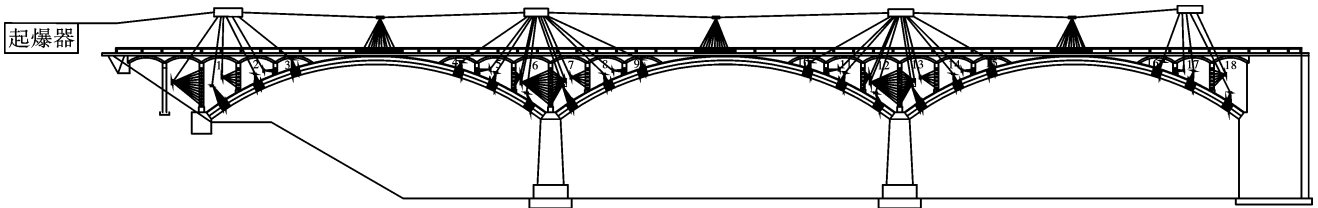


图7 起爆网路示意图

Fig. 7 Diagram of initiation network

## 4 爆破安全计算及防护措施

### 4.1 爆破安全计算

#### 4.1.1 飞石距离计算

根据多年来的工程实践经验<sup>[8]</sup>,确认工程兵指挥学院关于爆破飞石的安全距离的计算经验公式(1)比较符合本工程的实际情况。

$$R = K_n \cdot K \cdot D \quad (1)$$

式中: $R$ 为爆破飞石的最大抛距,m; $K_n$ 为常数

1.2~1.5; $K$ 为炸药单耗, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $D$ 为炮孔直径,mm。

经计算,桥墩(帽)最大飞散距离为: $R_{\text{墩下}} = 1.2 \times 0.8 \times 90 = 86.4 \text{ m}$ , $R_{\text{墩帽}} = 1.2 \times 0.6 \times 90 = 64.8 \text{ m}$ 。

拱肋最大飞散距离为: $R_{\text{肋}} = 1.5 \times 1.5 \times 40 = 90 \text{ m}$ 。

拱立柱、梁最大飞距离为: $R_{\text{梁柱}} = 1.5 \times 1.2 \times$

$40 = 72 \text{ m}$ 。

#### 4.1.2 爆破振动计算

按照《爆破安全规程》(GB 6722—2014)规定<sup>[9]</sup>,爆破振动用公式(2)估算

$$V = K \cdot [Q^{1/3}/R]^\alpha \quad (2)$$

式中: $V$ 为地面质点振动速度, $\text{cm}/\text{s}$ ; $K$ 为地质有关系数; $\alpha$ 为衰减指数; $Q$ 为一次齐爆药量; $R$ 为保护建筑物离爆区的最小距离。

参照同类工程类比及本项目工程地质特点,爆破上部结构时 $K = 37.1$ , $\alpha = 1.57$ ,爆破桥墩时 $K = 150.0$ , $\alpha = 1.50$ 。

爆破上部结构距离保护目标最近距离: $R_{\text{左}} = 8 \text{ m}$ 。

爆破桥墩距离保护目标最近距离: $R_{\text{左}} = 62 \text{ m}$ 。

爆破上部结构允许单段药量: $Q_{\text{左单}} = 15.8 \text{ kg}$ 。

爆破桥墩允许单段药量: $Q_{\text{单左}} = 381.3 \text{ kg}$ 。

表8 爆破振动质点振速允许值及最大单段药量允许值

Table 8 Permissible value of particle vibration velocity and maximum charge per delay

爆破部位	防护目标	最小距离/m	$K$ 值	$\alpha$ 值	单段起爆药量/kg	允许振速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	计算振速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1#拱肋	右岸南侧楼房	130	37.1	1.57	4	1.5	0.036
18#拱肋	左岸电站水闸	8	37.1	1.57	4	6.0	2.920
右桥墩	南侧厂房	170	150.0	1.50	60	1.5	0.520
左桥墩	电站水闸	62	150.0	1.50	120	6.0	3.360

经计算:1#拱肋爆破震动对南侧楼房最大振动速度为0.036  $\text{cm}/\text{s}$ ,右桥墩爆破对南楼房最大振动速度为0.520  $\text{cm}/\text{s}$ 。

18#跨拱肋爆破震动对泄水闸最大振动速度为2.920  $\text{cm}/\text{s}$ ,左桥墩爆破对泄水闸最大振动速度为3.360  $\text{cm}/\text{s}$ 。因此,爆破震动不会造成不良影响,可确保周围建筑物安全稳定。

### 4.2 防护措施

#### 4.2.1 飞石防护措施

右岸拱肋、柱、梁均在桥面以下且位置较低,桥上下游河岸200 m内无建筑设施,仅桥南侧厂办公楼距右跨拱顶爆破部位150 m,在拱顶压草帘两层进行防护。

左跨拱肋、柱、梁爆破距离电站水闸较近,在左跨拱顶爆破部位压草帘两层,并对左跨柱子爆破采用近体防护,即用两层草苫围绕柱子包缠后再用铁丝捆扎;为了便于爆后清理,对拱肋防护采用悬挂草帘的或竹笆遮挡防护<sup>[10]</sup>。

通过采取上述防护措施可确保爆破飞石控制在20 m左右范围内。爆破时间段内左岸公路进行暂

时性的交通管制。

#### 4.2.2 冲击波防控措施

在拆除爆破工程中,由于单个药包药量较小,且设在梁、柱、墩体内部,因此,空气冲击波的危害可以忽略不计。

桥墩单段最大起爆药量较大,为降低其爆破对水闸、鱼咀、导流墙和滚水坝的影响,进一步减小水击波超压,在靠近左岸电站、滚水坝沿线100 m水下,预先敷设漏气PVC,用空压机向管内打压形成气泡帷幕<sup>[11,12]</sup>,以降低爆破振动和水击波的影响。同时,分别在南岸厂房、泄水闸设置爆破振动监测仪。

## 5 爆破效果

起爆后,大桥由紧临重要建筑物侧似骨牌式向右岸方向倒塌。大桥严格按设计方向倒塌,触地并解体,整体破碎效果较好,达到了预期的爆破效果。因大桥完全按照设计方向倒塌,并未倒向电站大坝侧,故未对电站大坝产生较大的推拉、挤压作用,保证了紧临重要建筑物的安全,同时周边被保护建

(构)筑物均未受到爆破有害效应的影响。爆破过程采用爆破测振仪记录振动速度,记录结果如表9、表10所示。

表9 爆破振动质点振速监测记录表(泄水闸控制室)

Table 9 Vibration velocity monitoring data  
(Sluice control room)

通道号	通道名称	最大值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大值 时刻/s	半波主频/ Hz
1	CH1	0.01	0.0976	63.49
2	CH2	0.11	0.2024	6.46
3	CH3	0.24	0.1990	6.31

表10 爆破振动质点振速监测记录表(腾飞化工厂办公楼)

Table 10 Vibration velocity monitoring data  
(Tengfei Chemical Plant Office Building)

通道号	通道名称	最大值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大值 时刻/s	半波主频/ Hz
1	CH1	0.01	4.7457	12.05
2	CH2	0.14	4.8577	11.59
3	CH3	0.12	4.8533	12.16

经过对比,爆破振动质点振速最大值(泄水闸控制室) $0.24 \text{ cm/s} < 6.0 \text{ cm/s}$ ;爆破振动质点振速最大值(腾飞化工厂办公楼) $0.14 \text{ cm/s} < 1.5 \text{ cm/s}$ ,最大振动速度均在允许范围内。

## 6 结论

(1)为降低爆破拆除双曲拱桥所产生的有害效应,有效保护紧邻重要建筑物,桥梁拱肋、拱柱、连梁等构件采用抛掷爆破装药,单耗为 $1.2 \sim 1.5 \text{ kg/m}^3$ ,桥墩采用加强松动装药,最大单墩药量为 $480 \text{ kg}$ ,实现了桥梁由左向右逐跨有序垂直塌落,有效降低了对左岸紧邻建筑物的挤压冲击,确保了紧邻建筑物的安全,同时桥体解体充分,钢筋混凝土分离,显著减少爆后水下二次破碎、切割钢筋及打捞清运的工作量。

(2)通过在重要紧邻建(构)筑物水下部分设置气泡帷幕,有效减小水击波超压,从而降低爆破振动和水击波对周边建(构)筑物的影响。

### 参考文献 (References)

- [1] 谌润水,谌乐强.改造加固双曲拱桥的成套技术研究[M].北京:人民交通出版社,2008:116-119.
- [1] SHEN Run-shui, SHEN Le-qiang. Study on complete technology of retrofit and reinforcement of double curved arch bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 116-119. (in Chinese)
- [2] 曾小丽.大跨度双曲拱桥上部结构拆除施工技术[J].现代城市轨道交通,2021(10):73-78.
- [2] ZENG Xiao-li. Dismantling construction technique of long-span double-curved arch bridge superstructures[J]. Modern Urban Transit, 2021(10):73-78. (in Chinese)
- [3] 王璞,周卫华,欧阳光,等.紧邻既有桥梁的大型钢筋混凝土拱桥爆破拆除[J].爆破,2020,37(1):107-112.
- [3] WANG Pu, ZHOU Wei-hua, OUYANG Guang, et al. Explosive demolition of large reinforced concrete arch bridge adjacent to existing bridges[J]. Blasting, 2020, 37(1): 107-112. (in Chinese)
- [4] 王守伟.复杂环境下钢筋混凝土箱型拱桥的爆破拆除[J].爆破,2018,35(3):98-102.
- [4] WANG Shou-wei. Blasting demolition of reinforced concrete box arch bridge under complex environment[J]. Blasting, 2018, 35(3):98-102. (in Chinese)
- [5] 郑炳旭,高荫桐,肖文雄,等.定向爆破抛掷距离研究与分析[J].爆破,2006(4):1-3,14.
- [5] ZHENG Bing-xu, GAO Yin-tong, XIAO Wen-xiong, et al. Research and analysis on casting distance of directional blasting[J]. Blasting, 2006(4):1-3,14. (in Chinese)
- [6] 李磊,沈兆武,马宏昊,等.台阶式中深孔延时加强松动爆破[J].工程爆破,2010,16(3):37-40,11.
- [6] LI Lei, SHEN Zhao-wu, MA Hong-hao, et al. Medium-length hole and delay strengthening loosening blasting method of bench type[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(3): 37-40,11. (in Chinese)
- [7] 张孟昌,杨保东,杨凯,等.复杂环境下高速公路天桥爆破拆除[J].工程爆破,2015,21(5):37-39,67.
- [7] ZHANG Meng-chang, YANG Bao-dong, YANG Kai, et al. Blasting demolition of the highway overbridge in complex surroundings[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5):37-39,67. (in Chinese)
- [8] 熊炎飞,董正才,王辛.爆破飞石飞散距离计算公式浅析[J].工程爆破,2009,15(3):31-34.
- [8] XIONG Yan-fei, DONG Zheng-cai, WANG Xin. Analysis of the formula about blasting flying rock's casting distance [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(3):31-34. (in Chinese)
- [9] 国家安全生产监督管理总局. GB 6722-2014 爆破安全规程[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [9] State Administration of Work Safety. GB 6722-2014 Safety regulations for blasting [S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [10] 黄雄,田水龙,余兴和,等.复杂环境下小塌落高度双曲拱桥爆破拆除[J].爆破,2022,39(1):120-129.
- [10] HUANG Xiong, TIAN Shui-long, YU Xing-he, et al. Blasting demolition of double-curved arch bridge with

- small collapse height in complex environment[J]. *Blasting*, 2022, 39(1): 120-129. (in Chinese)
- [11] 尹入成. 不同规格气泡幕对鱼类趋避行为影响机制及其工程应用设计[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- [11] YIN Ru-cheng. The influence mechanism of bubble curtain of different specifications on the approach-avoidance behavior of fishes and its engineering application design [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020. (in Chinese)
- [12] 谢达建, 吴立, 洪江, 等. 气泡帷幕对水下爆破冲击波的削弱作用研究[J]. *人民长江*, 2018, 49(8): 72-77.
- [12] XIE Da-jian, WU Li, HONG Jiang, et al. Study on weakening effect of bubble curtain on water shock wave in underwater blasting[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(8): 72-77. (in Chinese)
- 英文编辑: 陈东方
- 
- (上接第101页)
- [4] SHI X Z, ZHOU J, WU B B, et al. Support vector machines approach to mean particle size of rock fragmentation due to bench blasting prediction[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 432-441.
- [5] 周先平, 李彦坡, 吴新霞, 等. 岩体爆破块度控制技术新进展[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(S1): 7-13.
- [5] ZHOU Xian-ping, LI Yan-po, WU Xin-xia, et al. New advance of control technique for blasting fragment-size of rock mass[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(S1): 7-13. (in Chinese)
- [6] CUNNINGHAM C. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting] C] // HOLMBERG R, RUSTAN A. *Transactions of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*; Vol. 2 Llea, Sweden: Llea University of Technology, 1983: 439-453.
- [7] KULATILAKE P H S W, WU Q, HUDAVERDI T, et al. Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks[J]. *Engineering Geology*, 2015, 114(3): 298-311.
- [8] ASL P F, MONJEZI M, HAMIDI J K, et al. Optimization of flyrock and rock fragmentation in the Tajareh limestone mine using metaheuristics method of firefly algorithm[J]. *Engineering with Computers*, 2018, 34(2): 241-251.
- [9] 董师师, 黄哲学. 随机森林理论浅析[J]. *集成技术*, 2013, 2(1): 1-7.
- [9] DONG Shi-shi, HUANG Zhe-xue. A brief theoretical overview of random forests[J]. *Journal of Integration Technology*, 2013, 2(1): 1-7. (in Chinese)
- [10] 史秀志, 王洋, 黄丹, 等. 基于LS-SVR岩石爆破块度预测[J]. *爆破*, 2016, 33(3): 36-40.
- [10] SHI Xiu-zhi, WANG Yang, HUANG Dan, et al. Based on LS-SVR rock blasting fragmentation prediction[J]. *Blasting*, 2016, 33(3): 36-40. (in Chinese)
- [11] 史秀志, 周健, 吴帮标, 等. 台阶爆破岩石破碎平均粒径预测的支持向量机方法(英文)[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 432-441.
- [11] SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, WU Bang-biao, et al. Support vector machine method for predicting average particle size of rock broken by bench blasting (English) [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(2): 432-441. (in Chinese)
- [12] HUDAVERDI T, KULATILAKE P H S W, KUZU C. Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35(12): 1318-1333.
- [13] 王仁超, 朱品光. 基于随机森林回归方法的爆破块度预测模型研究[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(1): 89-101.
- [13] WANG Ren-chao, ZHU Pin-guang. Study on prediction model of blasting fragmentation based on random forest regression method[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(1): 89-101. (in Chinese)
- [14] 叶海旺, 胡俊杰, 雷涛, 等. LOO-XGboost模型预测岩石爆破块度[J]. *爆破*, 2022, 39(1): 16-21.
- [14] Ye Hai-wang, Hu Jun-jie, LEI Tao, et al. Prediction of rock fragmentation by loo xgboost model[J]. *Blasting*, 2022, 39(1): 16-21. (in Chinese)
- [15] 李俊卿, 李秋佳, 石天宇, 等. 基于数据挖掘的风电功率预测特征选择方法[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(10): 87-92.
- [15] LI Jun-qing, LI Qiu-jia, SHI Tian-yu, et al. Feature selection method of wind power prediction based on Data Mining[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2019, 56(10): 87-92. (in Chinese)
- 英文编辑: 黄刚