

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.018

## 复杂环境下小塌落高度双曲拱桥爆破拆除

黄雄,田水龙,余兴和,朱根华,郝亚飞,周桂松,胡劲松,唐安鹏,肖青松,郭飞高,陈红刚  
(中国葛洲坝集团 易普力股份有限公司,重庆 401121)

**摘要:** 2021年1月安宁河1桥被评定为四类危桥,为防止大桥在汛期时垮塌,因此当地政府拟对该桥进行爆破拆除。安宁河1桥为双曲拱桥,桥长207.7 m,桥宽9.5 m,其地处城中心闹市区,周边环境复杂,与紧邻既有彩虹桥最近处为3 m。由于桥梁各桥墩河床以上高度仅1.7~3 m,桥梁塌落高度不足,因此选取距两岸闹市区较远的3#桥墩先行充分爆破解体。3#桥墩、墩上横墙及拱上横墙的炸药单耗为1.5~2.13 kg/m<sup>3</sup>,保证3#桥墩充分破碎,为桥梁整体垮塌失稳创造塌落空间。对其他桥跨的拱肋、桥墩、盖梁、墩上横墙、部分拱上横墙和连接梁等影响桥梁整体垮塌的受力构件进行局部破坏,其单耗为1.44~1.96 kg/m<sup>3</sup>,使桥梁从中间向两边垮塌。采用导爆管雷管与电子雷管混合起爆网路,对各爆破部位进行分区,各区间内按高程、上下游进行等间隔短延时分段方式,使桥梁各部位起爆时间不一致,同部位不同高程、上下游进行分段延时,充分利用各部位起爆时间与桥梁塌落高度不同,实现桥梁低落差条件下的不均匀沉降与充分错位解体。采用高强度柔软性覆盖物胶皮、中强度覆盖物土工格塑料网、硬性覆盖物竹排、柔软性覆盖物草垫和密目安全网进行内外刚柔并济的多重防护方式进行防护,硬性与中高强度覆盖物可有效防护大块飞石,柔软性覆盖物可起到缓冲作用,有效防护小块飞石,有效的保护了周围建(构)筑物的安全。

**关键词:** 双曲拱桥;爆破拆除;塌落高度;不均衡落体;错位解体

**中图分类号:** TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0120-10

## Blasting Demolition of Double-curved Arch Bridge with Small Collapse Height in Complex Environment

HUANG Xiong, TIAN Shui-long, YU Xing-he, ZHU Gen-hua, HAO Ya-fei, ZHOU Gui-song,  
HU Jin-song, TANG An-peng, XIAO Qing-song, GUO Fei-gao, CHEN Hong-gang  
(CHINA Gezhouba GROUP Explosive Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

**Abstract:** In January 2021, the Anning River Bridge 1 was assessed as a class-4 dangerous bridge. In order to prevent the bridge from collapsing during the flood season, the local government planned to demolish the bridge by blasting. This Bridge was a double-curved arch bridge, with a length of 207.7 m and a width of 9.5 m. It was located in the downtown area of the city center and had a complex surrounding environment. The nearest distance to the existing Rainbow Bridge was 3 m. As the height of the bridge piers above the river bed was only 1.7~3 m, the collapse height of the bridge was insufficient. Therefore, the 3# bridge pier, which was far from the downtown on both sides of the bank, was selected for full blasting disintegration first. The powder factor of the 3# bridge pier, the upper cross wall of the pier and the upper cross wall of the arch was 1.5~2.13 kg/m<sup>3</sup>, which ensured the 3# pier could be fully broken and the space for the bridge to collapse could be created. Meanwhile, some stress components which affect the overall collapse of the bridge, such as arch ribs, piers, cover beams, transverse walls on piers, partial transverse walls on arches and connection beams, were destroyed locally, which resulted in the collapse of the bridge from the middle to both sides with powder factor of 1.44~1.96 kg/m<sup>3</sup>. A mixing initiation network of Nonel detonators and electronic detonators was adopted for different blast sections. In each section, equal interval short delay initiation was used according to the order of height and upstream to downstream, so that the initiation times of different sections of the

bridge were different. For the same section, the difference of the initiation times and bridge collapse heights were made full use to realize the uneven settlement and full dislocated disintegration of the bridge under the low drop condition. In addition, multiple internal and external protection methods with rigidity and flexibility were utilized, including high-strength soft covering rubber, medium-strength covering geogrid plastic net, hard covering bamboo raft, soft covering straw mat and dense mesh safety net. Among them, the rigid and medium-high strength covering could control the large flying rocks, and the soft covering could play a buffering role to suppress the small flying rocks, which effectively protected the surrounding buildings (structures).

**Key words:** double-curved arch bridge; demolition by blasting; collapse height; unbalanced falling body; dislocation

## 1 工程概况

### 1.1 工程环境

安宁河1桥位于国道G227线张孟路,桥梁编码为G227510421L0135,线路名称为张孟路,桥梁中心桩号为2530.721。该桥跨越安宁河,是一座6跨钢筋混凝土双曲拱桥,单孔净跨30 m,实测桥长207.7 m,桥宽9.5 m,厚0.86 m。由于安宁河1桥主要承重构件主拱圈存在较多结构性病害,主河道中桥墩基础冲刷严重,已严重影响桥梁使用,2021年1月该桥被评定为四类危桥,为防止大桥在汛期时垮塌,因此当地政府拟对该桥进行爆破拆除。

安宁河1桥东侧桥头距离尚品国际商业广场55 m,距离中医馆28 m,距离彩虹桥最近为3 m;西侧桥头距离攀枝花市米易市场监督管理局20 m,距离攀枝花农商银行18 m,距离河熙小区51 m,距离米易一中91 m。桥梁爆破周边环境极其复杂。桥梁周边环境如图1所示。



图1 待拆除桥梁周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the surrounding environment of the bridge to be demolished

### 1.2 桥梁结构

桥梁上部为组合拼接结构,采用6跨30 m 混凝土双曲拱,上部结构由主拱圈(即拱肋、横系梁、拱波和悬臂板)和拱上结构组合拼接而成。全桥拱肋共计36片,宽20 cm,高30 cm;横系梁共计270道,拱波共计4200片(包括悬臂板),腹拱共计36个(以水流方向从左至右,将每跨腹拱依次编号为1#~6#腹拱)如图2、图3所示。

桥梁下部结构两侧桥台支撑,桥台基础为明挖扩大基础;3#桥墩采用片石混凝土重力式结构,基础为明挖扩大基础,横桥向宽12.16 m;1#、2#、4#、5#桥墩基础采用钻孔灌注桩基础,由两根直径为1.5 m 桥墩支撑,桥墩为钢筋混凝土结构。后期对1#、4#桥墩进行加固,在桥墩外围包括0.15 m 厚的混凝土层。各桥墩上部腹拱圈由拱上横墙、墩上横墙组成,其中拱上横墙厚0.5 m,1#、2#、4#、5#桥墩墩上横墙厚0.8 m,3#桥墩墩上横墙厚2.3 m。

## 2 爆破方案

### 2.1 工程要求及技术难点

(1)工程要求将大桥自两端桥台以内的桥体全部炸塌,使其具备后期机械清运条件。

(2)爆破不得损坏临近建(构)筑物,尤其是确保彩虹桥的安全,严格控制爆破振动、冲击波在国家标准范围内。

(3)桥梁结构在未破坏时整体安全性较好,但结构的某点受到破坏后,可能会出现连锁坍塌的反应,预拆除施工不能破坏结构的整体性。

(4)1#、2#、4#、5#桥墩河床以上部分仅1.7~1.8 m,3#桥墩河床以上部分为3 m,塌落高度低,大桥破碎解体难度高。

(5)东侧(左岸)桥头与彩虹桥最近距离3 m,必须控制爆破产生的冲击波、振动、爆破飞石等有害效应对彩虹桥桥墩基础的影响,技术要求高。

(6)大桥距周边居民楼、商业中心、学校较近,安全防护、警戒压力大。

收稿日期:2021-09-24

作者简介:黄 雄(1993-),男,湖北武汉,硕士研究生、工程师,从事爆破理论及其应用研究,(E-mail)764187034@qq.com。

通讯作者:田水龙(1989-),男,甘肃庆阳,硕士研究生、工程师,从事爆破理论及其应用研究,(E-mail)850804660@qq.com。

(7)该工程属于应急抢险工程,须在雨季来临前完成爆破拆除及清渣,施工任务重,工期紧。

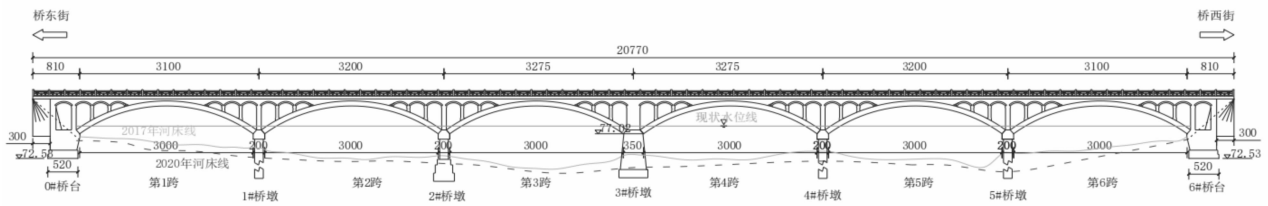


图2 待拆除桥梁示意图(单位:cm)

Fig. 2 Schematic diagram of the bridge to be demolished(unit:cm)



图3 待拆除桥梁实景图

Fig. 3 Picture of the bridge to be demolished

## 2.2 爆破总体方案

根据桥梁的结构特点,环境情况及工程要求,确定采用微差控制爆破原地坍塌方案<sup>[1,2]</sup>。先采用机械与爆破相结合的方式拆除,即采用机械对大桥两端桥台与桥体进行切割分离,然后采取原地坍塌爆破方案一次性将整个大桥爆落垮塌。对桥梁的关键支撑部位即:拱肋、桥墩、盖梁、墩上横墙、拱上横墙、桥面实施钻孔爆破<sup>[3]</sup>,解除桥体支撑,使桥梁结构失稳塌落至地面,在自重作用下解体破坏<sup>[4]</sup>。采用孔内外微差控制爆破技术以及特种防护技术,实现低振动、无飞石、弱噪音、少粉尘、小冲击的爆破目标。具体思路如下:

(1)选取距两岸闹市区较远的3#桥墩先行充分爆破解体,以形成桥梁整体垮塌失稳的先决条件。

(2)对其他桥跨的拱肋和桥面联系梁等影响桥梁整体垮塌的受力构件进行局部破坏,形成从中间向两边的连锁垮塌效应<sup>[5]</sup>。

(3)对其它不影响整体垮塌的大体积的盖梁和桥墩等进行弱松动爆破,以便于后序机械施工。

(4)采用电子雷管精确长延时分段方式使桥体在不均衡落体中<sup>[6]</sup>,实现低落差条件下的充分错位解体,同时最大限度减少爆破振动效应。

(5)采取内外刚柔并济的多重防护方式,减少飞石等爆破危害。

## 2.3 爆破参数

待拆大桥属于组合拼接结构,拆除时主要采用爆破方法破坏桥梁的关键支撑部位,使其整体垮落解体。因此本次爆破对象主要为河床以上一定范围的桥墩、盖梁、拱上横墙、墩上横墙、拱肋等如图4所示,大桥整体爆破部位示意图如图5所示。

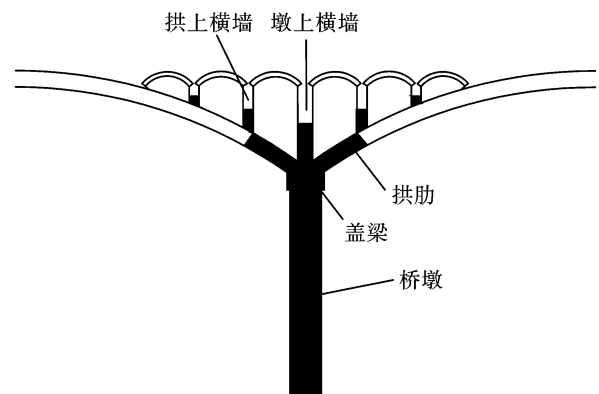


图4 大桥关键支撑部位爆破示意图

Fig. 4 Schematic diagram of blasting of key supporting parts of the bridge

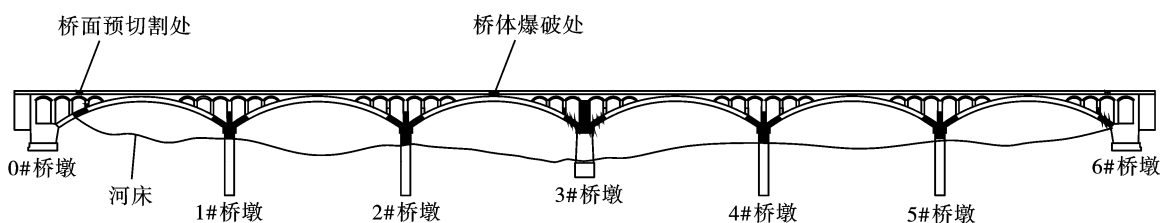


图5 大桥整体爆破部位示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the overall blasting part of the bridge

(1)3#桥墩爆破参数

3#桥墩爆破参数包括桥墩、盖梁、墩上横墙爆破参数<sup>[7]</sup>,其中在桥墩两侧面底部(方便钻孔位置)至盖梁处布置7排水平孔,孔距 $a$ 为0.6 m,排距 $b$ 为0.5 m,平均孔深 $L$ 为1.65 m,炸药单耗为 $2.13 \text{ kg/m}^3$ ,单孔平均装药量为1.15 kg,双面钻孔,由于3#桥墩为上小下大的变截面桥墩结构,因此桥墩底部炮孔深度根据实际情况可适当增加。在墩上横墙两侧分别对盖梁布置1排下向炮孔,孔距 $a$ 为0.3 m,孔深 $L$ 为0.7 m,炸药单耗为 $1.93 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量0.4 kg。在墩上横墙底部(方便钻孔位置)布置7排水平孔,孔距 $a$ 为0.75 m,排距 $b$ 为0.5 m,孔深1.85 m。3#桥墩布孔如图6所示,装药结构如图7所示。

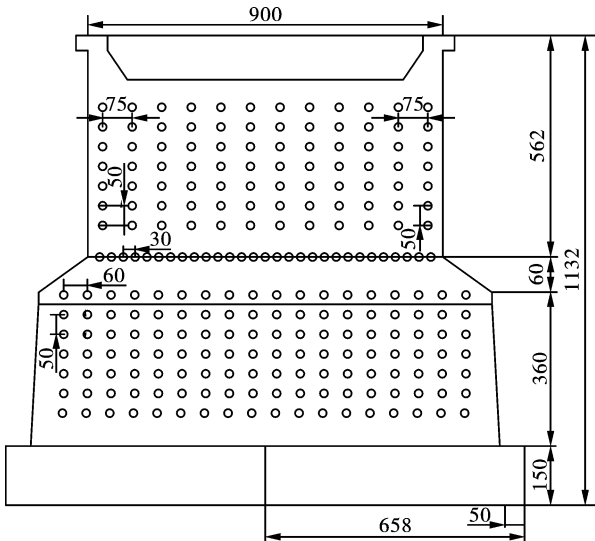


图6 3#桥墩布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 6 3# Schematic diagram of pier blast hole layout(unit:cm)

(2)1#、4#桥墩爆破参数

1#、4#桥墩由2个直径1.5 m的圆柱体组成,桥墩与盖梁下部1.1 m处,桥墩外部有0.15 m厚混凝土包裹。

布孔:沿桥墩交错布置炮孔,一个水平圆柱面布置1个孔,排距 $b$ 为0.3 m;上部直径1.5 m的桥墩孔深 $L$ 为1.15 m,炸药单耗为 $1.51 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.8 kg,堵塞长度为0.4 m;下部直径1.8 m的桥墩孔深 $L$ 为1.4 m,炸药单耗为 $1.44 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为1.1 kg,堵塞长度为0.4 m。见图8、9。

(3)2#、5#桥墩爆破参数

2#、5#桥墩由2个直径1.5 m的圆柱体组成。

布孔:沿桥墩交错布置炮孔,一个水平圆柱面布

置1个孔,排距 $b$ 为0.3 m;孔深 $L$ 为1.15 m,炸药单耗为 $1.51 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.8 kg,堵塞长度为0.4 m。见图10、11。

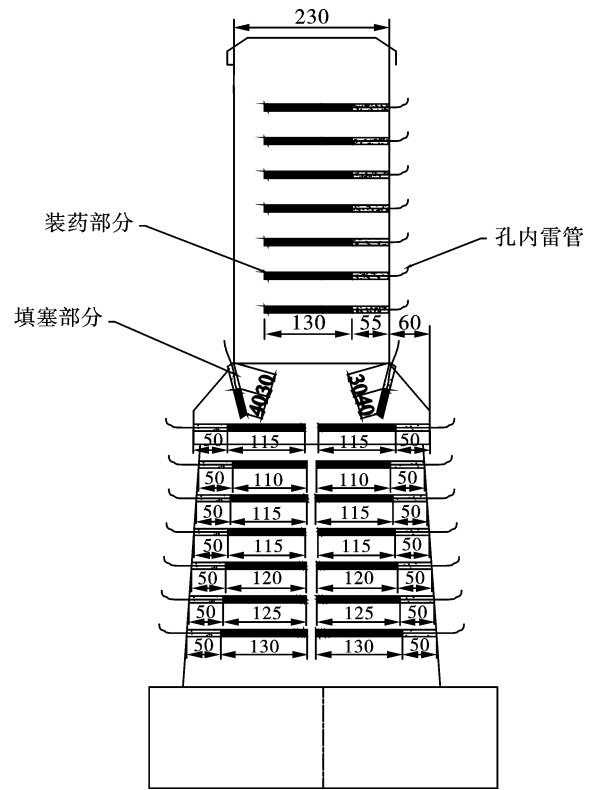


图7 3#桥墩装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 7 3# Schematic diagram of bridge pier charge structure(unit:cm)

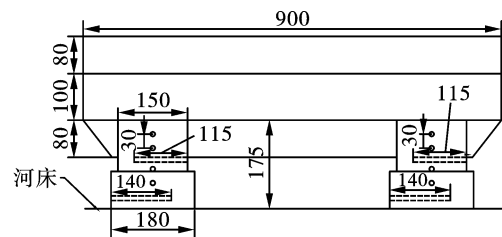


图8 1#、4#桥墩布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 8 Schematic diagram of 1#、4# bridge pier hole layout(unit:cm)

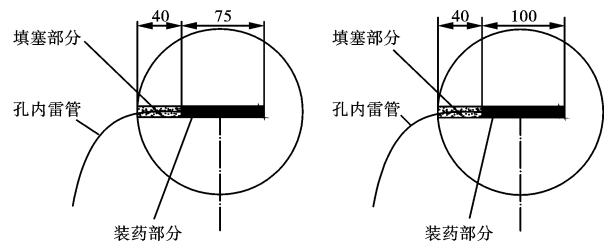


图9 1#、4#桥墩装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 9 Schematic diagram of 1#、4# bridge pier charge structurepier hole layout(unit:cm)

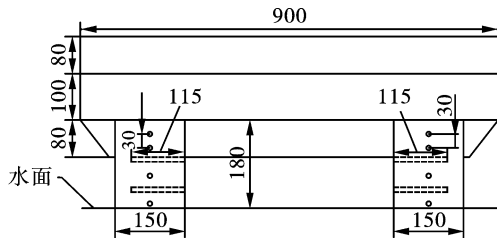


图 10 2#、5#桥墩布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 10 Schematic diagram of 2#,5# bridge pier hole layout(unit:cm)

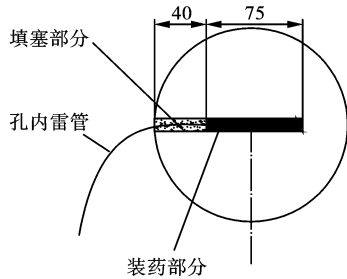


图 11 2#、5#桥墩装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 11 Schematic diagram of 2#,5# bridge pier charge structure(unit:cm)

(4) 盖梁爆破参数

1#、2#、4#、5#桥墩处盖梁分为三个部分,上部分为梯形结构,下部分为长方形结构,盖梁下部有中间连接梁;上部分梯形结构沿墩上横墙两侧分别布置1排下向炮孔,沿横墙方便钻孔角度尽量钻垂直炮孔,孔距 $a$ 为0.3 m,孔深 $L$ 为0.7 m,炸药单耗为 $1.49 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.5 kg,堵塞长度为0.2 m;下部分为长方形结构沿侧面布置2排炮孔,孔距 $a$ 为0.7 m,排距 $b$ 为0.4 m,孔深 $L$ 为1.6 m,炸药单耗为 $1.96 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为1.1 kg,堵塞长度为0.5 m;中间连接梁部分布置2排炮孔,孔距 $a$ 为0.5 m,排距 $b$ 为0.25 m,孔深 $L$ 为0.7 m,炸药单耗为 $2 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.4 kg,堵塞长度为0.3 m。盖梁布孔图、装药结构见图12、图13。

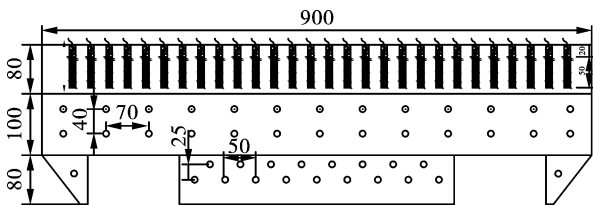


图 12 盖梁布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 12 Schematic diagram of cover beam charge structure(unit:cm)

(5) 墩上横墙爆破参数

1#、2#、4#、5#桥墩墩上横墙厚0.8 m,在墩上横墙底部(方便钻孔位置)布置7排水平炮孔;孔距 $a$

为0.5 m,排距 $b$ 为0.4 m,方形布孔,孔深 $L$ 为0.55 m;炸药单耗为 $1.56 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.25 kg;堵塞长度为0.3 m。布孔图、装药结构见图14、图15。

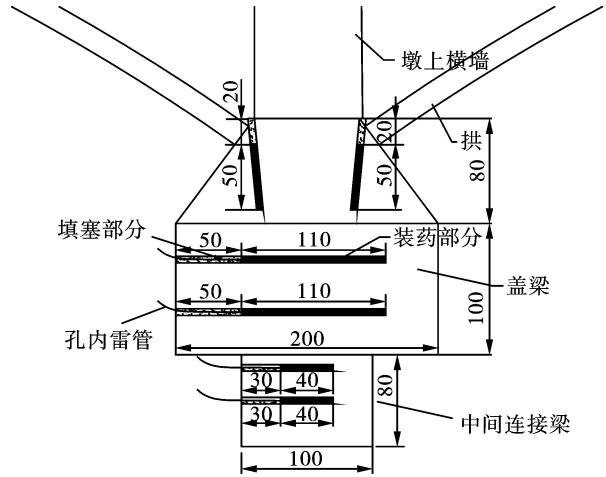


图 13 盖梁装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 13 Schematic diagram of cover beam hole(unit:cm)

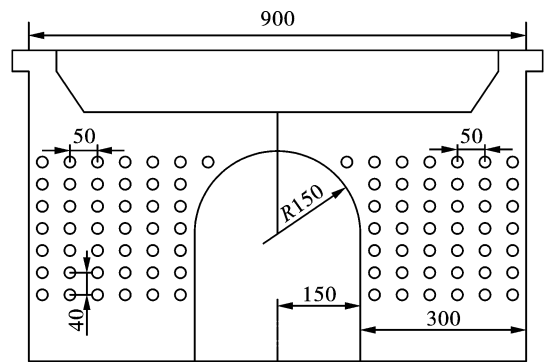


图 14 1#、2#、4#、5#桥墩墩上横墙布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 14 1#,2#,4#,5# pier piers on the horizontal wall of the hole layout diagram(unit:cm)

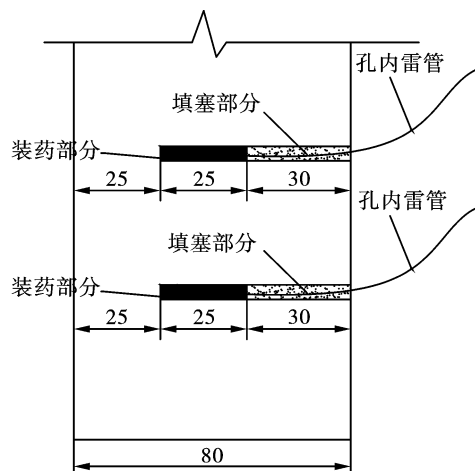


图 15 1#、2#、4#、5#桥墩墩上横墙装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 15 Schematic diagram of the charge structure of the transverse wall on the 1#,2#,4#,5# bridge piers(unit:cm)

(6) 拱上横墙爆破参数

拱上横墙作为桥面的一个辅助支撑,拱上横墙厚0.5 m,其中在3#桥墩拱上横墙底部(方便钻孔位置)布置4排水平孔,2#、4#桥墩拱上横墙底部(方便钻孔位置)布置2排水平孔;孔距  $a$  为0.4 m;排距  $b$  为0.4 m;方形布孔,孔深  $L$  为0.32 m;炸药单耗为  $1.5 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.12 kg;堵塞长度为0.2 m。见图16、17。

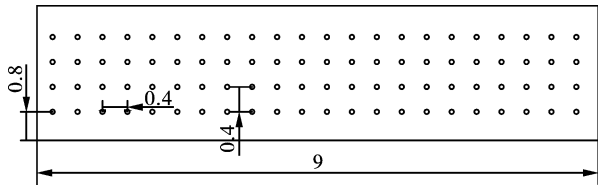


图16 拱上横墙布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 16 Schematic diagram of hole layout on horizontal wall of arch(unit:cm)

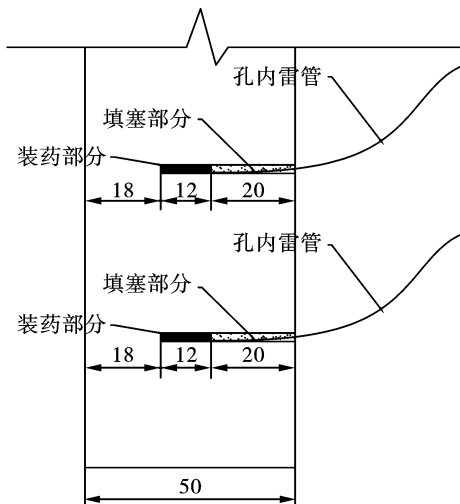


图17 拱上横墙装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 17 Schematic diagram of the charge structure of the transverse wall on the arch(unit:cm)

(7) 拱肋爆破参数

沿各桥墩拱肋侧面上方交错布置9个炮孔,孔距  $a$  为0.2 m,孔深  $L$  为0.13 m,单孔装药量为0.1 kg;堵塞长度为0.03 m。见图18、19。

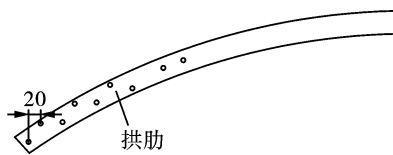


图18 拱肋布孔示意图(单位:cm)  
Fig. 18 Arch rib hole diagram(unit:cm)

(8) 桥面爆破参数

沿3#桥墩左右两侧拱顶桥面两端交错布置5

个炮孔,孔距  $a$  为0.3 m,排距  $b$  为0.3,孔深  $L$  为0.5 m,炸药单耗为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ,单孔装药量为0.1 kg;堵塞长度为0.4 m。见图20、21。

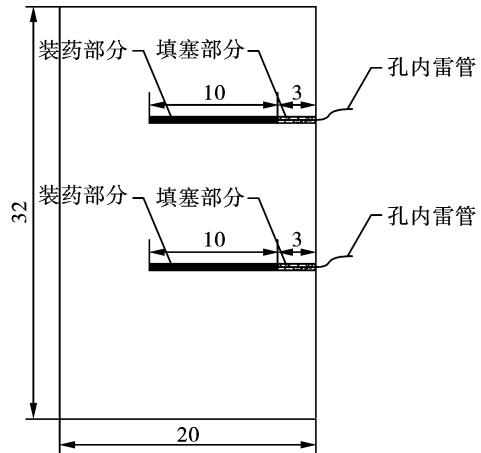


图19 拱肋装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 19 Arch rib charging structure diagram(unit:cm)

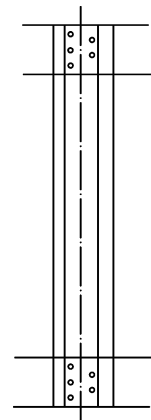


图20 桥面布孔示意图  
Fig. 20 Schematic diagram of bridge deck hole layout

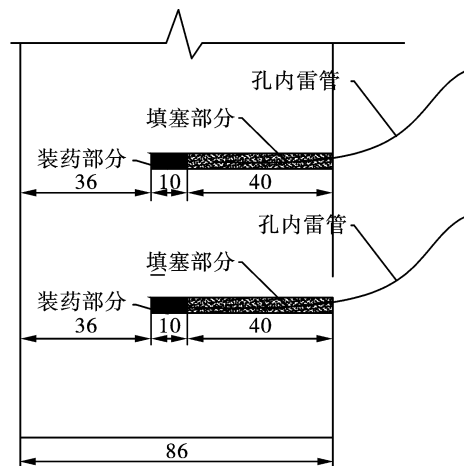


图21 桥面装药结构示意图(单位:cm)  
Fig. 21 Schematic diagram of bridge deck charge structure(unit:cm)

### 2.4 起爆网路

爆破网路采用导爆管雷管与工业电子雷管混合起爆网路。为确保安全准爆,所有炮孔孔内均采用同段的高段位导爆管毫秒雷管,孔外采用工业电子雷管精确延时。

大桥所有炮孔内均装 880 ms( MS15 段) 导爆管雷管,各孔引出的导爆管不超过 20 根捆为 1 扎,每扎绑 2 发 1 段导爆管雷管引至桥面,再使用 2 发工

业电子雷管连接传爆。3#桥墩先起爆,再向两侧逐跨延时;各桥墩处拱肋先起爆,然后由上至下依次起爆,3#桥墩内部延时分为 21 个段别,每段延时间隔 14 ms,延期时间控制在 280 ms 内;2#、4#桥墩内部延时分为 9 个段别,每段延时间隔 25 ms,延期时间控制在 200 ms 内;1#、5#桥墩内部延时分为 7 个段别,每段延时间隔 33 ms,延期时间控制在 200 ms 内;起爆网路如图 22 所示。

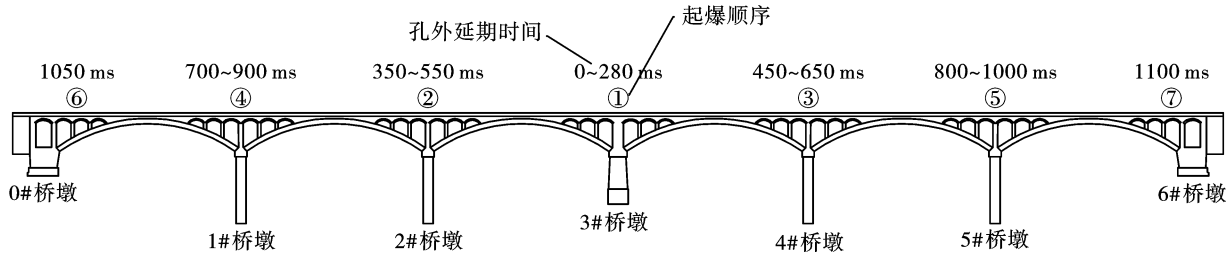


图 22 起爆网路示意图

Fig. 22 Schematic diagram of detonation network

## 3 爆破安全校核与防护

### 3.1 爆破振动速度计算

爆破后产生的振动是通过桥墩传到基础后再传至地面至既有桥及建(构)筑物上,爆破振动发生衰减。爆破振动速度按下式估算<sup>[6]</sup>

$$V = k'k \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $V$  为爆破振动速度,  $\text{cm/s}$ ;  $Q$  为最大单响起爆药量,  $\text{kg}$ ;  $R$  为保护目标至爆区距离,  $\text{m}$ ;  $k$  为与地质

条件有关的系数;  $k'$  为衰减系数;  $\alpha$  为地震波衰减系数。根据我公司在米易县类似地区实测振动监测数据回归结果,本工程取  $k = 32.1$ ,  $k' = 1$ ,  $\alpha = 1.54$ 。

选取爆区周边彩虹桥、商业广场、中医馆、市场监督管理局、小区、学校、银行进行安全校核,其中单段最大药量处为 3#桥墩处,因此根据其距 3#桥墩的距离计算爆破振动速度。为确保周边桥梁及建筑物的安全,对离周边建筑物较近的 1#、5#桥墩处爆破产生的爆破振动也进行安全校核,爆破振动速度预测值及安全评价如表 1 所示。

表 1 爆破振动速度估值表

Table 1 Blasting vibration velocity estimation table

保护目标	距离 $R/\text{m}$	$k, \alpha$ 值	$Q_{\text{max}}/\text{kg}$	$V$ 允许值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V$ 预测值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	评价
彩虹桥	56	$k = 32.1$ $\alpha = 1.54$	48.594 (3#桥墩)	4.0	0.48	安全
商业广场	155			2.5	0.10	安全
中医馆	128			2.5	0.13	安全
市场监督管理局	120			2.5	0.15	安全
河熙小区	151			1.5	0.11	安全
米易一中	191			2.5	0.11	安全
攀枝花农商银行	118		2.5	0.07	安全	
彩虹桥	31.5		29.3 (1#桥墩)	4.0	0.15	安全
商业广场	86			2.5	0.19	安全
中医馆	59			2.5	0.34	安全
市场监督管理局	61.5			2.5	0.32	安全
河熙小区	82			1.5	0.21	安全
米易一中	123	2.5		0.11	安全	
攀枝花农商银行	57.9	29.3 (5#桥墩)	2.5	0.35	安全	
			2.5			

对于拆除爆破而言,爆破振动波经被爆体爆破后传入地面传播,再经地面传播至被保护建(构)筑物,会有较大的衰减,因此爆破引起的实际振动速度会上表计算数值小,爆破产生的振动是在安全允许范围内的。

### 3.2 塌落振动速度计算

桥体在塌落过程中因冲击地面而产生振动,一般而言,塌落振动的强度较爆破振动大、持续时间长、频率低,保护对象的安全允许质点振动速度越小,对保护目标的危害更大,必须引起足够重视。为降低塌落振动效应的危害,应尽量防止桥体桥面同时触地。

通常,塌落振动由下式估算

$$V = K_t \times [(mgH/\sigma)^{1/3}/R]^\beta \quad (2)$$

式中:  $V$  为构件塌落引起的地表振动速度,  $\text{cm/s}$ ;  $m$  为下落构件质量,  $\text{t}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $H$  为构件中心的高度,  $\text{m}$ ;  $\sigma$  为地面介质的破坏参数,土质地面一般取  $10 \text{ MPa}$ ;  $R$  为观测点至冲击地面中心的距离,  $\text{m}$ ;  $K_t, \beta$  为衰减参数。

根据我公司在米易地区类似工程实测振动监测数据回归分析,计算确定  $K_t = 3.37, \beta = 1.66$ 。

安宁河 1 桥距河床最大高度为  $8.5 \text{ m}$ , 桥面厚度为  $0.86 \text{ m}$ , 本工程考虑一单跨拱  $m = 160 \text{ t}$ , 3# 桥墩起爆, 向两端逐跨倒塌触地, 故可按  $160 \text{ t}$  估算塌落振动, 重心落差约  $9 \text{ m}$ , 其塌落振动估算值见表 2。

表 2 塌落振动估算值

Table 2 Estimated value of collapses vibration

保护目标	距离 $R/\text{m}$	$K_t, \beta$	$m/\text{t}$	[ $V$ ] 允许/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$V$ 预测值/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	评价
彩虹桥	15	$K_t = 3.37$ $\beta = 1.66$	160	4.0	1.95	安全
商业广场	71		160	2.5	0.16	安全
中医馆	44		160	2.5	0.35	安全
市场监督管理局	35		160	2.5	0.51	安全
河熙小区	65		160	1.5	0.18	安全
米易一中	108		160	2.5	0.08	安全
攀枝花农商银行	34		160	2.5	0.53	安全

通过计算,受待爆桥梁爆破、塌落所产生的振动影响,周边所有被保护对象质点振动速度低于《爆破安全规程》(GB 6722—2014)<sup>[8]</sup> 和相关行业标准所规定的安全允许值。

### 3.3 爆破飞石距离验算

个别飞散物的产生与炮孔参数和炸药单耗等因素密切相关。无覆盖条件下个别飞散物的飞散距离与炸药单耗之间的关系近似为

$$L_f = 70K^{0.58} \quad (3)$$

式中:  $L_f$  为飞散距离,  $\text{m}$ ;  $K$  为炸药单耗,  $\text{kg/m}^3$ 。

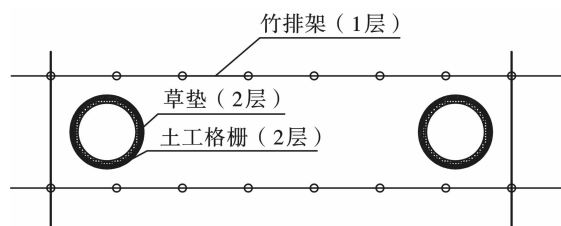
本次爆破设计  $K$  取最大值  $2.13 \text{ kg/m}^3$ , 计算得无覆盖条件下  $L_f = 70 \times 2.13^{0.58} = 108.5 \text{ m}$ , 该值大

于周边部分保护对象距爆体的最小距离,因此,需采取有效的防护措施。

### 3.4 安全防护措施

优化设计:严格控制药量,提高炸药能量利用率,使其主要用于破碎介质,最大程度减少个别飞散物。

覆盖防护:待爆桥墩先捆绑两层草垫,再使用两层土工格栅塑料网进行包裹,外围再使用竹跳板进行防护,防护如图 23 所示<sup>[9,10]</sup>;在桥体装有炸药爆破处两侧悬挂胶皮进行围挡,桥面开窗处覆盖胶皮及沙袋进行防护,并在桥体两侧悬挂两层密目安全网,防护图如图 23 ~ 26 所示。

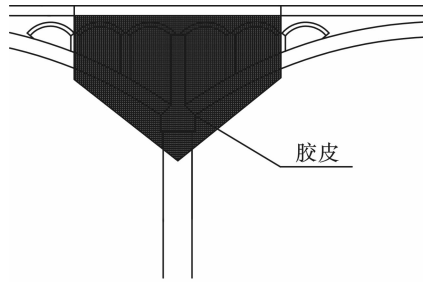


(a) 示意图  
(a) Schematic diagram

(b) 实物图  
(b) Physical map

图 23 桥墩防护示意图

Fig. 23 Schematic diagram of bridge pier protection



(a) 示意图  
(a) Schematic diagram



(b) 实物图  
(b) Physical map

图 24 腹拱圈胶皮防护示意图

Fig. 24 Schematic diagram of rubber protection for abdominal arch ring

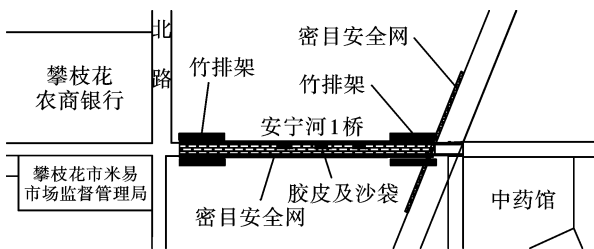


图 25 防护俯视图

Fig. 25 Protection top view

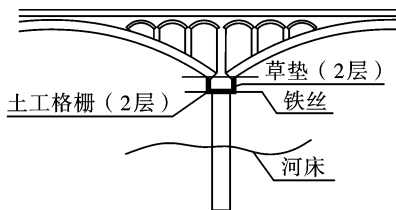


图 26 盖梁防护示意图

Fig. 26 Schematic diagram of cover beam protection

近体防护:在大桥两端0#桥墩与6#桥墩处搭设竹排架,竹排架沿桥墩底部搭设至略高于桥面,并将桥墩附近所有腹拱覆盖,预计搭设竹排架长5 m,高10 m,竹排架上铺设两层竹笆或竹跳板,并在彩虹桥靠近安宁河1桥一侧铺设两层密目安全网进行防护,可有效防止飞石对周围被保护建筑物的破坏,防护图如图23~26所示。

#### 4 爆破效果

起爆后,大桥由中间向两侧依次倒塌,相应的桥面依次失稳塌落,大桥严格按设计倒塌,触地解体,破碎效果良好,达到预期爆破效果。大桥没有向附近彩虹桥倾斜,保证了彩虹桥桥墩及基础的安全,周边被保护建(构)筑物均未受到爆破有害效应的影响,爆后效果如图27所示。爆破过程采用爆破测振仪与空气冲击波测试仪对彩虹桥桥墩及周边建(构)筑物进行振动与空气冲击波监测,爆破时最大

实测振动值为 $1.4928 \text{ cm/s}$ ,如图28所示,大桥爆破与塌落振动控制均在允许振动范围之内,符合设计要求<sup>[5]</sup>,本次爆破拆除安全可靠。



图 27 爆后效果图

Fig. 27 Effect picture after explosion

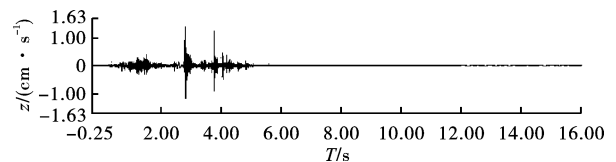


图 28 爆破振动图

Fig. 28 Blasting vibration diagram

#### 5 结语

(1)为解决桥梁塌落高度不足,桥梁无法垮塌的难题,通过对桥墩、盖梁、连系梁、拱上横墙及墩上横墙实施钻孔爆破来增加桥梁塌落高度,同时对双曲拱桥拱肋及桥面爆破来解除桥体触地支撑,实现了桥梁垮塌的目的。

(2)为减少后续二次破碎工程量,在汛期来临前完成桥梁拆除及清渣工作,双曲拱桥爆破拆除中充分利用电子雷管灵活设置延期时间与桥梁各部位塌落高度不同的优势,对桥梁各爆破部位进行分区,各区间内按高程、上下游进行等间隔短延时分段方式,使桥梁各部位起爆时间不一致,实现低落差条件下的桥梁各部位的不均匀沉降与错位解体,保证了桥梁的充分解体,减少了后续二次破碎工作量。

(3)采用高强度柔软性覆盖物胶皮、中强度覆

盖物土工格塑料网、硬性覆盖物竹排、柔软性覆盖物草垫和密目安全网进行内外刚柔并济的多重防护方式,有效的防止了飞石,保护了周边建(构)筑物的安全。

### 参考文献(References)

- [1] 支文超,孟祥栋. 580 m 长钢筋混凝土箱型拱桥爆破拆除[J]. 爆破,2017,34(3):100-103.
- [1] ZHI Wen-chao, MENG Xiang-dong. Explosive demolition of 580 m long reinforced concrete box-typed arch bridge [J]. Blasting,2017,34(3):100-103. (in Chinese)
- [2] 刘士兵,郑永泽,贺攀,等. 复杂环境下334 m 钢筋混凝土刚架拱桥爆破拆除[J]. 工程爆破,2017,23(1):59-63,80.
- [2] LIU Shi-bing, ZHEN Yong-ze, HE Pan, et al. Blasting demolition of a 334 m reinforced concrete rigid frame arch bridge in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2017,23(1):59-63,80. (in Chinese)
- [3] 隋玉凤,毕卫国,孙明旭,等. 钢筋混凝土双曲拱桥爆破拆除[J]. 工程爆破,2015,21(5):40-42.
- [3] SUI Yu-feng, BI Wei-guo, SUN Ming-xu, et al. Blasting demolition of reinforced concrete double curved arch bridge[J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5):40-42. (in Chinese)
- [4] 赵飞,赵明生,池恩安,等. 石拱桥的爆破拆除实践[J]. 爆破,2014,31(1):100-102.
- [4] ZHAO Fei, ZHAO Ming-shen, CHI En-an, et al. Demolition of stone arch bridge by blasting in complex surroundings[J]. Blasting,2014,31(1):100-102. (in Chinese)
- [5] 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.
- [5] 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)
- [6] 李卫群,钟云,周浩仓. 复杂环境刚架拱桥电子雷管拆除爆破控制技术[J]. 工程爆破,2020,26(1):65-71.
- [6] LI Wei-qun, ZHONG Yun, ZHOU Hao-cang. Controlled blasting demolition of electronic detonator for rigid frame arch bridge in complex environment [J]. Engineering Blasting,2020,26(1):65-71. (in Chinese)
- [7] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [8] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [9] 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.
- [9] WANG Shou-wei. Blasting demolition of reinforced concrete box arch bridge under complex environment [J]. Blasting,2018,35(3):98-102. (in Chinese)
- [10] 王新生,张英才. 运行高速公路上跨天桥爆破拆除关键技术研究[J]. 爆破,2018,35(4):84-89.
- [10] WANG Xin-sheng, ZHANG Ying-cai. Research of key technology of blasting demolition on flyover bridge running highway [J]. Blasting, 2018, 35(4):84-89. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第106页)

- [9] 高文乐,刘志成,李坤鹏,等. 100 m 高钢筋混凝土烟囱双向切口爆破时差研究[J]. 爆破,2021,38(2):128-134.
- [9] GAO Wen-le, LIU Zhi-cheng, LI Kun-peng, et al. Study on time difference of two-way notch blasting for a 100 m high reinforced concrete chimney [J]. Blasting, 2021, 38(2):128-134. (in Chinese)
- [10] 夏曼曼,郑德明,戴春阳,等. 250 m 超高钢筋混凝土烟囱套入式爆破拆除的数值模拟[J]. 爆破,2021,38(2):136-140.
- [10] XIA Man-man, ZHENG De-ming, DAI Chun-yang, et al. Numerical simulation of the demolition of a 250m ultra-high reinforced concrete chimney nested in blasting[J]. Blasting,2021,38(2):136-140. (in Chinese)
- [11] 李飞,孙飞,顾云,等. 120 m 高钢内筒钢混烟囱爆破拆除技术[J]. 爆破器材,2021,50(3):45-50.
- [11] LI Fei, SUN Fei, GU Yun, et al. Blasting demolition technology of a 120 m high steel inner tube concrete chimney [J]. Explosive Materials,2021,50(3):45-50. (in Chinese)
- [12] 王威,贾永胜,韩传伟,等. 框架结构楼房定向爆破拆除后坐控制措施及应用[J]. 爆破,2021,38(2):105-110.
- [12] WANG Wei, JIA Yong-sheng, HAN Chuan-wei, et al. Recoil control measures and application in directional blasting demolition of a frame structure building[J]. Blasting,2021,38(2):105-110. (in Chinese)
- [13] 叶海旺,李庆,郑长青,等. 22 层框架楼房定向爆破拆除倒塌过程分析[J]. 爆破,2021,38(2):111-116.
- [13] YE Hai-wang, LI Qing, ZHENG Chang-qing, et al. Analysis of collapse process of 22-story frame building by directional blasting [J]. Blasting, 2021, 38(2):111-116. (in Chinese)

英文编辑:陈东方