

# 复杂环境下城市超长高架桥 精细爆破拆除关键技术研究

谢先启<sup>1,2</sup>, 贾永胜<sup>1</sup>, 姚颖康<sup>2</sup>, 孙金山<sup>2</sup>, 吴新霞<sup>3</sup>, 刘昌邦<sup>2</sup>

(1. 武汉市市政建设集团有限公司, 武汉 430023; 2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430023; 3. 长江科学院, 武汉 430014)

**[摘要]** 针对复杂环境下城市高架桥爆破拆除工程的特点,提出了其精细爆破的关键技术。提出采用墩柱爆后钢筋骨架的初弯曲压杆失稳力学模型和高架桥连续塌落动力学模型等进行关键参数的量化设计,运用水压爆破技术对多室箱梁进行爆破破碎,采用“宽间隔、长延时、互动有序”非电接力交叉复式起爆网路可确保超长延时起爆网路的安全准爆,采用物理模型试验方法对爆破方案、关键参数等的合理性进行验证,采用多种综合防护技术进行有害效应的预测与控制,采用专业化、协同化、精细化、执行力(SCPE)的项目管理方法进行爆破拆除工程的精细管理。该精细爆破关键技术可为复杂环境下城市高架桥爆破拆除工程实践提供参考。

**[关键词]** 高架桥;爆破拆除;精细爆破;失稳模型;起爆网路;有害效应控制

**[中图分类号]** TU746.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0065-07

## 1 前言

随着我国社会经济的发展,城市建设规模不断扩大,交通基础设施亟需升级改造,其中,部分城市高架桥因通行能力不足、设计缺陷或工程质量等问题需拆除。城市高架桥通常地处闹市区,且结构形式复杂多样,拆除施工对交通、环境影响极大。

拆除爆破具有高效快捷、安全经济的优点,特别适合高架桥的拆除。然而,城市高架桥爆破拆除技术体系尚未形成,相关的基础理论、关键技术以及管理体系等是工程爆破行业亟待解决的重要科学技术问题,对其开展系统的研究具有重要的理论意义和工程实用价值。本文针对城市高架桥爆破拆除过程中存在的问题,提出了爆破方案的量化设计、超长起爆网路、爆破有害效应控制和项目管理等关键技术,以期工程实践提供参考。

## 2 高架桥连续垮塌机理与动力学模型

在城市高架桥拆除爆破工程中,为降低塌落振动对周边环境的危害,一般采用逐跨连续塌落的方式进行拆除。对桥体塌落过程的分析是准确预估桥梁塌落过程,确定总体爆破方案,选择合理跨间起爆时差的重要前提。城市高架桥主要分为连续简支梁桥、连续梁桥、连续刚架桥和组合体系桥等,其失稳塌落机制各有差异。

### 2.1 简支梁桥

简支梁是梁式高架桥结构最常见的一种形式,桥梁跨结构搭接在桥墩上,其拆除爆破过程中需破坏承重的桥墩,桥跨结构在未破坏桥墩的支撑作用下,绕支撑点做旋转运动。对多跨简支梁桥而言,每跨结构是相对独立的,因此其连续垮塌过程可视为单跨简支梁塌落过程在空间和时间上的延

**[收稿日期]** 2014-09-01

**[作者简介]** 谢先启,1960年出生,男,湖北洪湖市人,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事工程爆破理论与工程实践工作;  
E-mail:xxqblast@163.com

续。当每跨间隔一定时间顺序起爆时,其空间姿态如图1所示。

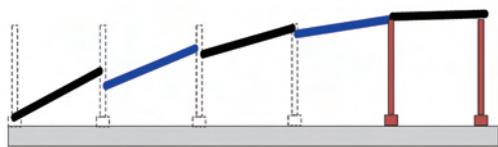


图1 简支梁桥连续垮塌形态

Fig. 1 Sequence collapse form of simple supported beam bridge

根据桥体的塌落过程,可采用下述动力学模型对其运动姿态进行预测,为爆破时差的选择提供依据。

### 2.1.1 杆摆运动阶段

桥体角加速度与其倾角的近似关系方程为

$$I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = G \frac{L}{2} \cos \theta \quad (1)$$

式(1)中, $I$ 为桥面的转动惯量; $\theta$ 为桥面转动角度; $t$ 为时间; $G$ 为单跨上部结构重量; $L$ 为桥的跨度。方程的初值条件为: $t=0$ 时, $\theta=0$ , $\frac{d\theta}{dt}=0$ 。

### 2.1.2 转动和自由落体复合运动阶段

上部结构绕质心的转动的角速度为

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

上部结构任意一点的竖直向的速度为

$$V_{xy} = \frac{L\omega}{2} \cos \theta_1 + gt_2 + \omega \times l_x \times \cos \theta_2 \quad (3)$$

式(2)、式(3)中, $t=t_1$ , $t_1$ 为前后桥墩的起爆时差; $l_x$ 为上部结构任意一点到质心的距离; $\theta_2$ 为上部结构自由落体 $t_2$ 时间后转动的角度。

## 2.2 连续梁桥或连续刚架桥

对多跨的连续梁桥或连续刚架桥等上部结构为整体的桥梁结构而言,相邻单跨结构是相互影响、相互作用的,因此其连续垮塌过程也是连续的,当每跨间隔一定时间顺序起爆时,其空间姿态如图2所示。整个塌落过程可分解为两个阶段。

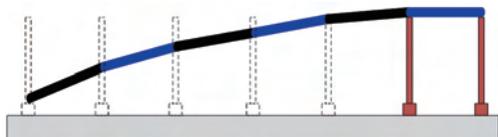


图2 连续梁桥连续垮塌形态

Fig. 2 Sequence collapse form of continuous beam bridge

### 2.2.1 落地前

研究表明,对上部结构为连续整体的高架桥结

构而言,其连续垮塌的过程仍可近似为单跨简支梁塌落过程在空间和时间上的延续(见图3)。每跨塌落的运动形态通过近似公式计算后,再进行转角的修正,即可获得连续简支梁桥和连续梁桥的多跨连续塌落过程的近似解。

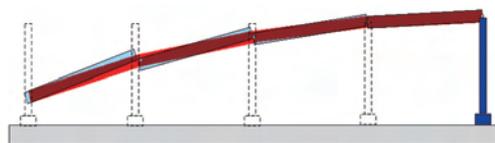


图3 简支梁桥和连续梁桥连续垮塌形态对比

Fig. 3 Sequence collapse form comparison of simple supported beam bridge and continuous beam bridge

### 2.2.2 落地后

由于连续梁桥和刚架桥的上部结构是连续的,因此,单跨桥面落地后,将会对后部的塌落过程产生影响。由于落地冲击过程和多连杆运动十分复杂,该过程难以用解析公式进行简化求解,需通过复杂的数值模拟进行分析。

## 2.3 组合体系桥

组合体系桥常见的结构组合主要有简支梁桥+连续梁桥,简支梁桥+刚架桥和连续梁桥+刚架桥。上述分析表明,当前后跨的起爆时差(起爆间隔)不大时,都可近似为连续简支梁桥的塌落过程,通过适当的修正即可满足工程设计的需要。而当前后跨的起爆时差较大,即上部结构落地时转角较大时,则应进行专门的分析。

## 3 墩柱爆破高度

选取合理的高架桥桥墩爆破高度是确保建(构)筑物失稳的关键。目前,爆高的选取一般依据简化的计算模型或经验公式。具有代表性的立柱失稳模型有等直压杆模型和小型刚架模型等<sup>[1-5]</sup>。其中,欧拉等直压杆模型应用最为广泛。等直压杆模型的优点是模型简单且计算方便,但模型没有考虑上部约束的影响,也未真实反映钢筋骨架的实际初始状态,计算结果误差较大。为此,应采用更为合理的爆破后裸露钢筋骨架的失稳力学模型。

### 3.1 爆破后裸露钢筋的形态特征

实践表明,爆破后墩柱裸露钢筋的形态并非真正的等直压杆,而是形成一定的弧度。

对于简支梁桥或连续梁桥而言,其桥墩的顶部与上部结构呈搭接状态,墩柱顶部无竖向约束,爆

破时爆炸力将钢筋弯曲的同时,可将其上半部分向下拉伸,从而使钢筋的弯曲更为显著(见图4a)。

刚架桥墩柱的顶部与上部结构呈刚性连接状态,即墩柱顶部不能自由的垂直向下移动,特别在墩柱的爆破瞬间,上部结构对墩柱具有强烈的限制作用,因此,爆破时桥墩受力钢筋弯曲程度较小,如图4b所示。



(a) 顶部无约束



(b) 顶部有约束

图4 墩柱的爆破后钢筋骨架

Fig. 4 Reinforcing steel bar frame of blasting fragmented pier

### 3.2 计算爆高的初弯曲压杆力学模型

鉴于爆后钢筋骨架的实际形态,可将建(构)筑物墩柱爆破时钢筋骨架简化为初始呈弯曲状态的压杆(见图5),即爆破后钢筋骨架呈“灯笼状”,单根

钢筋在其中部具有明显的弧度,下端为固定端,上端不能转动但可以上下移动,同时上端承受竖直向的集中荷载,在集中荷载超过弧形钢筋的临界屈曲荷载时,则产生大变形。

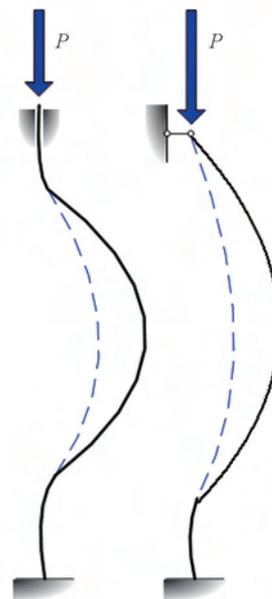


图5 初弯曲压杆失稳模型示意图(虚线表示压杆初始形态)

Fig. 5 Initial bending compressing bar instability model (dot line is its initial status)

经力学分析,可得初弯曲压杆的临界失稳荷载的近似表达式,同时考虑压杆两端约束条件的不同,则其临界荷载可表示为

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI [\sigma] d^3}{[\sigma] d^3 \mu^2 l^2 + 32 a \pi EI} \quad (4)$$

式(4)中,  $P_{cr}$  为压杆临界荷载;  $EI$  为钢筋的抗弯刚度;  $[\sigma]$  为钢筋屈服强度;  $\mu$  为杆端系数(两端固定取0.5,两端铰支取1,一端固定一端铰支取0.7,一端固定另一端自由取2);  $l$  为初弯曲压杆的高度(上下约束间的垂直距离);  $a$  为初弯曲压杆中部的初始挠度;  $d$  为钢筋直径。

## 4 多室箱梁的水压爆破技术

高架桥箱梁结构强度高、刚度大、破碎难,爆破触地后需进行二次破碎,功效低,噪音粉尘污染较严重。应采用集破碎、塌落、减振、降尘于一体的高架桥箱梁结构水压爆破技术进行爆破破碎。通过合理确定药包布置方式、爆破参数和起爆时间,实

现箱梁结构的解体破碎,可解决传统拆除方法工效低、噪声大、污染重的难题(见图6)。



图6 多室箱梁水压爆破破碎形态

Fig. 6 Blasting fragmentation form of multi-cell box girder

## 5 超长延时起爆网路

起爆网路是爆破工程的“生命线”。超大型高架桥爆破拆除起爆网路与常规爆破网路相比,具有

起爆线路敷设长度大、节点多、起爆网路总延期时间长和可靠度要求极高的特点。

工程实践中应采用以导爆管起爆网路为基础的“宽间隔、长延时、互动有序”超长非电接力交叉复式起爆网路。

超长非电接力交叉复式起爆网路为避免长距离传爆网路在传爆过程中单一线路遭受破坏而停止传爆,将每个接力点的雷管分成两组,逐点搭接,以提高传爆可靠性。此外对于高精度雷管采用专用卡子连接,每一雷管最多只能传爆6发雷管,即接力点上同时传爆6发雷管,如果支线需要3发雷管去引爆孔内雷管,则主线只有3发接力雷管(即3发并联),即使单发雷管的起爆概率为 $P_0=0.95$ ,到第100个接力点时的起爆概率只有0.9876,因此,需考虑采用交叉搭接来提高各接力点的传爆概率。起爆网路结构(局部)见图7。

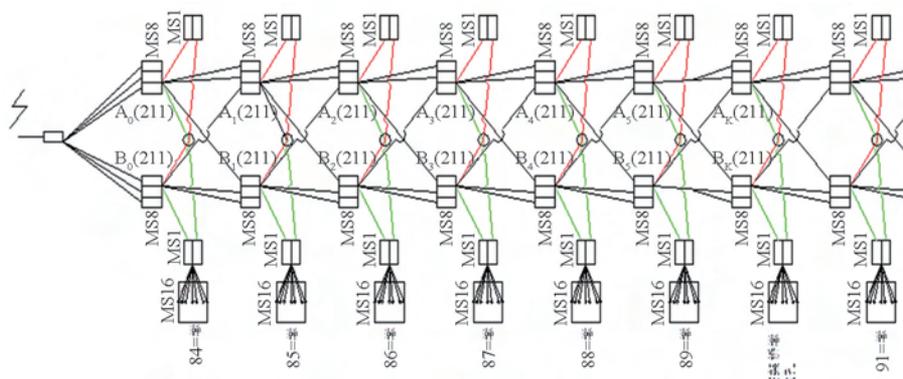


图7 超长延时起爆网路(局部)

Fig. 7 Ultra-long delay initiation network (portion)

## 6 物理模型试验技术

复杂环境下城市高架桥爆破拆除仍具有一定的风险,而现场试验的难度和风险也较高,因此为了验证爆破方案、桥墩爆高、炸药单耗、跨间延期时间等参数的合理性和可靠性,应在对城市高架桥爆破拆除方案实施前,进行物理模型试验。

### 6.1 模型构建

根据墩柱的结构特征,同时考虑尺寸效应对试验结果的影响,采用1:1的相似比可更好的模拟实际的爆破状态。因此宜选取有代表性桥墩(见图8)

和单跨或多跨桥体(见图9),以1:1的几何相似比进行模型制作。

模型试验中,桥墩的钢筋、混凝土及其他主要组成部分的材料力学性能应力求与原型一致,而对结构承载力和爆破效果影响较小的局部构造、附属结构等细部结构可予以简化处理。

模型的制作应按原施工图设计进行,并进行标准养护,待强度与结构原型基本一致时方可进行试验。模型制作时可在适当的部位预留炮孔,便于后期装药,省去钻孔环节。



图8 独立墩柱模型

Fig. 8 Pier blasting physical model tests



图9 1:1单跨物理模型

Fig. 9 1:1 one-stride physical test

## 6.2 试验方案

根据爆破设计方案构建好试验模型后,待模型养护至标准强度后进行试爆。

爆破时应采用与实际爆破时相同的雷管和炸药进行爆破,以便同时检验爆破器材的性能和可靠度。

试验时还应同时对爆破飞石和冲击波防护措施的有效性进行验证。试验过程中应采用多种测试手段对模型的破坏过程和结构的动力响应进行测试,如超动态应变测试、爆破振动和噪声监测等。

## 7 爆破有害效应综合控制技术

城市高架桥地处交通要道,交通流量大、人员密集,周边地下管网现状复杂,安全问题尤为突出,必须通过对有害效应的准确预测和制定可靠的防护措施,最大限度地减少爆破对周边环境的影响。

### 7.1 触地冲击荷载与触地振动

#### 7.1.1 预测方法

塌落体的触地冲击与振动效应是拆除爆破的主要危害,爆前需通过预测其冲击荷载和振动速度

制定相应的防护方案。预测时可采用简化的触地冲击荷载预测模型(式(4))和基于动量守恒定律的触地振动预测模型(式(5)),为制定切实可行的塌落冲击与振动效应的防护方案提供了科学依据。

$$F_{\max} = 2\pi m f V_0 \quad (4)$$

式(4)中, $F_{\max}$ 为碰撞时的最大冲击力,kN; $m$ 为落体质量,kg; $f$ 为塌落振动频率,Hz; $V_0$ 为塌落体落地速度,m/s。

$$V_R = \left( \frac{4m_1 v_1 (1 - \sin \phi)}{\rho L w^2 R \cot \phi (2e^{\pi \tan \phi} \sin \phi + e^{-\pi \tan \phi} + \sin \phi - 1)} \right)^\beta \quad (5)$$

式(5)中, $m_1$ 为塌落体质量,kg; $v_1$ 为塌落体落速度,m/s; $\phi$ 为塑性区内摩擦角,(°); $\rho$ 为塑性区平均密度,kg/m<sup>3</sup>; $L$ 为冲击作用下塑性区的长度,m; $R$ 为距离振源长度,m; $w$ 为倒塌体宽度,m。

#### 7.1.2 防护措施

触地冲击和振动的控制主要通过塌落模式和爆破参数优化,精确控制爆破破坏及失稳过程,可使桥面塌落触地速度降低约40%。

同时,通过在地面倒塌区域不同部位铺设多道不同高度、厚度的减振缓冲墙,利用缓冲墙降低构件下落高差,缓冲材料对下落构件进行缓冲、削弱,达到减小构件动能造成的冲击和触地振动的目的,并避免桥梁构件塌落时对保护对象的直接冲击,保证地面、地下管线以及邻近建(构)筑物的安全(见图10)。



图10 有害效应综合防护

Fig. 10 Adverse effects integrated protective

### 7.2 飞石与冲击波

爆破飞散物的控制主要通过爆破参数的优化和被动防护进行控制,例如,控制一次起爆药量与炸药单耗,精确钻凿立柱炮孔,合理选用装药结构(空气间隔装药、不耦合装药),确保堵塞质量和长

度,使每个药包的爆炸能量都能得到充分利用。另外,应采用多层次包裹阻隔技术,即先对桥墩墩柱覆盖防护,采用先包裹3层棉被,再围上1层钢丝网,然后再用竹排进行覆盖包裹的多重捆绑防护;再从桥面两侧护栏向下悬挂2层密目网至地面,从而彻底阻挡覆盖防护中飞出的爆破碎块(见图10)。

### 7.3 爆破粉尘

爆破粉尘对环境影响较大,而高架桥线路长,爆破时粉尘影响范围更广,为了在爆破过程中降低爆破粉尘对环境的影响,可采用“点面结合、多点驱动、同网超前”的爆炸水雾降尘技术。

在桥面或桥墩两侧上铺设水袋,利用微型药包爆炸产生的爆生气体使水袋破裂同时使水雾化,以吸附爆破粉尘(见图11)。



图11 爆炸水雾降尘水袋

Fig. 11 Water bags of blast water fog dedust

为保证药包安放时不受水袋挤压,铺设水袋时在水袋底部放置一组专用装药管道,在水袋灌满水后再进行装药施工。所有水袋下部均安装导爆管雷管进行延时爆破,水袋超前桥墩起爆。

同时,爆破装药联网前对桥面进行清扫和洒水冲洗;在变电站等敏感地段,在墩柱四周悬挂水袋,利用爆破飞散物击破水袋产生水雾和散落水吸附灰尘。

## 8 爆破工程精细管理

城市高架桥拆除爆破工程项目具有涉及专业广、组织管理难度大、工期紧张、工程涉爆、安全风险高等特点,传统建设工程项目管理思想与方法难以满足复杂环境下拆除爆破工程项目管理要求。

实际施工组织中应贯彻爆破工程项目管理全

寿命周期管理的理念,明确全寿命周期组成内容以及各阶段的工作目标与任务。

采用基于本质安全原理的拆除爆破工程风险管理体系,应用定性分析与定量计算相结合的危险源辨识与评价方法,综合采用无源、有源安全措施或多层次安全防护,将风险降低至可接受水平。

运用以专业化(specialization)、协同化(collaboration)、精细化(precision)和执行力建设(execution)为核心的拆除爆破工程SCPE项目管理方法,进行爆破项目的全程精细化管理。

## 9 工程实例

### 9.1 工程概况<sup>[6,7]</sup>

武汉市沌阳高架桥,总长3 500 m,由主桥和引道两部分组成。其中,主桥长3 000 m,为先简支、后刚构-连续体系,南北引道共长500 m,为重力式混凝土U型挡墙结构,采用爆破方式进行拆除。

主桥共22联,联长在128~144 m,每8~9孔为1联,共181孔,其中18 m跨径26孔,16 m跨径154孔,15.5 m跨径1孔。主桥上部构造为先张法预应力混凝土空心板,混凝土强度C40;桥墩为双柱式矩形钢筋混凝土墩,截面尺寸550 mm×1 000 mm,混凝土强度C30;主桥基础为C25混凝土扩大基础。

高架桥下部有5条城市干道与其相交,周边环境极其复杂:桥体两侧分布有大量居民楼、企事业单位办公楼和工厂厂房;桥体上部横跨110 kV高压线,高压铁塔距桥体仅24 m;桥体地下分布有 $\phi$  720 mm高压天然气管道、 $\phi$  800 mm自来水管和110 kV高压线等各种市政管线共计32根。

### 9.2 总体方案与爆破参数

根据沌阳高架桥工程结构和周边环境特点,确定总体拆除方案为引桥机械拆除、主桥原地坍塌爆破拆除。

主桥采用一次点火起爆,自中间分别向南北两端对墩柱实施逐排延时爆破,排间延时取250 ms,墩柱爆破高度取3~8 m。

设计了“宽间隔、长延时、互动有序”非电接力交叉复式起爆网路,爆破延时总长达24.77 s。

根据高架桥设计图纸和现场实际情况,选取有代表性桥墩,按相同的截面尺寸、混凝土强度和配筋情况在试验场共建造了12个独立墩柱和一跨1:1单跨物理模型,验证了设计方案和参数的合理性和准确性。

采用“主动与被动、刚性与柔性、近体与远区相结合”的冲击、振动及飞石综合防护技术和爆炸水雾降尘技术,采用了以专业化、协同化、精细化和执行力为核心的SCPE项目管理方法,进行项目管理,实现了精心施工。

沌阳高架桥于2013年5月18日晚22时整准时起爆,高架桥在24.77 s内顺利实现多米诺骨牌式逐排纵向倒塌。爆破后30 min内,技术人员和管线权属单位对周边建筑物和各类市政管线运营情况进行了认真检查,均未出现破坏,爆破效果良好,爆破取得圆满成功(见图12~14)。经查新检索,该桥是目前国内外采用爆破方式拆除的最长城市高架桥梁。



图12 沌阳高架桥爆破拆除

Fig. 12 Zhuanyang viaduct blasting demolition



图13 爆炸水雾

Fig. 13 Blasting water fog

## 10 结语

近年来,为完善基础设施建设,提升城市功能,许多高架桥需拆除。但高架桥结构和所处环境复杂,必须采用精细爆破的技术进行爆破拆除。本文对城市高架桥精细爆破拆除关键技术进行了介绍。

1)针对定量化设计,可采用墩柱爆后钢筋骨架



图14 沌阳高架桥爆破效果

Fig. 14 Blasting demolition effect of Zhuanyang viaduct

的初弯曲压杆失稳力学模型和高架桥连续塌落动力学模型,进行关键爆破参数的确定。

2)高架桥箱梁结构应采用集破碎、塌落、减振、降尘于一体的高架桥箱梁结构水压爆破技术进行爆破破碎。

3)对城市高架桥进行爆破拆除时,应确保其网路的可靠性,宜采用“宽间隔、长延时、互动有序”非电接力交叉复式起爆网路,并进行标准化和精细化的网路敷设作业。

4)针对有害效应控制,应采用“主动与被动、刚性与柔性、近体与远区相结合”的冲击、振动及飞石综合防护技术和“点面结合、多点驱动、同网超前”的爆炸水雾降尘技术,确保周边居民的安全,降低对环境的污染。

5)针对复杂环境下的施工组织,应采用全寿命周期管理模式,建立基于本质安全原理的拆除爆破工程风险管理体系,采用以专业化、协同化、精细化和执行力为核心的SCPE项目管理方法,进行精细管理。

## 参考文献

- [1] 谢先启. 精细爆[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2010.
- [2] 卢文波. 除爆破中裸露钢筋骨架的失稳模型[J]. 爆破,1992,9(2):31-34.
- [3] 关志中. 用控制爆破拆除21米高钢筋混凝土框架大楼[C]//爆破与安全. 武汉:湖北科技出版社,1984:12-16.
- [4] 冯叔瑜. 城市控制爆破[M]. 北京:中国铁道出版社,1985.
- [5] 李肇胤,袁澍莹. 拆除爆破中钢筋混凝土框架柱的失稳判据[J]. 爆破,1993,10(2):109-112.
- [6] 武汉爆破有限公司. 沌阳高架桥爆破拆除工程设计报告[R]. 2013.5.
- [7] 武汉爆破有限公司. 复杂环境下城市超大型高架桥爆破拆除关键技术鉴定报告[R]. 2013.

(下转77页)