

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.007

## 钢筋砼支撑梁爆破拆除新技术及应用\*

何理<sup>1,2</sup>, 钟冬望<sup>2</sup>, 马建军<sup>2</sup>, 柯松林<sup>2</sup>, 宋琨<sup>1</sup>, 操鹏<sup>3</sup>

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2. 中铁港航—武科大爆破技术研究中心, 湖北武汉 430065; 3. 武汉铁四院控制爆破技术有限公司, 湖北武汉 430063)

**摘要:**复杂环境下深基坑钢筋混凝土支撑梁的安全、高效拆除是城市建设过程中极为关键的环节。基于箍筋对支撑梁侧向约束作用机制的理论分析,揭示解除箍筋侧向约束效应前后梁内砼单元应力状态的演变规律及对支撑梁爆破效果的影响,并研发新的支撑梁线性切割预处理方法、布孔方法及其毫秒延时起爆网路,形成较为系统的支撑梁爆破拆除技术。工程应用结果表明,支撑梁线性切割预处理方法可显著增强拆除效果;多向协同布孔法可改善爆炸能量耦合状态,减小爆破飞石危害;基于爆破网路连接单元的毫秒延时起爆网路可有效控制振动强度,提高网路可靠性。

**关键词:**支撑梁;爆破拆除;起爆网路;爆破振动;爆破飞石

**中图分类号:** O389; O383.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0189-07

## New Blasting Demolition Technology and Its Application in Reinforced Concrete Support Beam Engineering

HE Li<sup>1,2</sup>, ZHONG Dongwang<sup>2</sup>, MA Jianjun<sup>2</sup>, KE Songlin<sup>2</sup>, SONG Kun<sup>1</sup>, CAO Peng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. CRPCE-WUST Blasting Technology Research Center, Wuhan 430065, China; 3. Control Blasting Technology Co Ltd, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co Ltd, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Safe and efficient demolition of reinforced concrete support beam in deep foundation pit under complex environment is a key point in the process of urban construction. On the basis of theoretical analysis on lateral restraint mechanism of stirrups, the evolution law for the stress state of the concrete element and the blasting effect of the supporting beam is revealed before and after the remove of the lateral restraint effect of the stirrup. The methods for stirrup cutting, shothole arrangement and millisecond delay initiation network are developed. A comparatively systematic technology on blasting demolition of support beams is formed. The result of engineering application shows that, the blasting demolition effect can be significantly enhanced by the linear cutting pretreatment method. The coupling state of explosion energy can be improved and the hazard of blasting flying rocks can be reduced by the

\* 收稿日期:2018-03-16;修回日期:2018-05-22

**基金项目:**三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学)开放研究基金项目(2017KDZ02);湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20161101);国家自然科学基金项目(51574184, 51904210)资助

**作者简介:**何理(1986-),男,副教授,博士。主要从事工程爆破与岩石动力学方面的研究。

Email: emp-heli@hotmail.com

**通讯作者:**钟冬望(1963-),男,教授,博士,博导。主要从事矿山工程力学方面的研究。Email: zhongdw123@wust.edu.cn

method of multi-directional synergy arrangement of shotholes. The vibration intensity can be effectively controlled and the network reliability can be improved by the millisecond delay detonating network based on the blasting network connection unit.

**Keywords:** support beam; blasting demolition; initiation network; blasting vibration; blasting flying rocks

## 引言

近年来,随着各类岩土工程的建设规模越来越大,衍生出大量的城市深基坑工程,因此复杂环境下深基坑支撑体系的安全、高效拆除直接关系到后期的工程建设与生产<sup>[1]</sup>。通过炸药爆破破碎钢筋混凝土支撑结构是现今应用最为广泛的支撑梁拆除方法之一<sup>[2-6]</sup>。爆破法拆除支撑梁时,需要对炸药的爆轰及破岩过程进行精确的控制,否则会造成极大的爆破振动、飞石及冲击波危害,危及邻近构筑物与行人的安全<sup>[7-8]</sup>。相关工程实例表明,在浇筑混凝土前,采用PVC管预制炮孔能达到较高的成孔率<sup>[9]</sup>。然而,现有的支撑梁爆破拆除方法仍然存在很多值得研究与改进的方面,例如存在炮孔数目多的问题,由此导致整体施工工期延长,爆破耗材成本升高;另外,由于支撑梁截面尺寸有限,导致预制炮孔深度被限制,造成单孔药量偏小或炮孔堵塞长度不足,仍未有效解决爆破拆除成本与爆破有害效应间的矛盾问题<sup>[10]</sup>。

鉴于此,钟冬望等<sup>[11-12]</sup>、叶建军等<sup>[13]</sup>提出沿支撑梁轴向预制水平向直管(孔)或弧形管(孔)的设想,试图通过降低单位长度支撑梁炮孔的预制数目达到降低施工成本、缩短施工工期的目的。在此基础上,本文基于理论分析揭示箍筋侧向约束效应对支撑梁爆破拆除效果的影响机制,提出科学的支撑梁预处理方法;其次针对深基坑钢筋混凝土支撑梁多向协同布孔技术,设计研发药包结构与装药方法,并建立爆破法拆除支撑梁的毫秒延时起爆网路;最后将研究成果成功应用于武汉市某深基坑支撑梁爆破拆除工程实践,验证了方法的可行性。

## 1 箍筋侧向约束效应理论分析及预处理方法

### 1.1 箍筋对混凝土梁的侧向作用机制

S. A. Sheikh等<sup>[14]</sup>提出,在圆形截面钢筋混凝土

梁中,圆形箍筋对核心区混凝土的被动约束力是均匀分布的,而对于方形截面,箍筋侧向约束力并非均匀分布,其最大值集中在箍筋各肢十字相交处。分析其原因,主要是十字相交处箍筋的轴向刚度决定该处的侧向约束,箍筋在拉伸屈服前始终保持较高的轴向刚度水平;随着远离十字相交处,箍筋侧向约束效应显著降低,此时其抗弯刚度逐渐占主导作用,如图1(a)所示。

假设矩形箍筋对混凝土梁侧向约束力为均匀分布<sup>[15]</sup>,对箍筋的实际侧向约束力进行等效简化(图1(b)),可通过静力平衡方程计算得到平均约束应力 $\sigma_{ave}$ 为:

$$\sigma_{ave} = \frac{\sigma_{sc}}{s} \left( \frac{A_x + A_y}{R_x + R_y} \right) \quad (1)$$

式中, $\sigma_{sc}$ 为混凝土达到峰值应力时的箍筋应力,MPa; $R_x$ 和 $R_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向箍筋轴线间的距离,m; $s$ 为箍筋间距,m; $A_x$ 和 $A_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向箍筋的截面总面积,m<sup>2</sup>。

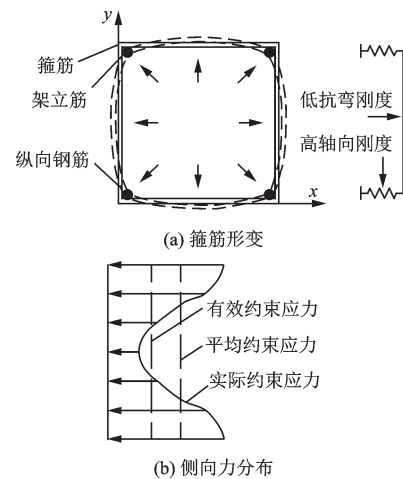


图1 箍筋的形变和侧向力分布

Fig.1 Deformation and lateral force distribution of stirrup

### 1.2 砼单元应力状态分析

爆破法拆除支撑梁时,箍筋对梁内混凝土的侧向约束力随核心区混凝土的爆破扩容效应显著增强。此时,箍筋本身承担较大拉应力,同时会限制

混凝土中拉应力的产生;梁内混凝土单元大多处于三向压缩的应力状态,其动态力学性能体现出一定的塑性材料特性,抵抗变形、破坏的能力显著提高,单元应力状态如图2(a)所示。在箍筋受到屈服破坏之前,梁内混凝土单元主要以受压破坏为主,而压碎混凝土比拉坏混凝土要困难得多。在城市复杂环境下,通常设计药量不足以拉断架立筋与纵向钢筋,一般只产生较大塑性变形而被拉长。由于药量的限制和箍筋的侧向约束效应,再加上钢筋被拉伸消耗较多能量,钢筋混凝土支撑梁的爆破拆除往往达不到预期效果,多出现钢筋与混凝土不能完全分离、大块多、需二次破碎和处理等问题。因此在实践中,通常采取相应的技术手段<sup>[3,10]</sup>先切断矩形箍筋,解除其侧向约束效应,再对支撑梁进行爆破拆除作业,梁内混凝土单元在爆破荷载作用下的应力状态如图2(b)所示;此时混凝土单元抵抗变形破坏的能力降低,体现出明显的脆性材料力学特性。

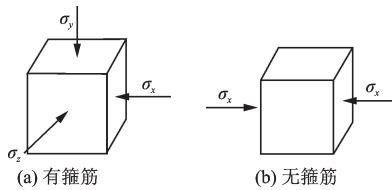


图2 混凝土单元应力状态

Fig.2 Stress state of concrete element

### 1.3 箍筋线性切割预处理方法

基于前述理论,为尽可能解除箍筋侧向约束效应,选取在十字相交处切断箍筋。箍筋被切断后,在切断处混凝土的侧向约束最小,因此支撑梁的早期破坏区域与抛渣方向将被引导至切断点方向。为了最大限度控制爆破飞石危害,只能将抛渣方向引导至侧下方。综合考虑爆破拆除效果、施工便捷性及爆破飞石等因素,钟冬望等<sup>[16]</sup>提出一种深基坑钢筋混凝土支撑梁爆破拆除的预处理方法,核心技术包括:(1)钢筋混凝土支撑梁浇筑混凝土前,沿轴向在支撑梁两侧靠下位置固定与梁身混凝土保护层厚度相当的定位木条,通过镀锌扎丝绑扎标示箍筋位置,见图3所示;(2)支撑梁爆破拆除前,采用气割机沿定位木条对照标示位置依次切断箍筋,实现钢筋混凝土支撑梁线性切割预处理。

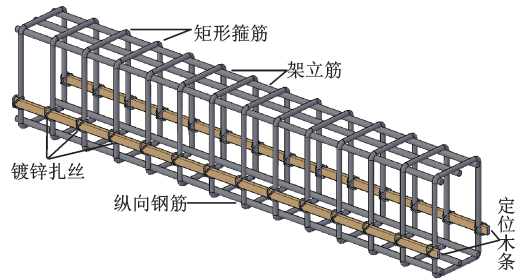


图3 箍筋预处理技术

Fig.3 Pretreatment technology for stirrup

## 2 支撑梁的炮孔预制方法

### 2.1 多向协同布孔技术

选用相同直径的PVC弧形管和直管分别沿支撑梁轴向和垂直向预制炮孔<sup>[10-11]</sup>,炮孔布置方式如图4所示。

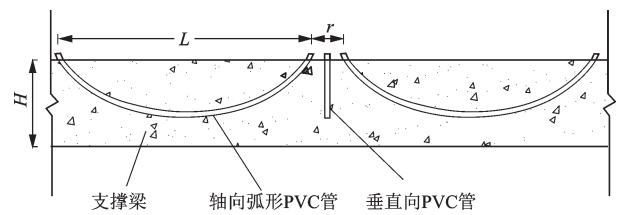


图4 炮孔布置方式

Fig.4 Arrangement of shotholes

注: $H$ 为支撑梁截面高度, $L$ 为弧形管两端口间水平距离, $r$ 为相邻弧形管端口间最小距离

根据支撑梁截面尺寸调整轴向PVC弧形管的数量,当支撑梁截面宽度 $R \geq 700$  mm,梁身的轴向PVC弧形管布置方式如图5所示。

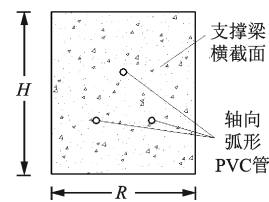


图5 PVC弧形管的布置方式

Fig.5 Arrangement of PVC pipe

注: $R$ 为支撑梁截面宽度,其余同上

数值计算结果表明<sup>[17]</sup>,支撑梁内炮孔的协同布置形式可改善不同方向炮孔中炸药能量的耦合状态,促进梁内爆炸荷载的均匀分布;同时可有效避免支撑梁局部区域过度破碎或破碎不充分的情况

发生。并且,支撑梁内垂直向炮孔数目的大幅减少不仅能够缩短施工工期,而且降低了爆破中发生冲炮事件的概率,提高了拆除作业安全及可靠性。

## 2.2 炮孔装药结构

垂直孔内采用孔底连续装药,并选用粘性好的炮泥进行堵塞;轴向PVC弧形孔内选用空气间隔装药结构,通过将间隔小药包敷设在导爆索上,导爆索的一端与毫秒延时起爆雷管连接,另一端与牵引铁丝连接,装药时通过牵引铁丝将若干间隔小药包和导爆索一同牵引至轴向弧形管内的特定位置。两端管口处通过炮泥进行堵塞,并确保导爆索不能裸露到孔外,以尽可能降低爆破冲击波及噪音危害。药包牵引装置如图6所示。

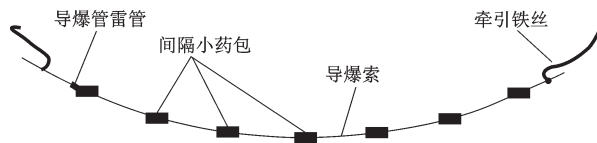


图6 药包牵引装置

Fig.6 The traction device of charge

弧形孔中间隔小药包的质量  $Q_1$  为<sup>[18]</sup>:

$$Q_1 = \frac{qRHL}{nk} \quad (2)$$

式中,  $q$  为炸药单耗,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $n$  为单根弧形管内间隔小药包数量;  $k$  为截面内弧形管的数量; 其余参数同图4、5。

垂直孔中的药包质量  $Q_2$  为:

$$Q_2 = \frac{qRHr}{2} \quad (3)$$

## 3 爆破拆除起爆网路

城市深基坑支撑梁爆破多处闹市区、商圈,居民对爆破作业较为敏感,爆破施工安全要求高。因此,在确保安全和工程进度条件下应尽量减小爆破振动强度、噪声以及爆破次数,严格控制爆破飞石危害。为此,将满足工程进度所需的爆破总量,通过合理优化组合爆破网路,分解为多个相对独立的爆破网路连接单元,在一次点火起爆作用下各单元依次接力式、单向顺序起爆。各爆破网路连接单元依据爆破安全允许的最大单响药量进行划分。为此多向协同布孔起爆网路的设计特点为:

(1)以多向协同布孔组为爆破网路连接单元。即单个轴向弧形炮孔组与弧形炮孔组间的两垂直向炮孔,组成一个爆破网路连接单元,如图7所示。单元内起爆顺序为,轴向弧形孔从下往上依次起爆,最后同时起爆两垂直向直孔,理论上可通过调节轴向弧形管的长度实现对最大单响药量的主动控制,从而有效降低爆破振动强度;同时可将支撑梁破碎抛掷方向引导到侧下方来,且后爆的成为先爆区域的覆盖层,以控制和减弱爆破飞石危害。

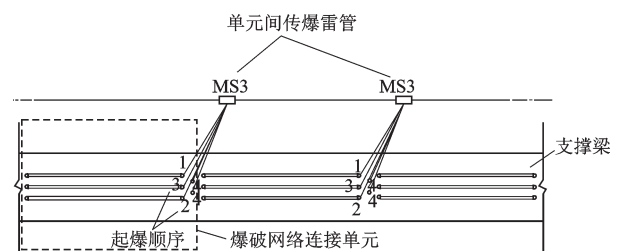


图7 爆破网络连接单元起爆时序

Fig.7 Detonating sequence for connecting unit of blasting network

(2)一次点火、孔内外接力延时顺序起爆。市区爆破应尽量减少爆破次数,以减少对市民生活的干扰,因此支撑梁爆破需尽量实现一次性点火。为尽可能降低爆破地震效应危害,确保起爆网路的可靠性,选用孔内大延时与孔外小延时相结合的延时系统,如图8所示。

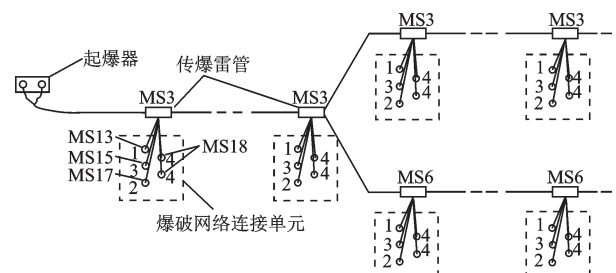


图8 起爆网路

Fig.8 Detonating network

(3)串联为主、并联为辅的单向依次顺序起爆。为有效控制最大单响药量、最大限度降低爆破振动危害,本系统采用大延时、单向依次顺序起爆,尽可能实现各爆破网路连接单元在时空上的独立起爆。要在连续、相互交错的深基坑支撑体系中实现单向依次顺序起爆,可采用串联为主、并联为辅的爆破单元联接方式,如图9所示。

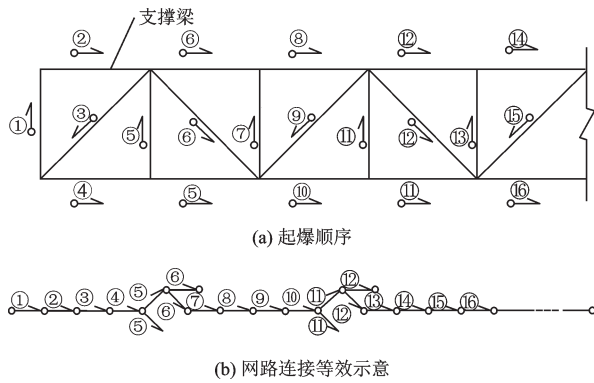


图9 支撑体系起爆时序

Fig.9 Detonating sequence diagram of support system

## 4 工程实例应用

### 4.1 工程简介

某深基坑地处闹市区,周围环境复杂,基坑开挖面积与深度大,支撑梁爆破拆除体量大。支撑体系待拆构件参数见表1。

表1 待拆构件参数

Table 1 Parameters of component

待拆构件	截面尺寸( $H \times R$ )/(m $\times$ m)
主撑	0.8 $\times$ 0.7
次撑	0.5 $\times$ 0.5

浇筑梁身混凝土前,已采用前述预处理方法在梁两侧靠下位置沿轴向方向绑扎定位木条。通过爆破法拆除钢筋混凝土支撑梁前,使用气割机沿定位木条的标示位置依次切断箍筋,解除箍筋对混凝土梁身的侧向约束作用,如图10所示。



图10 箍筋预处理

Fig.10 Pretreatment of stirrups

### 4.2 爆破参数

参考相关实际工程应用资料<sup>[18]</sup>,炸药单耗取 $0.5 \text{ kg/m}^3$ ,使用式(2)和式(3)计算各管孔中的炸药

量,具体爆破参数见表2。

表2 爆破参数

Table 2 Blasting parameters

类目	主撑	次撑
截面内弧形管数	3	1
间隔小药包数	3	5
弧形管两端口间水平距离/m	4	4
炸药单耗/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.5	0.5
相邻弧形管两端口间最小距离/m	0.32	0.32
间隔小药包质量/kg	0.124	0.10
垂直孔中装药量/kg	0.448	0.02

### 4.3 爆破网路及防控措施

为确保起爆网路可靠性,尽可能降低爆破地震动强度,减小爆破飞石危害,本次爆破孔内选用 $13^\#$ 、 $15^\#$ 、 $17^\#$ 、 $18^\#$ 的导爆管毫秒延期雷管;孔外选用 $3^\#$ 、 $6^\#$ 的导爆管毫秒延期雷管,如图7所示。并按图8设计支撑体系的起爆顺序,实现各爆破网路连接单元在不同时空上的独立起爆。

在联网过程中严密保护和遮盖传爆雷管,避免传爆雷管爆炸破坏起爆网路,并降低地表传爆雷管的爆破噪音危害。在钢筋混凝土支撑梁梁身的上表面铺满胶管帘,并在其两侧通过悬挂多层密目安全网和钢板进行遮挡;使用自制的水袋铺满支撑梁上表面的胶管帘,水袋上方再覆盖沙袋,可同时控制爆破飞石与粉尘危害。

### 4.4 拆除效果

通过应用爆破分区、孔内大延时、孔外小延时的强松动爆破技术对支撑梁进行拆除,梁身中、下部的混凝土脱落,顶部及其两侧的混凝土碎而不飞,如图11所示。同时,在基坑周边典型建、构筑物处进行振动监测,质点振动速度峰值均小于 $0.03$



图11 爆破拆除效果

Fig.11 Blasting demolition effect

m/s;另外,对爆区的摄影监测结果表明,无爆破碎石抛出基坑,爆破振动及飞石均得到有效控制,保证了施工安全与质量。

## 5 结 语

(1)提出了一种施工便捷、成本低廉的支撑梁线性切割预处理方法,替代传统的先依靠钢钎破除梁身混凝土保护层、后通过钢丝钳剪断箍筋的技术手段,克服了以往在解除箍筋侧向约束效应时,由于无法确定箍筋位置而导致的施工工期延长、成本增加等缺点。

(2)爆破法拆除支撑梁时,选取支撑梁侧面中下部为箍筋预处理切断点,可将爆破对梁身混凝土早期破坏区和主要抛渣方向引导到支撑梁侧下方,能有效减小爆破飞石危害;同时可降低箍筋对支撑梁核心区混凝土的环向约束效应,提高炸药能量利用率,显著增强爆破破碎效果。

(3)针对支撑梁的多向协同布孔方法,设计研发了一套完善的装药方法,并构建了可有效控制振动及飞石危害的支撑梁拆除爆破毫秒延时起爆网路;该网路可实现各爆破网路连接单元在不同时空的独立起爆,有效控制爆破振动强度的同时,大大提高起爆网路可靠性。

(4)工程实践表明,提出的基于振动与飞石控制的支撑梁爆破拆除技术,用于深基坑钢筋混凝土支撑梁拆除爆破工程切实可行,满足城市复杂环境拆除爆破的安全要求,可为类似爆破拆除工程提供理论参考。

## 参考文献:

[1] 温尊礼,顾月兵,韩文红. 基坑围护钢筋混凝土支撑精确爆破拆除[J]. 探矿工程, 2015, 42(3): 80-84.  
Wen Z L, Gu Y B, Han W H. Accurate blasting demolition of reinforced concrete support for foundation pit enclosure [J]. Exploration Engineering, 2015, 42(3): 80-84. (in Chinese)

[2] 刘伟,董超,徐岗,等. 临地铁超深基坑复杂混凝土内支撑拆除施工技术[J]. 施工技术, 2017(6): 8-11.  
Liu W, Dong Ch, Xu G. Demolition construction of the complex concrete internal bracing in deep Foundation excavation adjacent to the subway [J]. Construction Technology, 2017(6): 8-11. (in Chinese)

[3] 叶建军,程大春,明军. 基坑钢筋混凝土临时支撑梁绿色拆除爆破技术[J]. 爆破, 2017, 34(1): 101-107.  
Ye J J, Cheng D Ch, Ming J. Green explosive demolition of temporary reinforced concrete pit-supporting beams [J]. Blasting, 2017, 34(1): 101-107. (in Chinese)

[4] 杜宗,杜华彬,段义明,等. 城市核心地段钢筋混凝土内支撑爆破降尘措施[J]. 爆破, 2016, 33(3): 132-135.  
Du Z, Du H B, Duan Y M, et al. Dust-reduction measures of explosive demolition of reinforced concrete inner supporting in urban core area [J]. Blasting, 2016, 33(3): 132-135. (in Chinese)

[5] 杨建军,黄磊. 全覆盖条件下城市基坑支撑梁爆破拆除[J]. 爆破, 2015, 32(4): 99-102, 117.  
Yang J J, Huang L. Explosive demolition of city foundation pit support beam under full covering [J]. Blasting, 2015, 32(4): 99-102, 117. (in Chinese)

[6] 张兆龙. 复杂环境下基坑支撑梁爆破拆除[J]. 爆破, 2015, 32(4): 94-98.  
Zhang Zh L. Explosive demolition of foundation pit support beams under complex environment [J]. Blasting, 2015, 32(4): 94-98. (in Chinese)

[7] 何理,钟冬望,李琳娜,等. 岩体爆破综合实验研究系统及其应用[J]. 矿冶工程, 2017, 37(2): 36-35, 49.  
He L, Zhong D W, Li L N, et al. A comprehensive experimental research system for rock blasting and its application [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(2): 36-35, 49. (in Chinese)

[8] 陈三定. 深基坑支撑爆破拆除对周围建筑物稳定性的影响研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2009.  
Chen S D. Study on the impact of the stability of surrounding buildings under deep foundation support blasting [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[9] 赵坤,蒋昭镡. 预埋炮孔法在钢筋混凝土支撑爆破拆除中的应用研究[J]. 爆破, 2005, 22(2): 82-83, 99.  
Zhao K, Jiang Zh B. Application of blasting demolition of shot preplugged hole in the reinforced concrete braces [J]. Blasting, 2005, 22(2): 82-83, 99. (in Chinese)

[10] 何理,钟冬望,操鹏,等. 多向协同布孔法爆破拆除深基坑支撑梁的应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 44-47, 53.  
He L, Zhong D W, Cao P, et al. Application of blast demolition deep foundation pit support beam of multi-directional synergy arrangement of blasthole [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(4): 44-47, 53. (in Chinese)

[11] 钟冬望,何理,李琳娜,等. 一种多曲率换向耦合布孔的基坑内钢筋混凝土支撑梁: 中国,

- ZL201620538910.X[P]. 2016-10-26.
- Zhong D W, He L, Li L N, et al. A reinforced concrete supporting beam in a foundation pit with multi directional synergistic blast holes: China, ZL201620538910.X[P]. 2016-10-26.(in Chinese)
- [12] 钟冬望, 操鹏, 李琳娜, 等. 一种基坑内钢筋混凝土支撑梁的爆破拆除方法: 中国, ZL201610393413. X [P].2016-10-26.
- Zhong D W, Cao P, Li L N, et al. A blasting demolition method of reinforced concrete supporting beam in foundation pit: China, ZL201610393413. X [P].2016-10-26.(in Chinese)
- [13] 叶建军, 程大春, 舒大强, 等. 钢筋混凝土杆件轴向预埋孔绿色拆除爆破技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (10): 151-157.
- Ye J J, Chen D Ch, Shu D Q, et al. Green blasting technology for demolition of reinforced concrete bars by using pre-buried axial pipes as blast holes [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (10) : 151-157. (in Chinese)
- [14] Sheikh S A, Uzumeri S M. Analytical model for concrete confinement in tied columns [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1982, 108 (12) : 2 703-2 722.
- [15] 史庆轩, 王南, 田园, 等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变全曲线研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34 (4) :144-151.
- Shi Q X, Wang N, Tian Y, et al. Study on stress-strain relationship of high-strength concrete confined with high-strength stirrups under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (4) :144-151. (in Chinese)
- [16] 钟冬望, 涂圣武, 李琳娜, 等. 一种基于爆破拆除预处理的基坑内钢筋混凝土支撑梁: 中国, ZL201620537861.8[P]. 2016-11-16.
- Zhong D W, Tu Sh W, Li L N, et al. A reinforced concrete support beam in foundation pit based on blasting pretreatment: China, ZL201620537861.8[P]. 2016-11-16.(in Chinese)
- [17] 何理, 钟冬望, 李琳娜, 等. 布孔方式对支撑梁爆破拆除的影响机制[J]. 爆破, 2018, 35(3):85-91, 119.
- He L, Zhong D W, Li L N, et al. Influence mechanism of blasthole arrangement on explosive demolition of support beam [J]. Blasting, 2018, 35(3) :85-91, 119. (in Chinese)
- [18] 邓兰艳, 彭文, 周谢萍, 等. 深基坑桁架式钢混内支撑梁的微差爆破拆除施工技术[J]. 建筑施工, 2014 (11):1 217-1 218.
- Deng L Y, Peng W, Zhou X P, et al. Construction technology of differential blasting demolition of truss type steel-concrete support beams in deep foundation pit [J]. Building Construction, 2014(11):1 217-1 218. (in Chinese)
- [19] 汪旭光. 爆破手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010:738.
- Wang X G. Blasting manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010:738.(in Chinese)

(本文责编:赵霞)