

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.05.010

毫秒微差爆破在高层楼房拆除中的应用与研究*

范龙泉^① 李小帅^② 李杜一^③ 徐振洋^②

①中冶沈勘建筑工程有限公司(辽宁沈阳,110016)

②辽宁科技大学矿业工程学院(辽宁鞍山,114051)

③中铁上海设计院集团有限公司(上海,200070)

[摘要] 通过对高层建筑物倒塌过程中的后坐和前冲运动的分析论述,阐明了毫秒微差爆破持续时间对运动过程的影响;介绍了毫秒微差爆破技术在18层框架结构楼房拆除中的应用情况。为减少建筑物在拆除爆破中对周边环境的影响,设计合理的爆破网路参数,并且对主楼、墙体、剪力墙等结构进行预处理;采用适当的分段延时方法使得振动叠加,控制建筑物倒塌范围,从而减少高层楼房塌落产生的危害。合理的分段时间增加了建筑结构体内力作用时间,保证了楼房的充分解体,达到了预期的爆破拆除效果。

[关键词] 前冲;后坐;爆破持续时间;毫秒微差爆破;支撑体

[分类号] TU746.5

Application and Study of Millisecond Delay Blasting Technology in High-rise Building Demolition Blasting

FAN Longquan^①, LI Xiaoshuai^②, LI Duyi^③, XU Zhenyang^②

① Shenkan Engineering & Technology Corporation, MCC (Liaoning Shenyang, 110016)

② School of Mining Engineering, Liaoning University of Science and Technology (Liaoning Anshan, 114051)

③ China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd. (Shanghai, 200070)

[ABSTRACT] By analysis and discussion of the motion of the collapse process of high-rise building, the influence of blasting duration in millisecond delay blasting on the movement process was clarified. Application of millisecond delay blasting in an 18-story frame structure building was introduced. To reduce the environmental impact of the building in explosive demolition, suitable parameters for blasting network were designed. The main building, the walls and shear walls were pre-treated. An appropriate piece-wise delay method was used to make the vibration superimposed and control the collapsing range of the building, and thus to minimize the harm of blast. Reasonable time interval increased the action time of internal force of the building and ensured the full collapse of building, so as to achieve the desired blasting outcome.

[KEYWORDS] moving-up; backward collapse; blasting duration; millisecond delay blasting; support body

引言

由于爆破拆除的高层建筑物大多位于人口稠密、建筑物密集、市政道路水电通信管线纵横交错、地上地下环境复杂的城市中心,亦或是临近工厂矿山的工业厂房、管路、电器等重要设施,所以对高层建筑物的倒塌方向和倒塌范围都提出了严格要求,控制高层建筑物塌落过程中产生的前冲、后坐问题

也就成为爆破技术是否可行的关键因素。因此,为了成功进行爆破施工,在进行爆破设计时要合理地调整各种爆破参数,将楼体塌落过程中产生的前冲、后坐现象控制在有效范围内。

高层建筑物楼体塌落是一个极其复杂的运动过程。利用爆破技术控制其塌落过程涉及到许多门学科^[1-2]。一般地,可以通过建筑学、动力学、结构力学、材料强度等理论进行分析计算,进行爆破参数的优化。

* 收稿日期:2018-03-29

基金项目:辽宁省自然科学基金(20170540456)

作者简介:范龙泉(1963-),男,高级工程师,主要从事城市建筑控制爆破。E-mail:1031726582@qq.com

本文中,仅就楼体倒塌过程中的受力状况和运动规律予以分析阐述。

1 建筑物塌落过程中后坐与前冲运动分析

高层建筑物爆破拆除的倾倒过程十分复杂,它受多种条件和因素的影响,其中,建筑结构的强度和稳定性、爆破作用持续的时间、定向开口的部位和大小这3种因素直接影响了高层建筑物倾倒时产生的后坐和前冲^[3]。

1.1 后坐问题

定向爆破拆除设计通常采用的方法是在其倾倒方向底部适当的部位和范围实施爆破,也就是在楼体底部爆破形成一个三角形、矩形或梯形的开口(足够的倒塌空间),而在其反方向保留一定的楼体作为支撑体。随着爆破的实施,开口部分形成,同时形成了上部楼体的重力 W 和底部支撑体产生的反力 $F_{反}$,它们是作用力和反作用力,方向相反,并互为扭力。支撑体产生的最大反力由垂直方向墙体和立柱的最大承载力所决定。这样,上部楼体在自身重力 W 和底部支撑体产生反力 $F_{反}$ 的作用下,产生了以支撑体 H 轴为中心的扭转运动,如图1所示。

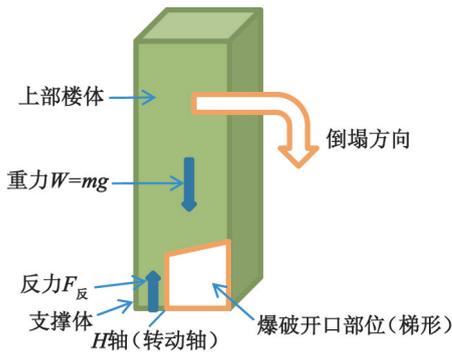


图1 爆破开口形成时倒塌受力分析(第一阶段)

Fig.1 Stress analysis when blasting incision is formed at the first stage

根据楼体受力情况:

1)当重力 $mg\cos\theta = F_{反}\cos\theta$ 时(θ 为楼体倾倒角度, $0\sim 90^\circ$),并且重力产生的扭力不能破坏支撑体时,上部楼体原地不动。

若产生的扭力破坏了支撑体(局部破坏 H 轴视为铰支),则上部楼体做定轴转动运动,此时楼体倒塌不产生后坐。

2)当重力 $mg\cos\theta > F_{反}\cos\theta$ 时,支撑体受到偏心的作用超过其最大的承载力,因强度不够而产

生粉碎性破坏或弯折断裂破坏。此时,上部楼体开始做类似于自由落体运动与绕 H 轴转动运动的合成运动。

楼体塌落的合成运动可以分为两个阶段。

第一阶段:从爆破开口形成开始,经过支撑体完全破碎,到爆破开口完全闭合的运动阶段。

在此阶段内,支撑体由于强度不够,往往迅速发生破坏而出现上部楼体下沉现象,其下沉时并非垂直,而是倾斜一定角度。这样支撑体不断被挤压破坏,旋转 H 轴向后移动,于是出现楼体后坐现象。

第二阶段:爆破开口完全闭合到楼体完全倒塌落地的运动阶段。此时楼体底部产生支撑反力 $F'_{反}$,如图2所示。

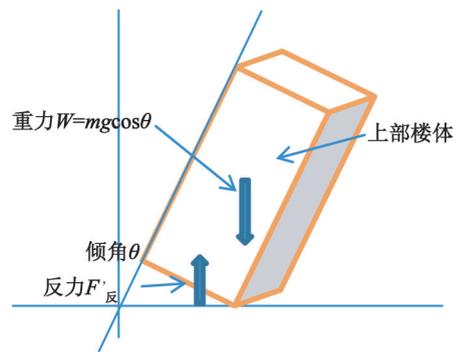


图2 爆破开口闭合后倒塌受力分析(第二阶段)

Fig.2 Stress analysis when blasting incision is closed at the second stage

根据图2可以知道(θ 为楼体倾倒角度, $0\sim 90^\circ$):

当 $mg\cos\theta = F'_{反}\cos\theta$ 时,上部楼体以反力中心点为轴做定轴转动运动,楼体后坐现象可以忽略。

当 $mg\cos\theta > F'_{反}\cos\theta$ 时,上部楼体继续做类似于自由落体运动与绕 H 轴转动运动的合成运动;亦即楼体根部破坏,从而出现下落现象;由于根部不断被挤压破碎,转动轴向后移动,于是出现较大楼体后坐现象。

1.2 前冲问题

通过对楼体倒塌过程的运动分析可知,前冲和后坐是一个问题的两个方面;后坐越小,前冲越大;后坐越大,前冲越小。

当 $mg\cos\theta = F'_{反}\cos\theta$ 时,上部楼体以反力中心点为轴做定轴转动运动,楼体后坐现象可以忽略,此时产生的前冲最大。

当 $mg\cos\theta > F'_{反}\cos\theta$ 时,上部楼体继续做类似于自由落体运动与绕 H 轴转动运动的合成运动;根部不断被挤压破碎,转动轴向后移动,出现较大楼体后坐现象,此时前冲较小。

当重力 W 远大于支撑反力 $F'_{反}$, 且转动角度 θ 较小 ($0 \sim 15^\circ$) 时, 楼体产生原地倒塌现象, 此时前冲和后坐均较小。

根据动力学理论:

$$M = I\beta = I \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

式中: M 为合外力矩; I 为转动惯量; β 为角加速度; ω 为角速度; t 为时间。

当重力 W 大于反力 $F'_{反}$ 时, 扭力 $F_{扭} = F'_{反} \cos\theta$; 力矩 $M = F'_{反} \cos\theta \cdot H/2 \sin\theta$, H 为楼体高度。

所以角加速度:

$$\beta = \frac{M}{I} = \frac{F'_{反} \cos\theta \sin\theta \cdot H}{2I} = \frac{F'_{反} H \sin 2\theta}{4I} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, 楼体的高度和转动惯量相对固定不变, 所以角加速度与支撑反力成正比, 支撑反力越大, 角加速度就越大, 楼体倒塌速度就越快。当转动角度为 45° 时, 角加速度最大。所以, 只要控制支撑反力的大小, 就可以控制倒塌产生的前冲、后坐。

2 爆破作用的持续时间分析

对于某个固定的建(构)筑物, 建筑结构的强度和稳定性是不变的。爆破作用持续的时间、定向开口的部位和大小需要通过爆破设计确定。在定向开口的部位和大小确定的前提下, 爆破作用持续的时间是影响高层建筑物倾倒时产生前冲和后坐的直接因素。

爆破作用的持续时间 t 通常是采用秒差、半秒差、毫秒差或是瞬发导爆雷管分段控制药包的起爆顺序所持续的时间。

对于高层建筑物爆破, 当采用瞬发导爆雷管引爆建筑物底部所有药包(包括支撑部位装药)时, 持续时间 $t=0$, 此时支撑反力 $F'_{反}=0$; 楼体不发生扭转, 进行自由落体运动。

当采用秒发(高段)导爆雷管分段引爆时, 持续时间 t 足够大, 此时支撑反力 $F'_{反}$ 最大, 楼体发生倾倒, 瞬间反力 $F'_{反} = W = mg$ (上部楼体重力)。楼体发生固轴扭转。

所以, 采用毫秒导爆雷管控制爆破作用的持续时间 t , 用来控制高层建筑物爆破倒塌的前冲、后坐, 可以满足某些爆破工程的安全需要。

下面以某工程为例, 介绍毫秒微差爆破在某高层楼房拆除中的应用。

3 案例

3.1 工程概况

3.1.1 楼体周边环境

由于城市建设规划需要, 拟对某大厦进行爆破拆除作业。该大厦位于市中心闹市区, 周围环境复杂。在需爆破楼房的东侧 50 m 处为一地下通讯光缆, 164 m 处为一街道; 在东南方向 85 m 为广播电台; 南侧 15 m 为道路, 且路面地下 1.5 m 处埋设一条通讯线缆; 西侧 19 m 为站前地下商场入口, 220 m 为火车站; 西北方向 70 m 为一大厦; 北侧 50 m 为一道路。

3.1.2 楼体结构

该大厦主楼建筑结构为钢筋混凝土框架、剪力墙结构; 大厦主楼高 65.2 m, 南北长 34.0 m, 东西宽 15.3 m, 共 18 层; 框架柱体断面为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ (1~3 层) 和 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ (4~18 层) 两种规格, 框架承重柱体共有 18 根, 分为东西 3 排, 每排 6 根; 大厦主楼内 H 轴、8 轴、11 轴以及楼梯间、电梯井墙体为剪力墙结构。大厦主楼建筑平面结构如图 3 所示, 其中 A、B、C 分别为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 、 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 以及 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 规格的立柱, E、F 为剪力墙。

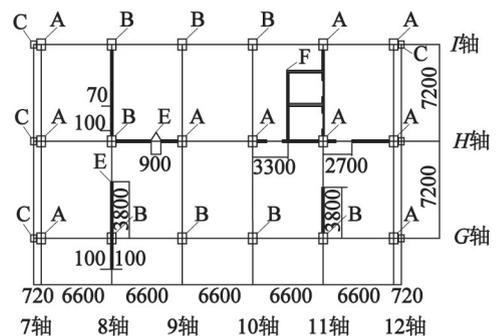


图3 主楼平面结构(单位:mm)

Fig.3 Plan structure of the building (unit: mm)

3.2 爆破拆除方案

3.2.1 总体方案设计

通过分析待拆除楼体周边环境情况, 其倒塌方向只能为东向和东北两个方向。由于主楼南侧 15 m 地下通讯管线需重点保护, 所以东偏北方向为最佳倒塌方向。然而, 正东方向 50 m 处有地下埋设通讯光缆, 所以, 严格控制倒塌楼体的前冲就成为此次爆破成功与否的关键所在。

为确保楼体充分解体倒塌, 减少前冲倒塌堆积及触地振动对周围环境的影响, 楼体爆破方案宜通

通过对G轴(一层)局部装药,减弱支撑反力,同时确定恰当的起爆持续时间,所以必须选用毫秒微差起爆网路技术。而采用加大爆破缺口高度,增加爆破开口角,可以使被爆体在部分失去承载力的情况下,靠重力进行定向旋转塌落。

爆破前,南、西、北三面的三层附楼外墙予以保留,东面裙楼仅拆除南侧一翼,其他裙楼的拆除工作可在主楼爆破之后进行;可利用四面附楼结构墙体对爆破产生的碎块进行天然防护,在一定程度上起到屏蔽作用。同时,在主楼东侧(倒塌方向)40 m处挖一道宽4 m、深3 m的防震沟,以减少建筑倒塌前冲、触地振动及碎石飞溅,确保周围环境安全。

3.2.2 预处理

1)主、附楼结构分离预处理:利用机械对18层主楼与四周附楼底层结构连接处进行分割预拆除,使主楼与附楼结构完全分离。

2)砖结构墙体、剪力墙预处理:在确保楼体结构安全的情况下,在三层以下对建筑楼体局部的砖结构墙体、部分剪力墙结构墙体(包括电梯井、楼梯间)进行机械或人工破碎预处理。

通过以上预处理工作,此次拆除爆破设计仅就主楼18根立柱及部分梁体予以设计施工。

3.2.3 立柱炸高的确定

根据楼体框体结构,需要对主要承重结构柱体进行炮孔爆破破碎,立柱炸高采用计算公式^[4]:

$$H = K(B_1 + H_{\min})。 \quad (3)$$

式中: H 为爆破高度; K 为经验系数,一般取1.5~2.0; B_1 为立柱截面的最长边长; H_{\min} 为立柱最小破坏高度。

为使主楼最终解体倒塌,经式(3)计算调整,确定出合理的立柱炸高。 I 轴:爆破1~4层,每层爆破柱高2.5 m; H 轴:爆破1~2层,每层爆破柱高3.5 m; G 轴:爆破第1层,爆破柱高1.0 m。最终,主楼柱体爆破缺口高度15.4 m;倾倒角度 47° 。爆破缺口如图4

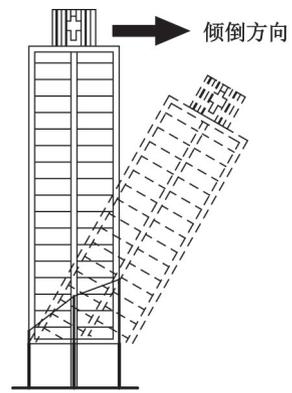


图4 爆破缺口(单位:mm)

Fig.4 Schematic diagram of the blasting cuts (unit: mm)

所示。

3.2.4 爆破参数的确定

本次爆破设计按主楼东偏北方向倒塌爆破方案,即楼体底层爆破柱体实现东侧定向倒塌。由于倒塌前方50 m地下为光缆设施,所以选择雷管时间间隔为100~150 ms,通过毫秒微差起爆网路技术^[5-6],调整起爆时间和顺序,实现向北偏移。选用 $\varnothing 38$ mm的钎头对每个柱体钻水平炮孔,沿竖直方向布置双排梅花孔,在柱体侧面的中心线两侧布置双排炮孔。

钻孔总计476个,总装药量99.63 kg。爆破参数如表1所示。

3.2.5 起爆系统设计

1)起爆顺序:为保证主楼向东偏北方向倒塌,顺次起爆主楼I轴、H轴、G轴的柱体。

柱体起爆顺序平面图如图5所示。

2)起爆网路:设计采用导爆管非电起爆系统,每段微差时间为100 ms,5段110 ms,7段210 ms,9段310 ms,11段460 ms,为确保所有雷管起爆的可靠性及安全性,雷管之间的连接方法采用导爆四通相联。

起爆网路如图6所示。

表1 爆破参数

Tab.1 Blasting parameters

| 爆破位置 | 爆破层数 | 柱体规格/ mm × mm | 炮孔直径/ mm | 孔深/ mm | 孔距/ mm | 排距/ mm | 单孔装药量/ g | 孔数 | 药量/ kg |
|------|------|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----|-----------|
| I轴 | 1~3 | 800 × 800 | 38~40 | 600 | 200 | 500 | 225 | 198 | 54.45 |
| | 4 | 600 × 600 | 38~40 | 400 | 100 | 500 | 120 | 66 | |
| H轴 | 1~2 | 800 × 800 | 38~40 | 600 | 200 | 500 | 225 | 168 | 37.80 |
| G轴 | 1 | 800 × 800 | 38~40 | 600 | 200 | 500 | 225 | 20 | 4.50 |
| 横梁 | | 250 × 600 | 38~40 | 400 | 500 | | 120 | 24 | 2.88 |
| 合计 | | | | | | | | 476 | 99.63 |

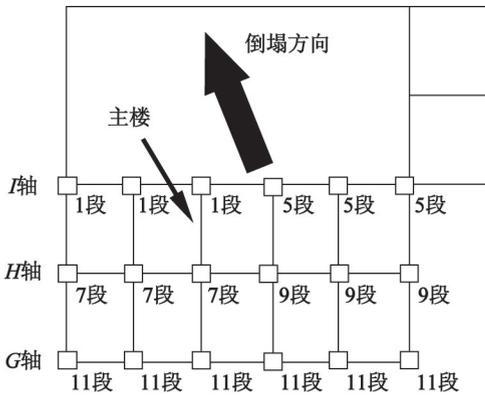


图5 柱体起爆顺序平面

Fig. 5 Plan of firing order of cylinder

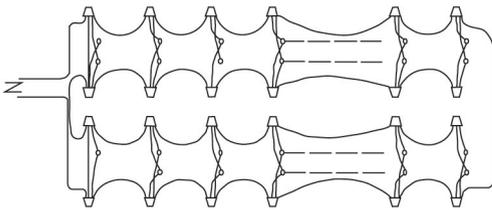


图6 起爆网路

Fig. 6 Blasting network

3.2.6 主楼失稳验算^[7-9]

主楼能否失稳取决于承重立柱爆破切口的高度,就需要在实施爆破过程中,立柱爆破切口内的竖筋必须达到失稳条件。

压杆的柔度极限为:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} \quad (4)$$

式中: E 为钢筋的弹性模量; σ_p 为钢筋的比例极限。

每根裸露钢筋(竖筋)爆破后的实际应力为:

$$\sigma_i = \frac{P}{N \cdot S} \quad (5)$$

式中: P 为切口上部总载荷; N 为筒身竖筋根数,取24; S 为竖筋截面积。

由式(4)、式(5)计算其柔度极限:

$$\lambda_j = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_i}} \quad (6)$$

临界压杆高度与柔度极限之间的关系如下:

$$l_j = \frac{\lambda_j \cdot d}{4} \quad (7)$$

式中: d 为竖筋直径,此钢筋结构中 λ_j 取200。

失稳高度 $l_j = 200 \times 0.028/4 = 1.4$ m。

为使立柱爆破切口内的竖筋达到失稳条件,设计炸高应大于1.4 m。综合考虑楼体结构、爆破安全等因素,炸高取2.0~2.5 m,可以保证大厦主楼在爆破过程中失稳倒塌,并按设计东偏北方向倾倒。

3.3 爆破效果

该大厦成功起爆,起爆后的高层建筑按照设计方向轰然倒塌。爆破后经过现场检查,楼顶倒塌前冲正好达到40 m防震沟处,爆破所产生的地震波、冲击波、噪声、飞石等有害效应均在合理控制范围内,未对周围建筑产生影响,爆破拆除取得圆满成功。爆破效果如图7所示。



图7 爆破效果

Fig. 7 Blasting outcome

4 结论

微差(包括秒差)爆破网路技术在实际工程中有广泛的应用,通过对爆破楼体的定向倒塌的运动进行分析,以及毫秒微差网路在实际工程的应用进行探讨,得到如下结论:

1)在导爆雷管的网路设计中,通过各种倒塌过程中的运动计算,可以合理调整爆破作用的持续时间,控制高层建筑物爆破倒塌的前冲、后坐,对满足某些爆破工程的安全需要具有重要的意义。

2)在爆破设计方案中,楼体上下分层(局部爆破)采用微差或秒差网路,以及减弱楼体的支撑反力,可以实现高层建筑物原地倒塌爆破。

3)在定向倒塌爆破中,当采用半秒、秒发(高段)导爆雷管分段引爆时,最大地增加爆破持续时间 t ,充分利用楼体自重,可以使楼体倒塌运动发生固轴扭转,后坐最小。

参考文献

- [1] PARK H, SUK C G, CHOI S H, et al. Relations between the explosive demolition design variables and progressive collapse resisting capacity of RC frame structures [J]. Science and Technology of Energetic Materials; Journal of the Japan Explosive Society, 2014, 75(5/6): 119-127.

(下转第64页)

FEI H L, ZENG X Y, YANG Z G. Influence of tunnel excavation blasting vibration on earth's surface based on wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 77-83.

[8] 龙源, 娄建武, 徐全军. 小波分析在结构物对爆破振动响应的能量分析法中的应用[J]. 爆破器材, 2001, 30(6): 1-5.

LONG Y, LOU J W, XU Q J. Application of wavelet analysis to the energy method of the structure response caused by explosion vibration[J]. Explosive Materials, 2001, 30(6): 1-5.

[9] 李兴华, 龙源, 纪冲, 等. 基于小波包变换的高程差对爆破震动信号影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(4): 44-47.

LI X H, LONG Y, JI C, et al. Influence of height difference based on wavelet packets transformation on blasting vibration signals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 44-47.

[10] 娄建武, 龙源, 徐全军. 基于小波包技术的爆破地震

波特征提取及预报 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(3): 261-267.

LOU J W, LONG Y, XU Q J. A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(3): 261-267.

[11] 娄建武, 龙源, 方向, 等. 基于反应谱值分析的爆破震动破坏评估研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 41-46.

LOU J W, LONG Y, FANG X, et al. Study on blasting vibration damage based on response spectrum [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 41-46.

[12] 张晓志, 谢礼立, 于海英. 地震动反应谱的数值计算精度和相关问题 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 15-20.

ZHANG X Z, XIE L L, YU H Y. Precision problems in calculating response spectra by using numerical method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(6): 15-20.

(上接第 58 页)

[2] PARK H, PARK H K, KO J H, et al. Blast design for explosive demolition of a large-scale concrete foundation [J]. Science and Technology of Energetic Materials: Journal of the Japan Explosive Society, 2013, 74(1/2): 6-11.

[3] 杨阳, 杨仁树, 李清, 等. 复杂环境下加固型抗震大楼爆破拆除及数值模拟预测 [J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 24-28, 68.

YANG Y, YANG R S, LI Q, et al. Rugged seismic building demolition blasting under complicated environment and its numerical simulation prediction [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(4): 24-28, 68.

[4] 费鸿禄, 刘志东, 戴明颖. 复杂环境下 10 层非对称框架结构楼房定向爆破拆除 [J]. 爆破, 2015, 32(2): 89-94.

FEI H L, LIU Z D, DAI M Y. Directional explosive demolition of ten-storey dissymmetry building in complicated situation [J]. Blasting, 2015, 32(2): 89-94.

[5] 马洪涛, 孟祥栋, 李远明, 等. 高耸钢筋混凝土桥梁实体墩柱的拆除爆破 [J]. 爆破, 2011, 28(1): 74-77.

MA H T, MENG X D, LI Y M, et al. Explosive demolition of high entity pillars of reinforced concrete bridge [J]. Blasting, 2011, 28(1): 74-77.

[6] 范作鹏, 黄治成, 刘高. 复杂环境下钢筋混凝土基础爆破拆除实践 [J]. 矿冶工程, 2010, 30(5): 9-11.

FAN Z P, HUANG Z C, LIU G. Practice of blasting demolition of reinforced concrete foundation under complex environment [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(5): 9-11.

[7] 王小林, 靳龙, 曾庆元, 等. 混凝土围堰拆除爆破对大坝的安全影响分析 [J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(1): 15-20.

WANG X L, JIN L, ZENG Q Y, et al. Influence of the concrete coffer demolition blasting on the dam safety [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(1): 15-20.

[8] 孙金山, 谢先启, 王坤鹏, 等. 建(构)筑物墩柱爆破后裸露钢筋初弯曲失稳模型 [J]. 爆破, 2015, 32(1): 1-4, 27.

SUN J S, XIE X Q, WANG K P, et al. Initial bending instability model of exposed reinforcing bars in demolition projects [J]. Blasting, 2015, 32(1): 1-4, 27.

[9] 杨建军, 黄磊, 蔡伟. 非对称钢筋混凝土框架结构楼房爆破拆除 [J]. 爆破器材, 2015, 44(4): 51-54, 59.

YANG J J, HUANG L, CAI W. Blasting demolition of a asymmetrical building with a reinforced concreted structure [J]. Explosive Materials, 2015, 44(4): 51-54, 59.