

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.018

钢筋混凝土楼房双向折叠爆破设计方法*

孙金山^{a,b}, 谢先启^{a,b}, 贾永胜^{a,b}, 姚颖康^{a,b}

(江汉大学 a. 省部共建精细爆破国家重点实验室; b. 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430023)

摘要: 针对高层楼房双向折叠爆破技术在工程应用中总体方案和关键参数选择缺乏计算依据的问题, 对折叠爆破方案的量化设计方法进行了研究。建立了楼房折叠爆破的运动学模型, 并基于动力学模型和工程案例, 提出了爆破切口位置、起爆顺序、起爆延时等主要参数的设计准则: 爆破切口应2~3个为宜, 且各分段的质量应接近; 每段的高宽比应大于2; 相邻切口的开口方向应相反, 底部切口应朝向宽敞的区域; 各切口的起爆顺序应自上而下; 相邻切口的最小起爆时差约等于上部切口起爆后转动 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 的时间, 最大起爆时差等于上部切口闭合的时间; 合理的起爆时差应确保在任何爆破切口闭合前, 楼房在空中呈Z字形。通过19层楼房的爆破实例, 验证了设计准则和运动学模型的合理性。

关键词: 拆除爆破; 钢筋混凝土楼房; 双向折叠爆破; 设计方法

中图分类号: TU746.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0116-08

Design Method for Bidirectional Fold Implosion of High-rise Reinforced Concrete Buildings

SUN Jin-shan^{a,b}, XIE Xian-qi^{a,b}, JIA Yong-sheng^{a,b}, YAO Ying-kang^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Precision Blasting;

b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430074, China)

Abstract: The problem during the overall scheme of bidirectional fold implosion technology is the lack of calculation basis for selecting key parameters. Thus the quantitative design method of folding blasting plan is studied. Firstly, a multi-rigid body dynamic model of the building's motion posture is established. Based on the dynamic model and engineering case analysis, the design criteria for main parameters such as the position of the blasting incision, the sequence of initiation, and the delay time are put forward. It is proposed that there should be 2 to 3 blasting cuts, and the mass of each section should be close with a height-width ratio greater than 2. The opening directions of adjacent incisions should be opposite, and the bottom incision should face a spacious area. The initiation sequence of each incision should be from top to bottom with the minimum delay interval between adjacent incisions approximately equal to the time for the upper incision to rotate $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ after initiation. While the maximum delay interval is equal to the time for the upper incision to close. Reasonable initiation delay time should ensure that the building is zigzag in the air before any blasting incision is closed. Through the blasting example of a 19-story building, the rationality of the design criteria and the kinematic model is verified.

Key words: demolition blasting, reinforced concrete building; bidirectional folding implosion; design method

收稿日期: 2022-06-11

作者简介: 孙金山(1980-), 男, 教授、博士, 主要从事工程爆破方面的教学与研究, (E-mail) sun99001@126.com。

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2020BCA084); 湖北省自然科学基金重点项目(2020CFA043)

目前, 高层和超高层楼房的拆除主要采用控制爆破技术^[1,2]。随着建筑结构日益复杂以及建筑密度的不断增加, 拆除爆破的技术难度日益加大, 应用条件也日益苛刻。为此, 高层建筑物的爆破拆除过

程必须进行严格和精密的控制。建筑物的控制爆破拆除技术兴起于 20 世纪 50 年代, 工程应用至今仍十分活跃。该技术利用炸药爆炸能量破坏建筑物的关键受力构件, 使之失去承载能力, 并通过合理的设计控制建筑的倒塌方向、破坏范围、破碎程度和爆破有害效应等^[3-7]。

近年来, 国内爆破行业逐渐推广采用双向折叠爆破技术拆除一些倒塌空间不足的高大结构, 该技术将高耸建筑分成几段, 使其在倒塌过程中发生折叠, 并且该技术也开始在国外推广应用(图 1b)。

2004 年, 武汉首次成功采用双向折叠爆破技术拆除了一座 100 m 高的钢筋混凝土烟囱^[8,9]。2007 年, 拆除了一座 19 层的楼房^[10]。2019 年, 拆除了一座 14 层框剪结构楼房^[11]。近年来, 该技术已在大量拆除工程中得到应用^[12,13]。在近二十年来, 虽然折叠式爆破技术在许多工程中得到了应用, 但由于缺乏设计标准, 一些工程的爆破效果并不理想^[14]。为此, 介绍了双向折叠爆破拆除技术的基本原理, 提出了双向折叠爆破拆除技术的设计准则和主要参数的理论选取方法, 并通过工程实例进行了验证。



(a) 烟囱三次折叠爆破 (广州, 2005 年)
(a) Fold implosion of a chimney (Guang Zhou, 2005)



(b) 楼房二次折叠爆破 (英国, 2011 年)
(b) Fold implosion of a building (The United Kingdom, 2011)

图 1 烟囱和建筑物的折叠爆破拆除
Fig. 1 Fold implosions of chimney and building

1 关键参数设计

与传统的拆除爆破模式类似, 折叠爆破方案设计过程中也需要确定合理的总体方案以及爆破位置、炮孔及装药参数、起爆网路等, 此外, 还需要确定爆破切口的数量、开口方向、高度位置。

1.1 爆破切口数量与方向

采用双向折叠爆破时, 应在楼房的特定高度上布置 2~3 个楔形爆破切口(图 2)。在爆破切口中, 大部分的柱和剪力墙应被破坏, 使切口区残余的柱和墙形成“塑性铰链”, 爆破的楼房则变成一个折叠的运动链。因此在爆破方案设计过程中, 应该首先设计爆破切口的数量、位置和方向。

切口的数量控制楼房的倒塌范围, 但过多的切口也不利于倒塌过程的控制, 将增加倒塌失控的风险。为了降低成本和提高效率, 两个切口间楼房分段的高度 H_i 应大于其宽度 W 的两倍, 即

$$H_i > 2W \quad (1)$$

式中: H_i 为折叠分段高度; W 为分段的宽度(平

行于倾倒方向的剖面)。

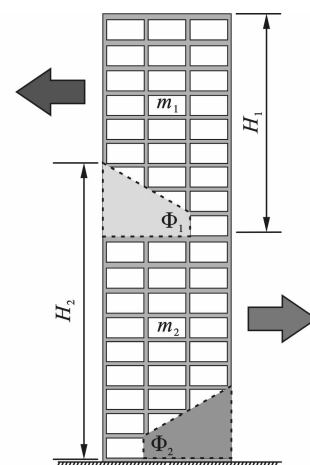


图 2 折叠爆破示意图
Fig. 2 Diagram of fold implosion

为确保折叠运动的稳定性, 各楼段的惯性矩应大致相等, 所以每个分段的重量应大致相等

$$m_1 \approx m_2 \cdots \approx m_n \quad (2)$$

式中, m_n 为折叠分段质量。

根据公式(1)和公式(2)可以确定爆破切口的数量。

其次,要实现可靠的折叠过程,应使相邻爆破切口的开口方向相反。因为倒塌范围主要受底部爆破切口的控制。所以底部切口的开口方向应朝向倒塌范围最充裕的方向。

1.2 爆破切口起爆顺序

爆破切口的起爆顺序主要有两种模式:自上而下和自下而上。采用自上而下顺序时,爆破切口的塑性较更易形成,且上切口的闭合对下段的运动影响较小(图3a)。采用从下到上顺序时,上部切口处重力力矩在楼房转动过程中会变得很小,导致切口塑性铰的形成较困难,爆破方案的可靠性将降低(图3b)。因此,建议爆破切口采用自上而下的起爆顺序。

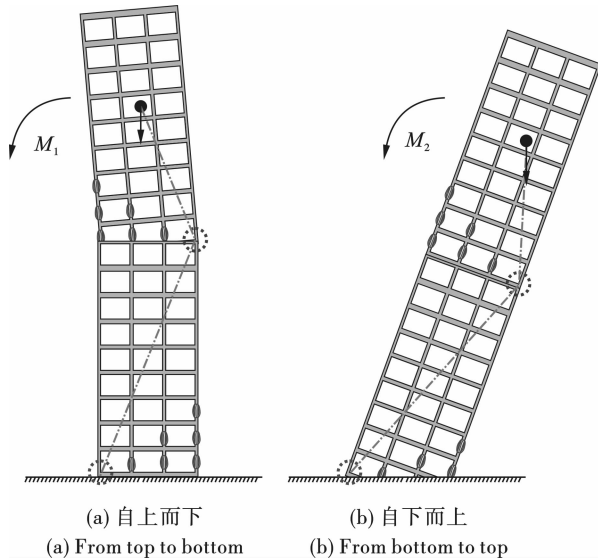


图3 不同起爆顺序示意图

Fig. 3 Diagram of initiation sequence of notches

1.3 爆破切口起爆时差

爆破切口间的起爆时差对折叠运动姿态影响很大,因此确定起爆时差时应遵循以下准则。

(1)要使楼房从结构转化理想的运动机构,需使爆破切口能形成塑性铰链,而其形成过程需要足够的时间,因此相邻切口的最小起爆时差等于理想铰链旋转 $1^\circ \sim 2^\circ$ 所需的时间

$$\Delta t \geq \Delta t_{\min} = \Delta t \Big|_{\Delta\theta=1^\circ \sim 2^\circ} \quad (3)$$

式中, $\Delta\theta$ 为起爆后切口上方楼房分段旋转的角度。

(2)爆破切口最终将闭合,且其闭合时的强烈碰撞可能会使折叠运动变得难以控制。因此,相邻爆破切口的最大起爆时差应等于爆破切口闭合所用

的时间

$$\Delta t \leq \Delta t_{\max} = \Delta t \Big|_{\Delta\theta=\Phi} \quad (4)$$

式中, Φ 楔形爆破切口的张开角度(如图2所示)。

(3)在双向折叠爆破运动过程中切口闭合时,应确保楼房在空中的运动姿态呈Z字形。

(4)为确保楼房安全地倒塌,须确保其下段先落地,上段后落地,且下段落地时上下段之间的夹角必须小于 90° 。

2 折叠塌落过程计算模型

由公式(1)~(4)可以获得无数组关键参数的组合,而为了确定最优的参数组合,必须对设计方案的折叠运动状态进行预测和评估。爆破切口闭合前折叠运动是与理想运动过程接近,因此,可以采用多体动力学模型来预测早期的倒塌过程。

2.1 两次折叠运动

两次双向折叠爆破需在楼房的底部和中部设置两个切口,是最简单的折叠方案。采用三次折叠时上两段也需经历两次折叠的阶段。两次折叠倒塌过程可以分为两个阶段(如图4所示):阶段(1)是从上部切口($t=0$)的起爆到下切口的起爆($t=t_1$)的过程;阶段(2)是下切口起爆之后的过程。

在阶段(1)中,根据牛顿运动定律,上段运动方程可表示为

$$J_1 \cdot \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial t^2} = m_1 g r_1 \sin \theta_1 \quad (5)$$

式中: J_1 是上段的转动惯量(旋转轴是上部塑性铰链); r_1 是上段质心到上部塑性铰链的距离; θ_1 是 r_1 与垂直轴的夹角; m_1 是上段的质量; g 是重力加速度。

公式(5)的边界条件为

$$\begin{cases} \theta_1 \Big|_{t=0} = \theta_{10} \\ \theta_1' \Big|_{t=0} = 0 \end{cases}$$

式中: θ_{10} 是 θ_1 的初始角; $t=0$ 是上切口的起爆时间; θ_1' 是角速度。

在阶段(2)中,下段开始旋转。在笛卡尔坐标系下,上段质心坐标可表示为

$$\begin{cases} x_1 = L_2 \sin \theta_2 + r_1 \sin \theta_1 \\ y_1 = L_2 \cos \theta_2 + r_1 \cos \theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_1 、 y_1 分别为上段质心的横坐标和纵坐标; L_2 为下切口转动轴与上切口转动轴之间的距离; θ_2 为 r_2 与垂直轴之间的夹角(顺时针为正,逆时针为负)。

因此,系统的动能 E 表示为

$$E = \frac{1}{2} [m_1(x_1'^2 + y_1'^2) + J_{1c}\theta_1'^2 + J_2\theta_2'^2] \quad (7)$$

式中: J_{1c} 为上段的转动惯量(转动轴为其自身的

质心); J_2 为下段的转动惯量(转动轴为下切口转动轴); x_1' 表示 $x_1(t)$ 对时间 t 的一阶导数, 依次类推。

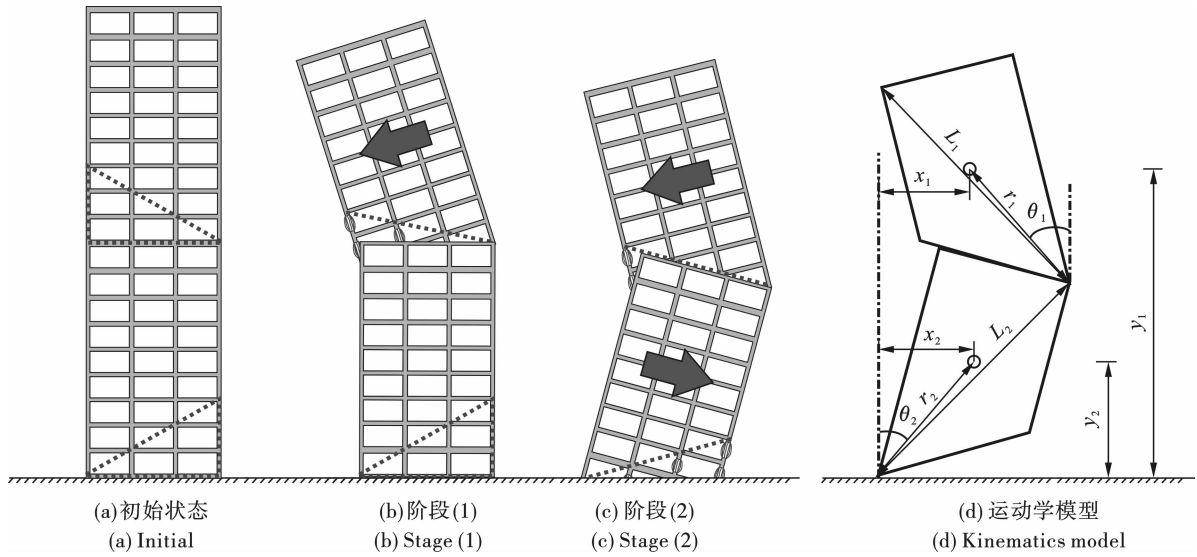


图 4 双向折叠爆破模式

Fig. 4 Bidirectional folding implosion mode

以地面为零势能面, 系统的势能 U 表示为

$$U = m_1gy_1 + m_2gy_2 \quad (8)$$

可建立运动系统的拉格朗日方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_1'} \right] - \frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_1} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_2'} \right] - \frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

解方程(9), 可得微分方程组为

$$\begin{cases} J_{1c}\theta_1'' + m_1r_1[r_1\theta_1'' + L_2\theta_2'^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + L_2\theta_2'^2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - g \sin \theta_1] = 0 \\ J_2\theta_2'' - m_2r_2 \sin \theta_2 + L_2m_1[L_2\theta_2'' - r_1\theta_1'^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + r_1\theta_1'' \cos(\theta_1 - \theta_2) - g \sin \theta_2] = 0 \end{cases} \quad (10)$$

方程组(10)的边界条件为

$$\begin{aligned} \theta_1 \Big|_{t=t_1} &= \theta_{1,t_1}, \theta_2 \Big|_{t=t_1} = \theta_{2,t_1}, \\ \theta_1' \Big|_{t=t_1} &= \omega_{1,t_1}, \theta_2' \Big|_{t=t_1} = 0 \end{aligned}$$

式中: θ_{1,t_1} 和 θ_{2,t_1} 是下切口起爆($t = t_1$)时 θ_1 和 θ_2 的角度; ω_{1,t_1} 是 $t = t_1$ 时刻上段转动的角速度。

设 $\tau = t - t_1$, 可将式(10)的边界条件转化为

$$\begin{aligned} \theta_1 \Big|_{\tau=0} &= \theta_{1,t_1}, \theta_2 \Big|_{\tau=0} = \theta_{2,t_1}, \\ \theta_1' \Big|_{\tau=0} &= \omega_{1,t_1}, \theta_2' \Big|_{\tau=0} = 0 \end{aligned}$$

根据式(10)的解, 可以求解 $\theta_1(\tau)$ 和 $\theta_2(\tau)$, 可以得到阶段(2)中楼房任意时刻的运动姿态。

由式(5)和式(10)可分两步模拟双向折叠爆破方案。阶段(1)中, 在上部切口起爆后, 以初始状态

参数为边界条件, 求解方程(5)。阶段(2)中, 下切口起爆后, 以上段的运动状态和下段的初始状态为边界条件, 求解方程(10)。方程(5)和(10)虽忽略了爆破荷载、碰撞、摩擦、阻尼等因素, 但仍可为运动状态的模拟提供重要的依据。

2.2 三次折叠运动

三次折叠爆破方案在楼房上布置三个爆破切口将其上段, 中段和下段(如图5)。其倒塌过程可以分为3个阶段: 阶段(1)为从上部切口的起爆到中间切口起爆的塌落过程($0 \sim t_1$); 阶段(2)是中间切口起爆到下切口起爆的塌落过程($t_1 \sim t_2$); 阶段(3)是下切口的起爆后的塌落阶段($> t_2$)。

三次折叠爆破过程中, 由于采用自上而下的切口起爆顺序, 因此其阶段(1)和阶段(2)与2.1节中两次折叠过程一致, 应通过方程(5)和(10)进行求解, 阶段(3)则通过以下过程进行求解。

在阶段(3)中, 上段的质心坐标表示为

$$\begin{cases} x_1 = r_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 \\ y_1 = r_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (11)$$

中段的质心坐标表示为

$$\begin{cases} x_2 = r_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 \\ y_2 = r_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (12)$$

式(11)和(12)中, $x_1, y_1, x_2, y_2, r_1, r_2, L_2, L_3, \theta_2, \theta_3$ 等数学符号和字符的定义如图5所示。

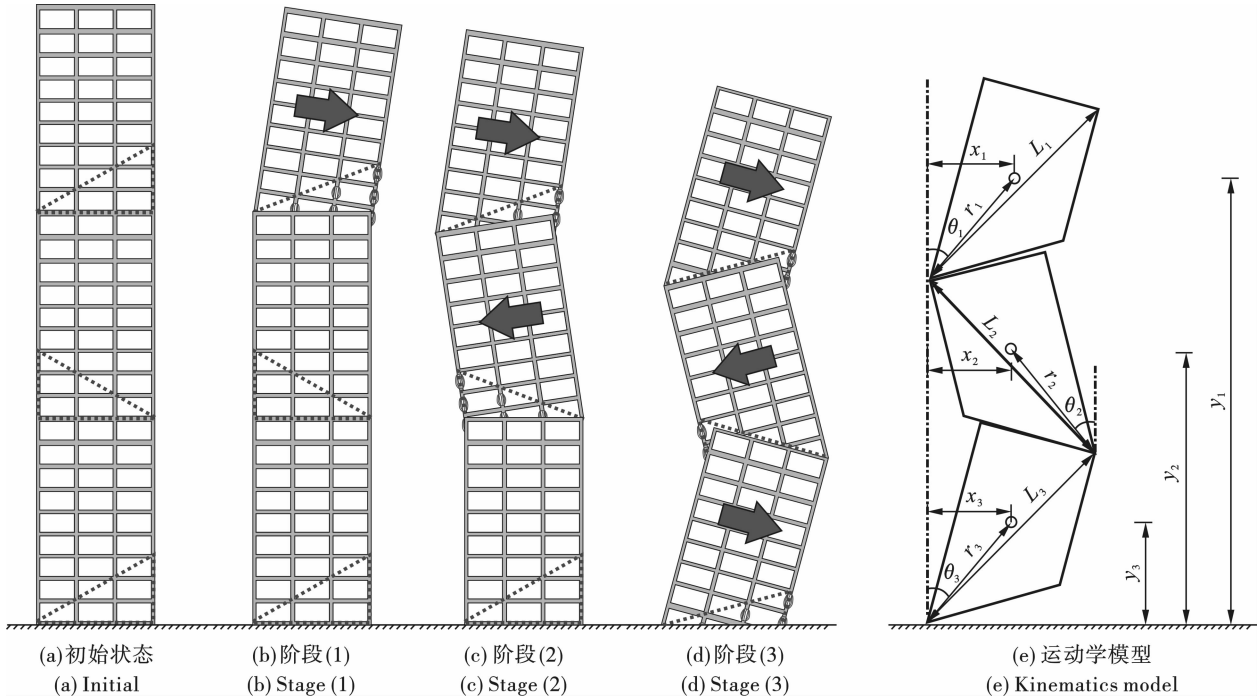


图5 三向折叠爆破模式

Fig. 5 Tri-folding implosion mode

三段运动系统的动能 E 为

$$E = \frac{1}{2} [m_1(x_1'^2 + y_1'^2) + m_2(x_2'^2 + y_2'^2) + J_{1c}\theta_1'^2 + J_{2c}\theta_2'^2 + J_{3c}\theta_3'^2] \quad (13)$$

式中: J_{1c} 、 J_{2c} 为上段和中段的转动惯量(转动轴为其自身的质心); J_{3c} 为下段的转动惯量(转动轴为下切口转动轴)。

以地面为零势能面, 势能 U 表示为

$$U = m_1gy_1 + m_2gy_2 + m_3gy_3 \quad (14)$$

式中: m_1 、 m_2 、 m_3 为各段质量; g 是重力加速度。

$$\begin{cases} J_{1c}\theta_1'' + m_1r_1(r_1\theta_1'' + L_2\theta_2''s_{12} + L_2\theta_2''c_{12} + L_3\theta_3''s_{13} + L_3\theta_3''c_{13} - gs_1) = 0 \\ J_2\theta_2'' + L_2m_1(L_2\theta_2'' - r_1\theta_1''s_{12} + r_1\theta_1''c_{12} + L_3\theta_3''s_{23} + L_3\theta_3''c_{23} - gs_2) + \\ m_2r_2(r_2\theta_2'' + L_3\theta_3''s_{23} + L_3\theta_3''c_{23} - gs_2) = 0 \\ J_3\theta_3'' - m_3gr_3s_3 + L_3m_1(L_3\theta_3'' - r_1\theta_1''s_{13} + r_1\theta_1''c_{13} - L_2\theta_2''s_{23} + L_2\theta_2''c_{23} - gs_3) + \\ m_2L_3(L_3\theta_3'' - r_2\theta_2''s_{23} + r_2\theta_2''c_{23} - gs_3) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $s_1 = \sin \theta_1$; $s_2 = \sin \theta_2$; $s_3 = \sin \theta_3$; $s_{12} = \sin(\theta_1 - \theta_2)$; $s_{13} = \sin(\theta_1 - \theta_3)$; $s_{23} = \sin(\theta_2 - \theta_3)$; $c_{12} = \cos(\theta_1 - \theta_2)$; $c_{13} = \cos(\theta_1 - \theta_3)$; $c_{23} = \cos(\theta_2 - \theta_3)$ 。

式(16)的边界条件为

$$\theta_1|_{t=t_2} = \theta_{1,t_2}, \theta_2|_{t=t_2} = \theta_{2,t_2}, \theta_3|_{t=t_2} = \theta_{3,t_2},$$

$$\theta_1'|_{t=t_2} = \omega_{1,t_2}, \theta_2'|_{t=t_2} = \omega_{2,t_2}, \theta_3'|_{t=t_2} = 0$$

各参数代表的意义与 2.1 节中相似。

设 $T = t - t_2$, 将式(16)的边界条件转化为

建立运动系统的拉格朗日方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_1'} \right] - \frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_1} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_2'} \right] - \frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_2} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_3'} \right] - \frac{\partial(E-U)}{\partial \theta_3} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

解方程(15), 可得阶段(3)中 $\theta_1(t)$ 、 $\theta_2(t)$ 和 $\theta_3(t)$ 的微分方程组为

$$\theta_1|_{T=0} = \theta_{1,t_2}, \theta_2|_{T=0} = \theta_{2,t_2}, \theta_3|_{T=0} = \theta_{3,t_2},$$

$$\theta_1'|_{T=0} = \omega_{1,t_2}, \theta_2'|_{T=0} = \omega_{2,t_2}, \theta_3'|_{T=0} = 0$$

依次求解方程(5)、(10)、(16)可得阶段(1)、(2)、(3)的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 进而评价不同参数组合下爆破楼房在不同时刻的塌落姿态, 进而确定最佳的方案。

3 工程案例

2007年爆破拆除的武汉中央商务区一楼房, 高

19 层, 为框架-剪力墙结构。部分结构参数如表 1 所示。混凝土强度为 30 MPa, 钢筋强度为 300 MPa。为了对比双向折叠爆破技术和定向爆破技术, 将大

楼分成两部分, 左侧部分采用折叠爆破方案, 右侧部分采用定向倾倒爆破方案(如图 6)。

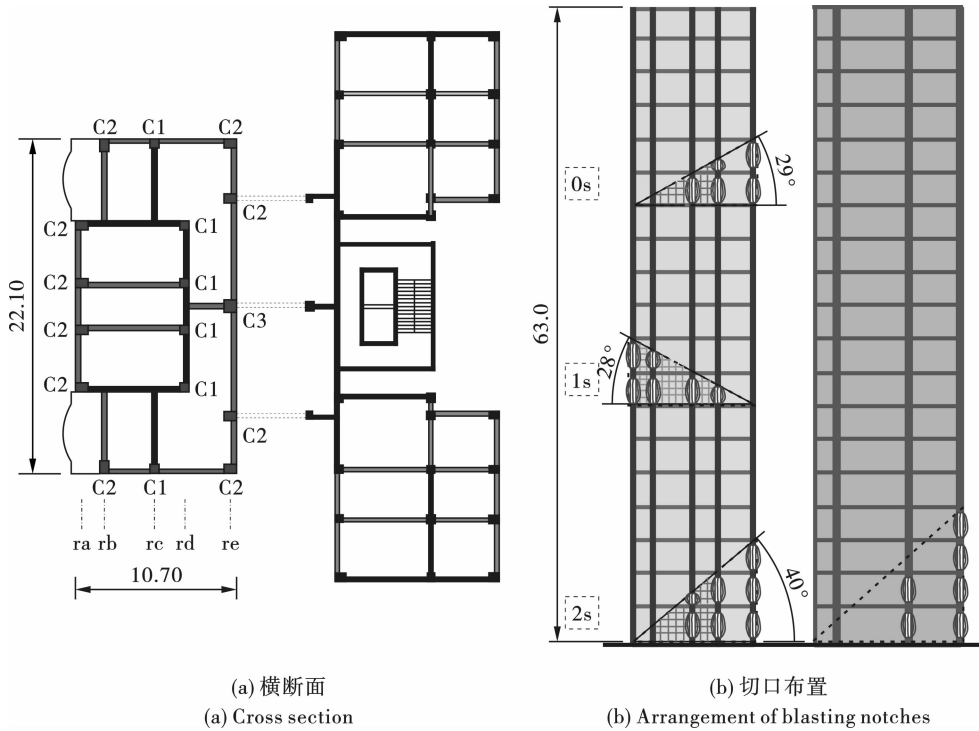


图 6 19 层建筑三叠爆破拆除方案(单位:m)

Fig. 6 Tri-folding implosion plan for the 19-story building(unit:m)

根据折叠爆破关键参数设计准则, 楼房的左侧部分设置了三个楔形爆破切口, 切口位置和参数如表 2 所示, 各切口方向如图 6 所示, 各分段的主要参数如表 3 所示。根据第 1 节和公式(5) 计算得到, 相邻爆破切口之间起爆时差选择范围为 0.5 ~ 2.0 s。爆破方案设计时, 分别选取了多种起爆时差组合进行了分析, 部分参数组合如表 4 所示。

根据式(5)、(10)、(16), 分别计算了不同参数组

合下, 阶段(1)、(2)和(3)中楼房的 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 并在 CAD 软件中绘制楼房在各时刻的运动姿态。其中, 表 4 中三种参数组合的计算结果表明, 所有的参数组合都是合理的, 而爆破施工单位最终采用方案(c)。

爆破后折叠爆破效果很好, 如图 7 和图 8(a) 所示。爆堆长约 21 m, 高约 12 m, 结构破碎充分。而右侧采用定向倾倒爆破方案的部分, 如图 8(b) 所示, 其爆堆长约 67 m, 高约 10.7 m, 其结构完整性较高。

表 1 建筑参数(左侧部分)

Table 1 Parameters of the building(Left part)

C_1 横截面/ mm	C_1 配筋/ mm	C_2 横截面/ mm	C_2 配筋/ mm	C_3 横截面/ mm	C_3 配筋/ mm	剪力墙厚度/ mm	板厚/ mm
500 × 500	4 × 22 + 8 × 18	500 × 700	4 × 25 + 14 × 22	700 × 700	4 × 25 + 16 × 22	250	100

表 2 爆破方案参数(左侧部分)

Table 2 Parameters of the implosion plan(Left part)

3 个切口位置	切口张开角/°	爆破轴	支撑轴	炸药单耗/(kg · m ⁻³)
14th ~ 15th	29	rc, rd, re	ra, rb	2000
8th ~ 9th	28	ra, rb, rc, rd	re	2000
1st ~ 3rd	40	rc, rd, re	ra, rb	2500

表3 三向折叠方案计算参数

Table 3 Calculation parameters of the Tri-folding implosion plan

$m_1/$ kg	$m_2/$ kg	$m_3/$ kg	$r_1/$ m	$r_2/$ m	$r_3/$ m	$L_1/$ m	$L_2/$ m	$J_1/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$J_2/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$J_3/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$J_{1c}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$J_{2c}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\theta_{10}/$ (deg)
1.5×10^6	1.5×10^6	1.8×10^6	11.8	12.2	13.4	21.5	21.5	2.7×10^8	2.9×10^8	4.0×10^8	5.5×10^7	5.5×10^7	22

表4 不同方案的分析结果

Table 4 Analysis results of 3 plans

方案	切口位置	切口起爆时间/s	是否符合关键参数设计要求
(a)	14 th -15 th , 8 th -9 th , 1 st -3 rd	0 → 0.5 → 1.0	是
(b)	14 th -15 th , 8 th -9 th , 1 st -3 rd	0 → 0.7 → 1.4	是
(c)	14 th -15 th , 8 th -9 th , 1 st -3 rd	0 → 1.0 → 2.0	是

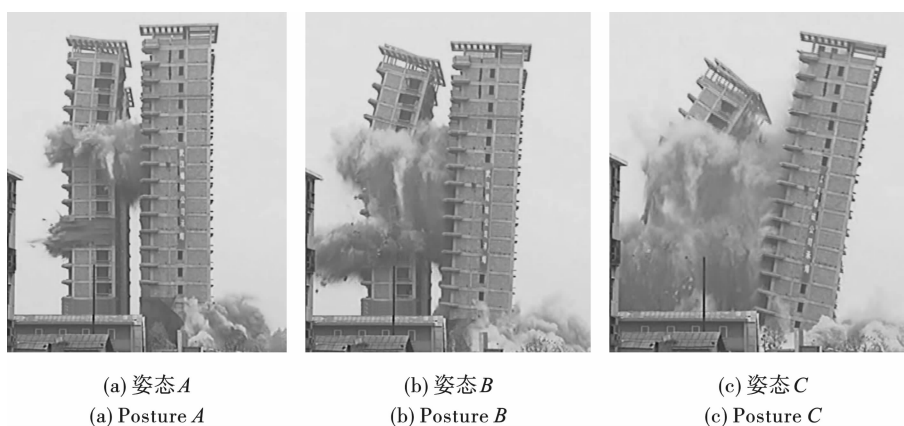


图7 19层建筑爆破拆除

Fig. 7 Implosion of the 19-story building



(a) 左侧折叠爆破拆除结果
(a) Folding implosion result of the left part

(b) 右侧定向爆破结果
(b) Directional blasting result of the right part

图8 19层建筑爆破拆除结果

Fig. 8 Blasting result of the 19-story building

4 结论

针对在高层楼房拆除中应用日益广泛的双向折叠式爆破技术,总结提出了爆破设计时一些关键参数的设计原则,包括切口数量、位置、方向、起爆顺序和时差等,同时建立了可对设计方案的效果进行分析预测的力学模型,可为爆破方案的优化设计提供理论依据与参考,主要结论如下:

(1) 楼房双向折叠爆破时,爆破切口应2~3个为

宜,且各分段的质量应接近;每段的高宽比应大于2。

(2) 相邻爆破切口的开口方向应相反,底部切口应朝向塌落范围更充裕的方向。

(3) 切口的起爆顺序应该是自上而下的。

(4) 相邻切口的最小起爆时差约等于上部切口起爆后转动 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的时间,最大起爆时差等于上部切口闭合的时间;合理的起爆时差应确保在任何爆破切口闭合前,楼房在空中呈Z字形。

(5) 可采用多刚体动力学模型进行塌落运动过程的预测和分析,但最还应进行更精确的数值模拟,确保预测结果的可靠性。

参考文献 (References)

- [1] BHANDARI M G, KULKARNI V K, MALVIYA R K. Building demolition: ground to earth important as construction[J]. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2013, 3(4): 396-401.
- [2] UENISHI K, TAKAHASHI H, YAMACHI H, et al. PC-based simulations of blasting demolition of RC structures [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24:

- 2401-10.
- [3] LOIZEAUX J M, LOIZEAUX D K. Demolition by implosion[J]. Scientific American, 1995, 273(4): 146-53.
- [4] 汪旭光,于亚伦. 21世纪的拆除爆破技术[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 32-35.
- [4] WANG Xu-guang, YU Ya-lun. Demolition blasting technology faced with the 21 century [J]. Blasting, 2000, 6(1): 32-35. (in Chinese)
- [5] 汪高龙,王潇,李跟,等. 复杂环境90m高双曲线冷却塔拆除爆破工程[J]. 爆破, 2021, 38(1): 62-68.
- [5] WANG Gao-long, WANG Xiao, LI Gen, et al. Demolition blasting of 90 m high hyperbola cooling tower in complicated environment [J]. Blasting, 2021, 38(1): 62-68. (in Chinese)
- [6] 李本伟,陈德志,张萍,等. 180m高钢筋混凝土烟囱爆破拆除[J]. 爆破, 2011, 28(4): 57-68.
- [6] LI Ben-wei, CHEN De-zhi, ZHANG Ping, et al. Demolition of a 180-meter-superheight reinforced concrete chimney by directional blasting [J]. Blasting, 2011, 28(4): 57-68. (in Chinese)
- [7] 于淑宝,汪旭光. 210 m 烟筒同向折叠爆破降振效果分析[J]. 爆破, 2020, 37(2): 60-74.
- [7] YU Shu-bao, WANG Xu-guang. Damping effect analysis of same direction folding blasting for 210 m high chimney [J]. Blasting, 2020, 37(2): 60-74. (in Chinese)
- [8] 孙金山,卢文波,谢先启,等. 钢筋混凝土烟囱拆除爆破双向折叠定向倾倒方案关键技术探讨[J]. 爆破, 2004, 21(2): 6-9.
- [8] SUN Jin-shan, LU Wen-bo, XIE Xian-qi, et al. Discussion on key technology of bidirectional folded blasting demolition of reinforced concrete chimney [J]. Blasting, 2004, 21(2): 6-9-24. (in Chinese)
- [9] 谢先启,贾永胜,罗启军,等. 双向折叠爆破拆除100 m 钢筋砼烟囱[J]. 爆破, 2004, 21(3): 49-55.
- [9] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, LUO Qi-Jun, et al. Demolition of 100 m-high Reinforced concrete chimney by bidirection folding blasting [J]. Blasting, 2004, 21(3): 49-55. (in Chinese)
- [10] 谢先启,孙金山,贾永胜,等. 19层框-剪结构楼房双向折叠爆破数值模拟[J]. 工程爆破, 2008, 14(4): 20-23.
- [10] XIE Xian-qi, SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, et al. Numerical simulation of bidirection folded blasting demolition of a 19-story frame-shear wall structure building [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(4): 20-24. (in Chinese)
- [11] 马世明,余兴春,任少华,等. 复杂环境下14层框剪楼房折叠拆除爆破[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 69-78.
- [11] MA Shi-ming, YU Xing-chun, REN Shao-hua, et al. Folding demolition blasting of 14-storey frame shear building in complex environment [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 69-78. (in Chinese)
- [12] 李晓杰,齐凯文,闫鸿浩,等. 金马大厦折叠爆破拆除塌落与爆破振动分析[J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 60-65.
- [12] LI Xiao-jie, QI Kai-wen, YAN Hong-hao, et al. Analysis of collapse vibration and blasting vibration in folding blasting demolition of Jinma building [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(2): 60-65. (in Chinese)
- [13] 辛振坤,洋红星,骆利锋,等. 18层大厦双向三次折叠控制爆破技术[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 33-36.
- [13] XIN Zhen-kun, PAN Hong-xing, LUO Li-feng, et al. The controlled blasting technology in bidirection-3-times-folding of 18-storey building [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(4): 33-36. (in Chinese)
- [14] 贾永胜,谢先启,姚颖康,等. 高层建筑物折叠爆破拆除关键技术参数探讨[J]. 爆破, 2016, 33(3): 75-80.
- [14] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, YAO Ying-kang, et al. Discussed on key parameters of folding explosive demolition of high-rise building [J]. Blasting, 2016; 33(3): 75-80. (in Chinese)

英文编辑:柯波

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418/CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》、“万方数据——数字化期刊群”、维普网和超星学术期刊“域出版”平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。