

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.002

## 房屋建筑物纵向逐跨坍塌爆破拆除关键技术探讨\*

贾永胜<sup>1a,1b,2</sup>, 刘昌邦<sup>1a,1b,2</sup>, 伍岳<sup>1a,1b,2</sup>, 黄小武<sup>1a,1b,2,3</sup>

(1. 江汉大学 a. 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 430056;

2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056; 3. 武汉科技大学 理学院, 武汉 430065)

**摘要:** 爆破拆除技术以其安全、高效的特点, 已经成为拆除高层楼房的首选技术。近年来, 城市高层楼房逐渐呈现出规模大型化、环境复杂化和结构多样化的特点。针对城市复杂环境下房屋建筑物爆破拆除面临倒塌空间受限的难题, 结合多个爆破拆除典型工程案例, 分析了纵向逐跨坍塌爆破拆除技术的基本原理, 探讨总结其相关爆破参数的设计原则: 纵向逐跨坍塌方式宜采用梯形爆破切口, 切口闭合角应不小于 $25^\circ$ , 后排应预留足够刚度的支撑区; 纵向分区延期时间宜取 $0.3 \sim 0.6$  s, 纵向跨度或刚度较大的框剪结构楼房分区延期时间应适当延长。通过3个楼房爆破拆除实例, 阐述了动力学有限元软件对楼房纵向逐跨坍塌爆破设计方案仿真验算分析的可行性, 模拟计算时可通过拉应力或主应变失效来控制楼房主体构件的破坏解体。纵向逐跨坍塌爆破技术具有爆堆堆积范围较小、破碎解体效果好、减小楼房触地振动等优点, 适用于高宽比小、长宽比大的楼房爆破拆除, 应用前景广阔。实际工程中, 应根据现场环境条件、楼房结构特点和技术风险等综合比选确定最佳的爆破方案。

**关键词:** 拆除爆破; 纵向逐跨坍塌; 楼房拆除; 设计方法

**中图分类号:** TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0010-07

## Discussion on Key Technology of Demolishing Buildings by Longitudinal Span-by-span Collapse Blasting

JIA Yong-sheng<sup>1a,1b,2</sup>, LIU Chang-bang<sup>1a,1b,2</sup>, WU Yue<sup>1a,1b,2</sup>, HUANG Xiao-wu<sup>1a,1b,2,3</sup>

(1. a. State Key Laboratory of Precision Blasting; b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China;

2. Wuhan Explosion & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China;

3. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** Because of its safety and high efficiency, blasting demolition technology has become the preferred technology for demolition of high-rise buildings. In recent years, urban high-rise buildings have gradually shown the characteristics of large scale, complex environment and various structures. Aiming at solving the problem of limited collapse space in the blasting demolition of buildings in complex urban environment, the basic principle of longitudinal span-by-span collapse blasting demolition technology is analyzed with several typical engineering cases of blasting demolition. Meanwhile, the design principles of related blasting parameters are discussed and summarized. The trapezoidal blasting incision should be adopted in the longitudinal span-by-span collapse mode, the closure angle of the incision should be no less than  $25^\circ$ , and the support area with sufficient stiffness should be reserved in the rear row. Furthermore, the extension time of longitudinal partition should be  $0.3 \sim 0.6$  s, and the partition delay time of frame-

收稿日期: 2022-10-07

作者简介: 贾永胜(1970-), 男, 教授、工学博士, 主要从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) jason03566@163.com。

通讯作者: 刘昌邦(1982-), 男, 正高级工程师、工学硕士, 主要从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) 57175907@qq.com。

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

shear structure buildings with a large longitudinal span or stiffness should be properly extended. Through three examples of blasting demolition of buildings, the feasibility of the simulation and analysis of the longitudinal and span collapse blasting design scheme of buildings by dynamic finite element software is expounded. In simulation calculation, the failure of main components of buildings is controlled by tensile stress or principal strain failure. By a contrastive analysis, longitudinal span-by-span collapse blasting technology has the advantages of small accumulation range of blasting pile, good crushing and disintegration effect, and reduction of building touchdown vibration. It is suitable for the blasting demolition of the buildings with small height-width and large length-width ratios, and it has broad application prospects. In practical engineering, the best blasting scheme should be determined according to the comprehensive comparison of site environmental conditions, building structure characteristics and technical risks.

**Key words:** demolition blasting; longitudinal span-by-span collapse; building demolition; design method

为满足城市规划发展的需要,大量老旧、高大楼房的建(构)筑物将被拆除,爆破拆除是目前建(构)筑物拆除的主要方式。近三十年以来,拆除爆破技术在理论设计和技术工艺等方面均取得了长足发展。在爆破拆除工程中,工程技术人员习惯于选用原理简明、设计可靠、施工方便的定向倾倒方式<sup>[1]</sup>。而随着城市建(构)筑物密集程度和地下空间利用率的进一步提高,高大楼房爆破拆除时面临倒塌空间不足、安全风险高等问题。为此,爆破技术人员在传统爆破拆除方法基础上,研发了多种爆破拆除方式,如原地坍塌、折叠爆破、内爆法、纵向倒塌等<sup>[2-4]</sup>。

随着楼房爆破拆除环境日趋复杂,越来越多的高大楼房爆破时在倒塌空间上受到限制。同时,对周边保护对象的振动控制难度也显著增大,而纵向逐跨坍塌爆破技术在此类楼房拆除中具有独特的优势,已在一些爆破拆除工程中得到应用,典型案例如表1所示。近年来,作者及研究团队对纵向逐跨坍塌爆破技术进行了相关研究与尝试,成功拆除多栋复杂环境下的砖混及框架结构楼房。由于该技术的复杂性,国内一些楼房爆破拆除工程因缺乏相关设计标准和经验,达不到理想的爆破效果。因此,通过分析并总结相关爆破案例的设计特点,从技术原理、设计原则等方面,对城市复杂环境下房屋建筑物纵向逐跨坍塌爆破拆除关键技术进行了探讨。

## 1 纵向逐跨坍塌技术原理

纵向逐跨坍塌爆破拆除技术就是通过在被爆建筑物某一水平轴线方向上布置一个或多个爆破切口,采用逐跨依次延期起爆方式,使其在自重作用下沿该轴线方向实现逐跨渐进破坏坍塌。根据楼房主要承重构件拆除顺序的不同,其倒塌形式主要包括向外逐跨坍塌、向内逐跨坍塌等,如图1所示。

国内较早采用纵向逐跨坍塌方式拆除建(构)筑物的工程案例在21世纪初期,处于对该技术的探索尝试阶段,设计者们多是先采用人工预切割方式,

将楼房沿纵向分割为多个独立的部分,削弱楼房整体刚度,加大高宽比,再分区设置爆破切口和起爆网路,使得各段楼体依次纵向倒塌解体。如2003年的湖南长沙的9层框架结构湘智楼爆破拆除<sup>[5]</sup>,2004年深圳市西丽同富裕工业区西北角3栋钢筋混凝土框架楼房爆破拆除<sup>[6]</sup>,以及重庆江北原轮船公司两栋16层和18层剪力墙筒体结构宿舍楼爆破拆除工程<sup>[7]</sup>,均采用此方法,达到了连续纵向倒塌的爆破效果。但人工预切割也大大增加了工程量,提高了施工成本。

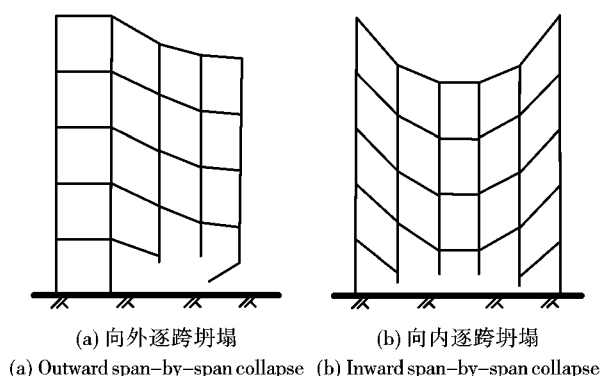


图1 纵向逐跨坍塌模式示意图

Fig. 1 Diagram of longitudinal span-by-span collapse mode

随着国内技术人员对楼房倒塌力学机理研究的不断深入,在2003年武汉永清片旧城改造项目黄浦大街原11号9层楼房爆破拆除中,采用纵向逐跨坍塌技术,梯形爆破切口,跨间延期时间310 ms(最后一排取460 ms)的爆破方案成功爆破拆除,空中解体破碎效果较好。在2012年的靖江金都大厦的爆破工程中,通过加大爆破切口高度,仅对爆破切口范围内的剪力墙进行预处理,运用不同的起爆时间差确保形成足够的倾覆力矩,使得楼房顺利沿纵向向外逐段坍塌,解体效果较好<sup>[8]</sup>。同年在海口市老海航大厦爆破拆除工程中,采用上下两个爆破切口,纵向设置12个延时段,斜线式起爆,实现楼房沿纵向逐段倒塌<sup>[9]</sup>。其次,作者及研究团队研发了纵向逐

跨空中解体爆破技术<sup>[10]</sup>,通过在不同楼层布置多个爆破切口,采用纵向斜线型延时网路,使楼房大部分构件在逐跨倾倒触地前实现破坏解体,进而降低触

地振动,减小塌落范围;该技术在2017年的武汉虹锦公寓及武汉凯风大厦爆破拆除工程中得以应用<sup>[11,12]</sup>,均取得理想的爆破效果,如图2所示。

表1 纵向逐跨坍塌爆破拆除典型案例

Table 1 Typical cases of longitudinal span-by-span collapse blasting demolition

序号	时间	拆除对象	爆破方案
1	2003	武汉永清片旧城改造项目黄浦大街原11号9层楼房	楼房为9层框架结构,1#楼长40.4 m、宽33.3 m、高31.5 m,平面呈“回”字形布置,采用“纵向纵向逐跨坍塌”爆破方案。设置正梯形爆破切口,跨间延期时间310 ms(最后一排取460 ms)。
2	2003	湖南长沙湘智楼	楼房为9层框架结构,总建筑面积5075 m <sup>2</sup> ,采取“人工切割成南北两栋,依次向北纵向倾倒”方式。设置梯形爆破切口,排间延期时间0.5 s。
3	2004	深圳市西丽同富裕工业区1#宿舍楼	楼房为7层框架结构,长60.2 m、宽11.5 m、高26 m,将楼体预切割成4部分,采用“纵向自东向西逐段坍塌”的爆破方案。设置三角形爆破切口,区间采用半秒差非电雷管延期。
4	2004	重庆江北区原轮船公司两栋宿舍楼	楼房为16层和18层剪力墙筒体结构,总建筑面积约2.28万 m <sup>2</sup> ,采用“分块、分片塌落、空中解体、三角立体延时”纵向倾倒方案。设置三角形爆破切口,区间延期时间0.5 s。
5	2007	武汉振华公寓	楼房为8层框架结构,长61.7 m、宽12.9 m、高28.6 m,建筑面积6400 m <sup>2</sup> ,采用“向北纵向逐跨坍塌”的爆破方案。
6	2009	韶关钢铁集团公司三轧厂旧厂房	厂房为框架结构,南北向5排、东西向58列立柱,将厂房沿纵向布设11个切口,采取厂房沿纵轴定向分段向西定向倒塌方式,过程类似多米诺骨牌效果。设置三角形爆破切口,采用半秒差非电雷管延期。
7	2012	靖江金都大厦	楼房为11层框剪结构,长46 m、宽16 m、高46.8 m,采用“向东纵向倾倒”的总体爆破方案。设置梯形爆破切口,纵向排间延期间隔0.5 s。
8	2012	海口市老海航大厦B座楼	楼房为15层框架结构,长32 m、宽15 m、高27 m,采用“纵向逐段倒塌”的爆破方案。设置梯形爆破切口,切口内排间延期时间0.5 s。
9	2013	沈阳东电医院住院楼	拆除对象为一栋10层框架结构楼房,长47.1 m、宽19.2 m、高43 m,采取“半秒延期、斜切式起爆、向西纵向逐段坍塌”的爆破方案。设置三角形爆破切口。
10	2017	武汉虹锦公寓	楼房为11层框架结构,长42 m、宽16.5 m、高51 m,采用“向南纵向逐段倒塌”爆破拆除方案。设置梯形爆破切口,纵向区间延期时间310 ms。
11	2017	武汉原二七饭店	楼房为7层框架结构,长43.2 m、宽14.1 m、高32.4 m,采用“逐跨向内倾倒”爆破拆除方案。设置正梯形爆破切口,跨间延期时间310 ms。
12	2019	景德镇市金岸名都1号楼	楼房为14层框架结构,长36.2 m、宽15.3 m、高45.5 m,采用“电子雷管一次延时起爆、向西纵向倾倒”的总体爆破方案。设置梯形爆破切口,区间延期时间450 ms。
13	2021	武汉某高校宿舍楼	楼房为7层砖混结构,平面呈“凹”型,建筑面积7163.72 m <sup>2</sup> ,采用楼房南侧中间部分向内坍塌、东侧部分向西定向倒塌、西侧部分向东定向倒塌的“内塌式”方案。设置梯形爆破切口,区间延期时间310 ms。



图2 武汉虹锦公寓爆破拆除

Fig. 2 Blasting demolition of Wuhan Hongjin Apartment

向内逐跨坍塌模式则是改变了各段楼体的纵向起爆顺序,通过合理控制爆破延期时间,使得建筑中间部位先触地,两边结构向内挤压倾倒坍塌,以达到增加楼房破碎程度、减小构件塌落堆积范围、降低触地冲击振动的效果。采用此方法拆除楼体的理想倾倒过程呈“M”型,其倒塌范围较向外逐段坍塌方式更小。在2003年的湖南省汨罗市法院两栋砖混结构楼房爆破拆除工程中,采取爆破缺口高度差、多段微差爆破时间差相结合的定向倾倒方案,沿纵向分区微差起爆,使得楼房中间部分先起爆,两端依次起

爆,整个楼房内合式倾倒<sup>[13]</sup>。其次,作者及研究团队在定向倾倒和原地坍塌爆破技术基础上,研发了逐段向内倾倒爆破技术,先后成功应用于湖北十堰原人民商场、湖北武汉原二七饭店和某高校7层“凹”型砖混结构宿舍楼爆破拆除工程(如图4(b)所示)<sup>[14,15]</sup>。

## 2 纵向逐跨坍塌技术设计要点

采用纵向逐跨坍塌技术进行楼房爆破拆除时,爆破方案设计除需要根据楼房结构特点确定爆破位置、炮孔孔网及装药参数外,还需要确定爆破切口、爆破分区、起爆顺序以及起爆延期时间等。下面分别对爆破切口和起爆网路等关键参数进行探讨。

### 2.1 爆破切口及预处理

楼房拆除爆破设计常用的爆破切口的形式主要有两种,即三角形切口和梯形切口。在采用纵向逐跨坍塌爆破拆除时,由于塌落范围有限,楼房纵向长度相对较长,前排立柱或楼体前倾距离不宜过大,楼房倒塌理想的运动状态是前部分楼体类似于原地坍塌连续塌落触地,带动后部分楼体失稳破坏而向前倾倒。而梯形切口的第一段楼体起爆先行着地,而后逐段坍塌,所产生的倾覆力矩、前倾速度及后坐一般比三角形切口要小,塌落振动、塌落距离及扩散范围也较小,故采用梯形切口效果更好。

爆破切口高度设置要合理,切口高度过小会出现“炸而不倒”的情况,过大则会引起严重的后坐。工程实践结果表明,砖混结构楼房切口高度宜设置3层,框架结构楼房切口高度宜设置4~5层。对于整体刚度较大的框剪结构,可在上部楼层增加一到两个单层切口,进行空中解体。其次,切口后排要预留足够强度的立柱或墙体作为支撑区,防止楼体后坐及下滑,支撑区的宽度一般要经楼房倾倒条件校核后确定。切口闭合角最小值以楼体重心移出楼房外侧时的角度为确定原则,切口闭合角应不小于25°。

进行必要的预处理不仅省时省力,亦可减小钻孔量。对爆破切口内的低楼层进行较彻底的预拆除处理是非常必要的,遵循“化墙为柱”的原则,剪力墙、楼梯、电梯井等阻碍结构剪切破坏的主要部位应予以重点弱化处理,降低其抗剪强度,使其支撑部位简洁利落,爆破时能迅速塌落。对中部或上部重点楼层的处理则可大大简化。

### 2.2 起爆网路

纵向逐跨坍塌爆破技术的复杂性主要体现在其起爆网路设计上,楼房切口的爆破分区、起爆顺序及

延期时间,对楼房能否实现纵向倒塌爆破拆除起到决定性作用。

楼房纵向分区大小要综合考虑楼房结构形式、质量分布以及倒塌方向等因素,可根据塌落体触地振动速度预测模型的计算公式(1)进行校核<sup>[16]</sup>。当确定了周边环境需要保护目标与待拆楼房之间的最小距离、允许的塌落振动速度以及楼体塌落区域地面土体的干容重、密度等参数,根据式(1)可得出每个起爆段上部楼体的最大质量,进而可换算出最大的分区数量。

$$V_R = \sqrt{\frac{2\eta m_1 \gamma}{\rho^2 dl}} R^{-\beta} \quad (1)$$

式中: $V_R$ 为距离振源 $R$ 处的最大振动速度,cm/s; $m_1$ 为塌落体质量,kg; $R$ 为需保护物距离塌落边界的水平最小距离,m; $\gamma$ 为塌落塑性区土体的干容重,kN/m<sup>3</sup>; $\rho$ 为塑性区土体的平均密度,kg/m<sup>3</sup>; $d$ 为触地接触面宽度,m; $l$ 为塑性区纵向长度,m; $\eta$ 为无量纲系数,取0.25; $\beta$ 为衰减指数,土体取1.3~1.7。

切口内各分区构件的起爆顺序是控制楼房倒塌方向的关键,在采用向外逐跨坍塌方式时,起爆顺序即从倾倒方向一侧沿纵向逐区向后,向内逐跨坍塌方式则为从中间向两侧的起爆顺序。其次,当对横向起爆顺序进行适当调整后,可以控制楼房偏向左前方或右前方倾倒,以满足实际允许倒塌范围要求。

无论采用哪种起爆顺序,应以便于控制构件的倒塌方向及不损坏主体结构为判据来确定区间延期时间。楼房逐段坍塌解体运动过程中,楼房构件的受力状态不再仅仅表现为受压,更多表现为各区间连接梁、板处的竖向弯断效应和拉剪破坏。因此,合理的区间延期时间要确保楼板、梁有足够的时间弯断,达到足够的倾覆力矩,且楼体触地时有一定的动能。在文献[8]中,齐世福认为框架结构楼房的底部立柱爆破后,上部梁结构在剪力荷载作用下的破坏响应在200 ms以上。通过对以往纵向逐跨坍塌爆破拆除案例分析和工程实践观察,楼房纵向逐段坍塌解体的延期间隔时间取0.3~0.6 s为宜,且最大不应超过爆破切口闭合所用的时间;砖混结构楼房解体较迅速,区间延期时间可取小值,整体刚体较大的框剪结构楼房则取大值;对于楼房跨间间距较大的分区延期时间应适当延长。

## 3 数值仿真验算

近年来,数值模拟技术逐渐在拆除爆破领域得到广泛应用,已经成为拆除爆破方案设计和分析重

要手段<sup>[17]</sup>。因此,在待拆楼房的倒塌模式确定后,进行爆破切口及起爆网路等参数选择时,可采用多刚体动力学或数值模拟等计算手段进行楼房逐跨塌落过程的初步验算分析,并结合一定的工程经验确定最优的设计参数组合,避免将主观上的估计直接运用到实际工程。

如在武汉原二七饭店和武汉某高校宿舍楼爆破拆除工程(见表1)中,作者及研究团队先后使用 ANSYS/LS DYNA 动力学有限元软件对待拆楼房的爆破设计方案进行了仿真验算。两栋待拆楼房分别为框架结构和砖混结构,因楼房周边环境复杂,无法为其提供足够倒塌空间,故采用“逐段向内倒塌方式”进行爆破拆除。有限元模型均采用整体式建模,楼房构件材料选用动态弹塑性模型。因楼房纵向倒塌过程中各构件易受拉破坏,故通过设置拉应力阈值来控制楼房主体构件的失效,使用关键字 \*MAT\_ADD\_EROSION 来定义失效条件及爆破切口的起爆顺序和延期时间。计算得出的模拟结构与实际爆破效果基本一致,如图3、图4所示,楼房解体较充分,实际爆堆范围类似原地坍塌,仅为原址的1.1~1.2倍。

又如在某9层框架结构楼房爆破拆除工程中,楼房长63 m,宽18 m,高31.5 m,横向3排立柱,纵向10排立柱,主要立柱截面尺寸为450 mm×600 mm。为满足降低楼房触地振动要求,设计采用阶梯形爆破切口(如图5所示)、纵向斜线形延时起

爆网路(如图6所示),延时间隔为310 ms,使楼房沿纵向逐跨坍塌并偏向右前方倾倒的总体方案。对该设计方案进行数值模拟验算时,有限元模型采用分离式建模,混凝土材料设置为拉应力失效,钢筋材料设置为主应变失效。数值计算结果如图7所示,楼房按照设计要求从右向左沿纵向逐跨坍塌触地,上部楼体最终偏向右前方倾倒,前倾距离约为楼房高度的1/2,整个倒塌过程历时约6.8 s,楼房左、右侧均无后坐,解体充分,符合工程实际要求。

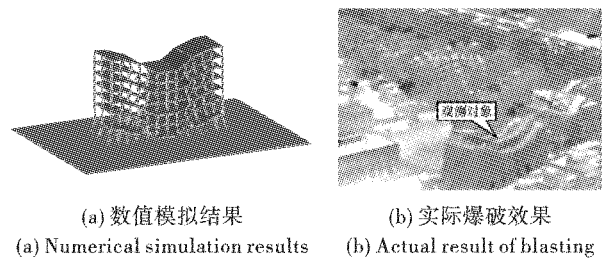


图3 武汉原二七饭店爆破

Fig. 3 Blasting demolition of Wuhan Erqi Hotel

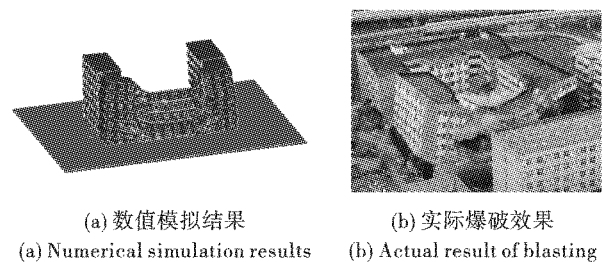


图4 武汉某高校宿舍楼爆破

Fig. 4 Blasting demolition of a university dormitory in Wuhan

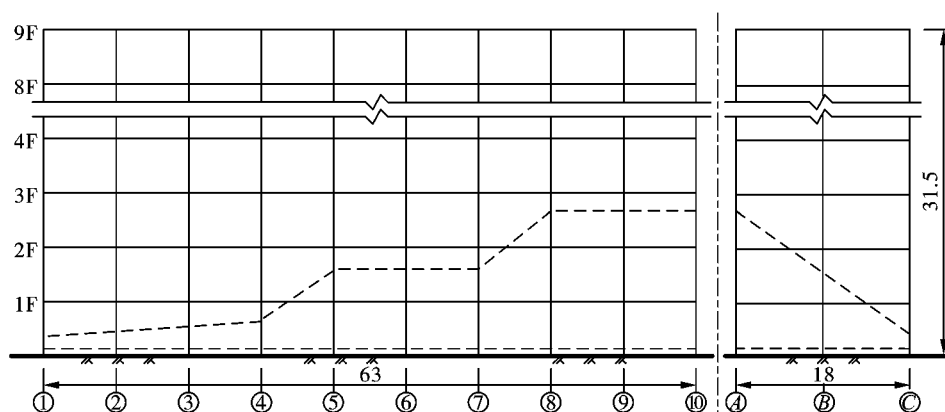


图5 爆破切口示意图(单位:m)

Fig. 5 Blasting incision diagram(unit:m)

可见,数值仿真计算可较好的预测楼房纵向倒塌姿态和爆堆范围,为爆破方案的设计提供了重要的理论依据。其次,计算结果表明,楼房纵向逐跨坍塌过程中梁柱等承重构件受弯剪破坏较明显,增加

了楼房解体破碎程度,同时减小了楼体触地振动效应,进一步验证了纵向逐跨坍塌爆破技术的可行性和科学性。

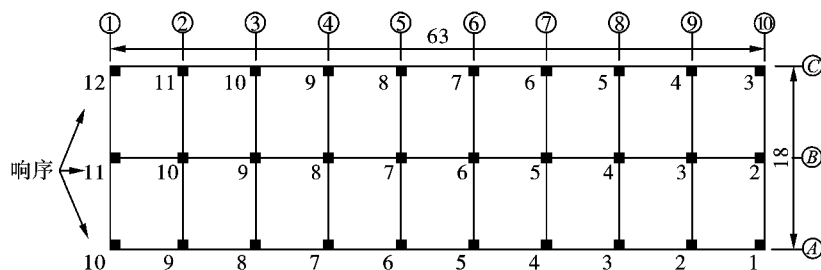


图6 起爆顺序示意图(单位:m)

Fig. 6 Detonation sequence diagram(unit:m)

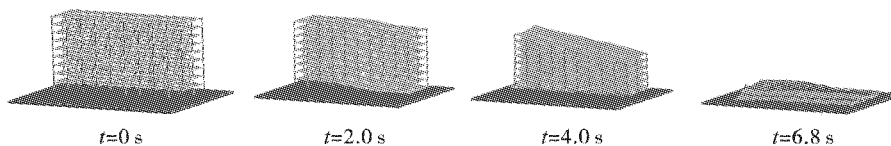


图7 楼房纵向逐跨倒塌过程

Fig. 7 Longitudinal span-by-span collapse process of building

## 4 纵向逐跨坍塌爆破拆除技术优势

通过上述理论分析、数值仿真验算和工程应用可以看出,纵向逐跨坍塌爆破拆除技术通过采用纵向逐区毫秒延时起爆网络,使楼房逐区爆破失稳,在自身重力势能作用下产生的重力弯矩、剪力,促使楼房在空中逐区、逐块解体成较小构件,各小构件之间相互发生牵扯、碰撞等力学作用,而进一步消耗了楼房的整体势能,最后各分区楼房构件依次缓冲坍塌触地而进一步解体破碎。其优点是爆破形成的爆堆堆积范围较小,解体充分,削弱了建筑物撞击地面造成的冲击振动,降低了对周围环境的危害。缺点是爆破网路较为复杂,设计要求较高,些许偏差对楼房整体爆破效果会有很大的影响。

纵向逐跨坍塌技术爆破拆除横向坍塌空间受限的房屋建筑物更具优势,更适合高宽比小、长宽比大的楼房爆破拆除,在城市复杂环境建筑物拆除市场的应用前景广阔。在实际工程中,应根据现场环境条件、楼房结构特点和技术风险等,对向外逐跨坍塌、向内逐跨坍塌或其他逐跨坍塌模式进行综合比选。

近年来,高层框剪结构楼房拆除工程逐年增多,纵向逐跨空中解体模式是此类楼房爆破拆除技术的重要发展方向,作者及研究团队在相关工程实践中进行了技术创新与成功尝试,取得了一定的研究进展。而针对不同结构形式的高层房屋建筑物,需进一步开展该技术的基础理论和设计方法研究,以拓展其应用范围。

## 5 结论

通过分析纵向逐跨坍塌相关爆破案例设计特点,对纵向逐跨坍塌爆破技术的基本原理和设计参数进行了探讨与总结,得出以下结论:

(1)纵向逐跨坍塌爆破采用梯形切口效果更好,切口闭合角应不小于 $25^\circ$ 。

(2)逐段解体的分区要合理,区间延期时间取 $0.3 \sim 0.6$  s为宜,砖混结构楼房取小值,框剪结构楼房取大值。

(3)采用 ANSYS /LS-DYNA 有限元软件可对楼房纵向逐跨坍塌爆破设计方案进行仿真验算,得出最优参数组合;模拟计算时,宜设置拉应力或主应变阈值来控制楼房主体构件材料的失效。

(4)纵向逐跨坍塌爆破技术具有爆堆堆积范围较小、破碎解体效果好、减小楼房触地振动等优点,更适用于高宽比小、长宽比大的楼房爆破拆除,可有效解决楼房爆破拆除倒塌空间不足的难题。

## 参考文献(References)

- [1] 谢先启,贾永胜,黄小武,等. 17层框-剪结构大楼定向爆破拆除[J]. 爆破,2016,33(2):101-112.
- [1] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Directional explosive demolition of 17-layer frame-shear structure building[J]. Blasting, 2016, 33(2): 101-112. (in Chinese)
- [2] 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.
- [2] 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)
- [3] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. *爆破*, 2019, 36(2):1-12.
- [3] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. *Blasting*, 2019, 36(2):1-12. (in Chinese)
- [4] 谢先启, 王洪刚, 刘昌邦, 等. 2 栋混合结构楼房纵向延时定向倾倒爆破拆除[J]. *爆破*, 2011, 28(2):87-89.
- [4] XIE Xian-qi, WANG Hong-gang, LIU Chang-bang. Demolition of two brick-concrete buildings by longitudinal delay and directional blasting[J]. *Blasting*, 2011, 28(2):87-89. (in Chinese)
- [5] 贾云峰, 尹斌, 王进军, 等. 长沙湘智楼爆破拆除浅析[J]. *采矿技术*, 2003, 3(4):66-67.
- [5] JIA Yun-feng, YI Bin, WANG Jin-jun, et al. Analysis on blasting demolition of Changsha Xiangzhi Building[J]. *Mining Technology*, 2003, 3(4):66-67. (in Chinese)
- [6] 张翠兵, 邓志勇, 张志毅, 等. 钢筋混凝土框架楼群定向爆破拆除[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(1):110-114.
- [6] ZHANG Cui-bing, DENG Zhi-yong, ZHANG Zhi-yi, et al. Demolition of a group of reinforced concrete frame buildings by blasting[J]. *China Railway Science*, 2004, 25(1):110-114. (in Chinese)
- [7] 李采华, 谭雪刚, 薛峰松, 等. 16 和 18 层剪力墙筒体大楼爆破拆除[J]. *工程爆破*, 2004, 10(2):31-34.
- [7] LI Cai-hua, TAN Xue-gang, XUE Feng-song, et al. Blasting demolition of 16 and 18-storeyed buildings with shear wall tube structure[J]. *Engineering Blasting*, 2004, 10(2):31-34. (in Chinese)
- [8] 齐世福, 刘好全, 李宾利, 等. 框剪结构高楼纵向倾倒拆除爆破研究[J]. *爆破器材*, 2014, 43(3):41-47.
- [8] QI Shi-fu, LIU Hao-quan, LI Bin-li, et al. Blasting study on the lengthwise collapse of a tall building with a frame shear wall structure[J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(3):41-47. (in Chinese)
- [9] 周凤仪, 胡少愚, 陆榆. 老海航大厦爆破拆除[J]. *采矿技术*, 2017, 17(1):82-85.
- [9] ZHOU Feng-yi, HU Shao-yu, LU Yu. Blasting demolition of old Haihang Building[J]. *Mining Technology*, 2017, 17(1):82-85. (in Chinese)
- [10] 谢先启. 框架结构楼房“纵向逐段定向倾倒”爆破拆除施工工法. 国家工法[Z].
- [10] XIE Xian-qi. Construction method of blasting demolition of frame structure building “longitudinal and sectionwise directional dumping”. National construction method[Z]. (in Chinese)
- [11] 王洪刚, 姚颖康, 王威, 等. 复杂环境下楼房纵向逐跨坍塌爆破技术应用[J]. *爆破*, 2020, 37(2):80-84.
- [11] WANG Hong-gang, YAO Ying-kang, WANG Wei, et al. Application of vertical span by span collapse explosive demolition technique in complex environment[J]. *Blasting*, 2020, 37(2):80-84. (in Chinese)
- [12] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 异形结构楼房纵向逐跨空中解体爆破拆除[J]. *爆破*, 2019, 36(3):84-89.
- [12] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Blasting demolition technology of longitudinal collapse and aerial disintegration for special-shaped building[J]. *Blasting*, 2019, 36(3):84-89. (in Chinese)
- [13] 周明安, 肖志军, 张胜平, 等. 复杂环境两栋六层楼房的爆破拆除[J]. *采矿技术*, 2003, 3(4):56-57.
- [13] ZHOU Ming-an, XIAO Zhi-jun, ZHANG Sheng-ping, et al. Blasting demolition of two six-story buildings in complex environment[J]. *Mining Technology*, 2003, 3(4):56-57. (in Chinese)
- [14] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 框架结构楼房逐跨向内倾倒爆破拆除[J]. *爆破*, 2020, 37(4):81-88.
- [14] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Span-by-span inward collapse blasting demolition of frame structure building[J]. *Blasting*, 2020, 37(4):81-88. (in Chinese)
- [15] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 砖混结构楼房逐段向内倾倒爆破拆除[J]. *爆破*, 2021, 38(3):82-87.
- [15] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Blasting demolition of brick-concrete structure building by piecewise and inward collapse[J]. *Blasting*, 2021, 38(3):82-87. (in Chinese)
- [16] 孙金山, 颜佳鑫, 蒋跃飞, 等. 宽大建(构)筑物爆破拆除塌落触地振动速度预测模型[J]. *江汉大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1):5-10.
- [16] SUN Jin-shan, YAN Jia-xin, JIANG Yue-fei, et al. Prediction model of ground vibration velocity in blasting demolition of wide buildings and structures[J]. *Journal of Jianghan University Natural Science Edition*, 2022, 50(1):5-10. (in Chinese)
- [17] 谢先启. 拆除爆破数值模拟与应用[M]. 湖北:湖北科学技术出版社, 2008.