

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.014

砖混结构楼房逐段向内倾倒爆破拆除*

刘昌邦^{1,2}, 贾永胜^{1,2}, 黄小武^{1,2}, 孙金山¹, 姚颖康¹, 伍岳^{1,2}

(1. 江汉大学 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)

摘要: 针对异形砖混结构楼房爆破拆除,且定向倒塌空间不足的技术难题,基于某7层“凹”型砖混结构楼房爆破拆除工程实践,提出了“原地坍塌和定向倾倒相结合”的逐段向内倾倒爆破拆除方法。通过创新设计爆破切口、孔网参数和爆破网路,实现了预期的爆破拆除效果。运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,模拟分析了楼房倒塌过程,验证了设计方案的科学性。结果表明:楼房中部楼体先触地,两侧楼体逐段向内倾倒,基本无后坐现象,可按设计方案坍塌,模拟结果与爆破结果基本一致;两侧拐角及南北中部区域有爆堆溢出楼房原址范围,需重点考虑该位置的倒塌空间余量,并采取有效的安全防护措施。采用逐段向内倾倒方案爆破拆除异形砖混结构楼房,达到了减小楼房塌落堆积范围、改善破碎解体效果的目的。

关键词: 爆破拆除; 砖混结构楼房; 向内倾倒爆破; 爆破效果; 数值模拟

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0082-06

Blasting Demolition of Brick-concrete Structure Building by Piecewise and Inward Collapse

LIU Chang-bang^{1,2}, JIA Yong-sheng^{1,2}, HUANG Xiao-wu^{1,2}, SUN Jin-shan¹, YAO Ying-kang¹, WU Yue^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jianghan University, Wuhan 430056, China;
2. Wuhan Explosions & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: Aiming at the technical problems of the irregular brick concrete structure building demolition by blasting and the lack of directional collapse space, a demolition method of in-situ collapse combined with directional toppling was proposed based on a blasting demolition engineering practice of a 7-story ‘凹’ style brick-concrete structure building. By innovative design of blasting cut, hole network parameters and blasting network, an expected blasting demolition effect was achieved. Using ANSYS/LS-DYNA finite element analysis software, the process of building collapse was simulated and the scientific nature of the design scheme was verified. The results show that the middle part of the building touches the ground first, and the two sides of the building are collapsed piecewisely and inwardly. There is basically no recoiling phenomenon, and it can collapse according to the design scheme. The simulation results are basically consistent with the blasting results. In the corner on both sides and north-south and central area, the explosion pile overflowed the original site of the building, so it is necessary to pay attention to the collapse space margin at this location, and take effective safety protection measures. By the method of piecewise and inward collapse, the demolishing of the special-shaped brick-concrete structure building has achieved the purpose of reducing the collapse accumulation range of the building and improving the disintegration effect.

Key words: blasting demolition; brick-concrete building; inward collapse blasting; blasting effect; numerical simulation

收稿日期: 2021-05-08

作者简介: 刘昌邦(1982-), 男, 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。

通讯作者: 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。

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)

随着我国城镇化建设的快速发展,许多老旧的砖混结构楼房逐渐被高层框架、剪力墙、框剪和筒体结构楼房取代。目前,城市中砖混结构楼房拆除改

造项目比较普遍。其中,大部分砖混结构楼房改造项目位于城中村,地理位置敏感、周边环境复杂,对拆除过程中的倒塌效果控制及安全文明施工要求极高。

作为砖混结构楼房拆除的重要手段,爆破拆除技术正在不断更新与发展^[1-3],并被运用于实际工程。近年来,爆破拆除技术多用于拆除高大、高耸、超长单体建(构)筑物,以及大规模群体建(构)筑物。由于倒塌空间和爆破有害效应的限制,砖混结构与低矮框架结构单体建筑拆除市场则经常被机械方式抢占。因此,有必要进一步创新发展城市复杂环境下砖混结构爆破拆除技术,从而提高爆破拆除技术的安全性与应用范围。杨元兵将一栋“L”型砖混结构楼房分割为两个独立体,分别采用定向倾倒方式进行爆破拆除^[4],达到预期效果。谢先启等采用纵向延时定向倾倒拆除爆破技术,对异形砖混结构楼房实施爆破拆除,实现结构逐步塌落,有效控制了塌落振动^[5,6]。程良玉等通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,对 8 层受损砖混楼房进行爆破拆除倒塌过程模拟^[7],提出增强预留支撑体强度设计措施。罗福友等提出一种排间、列间和层间分区三向延时起爆网路,成功应用于一栋 8 层砖混楼房爆破拆除^[8],解体效果良好,散落距离短。马世明等基于一栋抗震加固砖混楼房,采用增加爆破切口高度、机械预拆除等技术措施,达到良好的爆破效果^[9]。

砖混结构楼房虽楼层不高,但结构形式多样,整体刚度和稳定性较差,无法进行大规模预拆除。因此,需要对爆破拆除技术逐步进行改进和创新,以满足城市复杂环境下砖混结构楼房拆除工程安全高效、经济环保等高要求。结合某 7 层“凹”型砖混结构楼房,提出一种“原地坍塌和定向倾倒相结合”的逐段向内倾倒方法,通过提高爆破切口高度,预留足够强度支撑体,合理控制爆破延期时间,使得中部楼体先触地,两侧楼体逐段向内倾倒,以达到减小楼房塌落堆积范围、降低触地冲击振动的效果。并采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,对该楼房倒塌过程进行了数值模拟分析,验证了该爆破拆除技术的科学性和实用性,可供类似砖混结构楼房爆破拆除工程参考借鉴。

1 工程案例

1.1 工程简介

待拆楼房为 7 层砖混结构,平面呈“凹”型,长 48.6 m,宽 32.3 m,高 23.1 m,建筑面积为 7163.72 m²。其中,一层墙体为 240 mm 混凝土砖

墙,二层及二层以上为蜂窝型 240 mm 红砖墙,房屋拐角处有构造柱。走廊外侧钢筋混凝土立柱截面尺寸为 400 mm × 400 mm,楼板为预制空心板,板厚 120 mm,设有 2 个楼梯。具体结构如图 1 所示。

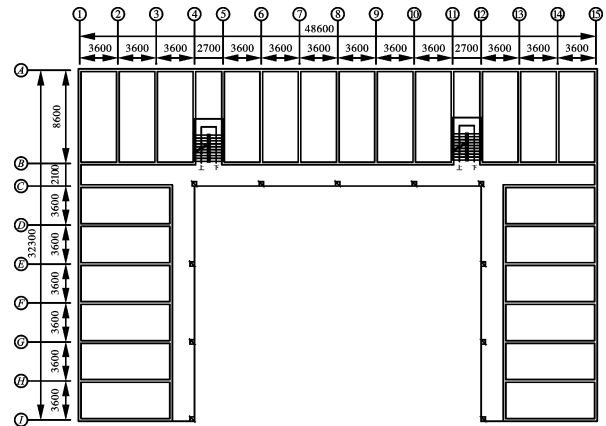


图 1 结构平面图(单位:mm)

Fig. 1 Planar graph of structure(unit:mm)

楼房东侧距围墙 7 m,距 7 层住宅楼 17.7 m;南侧距围墙 4.5 m,距 7 层学生宿舍楼 22.1 m;西侧距商铺 13.9 m,距 7 层待拆教学楼 19.4 m;北侧距 7 层待拆学生宿舍楼 8.0 m。具体环境如图 2 所示。

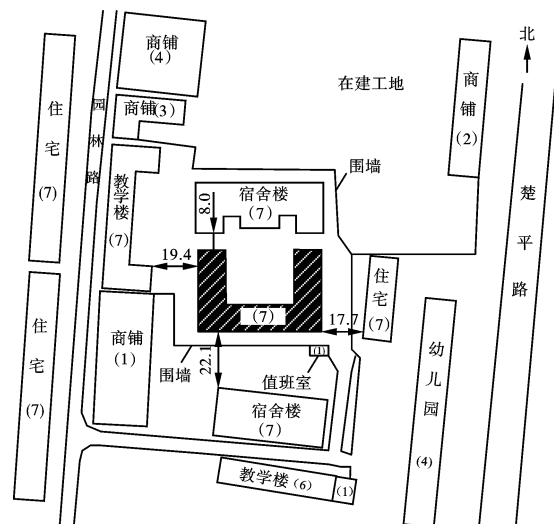


图 2 周边环境图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of surroundings(unit:m)

1.2 爆破拆除方案

(1) 爆破方案

待爆楼房地处城市闹市区,周边环境较为复杂,可供定向倾倒的空间有限,且楼房倒塌堆积范围需严格控制。此外,爆破振动、塌落触地振动、个别飞散物和空气冲击波等爆破有害效应均需严格控制。根据待爆楼房的特征及周边环境情况,可考虑以下两种爆破方案:(1)整体向北定向倒塌爆破;

(2)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爆破方案。方案1:楼房倒塌时与北侧待拆宿舍楼会相互碰撞,影响结构塌落运动速度,进而影响楼房破碎解体效果,且楼房东西两侧高宽比小,预拆除和钻孔施工工作量大。方案2:可充分利用楼房内部空间,爆堆堆积效果类似原地坍塌,楼房爆破拆除后渣块堆积范围集中;且施工工作量较方案1少。综上,选取方案2,即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爆破方案,既可以控制楼体构件塌落的堆积范围,又能控制塌落触地振动等有害效应。

(2)爆破切口

结合楼房的结构特征,爆破切口设置在1~3层、5层和6层,如图3所示。多个切口可有效划分楼房整体的重力势能,减小触地冲击力。爆破切口主要分布在1~2层,3层及3层以上主要破坏构造柱。1层东西两侧留有足够的支撑区,纵向预留宽度为2m,各楼层立柱切口高度见表1。为了降低楼房整体刚度,将楼梯弱化处理,即将上下楼梯第一踏步位置处混凝土破碎,但保留楼梯钢筋,承重墙处理采用“化墙为柱”,即将墙体处理成孔洞,既不影响结构自身稳定性,又可以减少爆破钻孔工作量,原则上预拆墙体长度不超过该墙体长度的1/3。

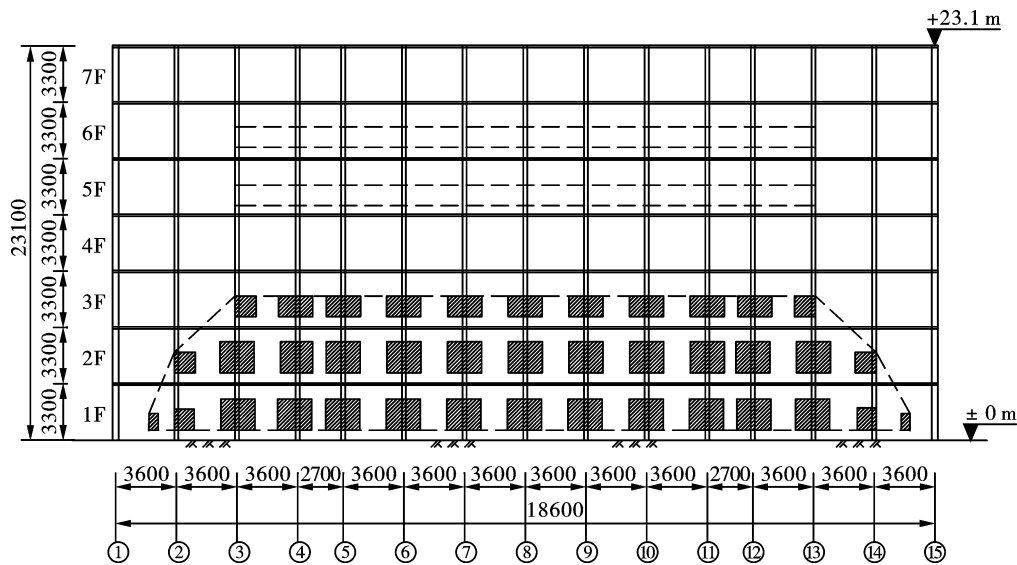


图3 爆破切口示意图(单位:mm)

Fig. 3 Schematic diagram of Blasting cut(unit:mm)

表1 爆破切口高度(单位:m)

Table 1 Height of blasting cut(unit:m)

轴号	2	3	4	5~11	12	13	14
第六层	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-
第五层	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	-
第三层	-	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	-
第二层	0.6	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	0.6
第一层	1.2	1.8	2.1	2.1	2.1	1.8	1.2

(3)孔网参数

待拆楼房爆破切口内的立柱截面尺寸均为400 mm×400 mm,设计单排炮孔,炮孔间距30 cm,孔深23 cm;构造柱尺寸为240 mm×240 mm,设计单排炮孔,孔距30 cm,孔深18 cm;墙面采用梅花形布孔,孔距30 cm,孔深15 cm;根据现场试爆效果,炸药单耗取1.5 kg/m³,对于配筋较高的区域,适当提高装药量。炸药装填采用连续装药结构。爆破参数见表2。

表2 爆破参数表

Table 2 Blasting parameters

立柱尺寸/ mm	最小抵抗线 w/cm	孔径 d/ mm	孔距 a/cm	排距 b/cm	孔深 l/cm	单耗 k/ (g·m ⁻³)	单孔药量 q/g	布孔方式	装药结构
400×400	20	40	30	-	23	1041	50.0	单排布孔	连续装药
240×240	12	40	30	-	18	2100	50.0	单排布孔	连续装药
240 mm 砖墙	12	40	30	35	15	1488	37.5	梅花形布孔	连续装药

(4) 爆破网路

控制各区间的起爆顺序与延期时间是按设计方案爆破拆除楼房的核心,起爆网路采用孔内装 MS19 (1700 ms) 段非电导爆管雷管、孔外 MS9 (310 ms) 段非电导爆管雷管接力延时起爆网路。中间楼体同

纵排各楼层墙体同时起爆,7、8、9 轴墙体最先起爆,依次向东西两侧区间对称同步延期;东西转角两侧楼体以预拆除的孔洞为界,将东西向承重墙划分为不同的爆破区域,由走廊立柱开始分别向后部墙体方向延期。起爆延期时间见表3。

表3 爆破延期时间(单位:ms)
Table 3 Blasting delay-time(unit:ms)

轴号	2	3	4	5	6	7-9	10	11	12	13	14
孔外	1550	1240	930	620	310	0	310	620	930	1240	1550
孔内	3250	2940	2630	2320	2010	1700	2010	2320	2630	2940	3250

2 数值仿真验算

2.1 材料模型及力学参数

采用 ANSYS/LS-DYNA 大型有限元程序,对该砖混楼房向内倾倒过程进行仿真计算,验证爆破设计方案的可行性,分析楼房在爆破切口形成后的失稳倒塌效果。根据待爆楼房的实际结构尺寸,建立7层砖混结构有限元模型。为了提高建模和计算效率,数值模拟采用整体式建模^[10,11],在不影响计算精度的情况下对计算模型进行简化,不考虑炸药爆炸的过程,忽略构造柱及楼梯间等狭小结构提升楼房整体刚度的影响。

楼房结构的墙体及楼板单元均采用 SOLID164 单元,结构材料使用动态弹塑性模型^[12](* MAT_PLASTIC_KINEMATIC),地面设置为刚体(* MAT_RIGID),并固定其所有的平动和转动自由度,刚性地面必须具备足够的刚度,以保证倒塌散落的结构不致穿透地面。采用8节点六面体单元对模型进行网格划分,砖块单元尺寸为 18 cm × 17 cm × 12 cm,整个模型划分得到的单元数为 805688,节点数为 1342497。接触形式采用自动单面接触,自动识别楼房倒塌时各部件之间以及楼房与地面之间的碰撞接触。楼房构件材料的物理力学参数,如表4所示。

表4 材料的物理力学参数

Table 4 Mechanical parameters of materials

名称	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
墙体	2200	30	0.15	2.0	10.5
楼板	2400	25	0.20	5.5	40.0
地面	2400	25	0.16	-	-

由于砖混构件材料为典型的脆性材料,在爆炸荷载作用下,更多发生的是受拉破坏,故选用第一强度理论来判断材料是否失效,使用关键字 * MAT_ADD_EROSION 来定义材料的失效条件。爆破切口墙体通过时间参数控制使之按照设定的时刻依次失效;其余主体结构部分发生断裂或破碎的阈值,通过定义失效主应变控制,本次计算设置失效主应变值为 0.025。最后给整体楼房施加重力加速度荷载,建好的模型如图4(a)所示。

2.2 楼房倒塌过程分析

楼房倒塌过程模拟结构如图4所示,0.6 s时,楼房中部7~9轴各爆破层承重墙体被爆破拆除,中部楼体应力重新分布,由于楼板有一定的刚度,中部楼体并未开始解体。0.9 s时,5~6、10~11轴爆破楼层承重墙体失效,中部楼体跨度变大,各楼层开始向下塌落,两侧楼梯间平台薄弱点处被剪切破坏,在

楼梯间出现明显的竖向错位。同时,两侧转角走廊处的墙体出现裂缝。1.7 s时,两侧楼体爆破切口内承重墙逐排失效,开始向内倾倒。3 s时,中部楼体相继坍塌触地,两侧拐角楼体向内倾倒并叠加在中部楼体上,倒塌过程中相互碰撞,充分破碎;同时,两侧楼体继续向中部空地倾倒。6.5 s时,整个楼房构件完全触地,解体充分。

计算结果表明,该砖混楼房可按照设计向内倒塌,自中部切口开始爆破至完全触地总历时约 6.5 s。爆堆效果如图5所示,爆堆高 7.15 m。可以发现,中部楼体原地坍塌后会向四周挤压,图5(a)中挤压区域1、2、3,爆堆较楼房原址挤压距离最大位置主要在两侧拐角处(区域2和区域3);两侧楼体向内倾倒触地,无后坐现象,但两侧楼体顶层在中间空地区域相互接触碰撞后,爆堆向北侧挤压,且范围较远,最远距离达 4.64 m,见挤压区域4。因此,

需重点考虑这几处区域的倒塌空间的富余量。

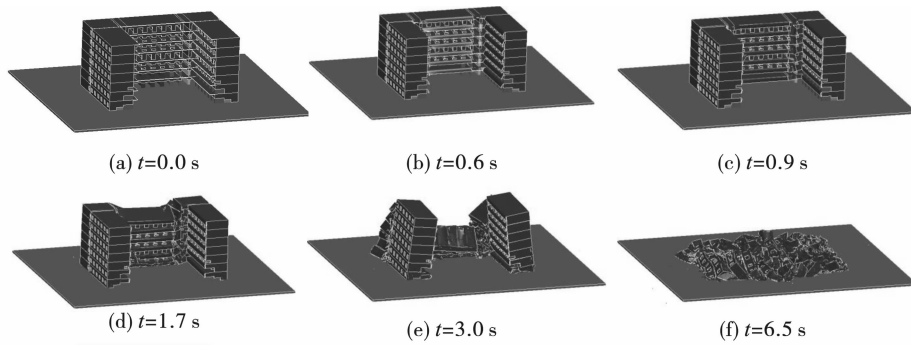


图4 楼房倒塌过程数值仿真

Fig. 4 Collapse process of building by numerical simulation

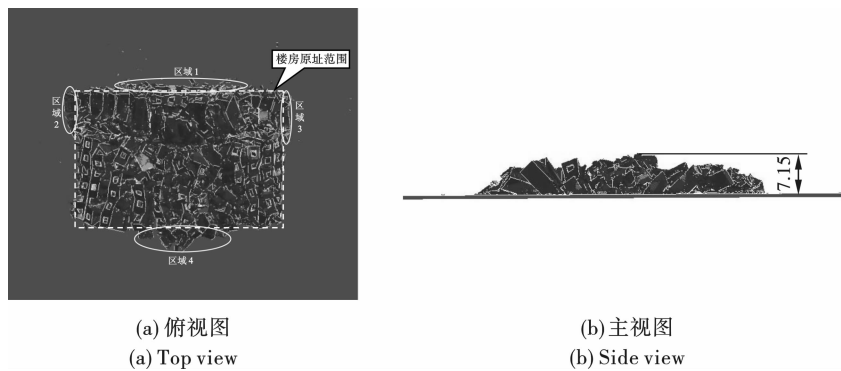


图5 楼房模拟爆堆形态及尺寸(单位:m)

Fig. 5 Shape and size of building blasting pile(unit:m)

3 实际爆破效果

起爆后,楼房中部5~10轴楼体原地向内坍塌,

坍塌过程中呈现明显的“M”形,随后东西两侧楼体同时向内倾倒,楼房按照设计方案向内倒塌,解体充分,整个倒塌解体过程历时约6s。



图6 楼房爆破拆除失稳倒塌过程

Fig. 6 Collapse process of building due to blasting demolition

对爆破拆除后的楼体进行航拍和实测,得到楼房的爆堆形态如图7所示。楼房爆破拆除后的主体都堆积在原址范围内,仅中部楼体南侧及两侧转角处有渣块溢出,未挤压到后方墙体。爆堆整体呈现中间低、两头高的形态,最大高度约6.5m。

楼房实际爆破效果与数值模拟效果的对比结果见表5,可以表明,该砖混楼房爆破切口的形成和闭合、大楼的倒塌过程等与数值模拟预测结果基本一致,塌落范围以及破坏特征较吻合,证明了砖混结构楼房逐段向内倾倒爆破拆除方法的合理性与可行性。

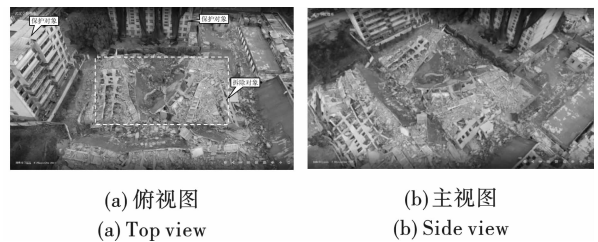


图7 楼房爆堆效果图

Fig. 7 Effect picture of blasting pile

表5 爆破效果对比
Table 5 Blasting effect comparison

对比项目	数值模拟结果	实际爆破效果
倒塌方式	与设计方案一致	与设计方案一致
倒塌触地时间/s	6.5	6.0
后坐情况	无后坐	无后坐
爆堆高度/m	7.15	6.5

4 结论

基于某7层“凹”型砖混结构楼房爆破拆除工程实践,提出一种“原地坍塌和定向倾倒相结合”的逐段向内倾倒爆破拆除方法。通过合理地控制爆破延期时间,使得中部楼体先触地,两侧楼体向内倾倒,大大减小了楼房塌落堆积范围,降低了触地冲击振动,为复杂环境下异型结构砖混楼房爆破拆除提供了新的设计思路。

(1)运用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,采用合理的材料模型及物理力学参数,较好的模拟了砖混结构楼房爆破拆除失稳倒塌过程,验证了该技术方案的可性,实现了爆破方案可视化设计。

(2)楼房倒塌后在其转角及南北两侧中部位置,渣块会溢出楼房原址范围,在实际爆破施工时,需重点考虑该位置的倒塌空间大小,并采取有效的安全防护措施。

(3)通过提高爆破切口高度,预留足够强度支撑体,楼房爆破拆除后未发生明显的后坐现象,且破碎解体充分。

参考文献 (References)

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2015:691-692.
- [2] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破,2019,36(2):1-8.
- [2] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting,2019,36(2):1-8. (in Chinese)
- [3] 王江平,王仕文. 5层砖混结构楼房的爆破拆除和效果分析[J]. 爆破,2011,28(4):73-76.
- [3] WANG Jiang-ping, WANG Shi-wen. Explosive demolition of 5-storeys brick-concrete structure building and result analysis[J]. Blasting,2011,28(4):73-76. (in Chinese)
- [4] 杨元兵,刘国军. “L”型砖混候车楼分体爆破拆除[J]. 爆破,2007,24(1):58-60.
- [4] YANG Yuan-bing, LIU Guo-jun. Part demolition of the “L” type brick-concrete structure of a waiting building [J]. Blasting,2007,24(1):58-60. (in Chinese)
- [5] 谢先启,贾永胜,韩传伟,等. 异形结构楼房纵向延时定向倾倒爆破技术[J]. 工程爆破,2010,16(4):58-60.
- [5] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, HAN Chuan-wei, et al. Longitudinal delay and directional collapse blasting technique for special shaped building [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4):58-60. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] XIE Xian-qi, WANG Hong-gang, LIU Chang-bang, et al. Demolition of two brick-concrete buildings by longitudinal delay and directional blasting[J]. Blasting,2011,28(2):87-89. (in Chinese)
- [7] 程良玉,吴建源,龙源. 8层受损砖混结构楼爆破拆除的数值模拟[J]. 爆破,2015,32(3):70-73.
- [7] CHENG Liang-yu, WU Jian-yuan, LONG Yuan. Numerical simulation of explosive demolition of 8-storey damaged brick and concrete structure building[J]. Blasting,2015,32(3):70-73. (in Chinese)
- [8] 罗福友,王云茂,刘成敏,等. 分区延时技术在砖混结构楼房爆破中的应用[J]. 工程爆破,2019,25(3):43-48.
- [8] LUO Fu-you, WANG Yun-mao, LIU Cheng-min, et al. Application of zone delay technology in blasting of brick-concrete structure building [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(3):43-48. (in Chinese)
- [9] 马世明,余兴春,王新阁. 抗震加固砖混楼房拆除的控制爆破技术[J]. 工程爆破,2019,25(5):63-68.
- [9] MA Shi-ming, YU Xing-chun, WANG Xin-ge. Controlled blasting demolition of aseismatic reinforced brick masonry building [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(5):63-68. (in Chinese)
- [10] 杨军,杨国梁,张光雄,等. 建筑结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [11] 孙金山,贾永胜,姚颖康,等. 拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的建模及参数取值方法[J]. 爆破,2020,37(3):115-121.
- [11] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Simplification and parameter selection of reinforced concrete component for numerical simulation of demolition blasting [J]. Blasting, 2020, 37(3):115-121. (in Chinese)
- [12] LSTC. LS-DYNA version 970 keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation,2014.