

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.014

山城地区框剪结构群楼安全高效爆破拆除*

贾永胜^{1,2}, 刘桂勇³, 黄小武², 刘伦志⁴, 伍岳², 陈港⁴

(1. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056; 2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056;
3. 重庆市公安局治安总队, 重庆 401147; 4. 云阳县公安局治安大队, 云阳 404500)

摘要: 山城地区的房屋大多依山而建, 具有地势高低不平、建筑布置错落和周边环境复杂等特点。重庆市某地区有10栋框剪结构违章建筑需要拆除, 因施工安全、进度等要求, 确定选用单切口定向爆破拆除方式。结合爆破拆除工程实践, 根据10栋违建群楼的平面位置、空间分布特点和周边环境, 提出了相应的总体爆破方案, 优化施工组织, 在15d内分3次安全高效地完成了群楼爆破拆除任务。针对影响楼房倒塌及爆破效果的高陡岩质边坡、山谷和陡坎等环境因素, 通过优化爆破切口、预留缓冲层, 合理设计爆破孔网参数等技术手段, 可靠保证了楼房的定向倒塌。通过合理设计起爆网路的分区和延时, 并高效地组织组网连接操作, 实现了大规模工业电子雷管同网延时可靠起爆。最终有效控制了楼房的倒塌堆积范围和爆破有害效应, 各楼房倒塌解体充分, 爆堆集中, 周边各类保护对象均安然无恙。工程实践结果表明: 工业电子雷管起爆网路可满足多单元、多层次的大规模起爆网路需求, 为类似工程提供了重要借鉴。

关键词: 爆破拆除; 框剪结构; 工业电子雷管; 爆破效果

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)01-0098-08

Efficient Blasting Demolition of Frame-shear Structure Buildings in Mountain City

JIA Yong-sheng^{1,2}, LIU Gui-yong³, HUANG Xiao-wu², LIU Lun-zhi⁴, WU Yue², CHEN Gang⁴

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China;
2. Wuhan Explosion & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China;
3. Security Corps of Chongqing Municipal Public Security Bureau, Chongqing 401147, China;
4. Security Brigade of Yunyang District Municipal Public Security Bureau, Yunyang 404500, China)

Abstract: Most of the buildings in the mountain city area are built on leaning the mountains, with the characteristics of uneven terrain, scattered architectural layout, scattered layout of buildings and complex surrounding environment. In a certain area of Chongqing, there were 10 frame-shear wall structure illegal buildings with a frame-shear structure that need to be demolished. Due to the requirements of construction safety and progress, single incision directional blasting demolition was determined and adopted. Combined with the practice experience of blasting demolition project, according to the plane position, spatial distribution characteristics and surrounding environment of 10 illegal buildings, the corresponding overall blasting scheme was put forward according to the plane position layout, spatial distribution characteristics and surrounding environment of the 10 illegal buildings. And optimi-

收稿日期 (Date of reception): 2023-10-30

网络首发日期 (Published online): 2024-01-03

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.

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目 (2023-XZ-35); 湖北省重点研发计划项目 (2020BCA084)

About the author: JIA Yong-sheng (1970-), male, professor, Ph. D, mainly engaged in engineering blasting research and practice work, (E-mail) jason03566@163.com.

Fund Programs: Strategic Research and Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (2023-XZ-35), Key Research and Development Program of Hubei Province (2020BCA084)

zing construction organization, the blasting demolition task of this building group is completed safely and efficiently in three times within 15 days under an optimizing construction organization. In view of the environmental factors such as high and steep rock slopes, valleys and scarps that which affect the collapse of the building and the blasting effect, the directional collapse of the buildings can be reliably guaranteed by optimizing the blasting incisions, reserving buffer layers, and rationally designing blasting parameters. Through the rational reasonable design of the partition sections and delay times of firing circuit the initiation network, and efficient organization of the circuit connection operations, the reliable delay initiation of large-scale industrial electronic detonator network is realized. Finally, the collapse accumulation range and blasting harmful effects of building are effectively controlled. The collapse of each building is fully disintegrated, the blasting heap piles fragments are concentrated, and all kinds of surrounding protection objects are safe. The engineering practice results show that the initiation network of industrial electronic detonators initiation network can meet the needs of multi-unit and multi-level large-scale initiation network, which provides an important reference for similar projects.

Key words: blasting demolition; frame-shear structure; industrial electronic detonator; blasting effect

随着我国城镇化进程不断推进、城中村改造不断加速,一些老旧楼房都将面临拆除重建。同时,自全面实施依法治国战略以来,常有违法、违建房屋需要安全快速拆除。值此新形势下,爆破拆除技术因其具有安全、经济、高效等优点,依然是拆除高层楼房和大规模群楼的首选技术^[1]。历经近几十年的革新与发展,爆破拆除理论与技术取得了丰硕的研究成果。有关学者和工程技术人员创新了楼房爆破拆除倒塌设计方法和数值模拟手段^[2-5]。先后发展了定向倾倒、原地坍塌、逐跨坍塌、折叠爆破和空中解体等多种楼房倒塌形式^[6-8],并在多个实际工程中成功应用。对爆破飞石、塌落振动等爆破有害效应进行了深入的研究^[9-11],并提出了行之有效的控制措施。

相比平原地区,在山城地区实施大规模群楼安全高效爆破拆除工程,具有以下特点和难点:(1)房屋建筑依山而建,布置错落,地形起伏,须综合考虑地形、地貌的影响;(2)楼房数量众多,结构形式复杂,须详细优化爆破设计方案;(3)周边房屋密集,环绕山林、道路、坟墓等保护目标,须对倒塌堆积范围和爆破有害效应等进行严格控制;(4)薄壁剪力墙结构的布孔数量多,工业电子雷管用量大,须合理设计起爆网路,确保大规模工业电子雷管起爆网路的

的可靠性。(5)拆除工期紧张,施工任务量重,须优化爆破设计方案并组织安全高效施工。除了需要克服上述难点之外,工业电子雷管才刚刚兴起^[12-14],在实际工程中大规模应用的经验尚不成熟,因此对群楼爆破拆除精细化设计和高效施工提出了更高的要求。

结合重庆市某山城地区 10 栋框-剪结构楼房爆破拆除工程,针对群楼的平面位置及空间分布状态,分别设计了各楼房的爆破参数。采用大规模工业电子雷管起爆网路,合理组织施工,安全高效地完成了群楼的爆破拆除任务,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

爆破拆除的群楼位于重庆市某山城地区,由云顶酒店 19、20 号两栋楼房,云端花园 12、13-1、13-2 号三栋楼房和花漾山谷五栋楼房组成。10 栋楼房均为框架-剪力墙结构,总建筑面积为 43 755.47 m²。群楼主要集中在 3 处位置,其中,云顶酒店 2 栋楼房距离云端花园 3 栋楼房 3.6 km,距离花漾山谷 5 栋楼房 5.1 km。根据楼房的平面位置及空间分布情况,群楼拆除分 3 次实施爆破。项目从方案设计、行政审批、施工准备到爆破完毕,总工期只有 15 d。见图 1。



图1 爆破拆除的群楼

Fig. 1 Group Buildings to be demolished by blasting

1.1 周边环境

云顶酒店 2 栋楼房毗邻岐山草场风景区(4A 级),四周有已建成的建筑群。19 号楼位于 20 号楼东侧,楼间距 8.5 m。19 号楼东侧距离建筑群最近楼房 32 m,地下预埋有天然气管道、水管、通信等设施;楼房南侧为山体,距离架空电线 25 m,距离小区内部道路 7 m;西侧距离 2 处土坯房 137 m;北侧为小区居民楼群,最近距离 6 号楼 28 m。

云端花园 13-1、13-2 号 3 栋楼紧邻,13-1 号楼

距 12 号楼 8.5 m。13-2 号楼东侧距离山体最近 2.0 m;南侧为小区内部道路及空地,距离山体边坡最近 28.0 m;西侧距离 11 号楼 8.5 m;北侧距离山体 2.0~3.5 m。

花漾山谷 5 栋楼房紧邻,东侧为山坡林地,林地下方有 3 户土坯房,距离爆破楼房距离 160 m;南侧为林地和建筑空地;西侧距离小区道路 2 m,距离 4 层楼房 11.5 m;北侧为山坡林地,距离装修中的酒店 45 m。见图 2。



图 2 周边环境情况

Fig. 2 Surrounding environment

1.2 建筑结构

云顶酒店 2 栋楼房结构特征相同,均为 9 层框架-剪力墙结构(20 号楼局部为 11 层),长 34.6 m、宽 20.1 m、高 29.4 m,主要立柱尺寸为 400 mm × 600 mm、300 mm × 600 mm、300 mm × 700 mm、400 mm × 700 mm,剪力墙厚度为 200 mm 和 300 mm,总建筑面积 10214.3 m²。

云端花园 3 栋楼均为 8 层框架-剪力墙结构,楼房结构特征相同,长 35.6 m、宽 16.4 m、高 28.5 m,主要立柱尺寸为 350 mm × 500 mm 和 400 mm × 500 mm,剪力墙厚度为 200 mm,总建筑面积 11455.44 m²。

花漾山谷 5 栋楼房均为 15 层框架-剪力墙结构,单栋楼长 20.5 m、宽 15.6 m、高 49.6 m,主要立柱尺寸为 500 mm × 500 mm、500 mm × 800 mm、600 mm × 800 mm、800 mm × 800 mm 和 700 mm × 1200 mm,剪力墙厚度 200 mm,总建筑面积 22085.73 m²。楼房 -1F 和 -2F 为框架结构,3F~12F 为框架-剪力墙结构;-1F 为地下车库层,层高 4.5 m;-2F 为架空层,无楼板,且沿山坡自南向北层高逐渐减低。各楼房平面结构见图 3~图 5,图中长度单位均为 mm。

2 难点分析

综合考虑楼房的结构特征和周边环境情况,本项目在技术设计、施工组织和外围协调方面具有以下特点和难点:

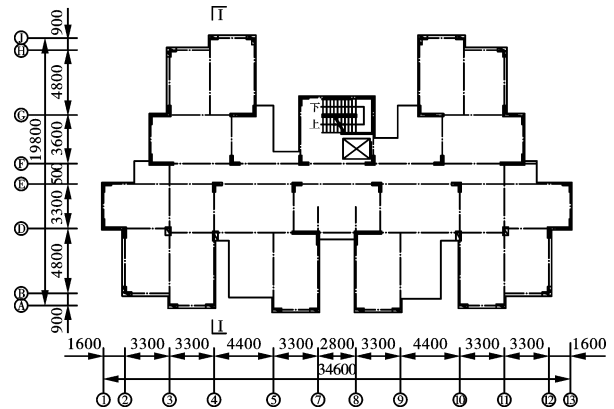


图 3 云顶酒店楼房平面结构(单位:mm)

Fig. 3 Plane structure of buildings in Yunding Hotel(unit:mm)

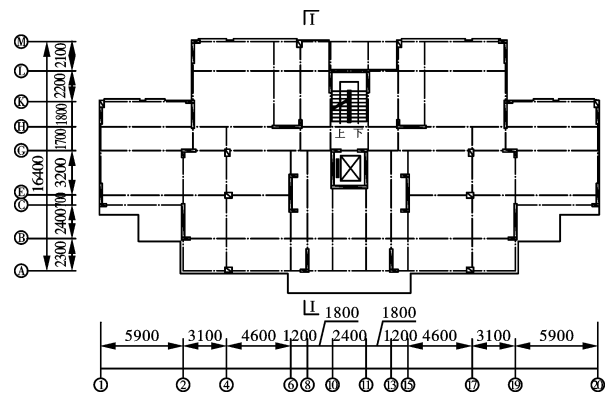


图 4 云端花园楼房平面结构(单位:mm)

Fig. 4 Plane structure of buildings in Yunduan Garden(unit:mm)

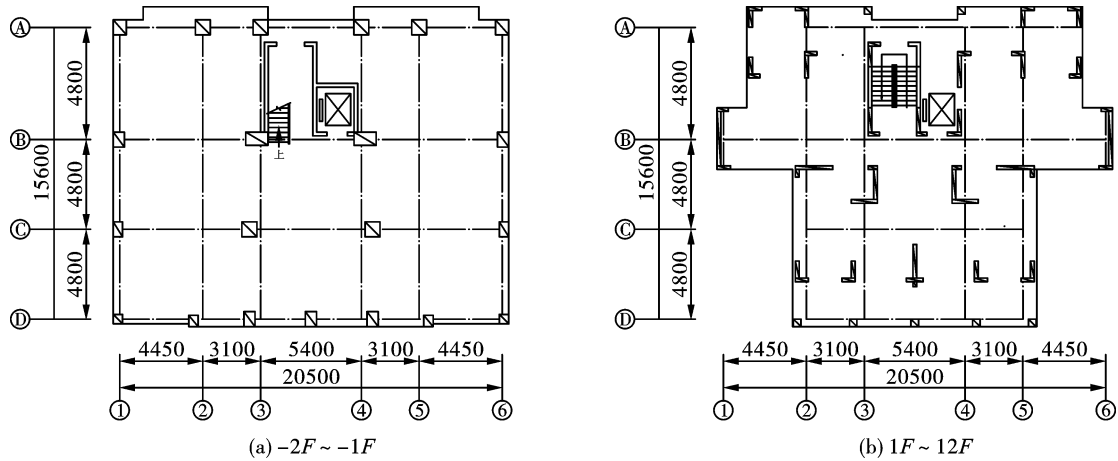


图 5 花漾山谷楼房平面结构(单位:mm)

Fig. 5 Plane structure of buildings in Huayang Valley(unit:mm)

(1)项目毗邻国家级地质公园风景区,时值旅游旺季,社会关注度高,安全文明施工要求高。

(2)项目的工期紧、任务重,施工组织难度大。

(3)楼房承重构件主要是薄壁剪力墙结构,炮孔数量多,预处理、装药、联网及防护工作量大,倒塌后不易充分解体。

(4)云顶酒店 2 栋楼房的高宽比小,采用单切口定向倒塌方式失稳困难,解体效果往往不理想;且在倒塌前方有 3 m 左右高度的陡坎,会对楼房定向倾倒产生阻碍作用。

(5)云端花园 12 号楼西侧距离 11 号楼仅 8.5 m,楼体所在高程相差 8 m,且楼房背靠高陡岩

质边坡,需严格控制楼房倒塌触地过程中诱发的冲击荷载和振动效应。

(6)花漾山谷 5 栋楼房依山而建,倒塌前方为陡峭的山谷,后方紧邻砌石道路,距离保留楼房仅 11.5 m,须严格控制楼体定向倒塌过程中的后坐。

3 爆破方案设计

3.1 总体爆破方案

综合考虑群楼的地理位置和工期要求,总体采用“单切口定向倾倒”分 3 次实施爆破的拆除方案。具体结合楼房的结构特征和周边环境情况,设计如下爆破方案。见表 1。

表 1 群楼总体爆破方案

Table 1 Overall blasting scheme of group the buildings

爆破次序	分项工程	施工工期/d	爆破方案
第 1 次爆破	云顶酒店 2 栋楼房	5	20 号楼 19 号楼,楼栋之间延时 700 ms,大切口依次向南定向倒塌。
第 2 次爆破	云端花园 3 栋楼房	7	13-2 号楼 13-1 号楼 12 号楼,楼栋之间延时 200 ms,500 ms,依次向南定向倒塌。
第 3 次爆破	花漾山谷 5 栋楼房	8	1 号楼 2 号楼 3 号楼 4 号楼 5 号楼,楼栋之间延时 500 ms,依次向东定向倒塌。

注:为节省施工工期,3 个分项工程的预拆除、钻孔、防护等爆破准备工作组织平行交叉作业。

3.2 爆破切口设计

云顶酒店 2 栋楼房爆破切口布设在 1~5F 层,切口设计如图 6(a)所示,切口区域内立柱破坏高度见表 2。云端花园 3 栋楼房爆破切口布设在 1~4F 层,切口设计如图 6(b)所示,切口区域内立柱破坏高度见表 3。花漾山谷 5 栋楼房采用“喇叭型”爆破切口,切口布设在 -1~2F 层,切口设计如图 6(c)所示,切口区域内立柱破坏高度见表 4。

表 2 云顶酒店楼房爆破切口区域及立柱破坏高度(单位:m)

Table 2 Blasting incision and damage height of columns in buildings of Yunding Hotel(unit:m)

楼层	轴号					
	A	D	E	F	G	J
5F	-	-	-	0.9	0.9	0.9
4F	-	-	-	0.9	0.9	0.9
3F	-	-	0.9	0.9	1.2	1.2
2F	-	-	0.9	1.2	1.5	1.5
1F	-	0.9	1.5	1.5	2.1	2.1

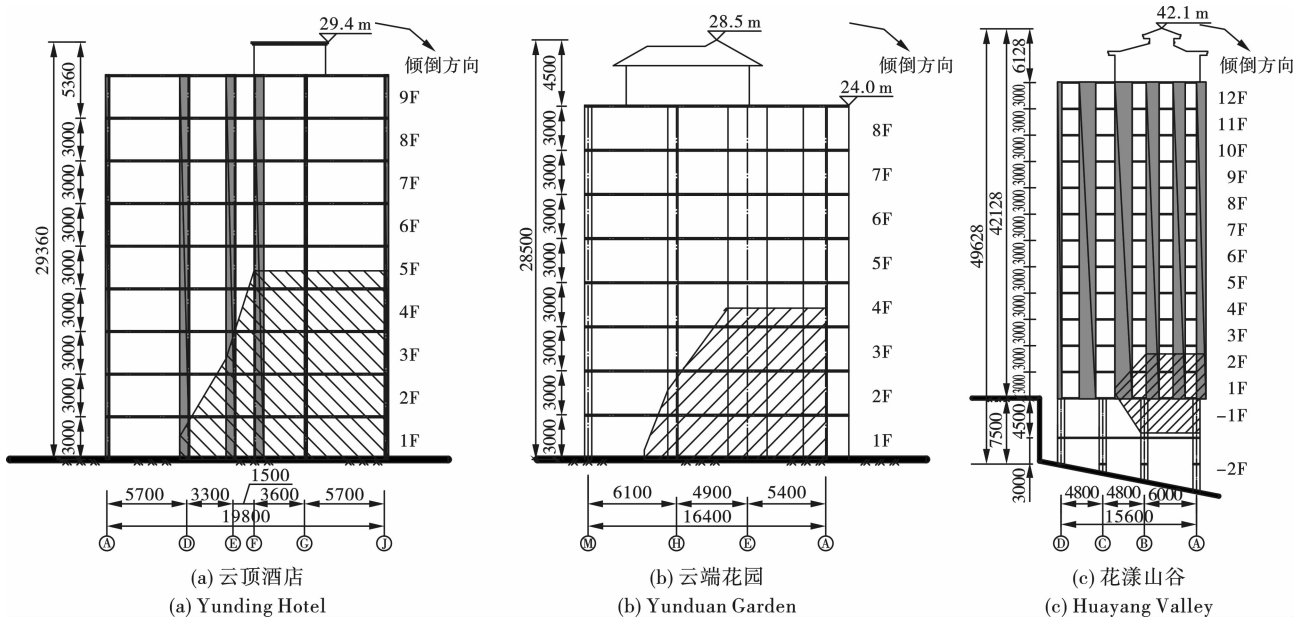


图6 爆破切口(单位:mm)

Fig. 6 Blasting incisions(unit:mm)

表3 云端花园楼房爆破切口区域及立柱破坏高度(单位:m)
Table 3 Blasting incision and damage height of columns in buildings of Yunduan Garden(unit:m)

楼层	轴号				
	M	L	H	B	A
4F	-	-	-	0.9	0.9
3F	-	-	-	1.2	1.2
2F	-	-	0.9	1.5	1.5
1F	-	0.6	1.5	2.1	2.1

表4 花漾山谷楼房爆破切口区域及立柱破坏高度(单位:m)
Table 4 Blasting incision and damage height of columns in buildings of Huayang Valley(unit:m)

楼层	轴号			
	D	C	B	A
2F	-	-	1.2	1.2
1F	-	0.9	1.5	1.5
-1F	-	-	2.1	2.1

3.3 预处理方案

为确保楼房顺利倒塌,1~2层除支撑区外,其余内墙、外墙全部拆除,切口范围内3层以上的内墙全部拆除,外墙保留。电梯井、楼梯间等部位的剪力墙采取“化墙为柱”的方式进行处理。将云顶酒店2栋楼房1~2F楼梯全部拆除,3~5F楼梯弱化处理;云端花园3栋楼房和花漾山谷5栋楼房爆破切口内的所有楼梯进行弱化处理。

3.4 爆破参数设计

钻孔采用梅花形布孔形式,炮孔直径为40mm,采用 $\phi 32\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的2号岩石乳化炸药进行

连续装药。群楼主要立柱及剪力墙爆破参数设计,如表5所示。

3.5 起爆网路设计

3次爆破均采用工业电子雷管起爆网路,根据每次爆破的起爆网路设计方案,将各栋楼房的雷管进行分区连接、扫描注册和精准赋时,再通过级联网路组成一个完整的起爆网路(见图7)。根据大规模起爆网路试验的相关经验^[15],每200~400发电子雷管连接1台子机起爆器形成一个起爆网路子网路。最后通过一台主机起爆器级联各个子机起爆器成一个起爆网路总网路,控制多台子机起爆器同时下达起爆指令。3次爆破的起爆网路设计方案如下:

(1)云顶酒店2栋楼房:20号楼19号楼,楼栋之间延时700ms;单栋楼房层间自下而上依次延时100ms;层内立柱(剪力墙)每排设为一响,响序之间依次延时200ms、500ms、500ms和500ms。

(2)云端花园3栋楼房:13-2号楼13-1号楼12号楼,楼栋之间依次延时200ms、500ms;单栋楼房层间自下而上依次延时50ms;层内立柱(剪力墙)每排设为一响,响序之间依次延时200ms、500ms、500ms和500ms。

(3)花漾山谷5栋楼房:1号楼2号楼3号楼4号楼5号楼,楼栋之间依次延时500ms;单栋楼层之间自下而上依次延时300ms、100ms;层内立柱(剪力墙)每排设为一响,响序之间依次延时500ms、500ms。

表 5 爆破参数
Table 5 Blasting parameters

构件类型	尺寸/ mm	最小抵抗线 w/cm	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
立柱	400 × 600	20	30	/	37	1389	100	单排布孔
	300 × 600	15	30	/	35	1389	75	单排布孔
	300 × 700	15	30	30	18	1481	40	梅花形布孔
	400 × 700	20	30	/	42	1428	120	单排布孔
	350 × 500	17.5	30	/	30	1429	75	单排布孔
	400 × 500	20	30	/	30	1250	75	单排布孔
	500 × 500	25	30	/	32	1333	100	单排布孔
	500 × 800	25	30	/	50	1250	150	单排布孔
	600 × 800	30	30	/	52	1389	200	单排布孔
	800 × 800	40	30	/	56	1563	300	单排布孔
剪力墙	700 × 1200	35	30	/	81/70	1587	400/200	梅花形布孔
	200	10	30	30	13	1667	30	梅花形布孔
	300	15	30	30	18	1481	40	梅花形布孔

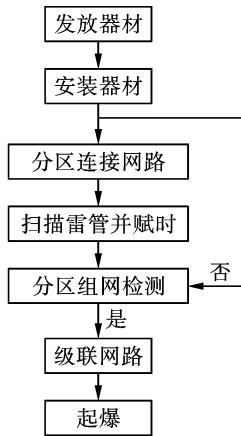


图 7 起爆网路操作流程

Fig. 7 Operation process of firing initiation network circuit

4 结果与讨论

10 栋楼房根据山城地区的地理分布情况,先后

分 3 次爆破,均按设计方向顺利倒塌,安全高效地完成了拆除任务。见图 8。通过设计合理的爆破切口和起爆时差,有效克服了地势起伏不平、框剪结构难以解体的难题。3 次爆破累计使用了 18 667 发工业电子雷管,单次起爆电子雷管数量最大达 6861 发,单次最多使用了 28 台起爆器(见表 6)。通过设计合理的网路分区,并有序地组织网路连接,实现了大规模电子雷管起爆网路可靠准爆。综合采用“覆盖防护与近体防护相结合”等多项技术,有效控制了触地冲击振动和个别飞散物。经爆后检查,各楼房解体充分,爆堆集中,周边各类保护对象均安然无恙。

表 6 工业电子雷管用量统计

Table 6 Usage statistics of industrial electronic detonators

分项工程	雷管总数	起爆器数量
云顶酒店	6350 发	23 台子机 + 1 台主机
云端花园	6861 发	27 台子机 + 1 台主机
花漾山谷	5456 发	19 台子机 + 1 台主机



(a) 云顶酒店 2 栋楼房
(a) 2 buildings in Yunding Hotel



(b) 云端花园 3 栋楼房
(b) 3 buildings in Yunduan Garden



(c) 花漾山谷 5 栋楼房
(c) 5 buildings in Huayang Valley

图 8 爆破效果

Fig. 8 Blasting effect

5 结论

通过本次山城地区 10 栋楼房爆破拆除工程实

践,可以总结得到以下结论:

(1) 单切口定向倒塌爆破拆除技术具有设计简单、施工量少和成本较低等优点,适用于安全快速地

爆破拆除周边环境相对简单的建(构)筑物。

(2)山城地区实施群楼爆破拆除要充分考虑高陡边坡、山谷和陡坎等对爆破效果的影响,采用优化爆破切口、合理设置时差和预留缓冲层等技术措施,可有效控制冲击振动效应和倒塌堆积范围。

(3)框剪结构群楼爆破拆除需要根据其结构特点,在确保楼房稳定的前提下充分做好预拆除处理,以减少钻孔数量和炸药用量。同时,需要进一步优化组织协调工作,提高施工效率。

(4)工业电子雷管起爆网路具有时间设置灵活、组网效率高、能可靠检测和延时精度高等优点,可满足多单元、多层次的大规模起爆网路需求,为拆除爆破的起爆网路优化提供了更大的设计空间。

参考文献 (References)

- [1] 谢先启. 精细爆破发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11): 14-19.
- [1] XIE Xian-qi. Precision blasting, current status and its prospective[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(11): 14-19. (in Chinese)
- [2] 孙金山, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土楼房双向折叠爆破设计方法[J]. 爆破, 2022, 39(3): 116-123.
- [2] SUN Jin-shan, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Design method for bidirectional fold implosion of high-rise reinforced concrete buildings[J]. Blasting, 2022, 39(3): 116-123. (in Chinese)
- [3] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Experimental investigation of stress transients of blasted RC columns in the blasting demolition of buildings[J]. Engineering Structures, 2020, 210(C): 1-10.
- [4] 徐鹏飞, 王磊, 张何, 等. 钢混本构模型及其在拆除爆破中的应用[J]. 工程爆破, 2020, 26(6): 56-63.
- [4] XU Peng-fei, WANG Lei, ZHANG He, et al. Constitutive model of reinforced concrete and its application in demolition blasting[J]. Engineering blasting, 2020, 26(6): 56-63. (in Chinese)
- [5] 费鸿禄, 张志强, 包士杰, 等. 框-筒结构楼房折叠爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 134-142.
- [5] FEI Hong-lu, ZHANG Zhi-qiang, BAO Shi-jie, et al. Numerical simulation study on folding blasting demolition of frame tube building[J]. Blasting, 2023, 40(3): 134-142. (in Chinese)
- [6] 刘昌邦, 贾永胜, 黄小武, 等. 框架结构楼房逐跨向内倾倒塌爆破拆除[J]. 爆破, 2020, 37(4): 81-88.
- [6] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Frame structure building span-by-span inward collapse due to blasting demolition[J]. Blasting, 2020, 37(4): 81-88. (in Chinese)
- [7] 王贵, 王渊, 孙国利, 等. 复杂环境下低层框架结构楼房拆除爆破[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 68-72.
- [7] WANG Gui, WANG Yuan, SUN Guo-li, et al. Demolition blasting of low-rise frame structure building in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 68-72. (in Chinese)
- [8] 贾永胜, 刘昌邦, 伍岳, 等. 房屋建筑物纵向逐跨坍塌爆破拆除关键技术探讨[J]. 爆破, 2022, 39(4): 10-16.
- [8] JIA Yong-sheng, LIU Chang-bang, WU Yue, et al. Discussion on key technology of longitudinal span by span collapse blasting demolition of building[J]. Blasting, 2022, 39(4): 10-16. (in Chinese)
- [9] 陈思佑, 姚颖康, 谢先启, 等. 钢混立柱爆破个别飞散物运动特性与水袋防护效果[J]. 工程爆破, 2023, 29(4): 94-100.
- [9] CHEN Si-you, YAO Ying-kang, XIE Xian-qi, et al. Motion characteristics of individual blasting flying rock and protective effect of water bag in reinforced concrete column blasting[J]. Engineering blasting, 2023, 29(4): 94-100. (in Chinese)
- [10] 黄小武, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物试验研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 13-18.
- [10] HUANG Xiao-wu, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Experimental study on failure process and flyrock of reinforced concrete columns induced by blasting[J]. Blasting, 2020, 37(1): 13-18. (in Chinese)
- [11] 徐洋, 谢全民, 梅比, 等. 远程测振系统在群楼拆除爆破振动监测中的应用[J]. 工程爆破, 2019, 25(6): 80-84.
- [11] XU Yang, XIE Quan-min, MEI Bi, et al. Application of remote vibration measurement system in monitoring the vibration of demolition blasting of group-buildings[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 80-84. (in Chinese)
- [12] 冷振东, 范勇, 涂书芳, 等. 电子雷管起爆技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 142-154.
- [12] LENG Zhen-dong, FAN Yong, TU Shu-fang, et al. Electronic detonator initiation technology: Research progress and development strategies[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 142-154. (in Chinese)
- [13] 周浩仓. 电子雷管在异型楼房拆除爆破中的应用[J]. 工程爆破, 2019, 25(6): 44-50.
- [13] ZHOU Hao-chang. Application of electronic detonator in demolition blasting of special shaped buildings[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 44-50. (in Chinese)

- [14] 丁林敏,曾国飞,吴著明. 电子雷管在密集建筑物拆除爆破中的应用[J]. 采矿技术,2018,18(5):106-109.
- [14] DING Lin-min, ZENG Guo-fei, WU Zhu-ming. Application of electronic detonator in blasting demolition of dense buildings[J]. Mining Technology, 2018, 18(5): 106-109. (in Chinese)
- [15] 黄小武,贾永胜,孙金山,等. 工业电子雷管在拆除爆破中的应用[J/OL]. 工程爆破;1-9. [2023-10-25]. <https://doi.org/10.19931/j.EB.20230170>.
- [15] HUANG Xiao-wu, JIA Yong-sheng, SUN Jin-shan, et al. Application of industrial electronic detonator in demolition blasting[J/OL]. Engineering Blasting;1-9. [2023-10-25]. <https://doi.org/10.19931/j.EB.20230170>. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第43页)

- [14] JI L, ZHOU C B, LU S W, et al. Numerical studies on the cumulative damage effects and safety criterion of a large cross-section tunnel induced by single and multiple full-scale blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12):6393-6411.
- [15] LYU G P, ZHOU C B, JIANG N. Experimental and numerical study on tunnel blasting induced damage characteristics of grouted surrounding rock in fault zones[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 56(1):603-617.
- [16] WU T Y, YU H G, JIANG N, et al. Theoretical analysis of the deformation for steel gas pipes taking into account shear effects under surface explosion loads[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1):8658.
- [17] WANG Z M, YANG J H, ZHANG T, et al. PPV and frequency characteristics of tunnel blast-induced vibrations on tunnel surfaces and tunnel entrance slope faces[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021:5527115.
- [18] ZHU B, JIANG N, ZHOU C B, et al. Dynamic interaction of the pipe-soil subject to underground blasting excavation vibration in an urban soil-rock stratum[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 129:104700.
- [19] 张震,周传波,路世伟,等. 超浅埋地铁站通道爆破暗挖地表振动传播特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8):2119-2125.
- [19] ZHANG Zhen, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Propagation characteristics of ground vibration induced by subsurface blasting excavation in an ultra-shallow buried underpass[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(8):219-2125. (in Chinese).
- [20] JIANG N, GAN T, ZHOU C B, et al. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 81:590-601.
- [21] 吉凌,周传波,张波,等. 大断面隧道爆破作用下围岩动力响应特性与损伤效应研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(7):161-168.
- [21] JI Ling, ZHOU Chuan-bo, ZHANG Bo, et al. Study on dynamic response and damage effect of surrounding rock in large tunnel under blasting excavation[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7):161-168. (in Chinese)
- [22] JI L, ZHOU C B, LU S W, et al. Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 147:104882.
- [23] JTGD70—2004. 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [23] JTGD70—2004. Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communication Press, 2004. (in Chinese)
- [24] 宋林,闫玉湛,韩八晓,等. 非线性变形节理中纵波传播特性的理论研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2):133-140, 236.
- [24] SONG Lin, YAN Yu-zhan, HAN Ba-xiao, et al. Theoretical research into the wave propagation of P-wave across rock joint with nonlinear deformation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(2):133-140, 236. (in Chinese)
- [25] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [25] GB 6722—2014 State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)

英文编辑:陈东方