

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.002

钢筋混凝土立柱爆破破坏过程及个别飞散物试验研究*

黄小武^{1,2,3}, 谢先启^{2,3}, 贾永胜^{2,3}, 姚颖康^{2,3}, 孙金山², 韩宇^{2,3}

(1. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065;

2. 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056; 3. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056)

摘要: 爆破拆除实践中存在保守设计、过度防护的现象,其根源是不能确定炸药能量“供”与“求”的平衡点。为研究多药包共同作用下钢筋混凝土立柱爆破破坏及个别飞散物运动过程,在野外爆破试验场开展了多组立柱爆破试验。高速摄影观测及破碎碎块分析结果表明:高段位孔内雷管的名义延期时间的误差影响立柱的爆破破坏过程;爆破个别飞散物在100 ms的观测时间内的运动速度与时间呈线性关系,抛掷速度为10~20 m/s,抛掷方向以水平方向为主。在工程实践中,建议将爆破对象外围构件作为防护重点,以柔性防护为主、刚性防护为辅,提高项目经济效益与施工效率。

关键词: 钢筋混凝土立柱; 爆破拆除; 个别飞散物; 高速摄影

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0013-06

Experimental Study on Failure Process and Flyrock of Reinforced Concrete Columns induced by Blasting

HUANG Xiao-wu^{1,2,3}, XIE Xian-qi^{2,3}, JIA Yong-sheng^{2,3}, YAO Ying-kang^{2,3}, SUN Jin-shan², HAN Yu^{2,3}

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Wuhan 430056, China;

3. Wuhan Explosions & Blasting Co Ltd, Wuhan 430056, China)

Abstract: Conservative design and over-protection are existing in demolition blasting practice. The essential reason is that the balance between “supply” and “demand” of explosive energy cannot be determined. In order to study the blasting damage of reinforced concrete columns and the movement of flyrock induced by multiple charge packs, blasting experiments on groups of columns are carried out. High-speed camera observation and fragment analysis show that: the error of high nominal delay time of the detonators in the hole affects the blasting failure process of the column. The movement velocity of some scattered objects during observation time of 100 ms shows a linear relationship with time. The velocity is 10~20 m/s, and the throwing direction is mainly in the horizontal direction. In order to improve the economic benefit and construction efficiency, the peripheral components of blasting objects are suggested be taken as the key point of protection, with flexible protection as the main and rigid protection as the auxiliary in engineering practice.

Key words: reinforced concrete columns; blasting demolition; flyrock; high-speed photographic

收稿日期: 2019-10-29

作者简介: 黄小武(1989-), 男, 工程师、博士研究生, 主要从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) 840022742@qq.com。

通讯作者: 谢先启(1960-), 男, 教授级高级工程师、中国工程院院士, 主要从事工程爆破理论与技术研究, (E-mail) xxqblast@163.com。

基金项目: 中国工程院战略咨询项目

钻孔爆破技术的历史悠久,它作为爆破工程中非常重要的一门施工技术,广泛应用于道路、交通、矿业、水利水电等各行各业,有力地推动着国民经济的发展。然而,由于对炸药能量的释放在超动态应变率荷载作用下

的破碎机理认识不足,爆破技术尚不能完全实现爆破对象“破而不离、碎而不飞”的目标。爆破工程领域内依然普遍存在着诸如振动、粉尘和个别飞散物等爆破有害效应,给公共安全带来了极大的安全隐患,影响着居民的正常生活,阻碍着爆破技术的进一步发展。

在多项爆破有害效应之中,个别飞散物是导致爆破事故的主要因素,倍受爆破从业者关注。尤其是在环境复杂的城市拆除爆破工程中,个别飞散物一直是安全防护的重中之重。一般认为,高速、高压的爆轰波使孔壁附近的混凝土与钢筋瞬间粉碎、破裂,随后在钢筋混凝土构件表面反射为拉伸波,导致混凝土剥离、抛掷。在工程实践中,一方面,我们需要施加充分的炸药能量使建(构)筑物承重构件中钢筋笼内的混凝土完全抛出,使整体结构失去支撑,继而在重力作用下失稳垮塌;另一方面,我们又在爆破构件上包裹大量的竹跳板、木模板、安全网等防护材料,以期对爆破个别飞散物进行严格控制,确保临近设施不被破坏。两者看似矛盾,其问题根源就是不能确定炸药能量“供”与“求”的平衡点。在建筑物爆破拆除施工实践中^[1-3],普遍存在着保守设计、过度防护的现象。因此,深入研究钢筋混凝土立柱爆破破坏及个别飞散物的抛掷过程,对拆除爆破技术设计与安全施工管理有重要的指导意义。

多年来,国内外学者基于理论分析、数值模拟、模型试验和现场实践,围绕爆破个别飞散物的产生原因及控制措施开展了广泛的研究。李振^[4]、林大

能和 Sasa Stojadinovic 等根据弹道理论、高速摄影、计时器测定等方法^[5,6],获取了爆破个别飞散物初始加速度、速度、空气阻力系数等关键数据,建立了最大飞行距离的计算公式。徐千军等采用 Ansys Autodyn-3D 有限元程序分析了钢筋混凝土桥墩爆破个别飞散物情况^[7],得到了适合的爆破单耗参数与有效的控制飞散物防护措施。张九龙^[8]、高旭^[9]、李本伟和 Vladislav Kecojevic 等总结了爆破个别飞散物事故的案例^[10,11],对影响爆破飞散物的因素进行了分类,从爆破设计、安全管理等角度提出了避免爆破飞散物事故的对策。总的来说,钻孔爆破条件下钢筋混凝土材料破坏过程的认识尚不深入^[12],关于拆除爆破工程中个别飞散物的现场试验也不多见,有必要进一步深入研究。

1 钢筋混凝土立柱爆破试验

技术团队在野外爆破试验场浇筑了10根高4 m,截面尺寸不同的钢筋混凝土立柱,立柱基础为2 m×2 m×1 m的承台,立柱可视为底部固定、顶端自由。其中,有一组900 mm×900 mm的钢筋混凝土立柱开展爆破破坏和个别飞散物抛掷过程研究的爆破试验,其混凝土标号为C30,主筋为24φ22,箍筋为φ12@100。通过高速摄影观测,分析立柱的爆破破坏过程,以及个别飞散物的飞散角度、初始速度等物理参量。为方便分析,在立柱的观测面上绘制出均匀的网格参考线,横向间距15 cm,纵向间距20 cm。见图1。



(a) 钢筋混凝土立柱

(a) Reinforced concrete columns



(b) 部分立柱爆破效果

(b) Blasting effect of columns

图1 钢筋混凝土立柱爆破试验

Fig. 1 Blasting experiment of Reinforced concrete columns

观测设备采用美国IDT公司生产的Y7-S2型超高速摄像机,画幅分辨率为1920×1080,最高采样率为9000 fps。考虑现场实际光线情况,设置采样率

为5000 fps,即每帧采集间隔时间为0.2 ms。在“无安全防护”条件下,近距离观察立柱爆破破坏过程与个别飞散物的抛掷过程。为保障设备的安全,在高速摄像机

周围用沙袋围成一个简易“碉堡”;并在镜头前方放置一块 1 cm 厚的透明有机玻璃板,以保证观测视线通透。

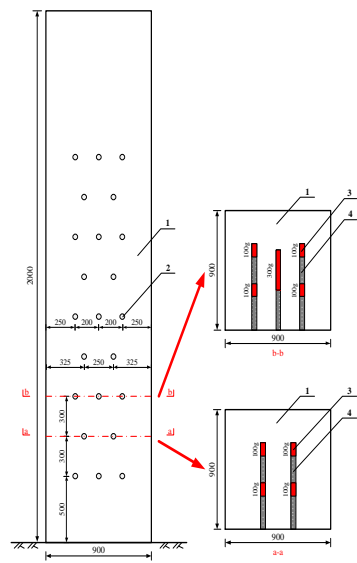
在立柱上布置了 9 排“3+2”梅花形炮孔,孔径 $\phi 40$;炸药选用 2# 岩石乳化炸药,药卷直径 $\phi 32$;起爆雷管为 MS19 毫秒导爆管雷管(名义延期时间为 1700 ms)。综合采用连续装药和间隔装药结构,详见图 2。选择在立柱底部 6 排炮孔装填炸药,合计 27 个药包,总装药量为 3.3 kg,综合炸药单耗为 2.26 kg/m^3 。

2 钢筋混凝土立柱爆破破坏过程

爆破后,采集得到钢筋混凝土立柱爆破破坏过程瞬间图像,如图 3 所示。

从组图中可以明显看出,在高速镜头下,立柱在多药包共同作用下的爆破破坏过程,并非传统认为的同时齐爆。孔内雷管的名义延期时间的误差 ($\pm 150 \text{ ms}$),直接影响着孔内药包的起爆顺序,间接影响了立柱的爆破破坏过程。立柱不同破坏位置的起始时刻有明显的先后顺序,破坏过程是从左侧→底部→右侧,对应的摄像帧数为 16210→16452→16482,间隔时间依次为 0 ms → 48.4 ms → 54.4 ms 。通过观察空气震荡与立柱表面鼓包现象,能看到炮孔间先后起爆的最长间隔时间约为 132.6 ms 。

由于导爆管雷管的实际延期时间在名义时间上下波动具有随机性,因此,孔内雷管的延期时间



(1-立柱 2-炮孔 3-炸药 4-炮泥)
(1-column 2-blasthole 3-explosive 4-stemming)

图 2 立柱装药结构图(单位:mm)

Fig. 2 Charge structure of column(unit:mm)

误差就像是一把“双刃剑”。一方面,根据毫秒微差爆破理论,若两侧临边位置的药包都先起爆,可以为中间药包创造新的自由面,有利于改善立柱爆破效果。另一方面,若多个药包朝向一侧依次起爆,会造成立柱“偏炸”现象;若单孔内俩药包延期时间较长,会造成后爆药包被“压灭”的现象;这两点在

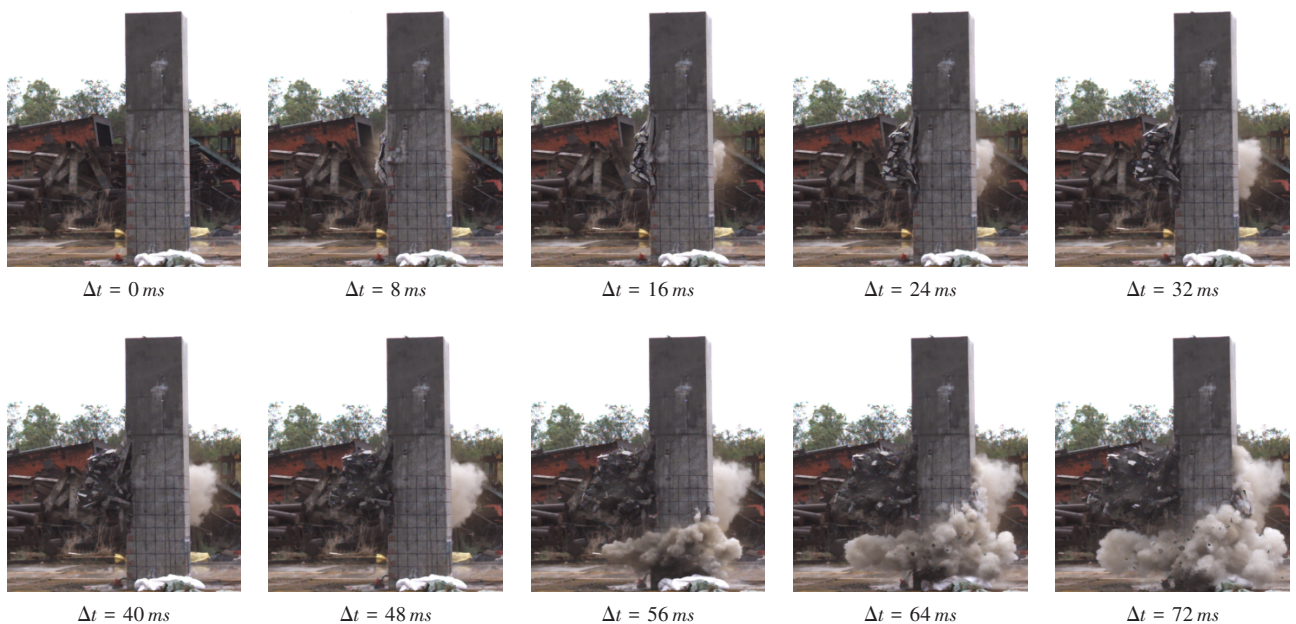


图 3 爆破飞散物运动过程

Fig. 3 Movement process of flyrock

试验过程中也都得到验证。

根据立柱不同区域的爆破破碎效果,参考无限边界内岩石爆破破碎分区理论,可以将有限边界内钢筋混凝土立柱爆破破坏区域分为空腔区、破碎区、裂隙区和损伤区。其中,空腔区内的箍筋彻底破坏,主筋明显弯曲(挠度30~50 mm),混凝土全部抛出;破碎区内的箍筋基本完好,主筋变形不明显,混凝土全部破碎但基本锁在钢筋笼内;裂隙区内的混凝土保护层基本剥离,钢筋裸露但基本不变形,笼内混凝土存在较多裂隙;损伤区内的钢筋混凝土表面无明显裂纹。值得注意的是,虽然破碎区的混凝土结构被完全破碎,但是在原地坍塌爆破拆除方案中,破碎区内的混凝土块被压实后仍具有一定强度,从而增加爆堆的高度。各区域的范围大小与炸药单耗、最小抵抗线、混凝土强度、配筋率等因素有关,需要进一步开展相关试验进行定量分析。



图4 立柱爆破效果图

Fig. 4 Blasting effect of column

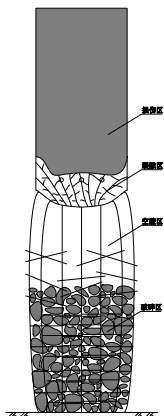


图5 立柱破碎区域图

Fig. 5 Broken region of column

此外,由于高段位雷管存在延时误差,导致先爆药包为后爆药包创造新的自由面,这直接影响了空腔区的位置分布。此次高速摄影捕捉的影像显示,最先起爆的雷管位于立柱左侧偏上的位置,立柱的破碎区范围大于空腔区。结合其他立柱爆破效果,可以发现,若最先起爆的雷管位于立柱的底部,更利于上部混凝土碎块垮落,形成的空腔区更大。通过筛分可将碎块分为粉粒($d < 5 \text{ mm}$)、碎块($5 \text{ mm} \leq d \leq 100 \text{ mm}$)和大块($d > 100 \text{ mm}$)三类,经不同粒径碎块的称重,粉粒、碎块和大块占总重量的比例分别为15%、58%、27%(图6),中小粒径比例超70%,这表明大量的爆炸能量作用于混凝土的粉碎。



(a) $d < 5 \text{ mm}$ (b) $5 \text{ mm} \leq d \leq 100 \text{ mm}$ (c) $d > 100 \text{ mm}$

图6 立柱爆破后混凝土碎块

Fig. 6 Concrete pieces of column after blasting

3 个别飞散物抛掷运动过程

确定长度比例尺之后,以立柱左侧“飞散物”为研究对象,捕捉一些代表性飞散物的像素A点和B点。其中,A点位于抛掷的最前沿,轨迹便于追踪,也最具代表性。通过建立平面坐标系,研究它们的抛掷运动过程(图7)。

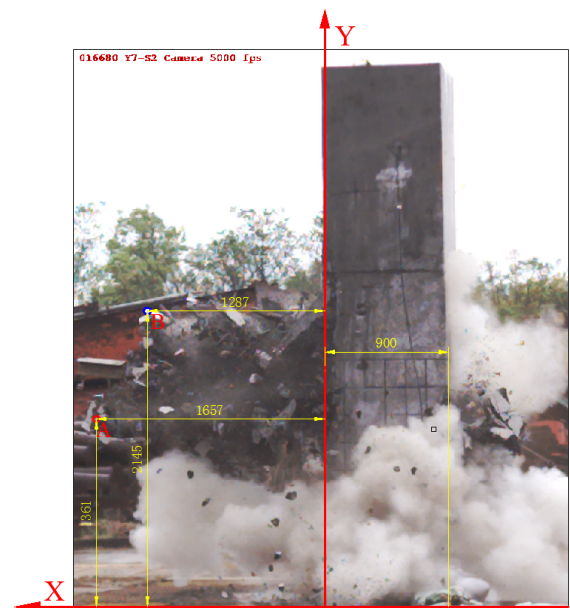


图7 代表性个别飞散物及平面坐标系

Fig. 7 Representative flyrock and plane coordinate system

表 1 A 点位移-时间数据表
Table 1 Displacement-time data of point A

帧数	时间 <i>t</i> / ms	<i>x</i> 方向位移 <i>S_x</i> / mm	<i>y</i> 方向位移 <i>S_y</i> / mm	帧数	间隔时间 <i>t</i> / ms	<i>x</i> 方向位移 <i>S_x</i> / mm	<i>y</i> 方向位移 <i>S_y</i> / mm
16680	78	1656	1363	16480	38	964	1469
16670	76	1628	1370	16470	36	931	1465
16660	74	1596	1369	16460	34	876	1477
16650	72	1572	1374	16450	32	844	1486
16640	70	1519	1385	16440	30	816	1498
16630	68	1485	1391	16430	28	790	1501
16620	66	1448	1396	16420	26	762	1510
16610	64	1416	1401	16410	24	715	1510
16600	62	1382	1408	16400	22	684	1518
16590	60	1343	1423	16390	20	648	1519
16580	58	1315	1423	16380	18	615	1519
16570	56	1277	1430	16370	16	578	1525
16560	54	1243	1429	16360	14	545	1529
16550	52	1217	1435	16350	12	502	1529
16540	50	1178	1436	16340	10	472	1529
16530	48	1135	1450	16330	8	435	1536
16520	46	1105	1457	16320	6	398	1536
16510	44	1072	1457	16310	4	362	1551
16500	42	1038	1460	16300	2	326	1552
16490	40	998	1464	16290	0	291	1558

分析单张高速摄影图像, 整理 A 点的运动轨迹数据, 得到飞散物在不同时刻的轨迹坐标, 如表 1 所示。同样的方法, 可以得到 B 点的运动轨迹数据。绘制两点的位移-时间曲线(图 8), 并进行线性拟合(图 9), 可以得到“飞散物”的抛掷速度, 即 $v_{Ax} = 17.6 \text{ m/s}$ 、 $v_{Ay} = -2.5 \text{ m/s}$ 、 $v_{Bx} = 13.4 \text{ m/s}$ 、 $v_{By} = 1.8 \text{ m/s}$ 。

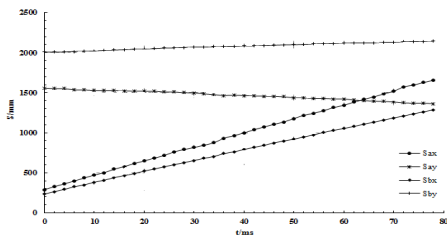


图 8 飞散物位移-时间曲线

Fig. 8 Displacement-time curve of flyrocks

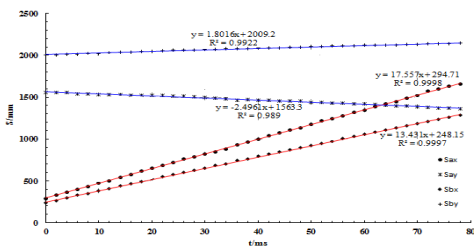


图 9 线性拟合结果

Fig. 9 Linear regression results

4 个线性拟合函数的拟合度均在 98.9% 以上, 由此判定, 从开始向外抛掷至 100 ms 的观测时间内, 爆破个别飞散物的运动速度与运动时间呈线性关系, 即爆破个别飞散物匀速向外抛掷。考虑到观测的时间极短, 可将上述速度值视为爆破个别飞散物向外抛掷的初始速度 v_0 , 数据量级与文献[5]基本一致, 抛掷方向以水平方向为主。

根据上述分析结果, 炸药单耗为 2.0 kg/s 左右时, 爆破个别飞散物的初始速度在 10~20 m/s 范围内。直观感受其速度不算太快, 但是整个个别飞散物抛掷过程在 0.1s 内瞬间完成, 释放的总动量高达 $2.0 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, 对单侧刚性物体造成的冲击力高达 100 kN。因此, 爆破飞散物的安全防护措施应该以柔性为主, 刚性为辅。在其他组立柱爆破试验中, 采用“竹跳板+旧棉被+防护毯+沙袋”的安全防护措施, 即使将炸药单耗提高近 3.0 kg/m^3 , 爆破个别飞散物也都被严格控制在 2 m 范围之内。因此, 在确保安全的前提下, 为实现项目经济效益最大化、提高施工效率, 建议在建筑物爆破拆除中个别飞散物安全防护方面, 除了主动优化爆破设计、降低炸药单耗; 更重要的是将外围的爆破构件作为防护重

点,内部的爆破构件可以采取弱防护。

4 结论与建议

在野外试验场开展多组钢筋混凝土立柱爆破试验,通过高速摄影观测立柱在多药包共同作用下爆破过程,根据影像资料和碎块筛分结果详细分析了立柱的爆破破坏过程及个别飞散物抛掷规律,得到如下结论和建议:

(1)高段位孔内雷管的名义延期时间的误差,直接影响着孔内药包的起爆顺序,间接影响了立柱的爆破破坏过程;立柱不同破坏位置的起始时刻有明显的先后顺序,需要加以利用和控制。

(2)爆破个别飞散物在 100 ms 的观测时间内,其运动速度与时间呈线性关系,抛掷方向以水平方向为主;炸药单耗为 2.0 kg/s 左右时,爆破个别飞散物的初始速度在 10~20 m/s 范围内。

(3)为实现项目经济效益最大化、提高施工效率,建议在建筑物爆破拆除个别飞散物安全防护方面,除了主动优化爆破设计、降低炸药单耗;更重要的是将建筑物外围的爆破构件作为防护重点,内部的爆破构件可以采取弱防护。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [1] 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)
- [2] 李新继. 薄壁空心钢筋混凝土桥墩原位解体拆除爆破[J]. 工程爆破, 2019, 25(4): 51-55.
- [2] LI Xin-ji. In-situ collapse demolition blasting of reinforced concrete bridge piers with thin-walled hollow [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4): 51-55. (in Chinese)
- [3] 易克,李高峰,张文杰,等. 异形全剪力墙结构危楼定向爆破拆除技术[J]. 爆破, 2015, 21(4): 29-32.
- [3] YI Ke, LI Gao-feng, ZHANG Wen-jie. et al. The directional blasting technology of special shear wall structure of dangerous buildings [J]. Blasting, 2015, 21(4): 29-32. (in Chinese)
- [4] 李振. 爆破个别飞散物的抛飞规律研究及控制防护[D]. 青岛:山东科技大学, 2009.
- [4] LI Zhen. The casting discipline study and controlling protection of blasting individual flying rock [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] 林大能,刘小春. 拆除爆破飞石及其防护研究[J]. 湘潭工学院学报, 1999, 14(3): 9-13.
- [5] LIN Da-neng, LIU Xiao-chun. Study on the flyrock and its preventment of demolishing blasting [J]. J XiangTan Min Inst, 1999, 14(3): 9-13. (in Chinese)
- [6] StojadinovicSASA, LilićNIKOLA, PantovicRADOJE, et al. A new model for determining flyrock drag coefficient [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2013(62): 68-73.
- [7] 徐全军,唐勇,刘影,等. 桥墩抛掷爆破飞散物初速度分析及防护研究[C]//中国爆破新技术III: 1011-1019.
- [7] XU Quan-jun, TANG Yong, LIU Ying, et al. Initial velocity analysis and protection study of fly rock caused by throw blasting of bridge pier [C]// New Technology of Blasting Engineering in China III: 1011-1019. (in Chinese)
- [8] 张九龙. 爆破飞散物的预防控制[J]. 采矿技术, 2014, 14(5): 157-160.
- [8] ZHANG Jiu-long. Preventive measures of flyrock [J]. Mining Technology, 2014, 14(5): 157-160. (in Chinese)
- [9] 高旭. 拆除爆破飞散物防护工程实例研究[J]. 工程爆破, 2009, 15(4): 74-77.
- [9] GAO Xu. Case study on flying debris protection in blasting demolition [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(4): 74-77. (in Chinese)
- [10] 李本伟,陈德志,周应军,等. 基于故障树分析法的拆除爆破飞散物事故风险分析[J]. 爆破, 2015, 32(2): 147-151.
- [10] LI Ben-wei, CHEN De-zhi, ZHOU Ying-jun, et al. Risk analysis of blasting flying-rock based on FTA [J]. Blasting, 2015, 32(2): 147-151. (in Chinese)
- [11] KecojevicVLADISLAV, RadomskyMARK. Flyrock phenomena and area security in blasting-related accidents [J]. Safety Science 2005(43): 739-750.
- [12] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2): 1-12.
- [12] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology [J]. Blasting, 2019, 36(2): 1-12. (in Chinese)