

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.016

复杂环境两座烟囱对向错位控制爆破拆除

李杰^{1,2}, 王园园³, 张义平², 刘登科¹

(1. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002; 2. 贵州大学矿业学院, 贵阳 550025;

3. 贵州建设职业技术学院, 贵阳 551499)

摘要: 因为国家环境保护政策需要, 毕节市某已关停焦化厂内2座烟囱需爆破拆除。2座烟囱材质和尺寸完全一致: 均为钢筋混凝土结构, 外部结构完整, 内衬为耐火砖结构, 高度为85 m, 底部外径为7 m, 底部周长为21.98 m, 外壁厚度36 cm, 内衬厚度24 cm, 内衬和外壁之间有4 cm的中空隔热层。烟囱位于城镇区域施工环境复杂, 临近工厂厂房、民宅、道路等保护对象(与保护对象最小距离60 m), 需要严格控制爆破振动、飞散物等危害效应。考虑两座烟囱同时起爆将产生较大的振动, 2座烟囱之间采取毫秒延时间隔爆破, 延时间隔时间为110 ms。为进一步控制触地振动, 在烟囱倒塌区域铺设4道砂土缓冲堤。为控制爆破飞散物, 对爆破切口范围采取2层胶皮网严密防护措施。计算得到爆破振动及爆破飞石等有害效应均满足安全判据要求。爆破效果表明: 起爆后2座烟囱按照设计方向对向错位倒塌, 距离最近的保护对象振动为0.66 cm/s, 远低于振动安全阈值控制标准, 产生的飞石在可控范围。本次烟囱爆破拆除可为其他相似工程提供相应借鉴。

关键词: 钢筋混凝土烟囱; 爆破拆除; 对向错位; 安全防护

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0148-08

Controlled Blasting Demolition of Two Chimneys with Opposite Staggered Collapse in Complex Environment

LI Jie^{1,2}, WANG Yuan-yuan³, ZHANG Yi-ping², LIU Deng-ke¹

(1. Poly Xianlian Blasting Engineer Limited Corp, Guiyang 550002, China;

2. Guizhou University Mining Institute, Guiyang 550025, China;

3. Guizhou Polytechnic of Construction, Guiyang 551499, China)

Abstract: To comply with national environmental regulations, controlled blasting was used to demolish two chimneys at a decommissioned coking plant in Bijie City. The twin chimneys exhibited identical material composition and dimensional specifications; each was a reinforced concrete structure with preserved external shells, incorporating refractory brick linings. Both structures measured 85 meters in height, with identical geometric parameters: a 7-meter outer diameter (21.98-meter circumference) at the base, featuring 36-cm-thick outer walls, 24-cm-thick refractory linings, and a 4-cm insulating air gap between concentric layers. Situated in an urban setting with complex surroundings, the chimneys were proximate to protected infrastructure, including industrial buildings, residential areas, and roadways (minimum clearance: 60 meters). This required stringent mitigation of blast-induced hazards, particularly ground vibration and flyrock. Given that simultaneous detonation would produce excessive vibration, a sequential millisecond-delay blasting technique with 110 ms inter-chimney delay was implemented. To minimize collapse-induced ground vibrations, four sand-soil cushion berms were strategically placed in the anticipated impact zones. Flyrock pre-

收稿日期 (Date of reception): 2025-05-16

网络首发日期 (Published online): 2025-08-20

作者简介: 李杰 (1990-), 男, 四川资阳人, 在读博士、正高级工程师, 从事爆破技术及安全管理工作, (E-mail) 542042223@qq.com.

About the author: LI Jie (1990-), male, Sichuan province Ziyang city, Ph. D, candidate, professor of engineering, mainly engaged in research of engineering blasting and safety management, (E-mail) 542042223@qq.com.

烟囱实际切口高度均取 $H=3.0$ m, 为方便施工切口布设在 $\nabla + 1.0 - \nabla + 4.0$ m。三角形定向窗底长 1.5 m、高 3 m, 位置位于 $\nabla + 1.0 - \nabla + 4.0$ m 处于爆破切口两端, 同时为降低钢筋混凝土之间的夹制作用, 保证混凝土全部脱笼, 在烟囱倒塌中心线上开

设宽 1 m、高 3 m 的卸荷槽, 见图 2 所示, 钻孔爆破切口长度为 $13.2 - 4 = 9.2$ m。

选择使用水钻取芯式钻孔(可直接切断钢筋), 炮孔直径 40 mm, 炮孔采用梅花形布孔。烟囱外壁和内衬爆破孔网参数如表 1, 炮孔布置如图 2。

表 1 爆破参数
Table 1 Blast Parameters

位置 Position	筒体外壁 Outer wall	筒体内衬 Inner wall	合计 Summation	备注 Notes
标高 Elevation/m	1.0 ~ 4.0	1.0 ~ 4.0		
壁厚 Wall thickness/cm	360	240		
孔距 Hole spacing/cm	35	30		
排距 Row spacing/cm	30	30		
孔深 Depth/cm	24	16		
炮孔数目 Number of boreholes	260	270	530	
单孔装药量 Charge per hole/g	100	50		
装药量小计 Total charge/kg	26	13.5	39.50	

2.1.2 切口保留面支撑强度校核

爆破切口形成时, 其保留面承受的压应力必须小于其钢筋混凝土抗压强度才能确保烟囱不会后座。

根据自重引起压力公式^[8]

$$\sigma_{\text{压}} = P \frac{g}{S}$$

$$S = [(360 - 216)/360] \times \pi(R^2 - r^2)$$

式中: $\sigma_{\text{压}}$ 为烟囱自重压应力, MPa; P 为烟囱切口以上自重, kg; g 为重力加速度, 取 9.8 N/kg; S 为预留截面的面积, m^2 ; R 为切口底边处外半径, m; r 为切口底边处内半径, m。

两座烟囱使用的混凝土标号均为 C30, 其钢筋混凝土抗压强度达到了 $\sigma_0 = 20.1$ MPa。

单座烟囱自重为 $P = 2 \times 10^6$ kg, 外径为 $R = 7$ m, 内径为 $r = 5.72$ m, 计算得到 $\sigma_{\text{压}} = 9.58$ MPa < 20.1 MPa, 说明爆破切口保留面能承受烟囱上部自重压应力。

2.1.3 倾倒可靠性校核

爆破切口闭合时, 其重心水平偏移距离必须超过烟囱外半径才能保证烟囱顺利倾倒。

爆破切口的闭合角公式^[8]

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{H_p}{R + r \sin \alpha} \right)$$

式中: β 为爆破切口闭合角, °; H_p 为爆破缺口高度, m; R, r 分别为切口底部的外、内半径, m; α 为定向窗的夹角, °。

两座烟囱的夹角相同, $\alpha = 63^\circ$ 。代入计算得到 $\beta = 28.6^\circ$ 。

根据重心偏移距离公式

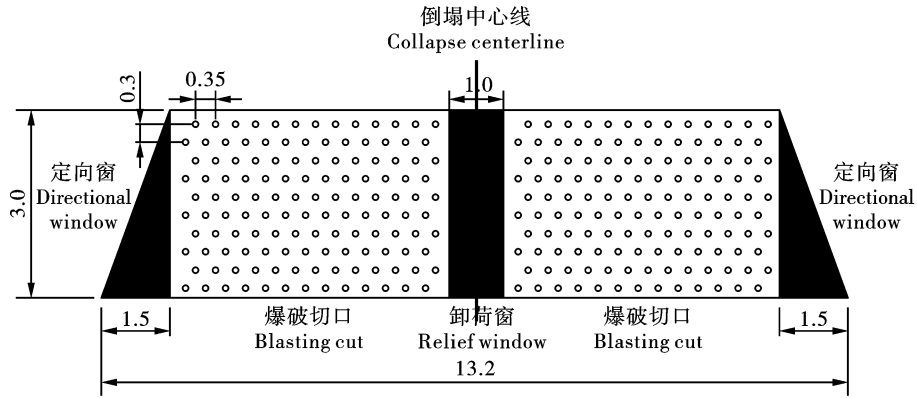
$$x_i = [Z_c^2 + (r \sin \alpha)^2]^{1/2} \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{Z_c}{r \sin \alpha} - \beta \right) - r \sin \alpha$$

式中: Z_c 重心高度; x_i 重心水平偏移距离。

两座烟囱 $Z_c = 28.5$ m, 得到 $x_i = 12.36$ m > 3.5 m。说明烟囱的重心水平偏移距离超过了烟囱外半径, 烟囱能够顺利倾倒。

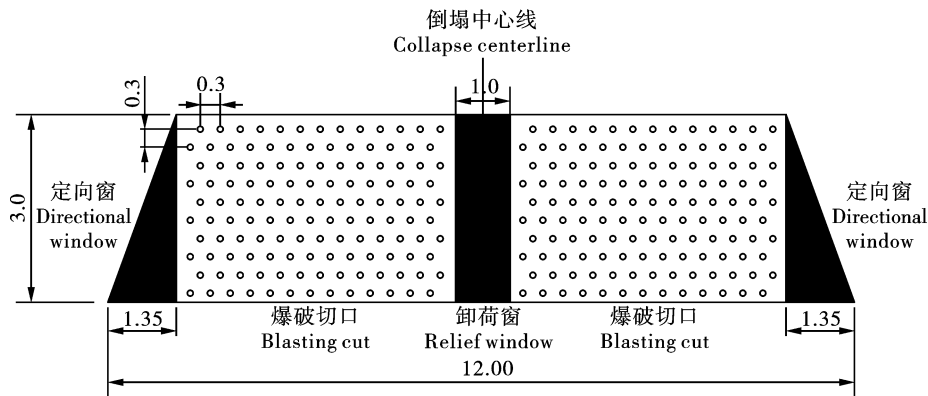
2.2 起爆网路

单座烟囱的外壁和内衬同时起爆, 采用交叉复式连接网路, 孔内均采用 MS10 段导爆管雷管进行爆破, 每 20 发为一簇, 用 2 发 MS1 段导爆管雷管桥接, 采用 MS5 段管桥接延时爆破, 具体爆破网路如图 3。1#烟囱和 2#烟囱之间采用 MS5 段管延时。



(a) 外壁炮孔布置

(a) Layout of the blast holes on the outside of the wall



(b) 内衬炮孔布置

(b) Layout of the blast holes on the lining

图 2 烟囱炮孔布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of the cut area of the blast holes(unit:m)

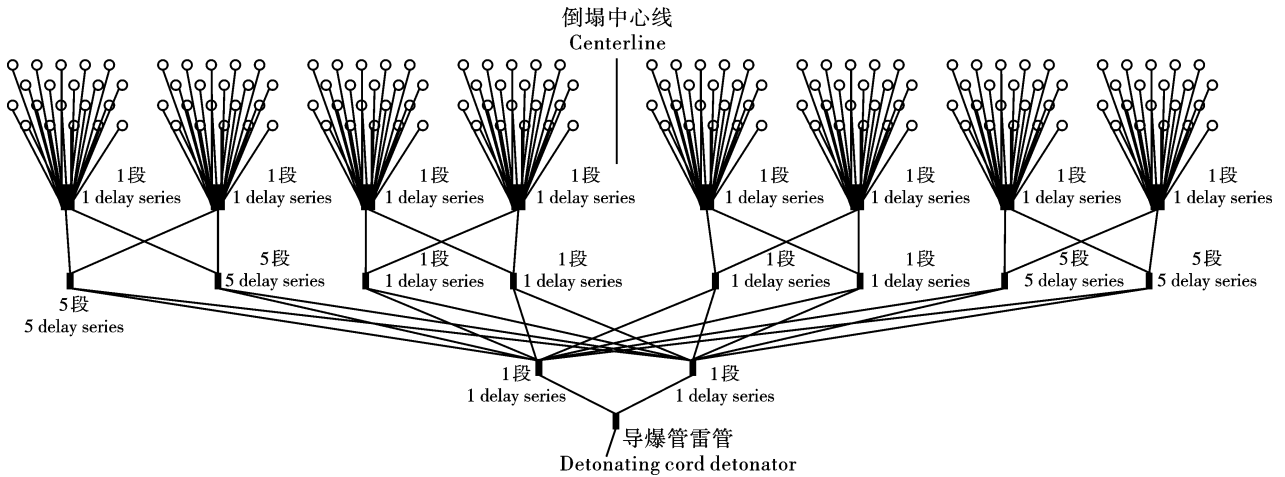


图 3 单座烟囱爆破网路

Fig. 3 Initiating network of each chimney

3 安全防护与校核

3.1 振动控制

3.1.1 振动防护措施

在 1# 烟囱和 2# 烟囱倒塌方向分别布设 4 道缓冲堤,沿各自倒塌中心线从烟囱底部边缘起依次

30 m、45 m、60 m、75 m 各布设一道,每道长 20 m、宽 3 m,高分别为 1.5 m、2 m、2.5 m、3 m,每道缓冲堤上部用帆布覆盖且铺设双层沙袋,如图 4。

3.1.2 振动校核

为控制振动有害效应,需要对烟囱爆破振动和倒塌触地振动进行预测校核,确保周围需保护对象

处于振动安全阈值内。

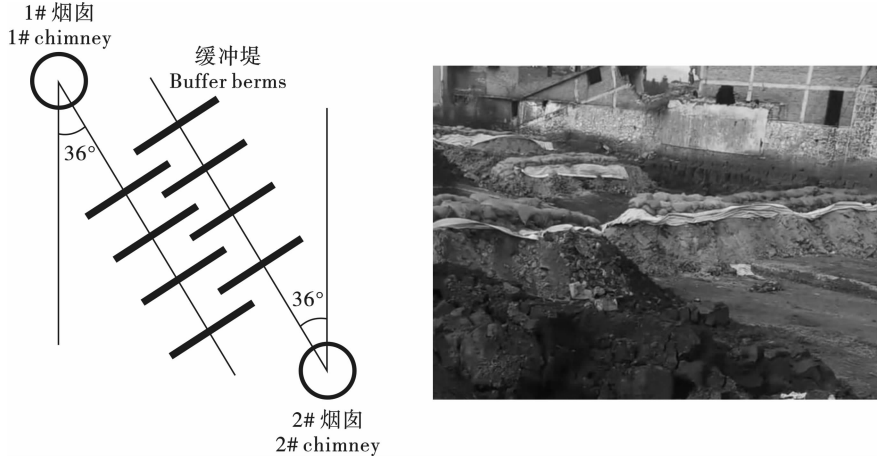


图4 缓冲堤防护示意图

Fig. 4 Sketch map of the buffer embankments

(1) 爆破振动

根据萨道夫斯基公式^[14]

$$V = k \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha$$

式中: V 为爆破振动速度, cm/s ; Q 为单响最大

起爆药量, 取倒塌中心线位置同时起爆计 19.75 kg ; R 为保护目标至爆区中心距离, m ; k 为与地质条件有关的系数, α 为地震波衰减系数, 根据当地地质条件及我公司在类似地区实测振动监测数据回归结果, 取 $k = 200, \alpha = 1.8$ 。见表2。

表2 爆破振动计算值

Table 2 Calculation of the blasting vibration

保护目标 Protected objects	距离 R Distance R/m	k, α	Q_{max} (kg)	$[V]_{\text{允许值}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ $[V]_{\text{Allowable}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{预测值}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ $V_{\text{Predictive}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	评价 Evaluation
塑胶厂厂房 Plastic factory	60			3.5	0.75	安全 safety
西南侧民房 Houses on the southwest side	99	$k = 200$ $\alpha = 1.8$	19.75	2.0	0.31	安全 safety
东南侧民房 Houses on the southeast side	155			2.0	0.14	安全 safety

爆破振动预测值均低于《爆破安全规程》规定的安全控制标准, 周围需保护对象处于振动安全阈值内。

(2) 触地振动

根据中科院力学所公式^[15]

$$V = K_t \times [(mgH/\sigma)^{1/3}/R]^{-\beta}$$

式中: V 为烟囱倒塌触地引起的振动速度, cm/s ; m 为烟囱质量, 2000 t ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; H 为烟囱重心高度, 28.5 m ; σ 为烟囱解体后混凝土结构的破坏强度, 取 10 MPa ; R 为观测点至冲击地面中心, m ; K_t, β 为衰减参数, 根据工程经验取 $K_t = 1.50, \beta = -1.70$ 。见表3。

通过计算, 可知各保护对象受待爆烟囱倒塌产生的触地振动预测值均小于其允许的安全控制标准。

本次爆破采取在烟囱倾倒侧铺设缓冲堤控制措施降低倒塌触地振动。实践证明, 缓冲堤可将触地振动降低 70% 左右, 显著降低对周围保护对象的影响。

3.2 爆破飞石控制

为控制个别爆破飞石有害效应, 对烟囱切口区域内用双层胶皮网进行覆盖防护, 胶皮网之间搭接部分用铁丝连接在一起, 使得切口内所有胶皮网组合成一张整体防护网, 同时在切口高度防护内每间隔 50 cm 用钢绳绕着烟囱保留支撑部位缠绕进行捆绑防护。

由中科院力学所公式^[11]

$$V_f = 20(Q_d^{1/3}/W)^2$$

式中: V_f 为个别飞石的初速度, m/s ; Q_d 为设计中单孔装药量, 取 0.1 kg ; W 为最小抵抗线, 取

0.3 m; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; S_{\max} 为个别飞石最大飞散距离, m。

表3 塌落振动计算值

Table 3 Calculation of the collapse vibration

保护目标 Protected objects	距离 R Distance R/m	K_t, β	$m(t)$	$[V]_{\text{允许值}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ $[V]_{\text{Allowable}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{预测值}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ $V_{\text{Predictive}} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	评价 Evaluation
塑胶厂厂房 Plastic factory	102			3.5	0.29	安全 safety
西南侧民房 Houses on the southwest side	120	$K_t = 1.50$ $\beta = -1.70$	1570	2.0	0.22	安全 safety
东南侧民房 Houses on the southeast side	197			2.0	0.09	安全 safety

采用双层胶皮网及钢绳捆绑加强防护措施后,修正得到如下爆破飞石计算公式^[11]

$$S_{\max} = (f_1 \cdot f_2 \cdot V_f^2 \cdot \sin 2\theta) / g$$

式中: f_1 为介质系数,烟囱为钢筋混凝土结构,取 9.4; f_2 为防护系数,一层、两层、三层防护分别取 2、1、0.5; θ 为飞石抛射初始角度,取 5° 。因切口内所有胶皮网组合成一张整体防护网,同时在切口高度防护内每间隔 50 cm 用钢绳绕着烟囱支撑部位缠绕进行捆绑防护(捆绑 6 圈), f_2 取 0.1。

计算可得:爆破飞石最大距离为 $S_{\max} \approx 38 \text{ m}$,该值远小于烟囱同周边保护的最小距离,满足安全要求。见图 5。



图5 胶皮网防护

Fig. 5 Rubber mesh protection

4 试爆设计及效果

根据《爆破安全规程》规定, A、B 级以上拆除项目必须进行试爆,同时为保证烟囱顺利拆除且防止过量装药增加爆破有害效应风险。对 1# 烟囱和 2# 烟囱爆破试验分为 2 组,第一组:在 1# 烟囱选定的筒体倒塌中心线左侧的外壁靠下部 10 个孔,取炸药单耗 q 为 2000 g/m^3 ,单孔装药量 Q 取为 80 g;相对应位置内衬靠下部 10 个孔,取炸药单耗 q 为 1600 g/m^3 ,单孔装药量 Q 取为 35 g;第二组:在 2# 烟囱选定的筒体倒塌中心线左侧对称位置的外壁靠

下部 10 个孔,取炸药单耗 q 为 2500 g/m^3 ,单孔装药量 Q 取为 100 g;相对应位置内衬靠下部 10 个孔,取炸药单耗 q 为 2000 g/m^3 ,单孔装药量 Q 取为 50 g。从试爆结果看出,两组试爆混凝土基本都完全脱笼,第二组试爆相对于第一组脱笼更好,最终确定外壁和内衬单孔药量分别为 100 g、50 g。见图 6。

1# 烟囱试爆效果
1# chimney2# 烟囱试爆效果
2# chimney

图6 试爆效果

Fig. 6 Test explosion effects

5 爆破效果分析

起爆后烟囱倒塌全过程耗时约 10 s,两座烟囱按照设计方向对向错位倒塌,倒塌距离为约 86 m。通过第三方振动检测,距离最近的塑胶厂房振动为 0.66 cm/s ,远低于《爆破安全规程》规定的安全控制标准。同时,经过爆后踏勘走访,爆破产生的飞石在可控范围,未对周边需保护建构筑物造成损坏。

6 结语

本文通过严格的危害效应校核与控制措施,确保了复杂环境拆除爆破下爆破及触地振动、飞石等危害效应得到有效控制,可以为相似复杂环境高耸建(构)筑物拆除提供参考。

(1)通过同时对两座相同材质烟囱采用不同参数试爆,根据试爆破碎效果确定了合适的混凝土外壁及耐火砖内衬装药量,确保了爆破切口的破碎效

果,结合倾倒可靠性理论校核,保证了结构的顺利拆除。见图7。



图7 爆破倒塌过程

Fig. 7 Collapse process

(2)通过两座烟囱110 ms延期间隔爆破错开筒体触地时间,同时采用4层多层砂土柔性缓冲堤,结合对爆破切口完全覆盖的双层胶皮网防护,实现了对爆破振动及个别飞散物的有效控制。

参考文献 (References)

- [1] 费鸿禄,钱起飞,刘雨,等.切口形状对高烟囱拆除爆破倾倒后坐的影响[J].工程爆破,2021,27(1):53-61.
- [1] FEI Hong-lu, QIAN Qi-fei, LIU Yu, et al. Effect of cut shapes on dumping backward collapse of high chimney in demolition blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1):53-61. (in Chinese)
- [2] 胡彬,杨赛群,李洪伟,等.超高钢混烟囱爆破切口角度计算及数值模拟[J].工程爆破,2022,28(1):99-106.
- [2] HU Bin, YANG Sai-qun, LI Hong-wei, et al. Calculation and numerical simulation of blasting cutting angle of an ultra-high reinforced concrete chimney [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(1):99-106. (in Chinese)
- [3] 郑长青,张静,赖经建,等.钢筋混凝土烟囱拆除爆破倾倒过程摄影分析[J].爆破,2017,34(4):106-108, 114.
- [3] ZHENG Chang-qing, ZHANG Jing, LAI Jing-jian, et al. Photography analysis of toppling process of reinforced concrete chimney during explosive demolition [J]. Blasting, 2017, 34(4):106-108, 114. (in Chinese)
- [4] 李玉景,赵文,张宝亮,等.100m高钢混烟囱小倒塌夹角拆除爆破[J].工程爆破,2021,27(6):80-85,91.
- [4] LI Yu-jing, ZHAO Wen, ZHANG Bao-liang, et al. Demolition blasting of a 100m high steel-concrete chimney with a small collapse angle [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6):80-85,91. (in Chinese)
- [5] 杨辉,袁翊硕,柴亚博,等.复杂环境下180m高烟囱定向拆除爆破[J].工程爆破,2022,28(2):84-92.
- [5] YANG Hui, YUAN Yi-shuo, CHAI Ya-bo, et al. Directional demolition blasting of a 180 m high chimney in a complex environment [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2):84-92. (in Chinese)
- [6] 程楠.复杂环境下210m烟囱定向爆破拆除[J].爆破,2021,38(1):100-104,158.
- [6] CHENG Nan. Directional blasting demolition of 210 m chimney under complex conditions [J]. Blasting, 2021, 38(1):100-104,158. (in Chinese)
- [7] 李友军,曾光耀,廖立,等.烟囱定向窗同步成型一次爆破施工技术与应用[J].煤矿爆破,2020,38(6):28-31.
- [7] LI You-jun, ZENG Guang-yao, LIAO Li, et al. Construction technology and application of synchronized once-blasting for the directional window of chimney [J]. Coal Mine Blasting, 2020, 38(6):28-31. (in Chinese)
- [8] 任江,汪高龙,王潇.两座150m高钢筋混凝土烟囱同时爆破拆除[J].爆破,2020,37(4):94-99.
- [8] REN Jiang, WANG Gao-long, WANG Xiao. Simultaneous blasting demolition of two 150 m reinforced concrete chimneys [J]. Blasting, 2020, 37(4):94-99. (in Chinese)
- [9] 刘翼,谢守冬,傅建秋.180m烟囱分段爆破拆除振动监测与安全分析[J].爆破,2020,37(3):103-108.
- [9] LIU Yi, XIE Shou-dong, FU Jian-qiu. Monitoring and safety analysis of blasting vibration for blasting demolition of 180 m chimney in sections [J]. Blasting, 2020, 37(3):103-108. (in Chinese)
- [10] 董星,张哲,刘永强,等.100m钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除实践与数值模拟[J].爆破,2020,37(4):100-105,115.
- [10] DONG Xing, ZHANG Zhe, LIU Yong-qiang, et al. Practice and Numerical Simulation of 100 m Reinforced Concrete Chimney by Directional Blasting [J]. Blasting, 2020, 37(4):100-105,115. (in Chinese)
- [11] 余红兵,赵明生.复杂环境废弃烟囱爆破拆除及安全控制措施研究[J].爆破,2020,37(2):69-74.
- [11] YU Hong-bing, ZHAO Ming-sheng. Study on blasting demolition of abandoned chimney in complex environment and safety control measures [J]. Blasting, 2020,

- 37(2):69-74. (in Chinese)
- [12] 郑桂初,王友新,段丽环,等. 180m 高钢筋混凝土烟囱的拆除爆破[J]. 工程爆破,2019,25(6):56-60.
- [12] ZHENG Gui-chu, WANG You-xin, DUAN Li-huan, et al. Demolition blasting of 180 m high reinforced concrete chimney[J]. Engineering Blasting,2019,25(6):56-60. (in Chinese)
- [13] 李阳,蒲传金,肖定军,等. 85 m 高的烟囱拆除爆破及其振动测试分析[J]. 工程爆破,2017,23(5):49-55.
- [13] LI Yang, PU Chuan-jin, XIAO Ding-jun, et al. Blasting demolition and vibration measurement analysis of 85 m chimney[J]. Engineering Blasting,2017,23(5):49-55. (in Chinese)
- [14] 叶海旺,吴家鹏,郑长青,等. 钢筋砼烟囱拆除爆破切口高度优选及效果分析[J]. 工程爆破,2023,29(3):117-122.
- [14] YE Hai-wang, WU Jia-peng, ZHENG Chang-qing, et al. Optimization of cutting height and effect analysis of reinforced concrete chimney demolition blasting[J]. Engineering Blasting,2023,29(3):117-122. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国国家安全标准. GB6722—2014 爆破安全规程[S].

(上接第98页)

- [6] 范勇,吴进高,冷振东,等. 爆破漏斗岩石破碎块度实验与仿真[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(9):2125-2139.
- [6] FAN Yong, WU Jin-gao, LING Zhen-dong, et al. Experiment and simulation of rock fragmentation size of blasting crater[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(9):2125-2139. (in Chinese)
- [7] 黄永辉,孙博,张智宇,等. 岩石 RHT 本构的爆破碎裂判定方法优化及验证[J]. 北京理工大学学报,2023,43(6):565-574.
- [7] HUANG Yong-hui, SUN Bo, ZHANG Zhi-yu, et al. Optimization and verification of blasting fragmentation judgment method for rht constitutive model of rock[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2023,43(6):565-574. (in Chinese)
- [8] 李斌,许梦国,王文杰. 扇形孔爆破裂隙的数值模拟[J]. 中国矿业,2014,23(2):84-91.
- [8] LI Bin, XU Guo-meng, WANG Wenjie. Numerical simulation of fan hole blasting induced rock fracture[J]. China Mining Magazine,2014,23(2):84-91. (in Chinese)
- [9] 张双侠,刘志祥,杨小聪,等. 高地应力下扇形孔爆破损伤特性分析及优化设计(英文)[J]. Journal of Central South University,2023,30(6):1887-1899.
- [9] ZHANG Shuang-xia, LIU Zhi-xiang, YANG Xiao-cong, et al. Analysis of damage characteristics and optimization of fan-holes blasting design under high in-situ stresses[J]. Journal of Central South University,2023,30(6):1887-1899. (in Chinese)
- [10] 郭东明,蓝樊革,张伟,等. 炮孔堵塞长度对爆破效果的影响研究[J]. 爆破,2023,40(3):108-115,142.
- [10] GUO Dong-ming, LAN Fange, ZHANG Wei, et al. Study of influence of stemming length on blasting effect[J]. Blasting,2023,40(3):108-115,142. (in Chinese)
- [11] 王社光,杨志强,王立杰,等. 地下中深孔爆破的最佳减振延期时间研究[J]. 爆破器材,2024,53(3):58-64.
- [11] WANG Du-guang, YANG Zhi-qiang, WANG Li-jie, et al. Optimal vibration reduction delay time medium-deep hole blasting underground[J]. Explosive Materials,2024,53(3):58-64. (in Chinese)
- [12] BLAIR D P. Acoustic pulse transmission in half-spaces and finite-length cylindrical rods[J]. Geophysics,1985,50:1676-1683.
- [13] YOU Yuan-yuan, YANG Ren-shu, ZUO Jin-jing, et al. Research on the fragmentation characteristics of iron ore based on RHT constitutive model calibration and charge structure optimization[J]. Mining, Metallurgy & Exploration,2024,41(4):1819-1834. (in Chinese)
- [14] 姜维,谭敏,姚团,等. 切割井中深孔孔内分段爆破一次成井数值模拟[J]. 工程爆破,2024,30(4):1-9.
- [14] JIANG Wei, TAN Cheng, YAO Nan, et al. Numerical simulation of one-time blasting completion of the cutting-shaft by stage blasting in medium deep holes[J]. Engineering Blasting,2024,30(4):1-9. (in Chinese)
- [15] HUO Xiao-feng, SHI Xiu-zhi, QIU Xian-yang, et al. Rock damage control for large-diameter-hole lateral blasting excavation based on charge structure optimization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,106:103569.
- [16] YI Chang-ping, SJOEBERG Jonny, JOHANSSON Daniel. Numerical modelling for blast-induced fragmentation in sublevel caving mines[J]. Tunnelling & Underground Space Technology,2017,68(oct.):167-173.