

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.012

## 复杂环境废弃烟囱爆破拆除及安全控制措施研究<sup>\*</sup>

余红兵<sup>1</sup>, 赵明生<sup>2</sup>

(1. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002; 2. 保利民爆哈密有限公司, 哈密 839000)

**摘 要:** 城镇废弃烟囱爆破拆除施工由于四邻环境复杂、烟囱筒体结构不稳定,对爆破的精准性、安全性提出了很高要求。贵阳市轮胎厂烟囱为钢筋混凝土结构,为满足安全生产要求,根据理论计算选取了合理的爆破方案,采取了覆盖防护、减震沟隔离、钢管排架防护等控制措施控制爆破次生灾害,并通过控制最大单响药量、优化爆破网路等措施,理论计算得到振动、飞石均满足安全判据。爆破效果表明:邻近受控建(构)筑物在爆破拆除施工过程中没有受到损伤,爆破振动峰值为 0.45 cm/s,合理的爆破参数和有效的防护措施是保证爆破过程中控制次生危害的有效办法。

**关键词:** 烟囱; 复杂环境; 爆破拆除; 减振技术

中图分类号: TU746.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)02-0069-06

## Study on Blasting Demolition of Abandoned Chimney in Complex Environment and Safety Control Measures

YU Hong-bing<sup>1</sup>, ZHAO Ming-sheng<sup>2</sup>

(1. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839000, China)

**Abstract:** Due to the complex surrounding environment and unstable structure of the chimney, the blasting demolition of abandoned chimneys in cities and towns requires high accuracy and safety. One example is the chimney of Guiyang tire factory which possesses a reinforced concrete structure. In order to meet the requirements of safety production, a reasonable blasting scheme is selected according to the theoretical calculation. And the control measures such as covering protection, damping ditch isolation, steel pipe bent protection are taken to control the secondary disasters due to blasting. Through controlling the maximum single delay charge, optimizing the blasting network and other measures, the theoretical calculation shows that the vibrations and flying rocks meet the safety criterion. The blasting effects show that the adjacent buildings (structures) under control are not damaged in the process of blasting demolition, and the peak particle velocity of the blasting vibrations is 0.45 cm/s. Reasonable blasting parameters and effective protective measures are efficient methods to control secondary disasters in the blasting process.

**Key words:** chimney; complex environment; blasting demolition; vibration reduction technology

受安全性和工期要求,城镇地区烟囱多采用爆

破作为主要的施工方法。爆破拆除高大钢筋混凝土具有以下特点:①烟囱高度高、体积大;②拆除工期紧;③四邻环境复杂,安全环保要求高。褚怀保、徐鹏飞等以高速摄影监测、数值模拟为基础,理论再现了钢筋混凝土烟囱爆破拆除倒塌过程中的受力过程<sup>[1]</sup>;王宇、姚颖康等结合视频监控技术、应变监测技术和数值模拟技术<sup>[2]</sup>,对钢筋混凝土烟囱爆破拆

收稿日期:2020-01-12

作者简介:余红兵(1991-),男,湖南常德人,高级工程师,硕士,主要从事工程爆破方向研究,(E-mail)602574716@qq.com。

通讯作者:赵明生(1982-),男,黑龙江双城人,研究员、博士,主要从事工程爆破技术研究,(E-mail)542042223@qq.com。

基金项目:2017年新疆维吾尔自治区天池百人计划(新人社函[2017]699号)



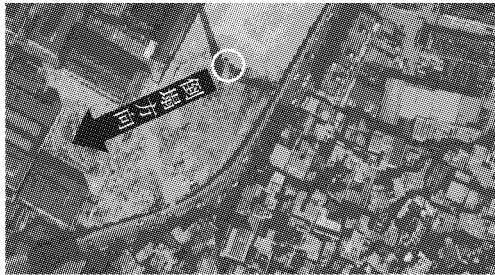


图 2 烟囱设计倒塌方向  
Fig. 2 Design collapse direction of chimney

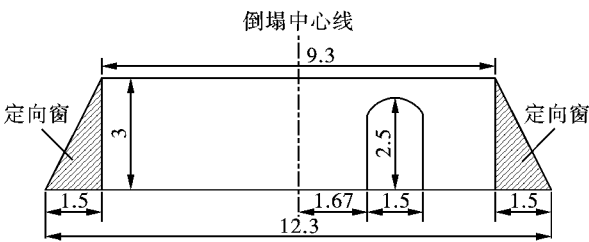


图 3 烟囱爆破切口展开图(单位:m)  
Fig. 3 Development of blasting cut of chimney(unit:m)

表 1 烟囱拆除工程爆破参数  
Table 1 Blasting parameters of chimney demolition project

| 名称 | 壁厚/<br>cm | 孔径/<br>mm | 孔距/<br>cm | 排距/<br>cm | 炸药单耗/<br>( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 单孔装药<br>量/g | 炸高/m | 总布<br>孔/个 | 总装药<br>量/kg |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------------------------|-------------|------|-----------|-------------|
| 外壁 | 35        | 40        | 30        | 30        | 2500                                        | 80          | 3.0  | 310       | 24.80       |
| 内壁 | 30        | 40        | 30        | 30        | 1500                                        | 50          | 3.0  | 205       | 10.25       |

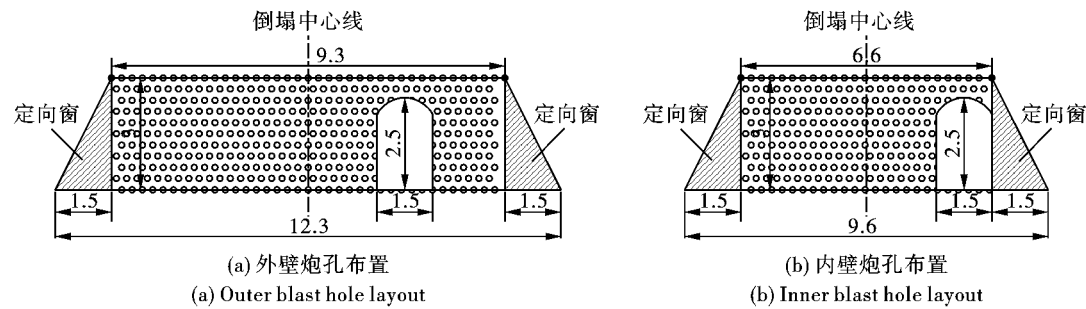


图 4 炮孔布置示意图(单位:m)  
Fig. 4 Layout of blastholes(unit:m)

3 安全防护措施

3.1 爆破振动控制

3.1.1 振动防护措施

在烟囱与被保护建(构)筑物之间且离爆源一定距离外开挖减震沟可以有效地减小爆破振动。根据周边勘察情况,本次烟囱爆破主要保护东侧 35 m 围墙外城市燃气管道,45 m 处为居民楼。为减少爆破振动和烟囱倒塌触底振动对城市燃气管道产生影响,在烟囱东侧距离围墙 1 m 出开挖减震沟,减震沟底 2 m,顶宽 3 m,深 3 m,开挖长度约 100 m。

为进一步减少烟囱倒塌过程中触地产生的触地振动,根据物理学动量和冲量原理,在物体与地面之间搭设缓冲物,使物体触地时间增长,速度减小,动量减小,使得接触地面瞬间冲量减小。因此,根据动量和冲量原理在倒塌正方向布设 3 道缓冲堤,当烟囱倒塌后会为缓冲堤的横向扩张提供补偿空间,使烟囱倒塌触地整个缓冲时间变长,降低的触地的瞬间速度,烟囱动量减小,转化成触地冲量减小,很好

的降低了烟囱触地振动。

缓冲堤沿倒塌中心线从塔基边缘算起距离 40 m、60 m 处各布设一条。每道长 30 m、宽 3 m,高度依次为 2 m、2.5 m。每道缓冲堤外围用双层沙包墙堆砌,缓冲堤中间为空(间距 1 m),缓冲堤平面见图 5。



图 5 现场安全防护总体俯视图  
Fig. 5 Overall top view of site safety protection

3.1.2 振动校核

需要对爆破振动和触地振动进行验算,保证周围受控建(构)筑物在爆破拆除过程中振动处于安

全阈值之内<sup>[7,8]</sup>。

### (1) 爆破振动

根据公式

$$v = k_1 k (\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha$$

烟囱距需保护距离为 35 m 左右,取  $R = 45$  m;根据经验取  $K = 100$ ,  $\alpha = 1.5$ ;  $Q$  次最大起爆药量,根据装药设计,  $Q$  取 24.8 kg。现场采用双层防护和减震带防护  $K_1$  取为 0.5。

即  $V = 0.5 \times 100 \times [24.751/3/35]^{1.5} \approx 1.8$  cm/s

按照 GB6722—2014《爆破安全规程》取周边设施最大允许振动速度取为 2 cm/s,可见爆破时产生的振动能够满足安全要求。

### (2) 触地振动

由中科院力学所公式

$$V_t = K_t \left( \frac{Mgh}{R\sigma} \right)^\beta$$

式中:  $V_t$  为振动峰值速度, cm/s; 倒塌方向采用三排减震堤,  $K_t$  取 0.5;  $\beta$  为衰减系数, 取 1.5;  $\sigma$  为塌落地面介质承载极限强度, 取 10 MPa;  $R$  为质心至计算点的距离, m。该烟囱总质量  $M$  约 1280 t, 重心  $h$  为 30 m, 得到不同距离的塌落振动速度计算值如表 2 所示。

表 2 塌落振动速度计算值

Table 2 Calculation value of collapse vibration speed

| 距离 $R$ /m                | 30   | 45   | 60   | 100  |
|--------------------------|------|------|------|------|
| 震速/(cm·s <sup>-1</sup> ) | 0.72 | 0.39 | 0.26 | 0.12 |

塌落触地点距离管道 45 m, 距离民房 60 m, 经测算均小于安全允许阈值, 因此塌落体的触地振动不会对周边受控对象造成危害。

### 3.2 爆破飞石及冲击波控制

为减小爆破飞石, 对烟囱爆破切口布孔部位采用胶皮网双层防护。对布孔部位采用双层胶皮网包裹捆扎, 如图 6 所示。在烟囱东侧厂区内距离围墙不低于 10 m、东南侧处搭建 9 m 高钢管排架, 长度 100 m, 在倒塌正前方紧邻需保护厂房搭设长 40 m, 高 9 m 钢管排架, 搭设总长度合计 140 m。排架外挂双层草垫, 防止爆破飞石、触底飞石以对被保护建筑物造成损伤。

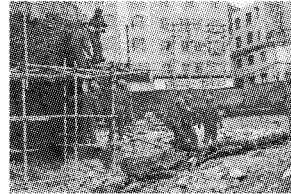
由中科院力学所公式

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

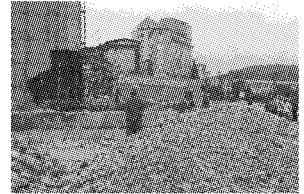
$$S_{\max} = (f_1 \cdot f_2 \cdot V_f^2 \cdot \sin 2\theta)/g$$

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<sup>2</sup>;  $S_{\max}$  为个别飞

石最大飞散距离, m;  $f_1$  为介质系数, 被爆介质为混凝土结构系数取 9.5;  $f_2$  为防护系数, 一层防护取 2, 两层防护取 1, 三层防护取 0.5;  $\theta$  为飞石抛射角, 设计中取 5°。爆破设计中在布孔部位采用胶网双层防护, 同时在东侧和西南侧搭设钢管排架, 在钢管排架上覆盖双层草垫, 防护系数取  $f_2 = 0.05$ 。



(a) 胶皮网安全防护施工  
(a) Safety protection  
construction of rubber net



(b) 胶皮网防护施工完成效果  
(b) Completion effect of rubber  
net protection construction

图 6 炮孔双层胶皮网安全防护

Fig. 6 Safety protection engineering of  
double layer rubber net for blasthole

根据上述公式计算可得: 最大飞石距离为  $S_{\max} \approx 19.2$  m, 满足安全要求。

### 3.3 安全警戒

按照技术设计进行上述各项减震、防飞石措施。起爆网路经现场爆破技术人员检查无误后方可起爆。起爆前, 明确划定安全和警戒位置, 以烟囱触地点为中心周围 100 m 范围为警戒范围, 100 ~ 200 m 范围内的居民全部疏散撤离, 200 m 以外的居民在爆破时不允许站在楼顶、阳台等无遮挡处, 共设立十一个警戒点。爆破警戒区域如图 7 所示。

## 4 试爆及爆破参数优化

选取烟囱左侧离定向窗 1 m 位置处 7 个外墙炮孔(呈 2、3、2 排列, 共三排), 4 个内衬炮孔(呈 2、2 排列, 共两排, 与外墙炮孔位置对应)进行试爆, 内墙炮孔装药 50 g, 外墙炮孔装药 80 g, 爆破后, 外墙混凝土表层未完全脱笼, 内墙脱落, 说明药量明显偏小, 经过人工锤击后发现混凝土部分未破碎厚度达 5 cm, 现场检查原因为钢筋笼距离外壁表面近, 在爆破时炸药能力大部分向烟囱内部释放, 未能使钢筋混凝土完全脱笼。为保证爆破效果, 随之在烟囱试爆位置右侧 1 m 处进行二次试爆, 外墙和内墙装药量分别为 100 g 和 80 g, 此次试爆爆破效果良好, 混凝土全部脱笼, 内衬装药位置全部塌落。爆破效果如图 8 所示。

## 5 爆破效果分析

如图 9 所示, 起爆后 2 s, 烟囱按照设计方向倾

倒,4 s 后烟囱整体偏移 2°后发生下坐,倒塌方向后侧支撑部分触地,切口闭合,随后速度加快倾斜,11 s 后烟囱倒塌至缓冲堤上,整个爆破倾倒过程持续约 11 s。从烟囱爆破录像中分析得到,烟囱在倾倒一定程度后发生下坐现象,主要是预留支撑体及

切口下方筒体强度不够,不能继续支撑切口上部筒体重量,同时,烟囱定向窗切口角度过大,使得烟囱在倾倒过程中定向窗不能在前期闭合,烟囱整体下坐。

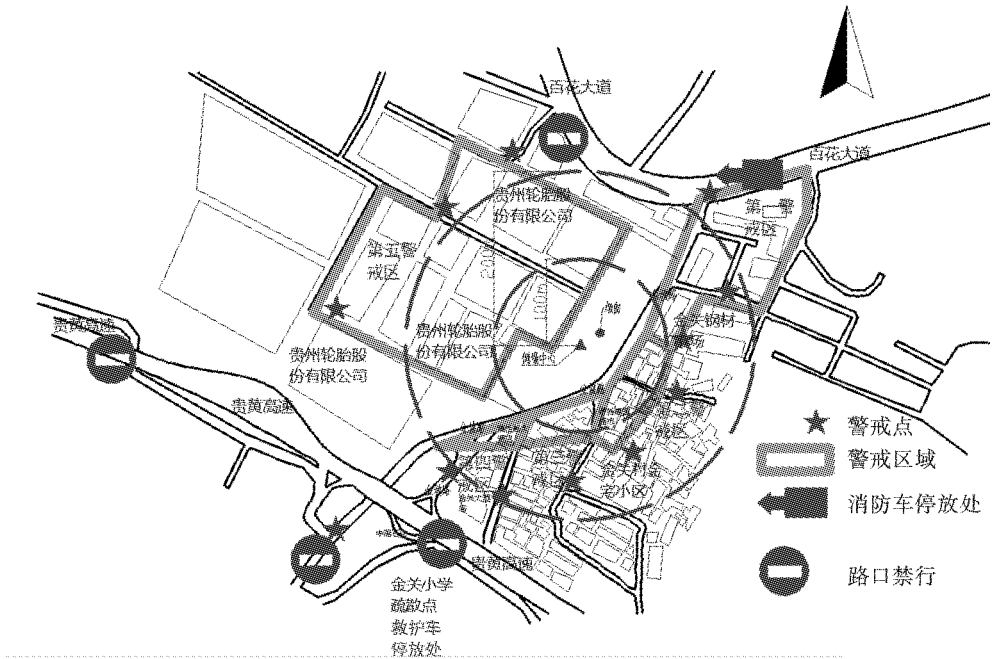


图 7 警戒平面示意图(单位:m)

Fig. 7 Sketch map of warning plane( unit:m)

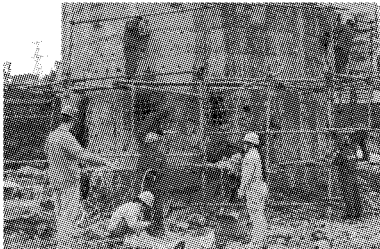


图 8 试爆效果图

Fig. 8 Effect diagram of explosion test

爆破后烟囱切口至以上 30 m 筒体部分破碎,30 m 以上筒体全部摔成扁平状或碎块,烟囱在倒塌中心线上的最大塌散距离为 78 m,横向最大塌散宽度为 10 m,爆堆集中。在缓冲堤和减震沟的共同作用下,经监测结果倒塌触地振动在距离 50 m 处测得数据为 0.45 cm/s,对周边房屋和管道没有造成任何不利影响。同时,经过爆后勘察,爆破飞石和触地飞石没有对倒塌侧方和后方的居民房屋造成破坏,通过录像分析,最大飞石距离为 20 m。

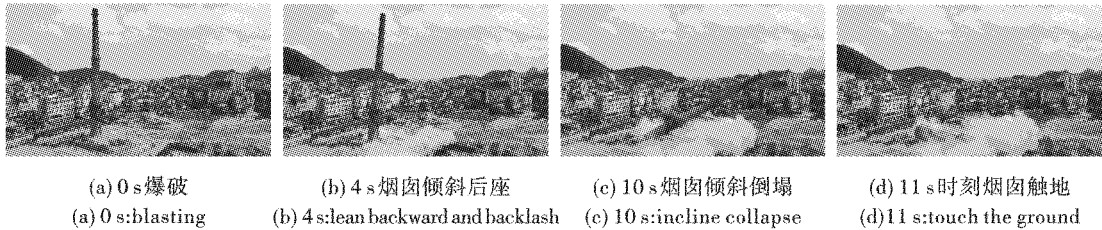


图 9 不同时刻烟囱倒塌形态分析

Fig. 9 Analysis of chimney collapse at different times

6 结论

(1)对于自重较重的钢筋混凝土烟囱,后续类

似工程为降低后座侧翻风险,可缩小爆破切口至烟囱底部范围的 210°,同时,定向窗可采用复式梯形切口,减小向窗角度至 30°。

(2)在不清楚钢筋混凝土钢筋分布情况下必须按照《爆破安全标准》GB6722 进行试爆,确保试爆后形成的各窗口性状良好,相应部位内衬应全部破碎,才根据试爆调整药量能装药填塞。

(3)对爆破切口的有效柔性主动防护,倒塌方向堆砌沙袋缓冲堤,防护方向挖掘减震沟,可将爆破次生灾害控制在安全允许范围内。

### 参考文献 (References)

- [1] 褚怀保,徐鹏飞,叶红宇,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除倒塌与受力过程研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22):183-186,198.
- [1] CHU Huai-bao, XU Peng-fei, YE Hong-yu, et al. Collapse process and loading-bearing process of reinforced concrete chimney during blasting demolition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22):183-186, 198. (in Chinese)
- [2] 王 宇,姚颖康,贾永胜,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除失稳下坐和空中断裂现象研究[J]. 爆破, 2018, 35(4):1116-126.
- [2] WANG Yu, YAO Ying-kang, JIA Yong-sheng, et al. Phenomenon of downward crush and break in air of reinforced concrete chimneys in blasting demolition[J]. Blasting, 2018, 35(4):1116-126. (in Chinese)
- [3] 徐鹏飞,张英才,盖四海,等. 180 m 钢筋混凝土烟囱两段单向控制爆破拆除[J]. 爆破, 2017, 34(1):129-132, 147.
- [3] XU Peng-fei, ZHANG Ying-cai, GAI Si-hai, et al. Controlled explosive demolition of 180 m reinforced concrete chimney by two section and same direction[J]. Blasting, 2017, 34(1):129-132, 147. (in Chinese)
- [4] 苏筱嘉,边作青,王友杰,等. 两座 150 m 高钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除[J]. 工程爆破, 2017, 23(6):39-42.
- [4] SU Xiao-jia, BIAN Zuo-qing, WANG You-jie, et al. Direction blasting demolition of two 150 m high reinforced concrete chimneys[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6):39-42. (in Chinese)
- [5] 司君婷,吕小师,曹 娟. 210 m 钢筋混凝土烟囱高位缺口控制爆破拆除实践[J]. 爆破, 2017, 34(1):124-128.
- [5] SI Jun-ting, LV Xiao-shi, CAO Juan. Application of controlled explosive demolition of 210 m reinforced concrete chimney with high blast-cut[J]. Blasting, 2017, 34(1):124-128. (in Chinese)
- [6] 赵 文,李玉景,张宝亮,等. 复杂环境下 80 m 高危裂缝钢混烟囱爆破拆除[J]. 工程爆破, 2018, 24(2):77-82.
- [6] ZHAO Wen, LI Yu-jing, ZHANG Bao-liang, et al. Blasting demolition of 80 m steel-concrete chimney with seriously cracked under complex conditions[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2):77-82. (in Chinese)
- [7] 陈恒东,罗 宁,鲍传齐,等. 复杂环境下 65 m 高砖混结构烟囱定向爆破拆除[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(2):32-34.
- [7] CHEN Heng-dong, LUO Ning, BAO Chuan-qi, et al. Demolition of 65 m high brick concrete chimney by Directional Blasting in complex environment[J]. Coal mine blasting, 2019, 37(2):32-34. (in Chinese)
- [8] 陈德志. 特大型高耸构筑物爆破拆除安全技术研究及工程应用[C]//2016 中国金属学会冶金安全与健康分会学术年会论文集. 中国金属学会, 2016:17.
- [8] CHEN De-zhi. Research and engineering application of blasting demolition safety technology for super tall structures[C]//Proceedings of 2016 Annual Meeting of Metallurgical Safety and Health Branch of China Metal Society. China Metal Society, 2016:17. (in Chinese)

英文编辑:何 松

(上接第 68 页)

- [9] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 11(1):1-4.
- [9] ZHOU Jia-han. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition[J]. Engineering Blasting, 2009, 11(1):1-4. (in Chinese)
- [10] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- [11] 陶铁军,池恩安,张建华,等. 爆破地震波对结构体受振响应幅值的影响分析[J]. 爆破, 2015, 32(3):114-117, 171.
- [11] TAO Tie-jun, CHI En-an, ZHANG Jian-hua, et al. Influence analysis of blasting seismic wave on response amplitude of structure[J]. Blasting, 2015, 32(3):114-117, 171. (in Chinese)
- [12] 汪旭光,郑炳旭,张正忠,等. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010.

英文编辑:陈东方