

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.013

薄壁型钢混结构烟囱控制爆破拆除*

谢亮波^{1,2}, 王 铭², 张西良^{1,2}, 仪海豹^{1,3}, 顾红建¹, 江东平^{1,2}

- (1. 中钢集团 马鞍山矿山研究院有限公司, 马鞍山 243000;
2. 马鞍山矿山研究院 爆破工程有限责任公司, 马鞍山 243000;
3. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 马鞍山 243000)

摘要: 为消除石溪野水泥厂废弃薄壁型钢混结构烟囱的安全隐患,在分析烟囱周边环境及拆除技术难点的基础上,采用与高压线平行的定向倒塌方案进行控制爆破拆除。设计爆破切口高度2.25 m,切口角度225°,三角形定向窗高度1 m,筒壁和烟道处炸药单耗分别取3.8 kg/m³和2.3 kg/m³;倒塌方向上设置两道高度1 m的土挡墙以减弱塌落振动,采用铁丝网和多层密目网防护措施以控制爆破飞石。通过精细的爆破设计和组织施工,成功实现了烟囱的定向爆破拆除,爆破振动和飞石控制在安全允许范围内。

关键词: 薄壁型钢混烟囱; 拆除爆破; 倒塌方案; 危害控制; 爆破效果

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)02-0075-05

Controlled Blasting Demolition of Thin-walled Steel-concrete Structure Chimney

XIE Liang-bo^{1,2}, WANG Ming², ZHANG Xi-liang^{1,2}, YI Hai-bao^{1,3}, GU Hong-jian¹, JIANG Dong-ping^{1,2}

- (1. Sinosteel Maanshan Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, China;
2. Maanshan Institute of Mining Research Blasting Engineering Co., Ltd., Maanshan 243000, China;
3. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan 243000, China)

Abstract: In order to eliminate the safety hazard of the abandoned thin-walled steel-concrete chimney in Shixiye Cement Plant, the controlled blasting demolition was carried out by considering the directional collapse scheme which parallel to the high-voltage line based on analyzing the surrounding environment of the chimney and the difficulties in demolition. The height of blasting cut was 2.25 m, the angle of the cut was 225°, and the height of the triangular oriented window was 1 m. The powder factor at the wall and the flue were 3.8 kg/m³ and 2.3 kg/m³ respectively. Two soil retaining walls with a height of 1 m were set in the collapse direction to reduce the collapse vibration. Barbed wire and multi-layer mesh were used to control the blasting flying rock. Through the fine blasting design and construction organization, the directional blasting demolition of the chimney was successfully realized, and the blasting vibration and flying rock were controlled within the safe allowable range.

Key words: thin-walled steel-concrete structure chimney; demolition blasting; collapse scheme; hazard control; blasting effect

收稿日期: 2020-01-14

作者简介: 谢亮波(1980-),男,高级工程师、硕士,主要从事矿山控制爆破及拆除爆破技术研究, (E-mail) xiellingbo2000@ sina.com。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(项目编号: 2017YFC0602902); 安徽省重点研究和开发计划资助项目(项目编号: 201904a07020038)

随着我国城市化进程的不断推进,大批待拆除高耸建(构)筑物的周边环境日益复杂,使得安全爆破拆除的难度逐渐增大,也对控制爆破提出了更高的技术要求。为实现复杂环境下的安全爆破拆除,诸多爆破科研工作者开展了大量相关研究工

作^[1-6]:谢先启院士提出了大型拆除爆破工程项目全寿命周期管理模式,以及 SCPE 项目管理方法,并在 3.5 km 武汉沌阳高架桥爆破拆除工程中得到应用;费鸿禄利用 Matlab 数值软件分析了冷却塔塔体触地解体过程,提出冷却塔爆破整体延期时间不宜过大的建议,降低冷却塔爆破对周围建筑的危害;季杉采用单柱和单跨桥梁模型研究了爆破振动和塌落振动传播规律,指出塌落振动主频与结构前几阶频率接近,爆破工程时需优先考虑塌落振动;武哲采用人工剪破碎和机械剪切等方法结合力学原理对剪力墙、电梯井等进行了预拆除,通过结合楼房的建筑材料、结构和受力状态选择爆破参数,实现了 90 m 高楼房的折叠控制爆破;张建华利用 ANSYA/LS-DYNA 软件研究了小缺口爆破技术对冷却塔拆除的影响,提出小缺口爆破技术能够促进冷却塔的倾倒速度,提高冷却塔触地破碎程度和降低爆破振动;蒙云琪采用数值模拟软件建立分离式耦合模型,优化确定了铁四院前大楼爆破拆除方案。已有研究成果从数值模拟、振动控制等角度进行了多方面研究,然而在结构设计资料不详的薄壁烟囱拆除方面鲜有报道。

以长江沿岸某薄壁型钢筋混凝土烟囱为例,在综合考虑烟囱周边环境及拆除难点的基础上,制定安全可靠的倒塌方案,从合理选择爆破切口高度、优化爆破孔网参数、加强安全防护等角度进行爆破危害控制,以实现烟囱的定向控制爆破拆除,消除烟囱的安全隐患,为类似拆除爆破提供一定借鉴。

1 概述

1.1 烟囱概况

石溪野水泥厂区内的待拆烟囱位于长江沿岸 300 m 范围内,运行 30 多年后废弃,表层混凝土风化严重,岩块片落现象突出。按照国家长江绿色发展和生态保护规划,消除烟囱的安全隐患,须对其爆破拆除。该烟囱高度 62 m,内衬耐火砖的钢筋混凝土结构;呈下部直径大、上部直径小的圆筒形;下部外径 4.5 m,内径 3.5 m;壁厚 50 cm,其中耐火砖厚度 24 cm,钢筋混凝土厚度 21 cm。在烟囱正南侧有一烟道,宽×高=1.1 m×1.5 m。

1.2 周围环境

该烟囱周边环境复杂,东侧有一从市发电厂引出的南北走向高压线路,与烟囱的最短距离为 85 m;东北侧和东南侧共计有 3 座高压线塔,距离分别为 180 m、255 m 和 270 m。烟囱东侧、西侧、北侧分别为西山路、沿江大道和六汾河路,最近距离分别

为 53 m、173 m 和 310 m。东北侧距某炉料加工厂最近 235 m。烟囱周边环境示意图见图 1,现场照片见图 2。

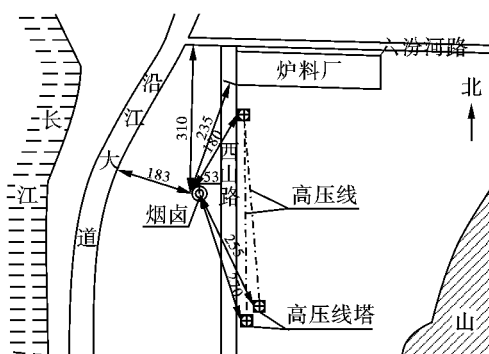


图 1 烟囱周边环境示意图(单位:m)

Fig. 1 Chimney surrounding environment(unit:m)

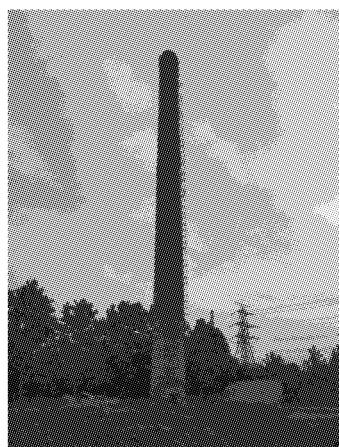


图 2 烟囱照片

Fig. 2 Chimney scene photo

2 拆除爆破方案

2.1 爆破拆除难点

- (1) 烟囱建设年代久远,结构设计图纸缺失,钢筋分布不清,增大爆破参数选取难度。
- (2) 通常烟道处钢筋分布较为密集,烟道未预拆除,可能对倒塌方向存在一定影响。
- (3) 该烟囱为典型的薄壁结构,对孔网参数、炸药单耗以及爆破飞石控制带来挑战。
- (4) 内衬耐火砖年久风化,爆破切口处进行预处理,存在整体剥离塌落的安全风险。
- (5) 周边环境复杂,爆破危害控制难度大。

2.2 倒塌方案及预处理

(1) 倒塌方案

该烟囱的正东侧 85 m 处为需保护的高压线路,而南侧场地比较开阔;同时考虑到烟道位于正南侧,由于工期紧,没有进行预拆除,为此,设计采用向正

南侧定向倒塌方案,倒塌方向与高压线走向一致。

(2) 预处理

定向窗的对称性是决定烟囱按照设计方向倒塌的关键。为保证倒塌方向的可靠性,在爆破切口两侧对称各设置一个三角形定向窗,高度 1 m,底边 1.5 m;经现场测量定位后,采用人工方式开凿。

为避免内衬耐火砖整体剥离塌落,在爆破切口位置间隔处理掉部分耐火砖,剩余部分作为上部耐火砖的安全支撑。

2.3 爆破设计参数

(1) 爆破切口

爆破切口是影响烟囱失稳倾倒的关键因素。切口高度 h 与烟囱的材质和筒壁厚度 δ 有关,同时应

保证爆破切口闭合后烟囱的重心偏离烟囱的支撑点。通常切口高度 h 需满足^[7-9]

$$h \geq (3 \sim 5)\delta$$

同样高度下,壁厚时,取小值;壁薄时,取大值。根据类似工程实际经验,这里设计采用梯形爆破切口;考虑到烟道未进行预处理,且为薄壁结构,切口高度应适当增大,设计切口高度取 2.25 m。为便于现场钻孔作业,切口下沿离地高度 75 cm。

预留具有一定承载能力的支撑柱不进行爆破,承受上部重力荷载,可以保证烟囱倾倒方向的可靠性。通常,爆破切口范围是筒壁的周长的 $1/2 \sim 2/3$,对应的圆心角为 $180^\circ \sim 240^\circ$;这里综合考虑选取切口角度 225° 。爆破切口示意图见图 3。

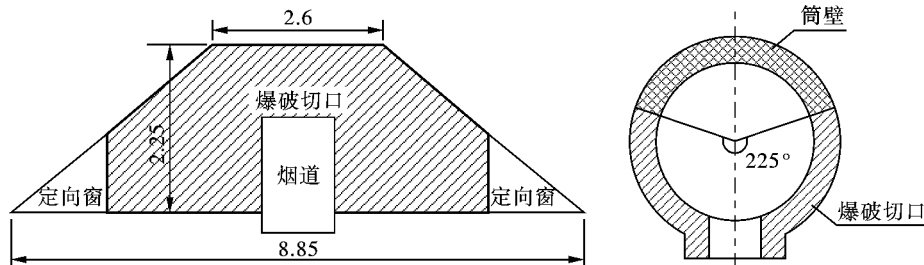


图 3 爆破切口示意图(单位:m)

Fig. 3 Figure of blasting cut(unit:m)

(2) 炸药单耗

单位炸药消耗量是拆除爆破设计中的一个重要参数。选择的炸药单耗不合适,不仅影响爆破效果,还会导致爆破事故。单耗选取的太大,爆破过粉碎,爆破飞石过远,防护效果不好时易于发生飞石伤害事故;反之,单耗选取的太小,容易发生炸而不倒现象,增加二次处理安全风险。

(3) 爆破参数

炮孔布置应力求炮孔规则整齐布置,使炸药均匀分布于爆破体中,以保证爆破后破碎块度均匀。采用直径 $\phi 40$ mm 钻孔,正方形布孔方式;鉴于烟囱结构设计图纸缺失,布筋情况不清,在定向窗开凿前,根据初步估计筒壁厚度,设计的筒壁和烟道处孔距分别为 25 cm 和 30 cm,孔深分别为 15 cm 和 70 cm,设计爆破切口处共计布置 168 个炮孔。

在定向窗完成后,实际筒壁厚度较预估值薄,原设计孔距参数偏大。因此,对孔网参数进行了适当调整,分别在筒壁原孔位对角线中心和烟道处进行了补孔工作;实际共计布孔 289 个。经现场补孔调整后,实际筒壁炸药单耗为 3.8 kg/m^3 ,烟道处 2.3 kg/m^3 ;由此计算,筒壁和烟道处的单孔装药量分别为 40 g 和 200 g,共计使用炸药量 16.32 kg。烟

道处采取分两段装药方式,每段 100 g,以均衡炸药能量分布。

(4) 起爆网路

烟囱拆除爆破的炮孔数量多,且对起爆可靠性要求严格。为此,设计采用非电复式起爆网路;沿烟道口中心线为对称轴,两边孔内分别采用 2 段和 4 段导爆管雷管,孔内同段控制在 20 发内为一簇,簇连接;孔外复式连接至起爆点。

3 拆除爆破危害控制

3.1 塌落振动控制

(1) 塌落振动计算

根据中国地震烈度表(GB/T 17742—2008)可知,该烟囱所在地区的地震烈度为 6 度,对应的地面峰值速度为 $5 \sim 9 \text{ cm/s}$ 。根据《电力设施抗震设计规范》(GB 50260—2013)和《架空输电线路杆塔结构设计技术规定》(DLT 5154—2012),输电线路杆塔和基础抗震设防烈度应采用当地的基本地震烈度。说明高压线塔基的抗震设防烈度为 6 度。为确保爆破作业期间高压线塔基的安全,这里选取的安全允许振动速度为 2 cm/s 。

爆破振动和塌落振动效应是周边设施安全的一

个重要影响因素^[10-13]。烟囱爆破拆除主要以塌落振动为主,爆破振动强度较小,只要塌落振动速度控制在周边保护设施的安全允许范围内即可满足要求。根据中国科学院力学研究所周家汉教授的研究成果,烟囱爆破塌落振动速度可以按照以下经验公式进行计算^[14]

$$V_t = K_t \left[\frac{R}{(Mgh/\sigma)^{1/3}} \right]^\beta$$

式中: V_t 为塌落引起的地面振动速度,cm/s; M 为下落构件的质量,t; g 为重力加速度,9.8 m/s²; h 为构件的高度,62 m; R 为观测点至冲击地面中心的距离,m; σ 为塌落地面介质破坏强度,一般取10 MPa; K_t 、 β 为塌落振动速度衰减系数和指数,分别取3.37和-1.8。

根据烟囱建筑设计图纸,烟囱质量 M 约为340 t,烟囱高度 h 为62 m,东北侧高压线塔基至冲击地面中心的距离为200 m。

计算可知,烟囱塌落在最近高压线塔基附近引起的地面振动速度为0.11 cm/s,远小于高压线塔基的安全允许振动速度2.0 cm/s。

(2) 塌落振动控制措施

为减轻烟囱塌落振动影响范围,在倒塌方向上分别在距离烟囱20 m和40 m处各设置一个高度为1.0 m的土挡墙,作为塌落冲击时的缓冲垫层。

3.2 爆破飞石控制

(1) 爆破飞石距离计算

由于拆除爆破的炮孔深度浅,堵塞长度小;破碎钢筋混凝土结构的炸药单耗大,如果采取的防护遮挡措施不到位,可能造成临近建筑物、设施的损坏和人员的伤害。无覆盖条件下,拆除爆破飞石可采用如下经验公式进行估算^[15]

$$R_{\max} = 70k^{0.58}$$

式中: R 为个别飞石最大距离,m; k 为炸药单耗,kg/m³。

计算可得,无覆盖条件下,爆破飞石最大距离为151.8 m。

(2) 飞石安全防护及安全警戒范围

为有效控制爆破飞石危害,减小飞石飞散距离,对爆破切口位置采用铁丝网和多层密目网进行近体防护。同时,为防止烟囱塌落后飞溅石块伤人事故的发生,爆破拆除前,将倒塌方向前侧地面上的碎石等清理干净。

根据本次爆破烟囱的周边环境,为避免爆破飞石伤害事故的发生,保证爆破作业安全,烟囱南侧、北侧、东侧的爆破警戒范围分别为500 m、310 m和

350 m,西侧至江边。在爆区周围的主要道路口共计设置八个警戒点,安排专人进行爆破警戒,确保人员、车辆等疏散到安全地点。

4 现场爆破效果

通过精心的设计、施工,烟囱起爆10 s后,完全按照预定的方向实现了塌落触地,塔体完整性较好,未对周边高压线等造成任何损害;现场振动监测结果表明,在最近高压线塔基处的峰值振动速度为0.21 cm/s,稍大于理论预测值,但仍在其安全允许振动速度范围内;爆破飞石控制在40 m范围内,取得了较好的爆破危害控制效果。现场爆破效果见图4。



图4 现场爆破效果

Fig. 4 On-site blasting effect

本次爆破作业成功实施,较好的保证了周边建(构)筑物的安全。中央电视台在《壮丽70年 奋斗新时代——共和国发展成就巡礼·安徽》—“为有源头活水来,共抓长江大保护”栏目,对该烟囱拆除爆破进行了全程现场直播报道。

5 结语

(1) 烟囱结构设计图纸是爆破孔网参数设计的关键;对于建设年代久远、技术资料缺失的钢混烟囱,应根据开凿定向窗掌握的筒壁参数对设计方案进行适当调整,保证倒塌方案的可靠性。

(2) 烟囱拆除后,现场塌落振动和爆破飞石皆控制在安全范围内,说明了爆破设计参数、切口方案的合理性,设置缓冲减振挡墙和近体覆盖防护对爆破危害控制是十分有效的,对类似薄壁烟囱爆破拆除具有一定指导借鉴作用。

(3) 该爆破工程的圆满实施,既消除了烟囱的安全隐患,又加快了水泥厂拆除整治进度,有力推进了安徽长江生态景观带建设步伐,为周边居民的生活环境和沿江生态提升创造了有利条件。

参考文献 (References)

- [1] 谢先启,贾永胜,姚颖康,等. 大型拆除爆破工程 SCPE

- 项目管理方法研究与实践[J]. 爆破,2015,32(3):118-122.
- [1] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Study on SCPE project management method of large-scale explosive demolition projects[J]. *Blasting*, 2015, 32(3):118-122. (in Chinese)
- [2] 费鸿禄,张超逸,吕金齐,等. 冷却塔爆破拆除倾倒解体及振动研究[J]. 爆炸与冲击,2019,39(2):139-147.
- [2] FEI Hong-lu, ZHANG Chao-yi, LYU Jin-qi, et al. On collapsing disintegration and vibration of a cooling tower subjected to blasting demolition [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2):139-147. (in Chinese)
- [3] 季 杉,谢伟平,王 礼. 爆破振动与塌落触地振动特点及传播规律试验[J]. 振动与冲击,2018,37(11):195-201.
- [3] JI Shan, XIE Weiping, WANG Li. Tests for ground vibration characteristics and propagation laws due to blasting and touchdown impact [J]. *Journal of vibration and shock*, 2018, 37(11):195-201. (in Chinese)
- [4] 武 哲,黄寅生,张耀良,等. 90 m 高楼房折叠控制爆破[J]. 爆破,2019,36(2):78-84.
- [4] WU Zhe, HUANG Yin-sheng, ZHANG Yao-liang, et al. Folding controlled blasting of 90 m tall building[J]. *Blasting*, 2019, 36(2):78-84. (in Chinese)
- [5] 张建华,叶永喜,罗余祥,等. 小缺口爆破技术对冷却塔拆除的影响数值模拟研究[J]. 爆破,2019,36(2):85-90.
- [5] ZHANG Jian-hua, YE Yong-xi, LUO Yu-xiang, et al. Numerical research on effect of small-notch blasting technology on explosion demolition of cooling tower[J]. *Blasting*, 2019, 36(2):85-90. (in Chinese)
- [6] 蒙云琪,倪明亮,操 鹏,等. 基于数值模拟的铁四院前大楼拆除爆破方案优化[J]. 爆破,2018,35(1):96-103.
- [6] MENG Yun-qi, NI Ming-liang, CAO Peng, et al. Optimization of demolition blasting scheme of TieSiYuan former building based on numerical simulation [J]. *Blasting*, 2018, 35(1):96-103. (in Chinese)
- [7] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
- [8] 游永锋. 复杂环境下框架-框剪结构厂房定向爆破拆除[J]. 爆破,2019,36(1):104-108.
- [8] YOU Yong-feng. Directional demolition blasting of frame-frame shear structure in complicated situation [J]. *Blasting*, 2019, 36(1):104-108. (in Chinese)
- [9] 涂 胜,周献忠,胡方华. 复杂环境下 85 m 两并立钢筋混凝土烟囱爆破拆除[J]. 爆破,2018,35(4):99-103.
- [9] TU Sheng, ZHOU Xian-zhong, HU Fang-hua. Explosive demolition for 85 m "twins" steel concrete chimneys in complicated surroundings [J]. *Blasting*, 2018, 35(4):99-103. (in Chinese)
- [10] 钟明寿,龙 源,刘 影,等. 城市高架桥塌落冲击地铁隧道结构的动态响应及防护技术[J]. 振动与冲击,2017,36(16):11-17.
- [10] ZHONG Ming-shou, LONG Yuan, LIU Ying, et al. Dynamic response and protection technology research on metro tunnels under collapse vibration of city viaduct [J]. *Journal of vibration and shock*, 2017, 36(16):11-17. (in Chinese)
- [11] 仪海豹,张西良,杨海涛,等. 基于重球触地实验的空区塌落振动分析及治理[J]. 爆炸与冲击,2019,39(7):91-103.
- [11] YI Hai-bao, ZHANG Xi-liang, YANG Hai-tao, et al. Goaf collapse vibration analysis and disposal based on a experiment of heavy ball touchdown [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(7):91-103. (in Chinese)
- [12] 杨永强,胡进军,谢礼立,等. 沌阳高架桥爆破拆除塌落引起的地面振动特征[J]. 振动与冲击,2015,34(5):110-114.
- [12] YANG Yong-qiang, HU Jin-jun, XIE Li-li, et al. Characteristics of ground vibration caused by blasting demolition collapse of zhuanyang viaduct [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(5):110-114. (in Chinese)
- [13] 张西良,徐进军,仪海豹,等. 边坡下民采空区稳定性分析及治理方案[J]. 金属矿山,2018(5):161-174.
- [13] ZHANG Xi-liang, XU Jin-jun, YI Hai-bao, et al. Stability analysis and disposal scheme of non-regular goaf under the mine slope [J]. *Metal Mine*, 2018(5):161-174. (in Chinese)
- [14] 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,2009,15(1):1-4.
- [14] ZHOU Jia-han. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition [J]. *Engineering Blasting*, 2009, 15(1):1-4. (in Chinese)
- [15] 汪旭光,于亚伦. 拆除爆破理论与工程实例[M]. 北京:人民交通出版社,2008.