

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.03.005

烟囱爆破拆除及其振动测试分析*

闫鸿浩 刘智远 李晓杰

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室(辽宁大连,116024)

[摘 要] 针对 41m 高钢混结构烟囱爆破拆除,采用梯形切口方式,设计了合理的烟囱爆破参数,并对爆破振动、塌落振动进行监测。通过分析振动图谱,得出烟囱从起爆到塌落共需 7s 左右。介绍了振动主频的两种求解方法,一种是国标规定的最大振动速度对应的频率;另一种是最大能量密度处由 FFT 分析快速傅里叶变换得到的频率。虽然两者之间存在较大差异,但都证明了爆破振动的主频要高于塌落振动的主频,塌落振动频率更接近于建筑物的固有频率,容易引起共振。

[关键词] 爆破拆除 爆破参数 爆破振动 塌落振动 FFT 变换

[分类号] TD235.37 TU746.5

引言

在城市扩建与厂房改建等工程中,常常涉及到废弃烟囱的爆破拆除问题。本次爆破根据以前烟囱拆除的经验设计爆破参数^[1-5]和经验公式,粗略地计算需保护建筑处的振动速度,使用爆破测振仪对拆除过程进行了监测,记录下测点的振动速度与振动频率,这为研究烟囱爆破后的运动过程及状态提供了准确、科学的依据。

1 爆破设计

某烟囱高 41m,底部直径 3.34m,顶部直径 2.00m。烟囱西侧紧邻一住房,东南侧 68m 处有一厂房。烟囱周围地质为上元古界震旦系长岭子组,主要岩性为灰绿色—黄褐色的泥质板岩和绢云钙质板岩。风化程度总体上自上而下为由强至弱的渐变关系。本次爆破采用梯形切口,实际爆破时,切口位于 +3m 处,切口处外直径 D 为 3.25m,壁厚 δ 为 17cm,根据以往爆破拆除经验,切口圆心角取值范围为 $216^{\circ} \sim 240^{\circ}$,本次拆除取为 240° ,故切口长度为 $L = \pi D(240/360) = 6.8\text{m}$,预留长度为 3.4m;切口闭合角取 35° ,孔距 0.2m,行距 0.2m,孔径 40mm,采用梅花布孔方式,总共孔数为 60 个,孔深为 12~13cm,装药后用泥土封堵炮孔,封堵高度为 7cm;切口高度 $h = (3 \sim 5) \times \delta = 0.51 \sim 0.85\text{m}$,此处取为 1.1m,设计参数见图 1。单孔药量为 40g,采用 MS—5 塑料导爆管雷管起爆,总使用药量 Q 为 2.4 kg。装药后,使用草袋覆盖爆破区,并用帆布包裹,

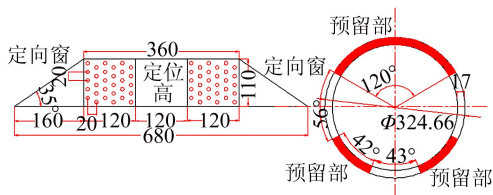


图 1 爆破横截面及切口展开图(单位:cm)

Fig.1 Unfolding diagram of blasting cross section and cut(unit:cm)

然后用铁丝捆绑,以防飞石伤人及损坏周边建筑物。

2 塌落触地时间与振动速度估算

2.1 塌落触地时间估算

切口以上烟囱总质量约为 134.5t,重心距地面高度为 $3.0 + 17.4 = 20.4\text{m}$ 。忽略爆破拆除的起爆与破碎时间,烟囱倒塌实际是中空锥台的倒塌计算问题。以被保留部位的最远点为转动绞点(忽略绞点的反向力矩影响),有角加速度、角速度公式存在:

$$J_0 \theta'' = R_0 M g \cos(\theta); \quad \omega = \theta' = \sqrt{2} \omega_0 \sqrt{\sin(\theta_0) - \sin(\theta)}; \quad \omega_0^2 = R_0 M g / J_0 = g / R_0 \quad (1)$$

式中: θ 为重心与转动绞点连线跟地平线的夹角; θ' 为角速度; θ'' 为角加速度; $\theta_0 = \arctan(17.3876/1.625) = 84.66^{\circ}$,为初始角; M 为上部烟囱质量; g 为重力加速度; $R_0 = 20.52\text{m}$ 为惯性转动半径; J_0 为绕绞点转动惯量。

转动角度与时间的关系见图 2,从开始 84.66°

* 收稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872044,10972051,10902023),辽宁省自然科学基金项目(20082161)

作者简介: 闫鸿浩(1975~),男,博士,副研究员,博导,主要研究方向:气相爆轰合成纳米材料。E-mail:honghaoyan@vip.sina.com

通信作者: 刘智远(1988~),男,硕士,主要研究方向:水相爆速测量。E-mail:shijizhixing852@163.com

转动到 -8.53° (其中烟囱底部预留高度为 3m, 烟囱底部到初始触地点的距离为 20m), 估算触地时间为 5.8s。

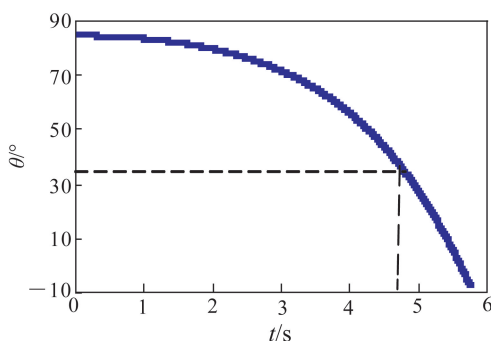


图 2 转动角与时间关系

Fig. 2 Relationship between rotation angle and time

2.2 振动速度估算

烟囱从起爆到倒塌理论上应有 4 个振动区域, 即爆破、闭合、前沿触地、倒塌。爆破时采用的同段别雷管, 近似认为同时爆破引起振动; 如果忽略反向力矩影响, 对于 35° 的闭合角, 从图 2 可以看出, 闭合振动应处于 4.75s 左右, 由于其引起的振动小于仪器的触发阈值, 所以振动图谱在此位置处未见明显振动。振动总体上分布在两个区域, 一是爆破振动区域, 二是塌落振动区域。依据上节估算, 两个区域间隔时间约为 5.8s。

根据我国 GB6722—2003《爆破安全规程》的规定, 对埋于地下集中炸药包爆炸, 其爆炸引起的质点振动速度, 可采用萨道夫斯基爆破振动经验公式:

$$v = K(\sqrt[3]{Q/R})^\alpha \quad (2)$$

大量观测数据表明, 在爆破拆除建筑物时, 振动预测公式中需要增加修正系数 K' , 才能使计算结果更接近于实际, 从而可以得到^[6]:

$$v = K'K(\sqrt[3]{Q/R})^\alpha \quad (3)$$

式中: v 为质点振动速度, cm/s; K 、 α 为与地形、地质有关的系数, 取 $K = 33.6$, $\alpha = 1.6$; Q 为单响最大药量, kg; R 为测点到爆源的距离, m; K' 为爆破拆除折减系数, 取 0.25 ~ 1.00, 此处取 0.25。

$$v = 0.25 \times 33.6(\sqrt[3]{2.4/68})^{1.6} = 0.0157 \text{ cm/s}$$

塌落振动常用振动速度校核公式为^[7]:

$$v_t = K_t \left(\sqrt[3]{\frac{MgH}{\sigma}} / R \right)^\beta \quad (4)$$

式中: v_t 为质点振动速度, cm/s; K_t 、 β 为衰减系数, 一般取 $K_t = 3.37$, $\beta = 1.66$; σ 为介质的破坏强度, MPa; R 为冲击地面中心到建筑物的最近距离, m; g 为重力加速度 9.8 m/s^2 ; M 为烟囱质量, t; H 为烟囱重心高度, m。

倒塌引起的地面质点振动速度为:

$$v_t = 3.37 \times \left(\sqrt[3]{\frac{134.5 \times 9.8 \times 20.4}{10}} / 54 \right)^{1.66} =$$

0.3545 cm/s

由计算结果可看出, 爆炸振动速度远小于塌落振动速度。根据《爆破安全规程》(GB6722—2003) 规定, 选取被保护物的爆破振动安全速度允许范围为 2.0 ~ 3.0 cm/s, 经过计算, 最大振动速度为 0.3545 cm/s, 满足标准。

3 振动速度监测

3.1 布点位置

本工程采用 TC—4850 爆破测振仪测试爆破及塌落振动速度和频率, 烟囱倒塌方向为南偏东 10° 左右, 在烟囱倒塌斜后方和斜前方各布有一个点, 仪器编号分别为 28 和 69, 28 号仪器到爆炸点和塌落中心的距离分别为 30m、46m; 69 号仪器爆心距与塌落中心距分别为 68m、54m, 仪器具体位置见图 3。仪器设置采集率为 2 kHz, 根据估算触地时间为 5.8s, 所以设置仪器采集时间长度为 10s。

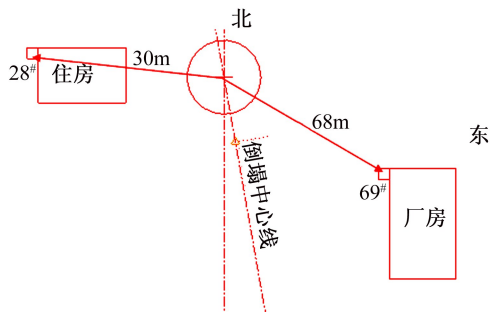


图 3 仪器布点图

Fig. 3 Instruments location diagram

3.2 仪器测试结果及 FFT 频谱分析

由于本次仪器设置的触发阈值为 0.05 cm/s, 而总起爆药量较小, 导致 28 号仪器没有爆破振动的触发, 由此可知其速度峰值小于 0.05 cm/s, 远低于建筑物的安全允许振速, 不会对建筑物造成损害。69 号仪器测得的振动合速度, 爆破振动与塌落振动的数据见表 1, 图谱见图 4 (合速度是同时记得的三维速度的矢量合成)。

从图 4 分析可以得到振动分两个区域, 第一个为爆破振动区域, 持续时间为 500ms 左右; 第二个为塌落振动区域, 持续 1000ms 左右, 触地时刻为 7000ms。假设爆破振动完毕后, 预留体爆破松散失去支撑能力, 那么烟囱从启动到触地大致为 $7000 - 500 = 6500 \text{ ms}$, 而估算触地时间为 5800ms, 相差 700ms 左右。这是因为计算时忽略了铰点的反向力矩, 所以持续时间会长一些。

表 1 实 测 振 动 速 度

Tab. 1 Actual measured vibration velocity

仪器号	振动类型	垂直速度 $v_z/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	垂直频率 /Hz	纬向速度 $v_y/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	纬向频率 /Hz	经向速度 $v_x/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	经向频率 /Hz	合速度 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
28	塌落振动	0.0339	10.309	0.0535	10.989	0.0828	12.981	0.0838
69-1	爆炸振动	0.0939	83.333	0.0554	333.331	0.0322	200.000	0.0967
69-2	塌落振动	0.0619	16.393	0.0388	15.873	0.0404	13.699	0.0710

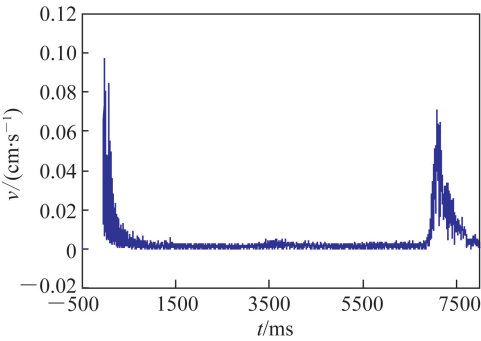


图 4 振动全过程合速度

Fig. 4 Total vibration process resultant velocity diagram

由表 1 可看出,塌落振动的频率远比爆炸振动的频率低,更接近于周围建筑物的固有频率(3 ~ 11Hz),易因共振而导致建筑物破坏;比较 69 号仪器测得的爆炸振动速度与塌落振动速度,却发现爆炸振动速度反而大,这是因为烟囱的质量较轻,且烟囱重心比较低,因而引起塌落振动速度比较小。

为了更好地表达烟囱爆炸拆除过程中振动问题,将振动测试波形图提出两个部分,即爆炸振动与塌落振动,各自振动合速度波形见图 5 与图 6。

为了进一步研究振动主频,这里又采用快速傅里叶变换(FFT)计算各自的振动主频^[8]。先对当前通道波形的数据进行窗函数处理,然后做 FFT 分析,寻求最大幅值下的振动频率,计算公式为:

$$Y(K) = \frac{1}{N} \sum X(n) W(n) \times e^{-j2\pi kn/N}$$

(5)

式中: $X(n)$ 为输入波形序列; $W(n)$ 为窗函数序列,

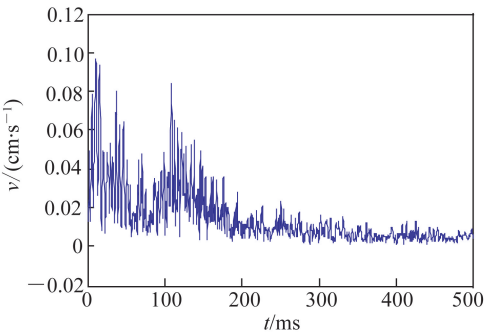


图 5 爆破振动合速度

Fig. 5 Blasting resultant velocity diagram

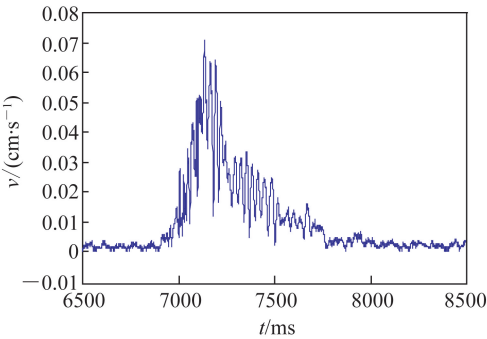


图 6 塌落振动合速度

Fig. 6 Touchdown resultant velocity diagram

取 $W(n) = 1$ 的矩形窗; N 为参加 FFT 计算的序列点数, n 值从 0 ~ $N - 1$; $Y(K)$ 是复数序列取模运算得到幅值谱 $|Y(K)|$, 不对其作对数归一化处理; $Y(K)$ 对应的频率计算为 $[\text{采集率} \times (i-1)/IX]$, $i = 1 \sim IX$, 其中 $IX = \text{Int}(\log n / \log 2 + 1)$, $IX = 2^n$ 。

选择 69 号仪器测试原始数据分区对 Z 向做 FFT 频谱分析,见图 7 与图 8。爆破振动 Z 向振动主频为 90.33Hz,塌落振动 Z 向振动主频为 47.36 Hz。表 1 中 69 号的振动主频分别为 83.33 Hz、16.39Hz。此处 FFT 频谱分析是功率图谱中能量密度最大处的频率,而仪器测试显示的主频是最大振动速度处的频率,这两种频率虽然算法不同,但同时说明了爆破振动频率大于塌落振动频率,塌落振动频率更接近于周围保护建筑的固有频率。

4 结束语

41m 高钢混结构烟囱爆破拆除,采用梯形切口

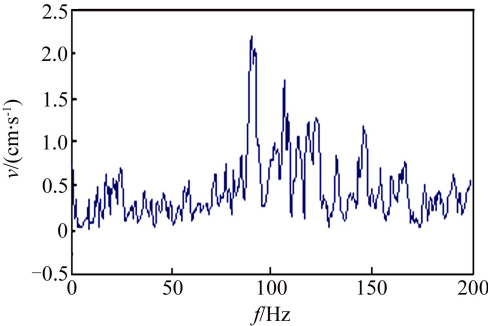


图 7 爆破振动 Z 向频谱图

Fig. 7 Blasting vibration spectrum diagram in Z direction

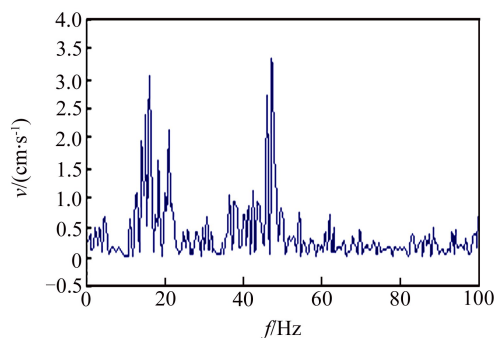


图 8 塌落振动 Z 向频谱图

Fig. 8 Touchdown vibration spectrum diagram in Z direction

方式,并对整个拆除过程进行了追踪测试,不管是从爆炸及倒塌振动的频率分析,还是从振动速度分析,整个烟囱拆除过程都是安全的。通过理论计算与测试分析得出倒塌时间分别为 5.8s、7.0s,说明了烟囱倒塌过程中存在着铰接点反向力矩的影响;本文中介绍了振动主频的两种求解方法,虽然两者之间存在较大差异,但都证明了爆破振动的主频要高于塌落振动的主频,塌落振动频率更接近于建筑物的固有频率,容易引起共振;因此,在以后的高耸建筑拆除工程中,要重点考虑塌落振动的破坏作用。

参 考 文 献

- [1] 池恩安,魏兴,温远富. 100m 钢筋砼烟囱和 80m 砖烟囱定向爆破拆除[J]. 工程爆破,2002,8(1):27-30.
Chi En'an, Wei Xing, Wen Yuanfu. Demolition of 100-meter reinforced concrete and 80-meter brick-structural chimneys by directional blasting[J]. Engineering Blasting, 2002,8(1):27-30.
- [2] 黎丹青,俞诚,汤月华,等. 210m 钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除[J]. 工程爆破,2009,15(1):48-51.
Li Danqing, Yu Cheng, Tang Yuehua, et al. Demolition of a 210m-high reinforced-concrete chimney by directional

- blasting[J]. Engineering Blasting, 2009,15(1):48-51.
- [3] 王健,付武,姚晓军. 125m 高钢筋混凝土烟囱定向折叠爆破拆除[J]. 爆破,2010,27(3):58-60.
Wang Jian, Fu Wu, Yao Xiaojun. Explosive demolition of 125m reinforced concrete chimney by directional and folded[J]. Blasting, 2010,27(3):58-60.
- [4] 谢先启. 150m 钢筋砼烟囱爆破拆除技术与分析[J]. 工程爆破,2008,14(1):54-57.
Xie Xianqi. Blasting technology and effect analysis in demolition of a reinforced concrete chimney of 150m height[J]. Engineering Blasting, 2008,14(1):54-57.
- [5] 罗先南,方向,谭雪刚,等. 180 m 烟囱爆破拆除减振技术与振动分析[J]. 爆破,2009,26(2):92-95.
Luo Xiannan, Fang Xiang, Tan Xuegang, et al. Vibration reduction technique and vibration analysis of demolition blasting of 180m chimney[J]. Blasting, 2009,26(2):92-95.
- [6] 邓祖明,姜昉. 80 m 砖—钢筋混凝土复合结构烟囱爆破拆除[J]. 爆破,2010,27(1):67-70,95.
Deng Zuming, Jiang Fang. The blasting demolition of a 80-meter high brick and reinforced concrete combined structure chimney[J]. Blasting, 2010,27(1):67-70,95.
- [7] 王晨,高文乐,方昌华,等. 100m 高钢筋混凝土烟囱的双向折叠爆破拆除[J]. 工程爆破,2010,16(3):68-71.
Wang Chen, Gao Wenle, Fang Chanhua, et al. Bidirectional folding blasting demolition of a 100m-high reinforced concrete chimney[J]. Engineering Blasting, 2010,16(3):68-71.
- [8] 徐岩,张晓明,王瑜,等. 基于离散傅里叶变换的频谱分析新方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(11):38-41.
Xu Yan, Zhang Xiaoming, Wang Yu, et al. A new method of spectrum analysis based on DFT[J]. Power System Protection and Control, 2011,39(11):38-41.

Chimney Blasting Demolition and Analysis of Vibration Measurement

YAN Honghao, LIU Zhiyuan, LI Xiaojie

State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology (Liaoning Dalian, 116024)

[ABSTRACT] By means of trapezoidal cut, the design of reasonable blasting parameters and the monitor of blasting and touchdown vibrations were conducted for the successful demolishing of reinforced concrete chimney of 41 m high. According to the analysis of vibration graphic, it takes about seven seconds from detonation to touchdown. Two different approaches to solving the vibration main frequency are introduced: The first frequency corresponds to maximum vibration velocity according to the GB standards, while the second frequency corresponds to maximum energy density and be achieved by Fourier transform. In spite of the great difference in calculation, both of them support the fact that the main frequency of blasting vibration is larger than that of touchdown vibration, and touchdown vibration frequency is more close to the inherent frequency of buildings, which is easy to lead to resonance.

[KEY WORDS] blasting demolition, blasting parameter, blasting vibration, touchdown vibration, Fast Fourier Transformation