

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.011

## 210 m 烟筒同向折叠爆破降振效果分析\*

于淑宝<sup>1,2</sup>, 汪旭光<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;2. 唐山金宇爆破工程有限公司,唐山 063020)

**摘要:** 高耸烟筒爆破拆除多采用定向倾倒、反向折叠、分段爆破等方法。烟筒筒体倒塌过程产生的较大触地振动长期以来是个难以克服的问题,尤其是势能较大的烟筒上部在倾倒下落过程产生巨大的冲量,势必造成较大的地面振动。该项研究是利用数值模拟分析和爆破切口部位的应力变化分析,通过对延期时间 2 s、3 s、5 s 时上部切口压应力、拉应力的不同切口闭合情况,确定上下两段同向折叠爆破合理的间隔时间为 3 s。通过对上部切口爆破震动衰减公式拟合与下部切口爆破震动衰减公式拟合及烟筒塌落振动衰减公式拟合,与相关工程经验值比较得出,当地面采取挖沟槽、垒筑土墙减震措施时可减震 70%。结合工程实例,采用同向折叠的爆破技术拆除 210 m 高钢筋混凝土超高烟筒。在 110 m 高检修平台处开设上部爆破切口,使重达 1770 t 的烟筒上部筒体在爆破切口背面产生铰链结构与剪切共同作用,在重力作用下撞击下部筒体产生破碎,从而实现空中解体。在上部切口爆破后,上部 100 m 烟筒迅速下切下座,与下部 110 m 烟筒筒体沿设计方向倾倒是呈现出少有的后座下切塌落现象,达到了很好的降振效果。

**关键词:** 同向折叠; 超高烟筒; 爆破拆除; 触地振动

**中图分类号:** TU746.5; TB41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0060-09

## Damping Effect Analysis of Same Direction Folding Blasting for 210 m High Chimney

YU Shu-bao<sup>1,2</sup>, WANG Xu-guang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Tangshan Jinyu Blasting Engineering Co Ltd, Tangshan 063020, China)

**Abstract:** The methods of directional collapse, reverse folding and segmented blasting are widely used in the demolition of high-rise chimneys by blasting. The large ground vibrations caused by the collapse of a chimney is a difficult problem to overcome for a long time. In particular, the upper part of the chimney with higher potential energy has a huge impulse in the process of toppling and falling, which is bound to cause greater ground vibration. The study is based on the numerical simulation analysis and the stress change analysis of the blasting incision position. According to different closure incisions of the upper incision under compressive stress and tensile stress at the delay times of 2 s, 3 s and 5 s, it is determined that a reasonable interval time between the upper and lower sections of a folding blasting in the same direction is 3 s. By fitting the vibration attenuation formulas of upper and lower incision blasting and the formula of flue tube collapse, it is concluded from the comparison with the relevant engineering experience value that 70% of the vibration can be reduced when trench excavation and earth wall construction are adopted on the ground. Combining with engineering examples, a 210 m super-high reinforced concrete chimney is removed by using the same direction folding blasting technique. The upper blasting incision is set up at 110 m high maintenance platform, which makes the upper cylinder of the chimney with a weight of 1770 t produce joint effect of the hinge structure and shear on the back of the blasting incision, and breaks the lower cylinder under the impact of gravity, thus realizing aerial disintegration. After the upper incision blasting, the upper 100 m chimney was cut down rapidly,

and the lower 110 m chimney was tipped down along the design direction, showing a rare phenomenon of back-seat down-cutting collapse, which achieved a good vibration reduction effect. The vibration attenuation formula of collapse touching the ground has engineering characteristics, research value and engineering reference significance.

**Key words:** same direction folding; super-high chimney; blasting demolition; collapse vibration

在科学技术不断发展的今天,爆破理论的发展却仍严重滞后于爆破技术的要求,这是由于爆破过程的瞬时性、动态性,以及爆破对象材料结构的随机性、不确定性等,使得爆破理论的发展非常困难,这种困境在工程爆破领域可能还会是长期存在的问题。近年来随着拆除爆破技术的发展进步,复杂环境下 200 m 以上超高烟筒折叠爆破拆除在国内已有几个成功案例。但是,超高烟筒均采用反向折叠设计,上下切口延时间隔选择众说纷纭,偶尔也有由于切口延时不当或切口形成后的烟筒后坐力等原因致使工程失败案例。而同向折叠爆破和在烟筒 100 m 以上高度设置切口的工程暂无先例。随着环保政策迫使电厂改造深入的进行,复杂环境下超高烟筒同向折叠爆破将成为近几年亟待解决的工程问题。

爆破地震效应是超高烟筒爆破拆除时需要考虑的重要问题。拆除爆破过程中产生地震的原因有两种,一是被拆除建(构)筑物中炸药药包爆炸所产生的地震,二是建(构)筑物塌落解体时对地面冲击造成的地震。而后者则是超高烟筒爆破拆除过程中产生地震的主要震源。为此,监测并研究超高烟筒爆

破拆除过程中的地震数据具有重要的现实指导意义。

## 1 工程概况及周边环境

### 1.1 工程概况

唐山市西郊热电厂于 2014 年停产,需拆除厂区内 1995 年建成的高 210 m 的钢筋混凝土烟筒,此烟筒隶属于唐山赛德热电有限公司。筒壁混凝土标号为 C30,双层布筋,环筋净保护层 30 mm,内外竖向钢筋位于内外环向钢筋之间;内衬采用水玻璃耐酸陶粒混凝土砌块;隔热层采用塑料薄膜包装岩棉板。烟筒筒壁的厚度由下向上逐渐减小,最大 60 cm,最小 25 cm,烟筒顶部筒壁外半径 3.35 m,筒壁厚度 25 cm;底部筒壁外半径 9.45 m,筒壁厚度 60 cm。烟道位于 +5.90 m 处,南北方向各一个。灰斗平台位于 +5.90 m 处,底部东西方向有高 2.40 m × 宽 1.80 m 的出灰口门洞,平台上部两个烟道口之间有一道东西方向高 4 m 的隔墙。烟筒 +110 m 处和 +160 m 处及 +210 m 处均设有检修平台。具体测量参数见表 1。

表 1 不同标高烟筒筒壁半径(单位:m)

Table 1 Radius of chimney walls with different heights(unit:m)

标高	半径	内半径	筒壁厚度	标高	外半径	内半径	筒壁厚度
0	9.45	8.85	0.60	110	4.45	4.09	0.36
10	8.65	8.05	0.60	120	4.25	3.91	0.34
20	7.85	7.25	0.60	130	4.15	3.83	0.32
30	7.05	6.45	0.60	140	4.05	3.75	0.30
40	6.65	6.15	0.50	150	3.95	3.67	0.28
50	6.25	5.77	0.48	160	3.85	3.59	0.26
60	5.85	5.39	0.46	170	3.75	3.50	0.25
70	5.45	5.01	0.44	180	3.65	3.40	0.25
80	5.05	4.63	0.42	190	3.55	3.30	0.25
90	4.85	4.45	0.40	200	3.45	3.20	0.25
100	4.65	4.27	0.38	210	3.35	3.10	0.25

收稿日期:2020-03-14

作者简介:于淑宝(1966-),男,河北省唐山人,高级工程师、硕士研究生,主要从事拆除工程爆破、矿山工程爆破和废旧炮弹销毁研究与实践,(E-mail)yushubao54321@126.com。

通讯作者:汪旭光(1939-),男,安徽枞阳人,中国工程院院士、中国矿业大学(北京)博士生导师,主要从事现代工业炸药与工程爆破技术的研究与开发工作,(E-mail)yjwang0281@163.com。

基金项目:国家自然科学基金(50704005)

### 1.2 周边环境

需要爆破拆除的烟筒位于唐山市西郊热电厂区内,烟筒北侧约 120 m 处是 2 层和 3 层的两栋办公楼;东北角约 180 m 处是停车库;东侧 20 m 是储料仓,约 287 m 是厂区外的居民楼小区;南侧 8 m 处是热电厂二期脱硫厂房;西侧 80 m 处是待拆除的车间

厂房。整体的爆破作业环境较好,具有一定的封闭性,有利于安全警戒,但对于烟筒倒塌的空间有限<sup>[1]</sup>。见图1。

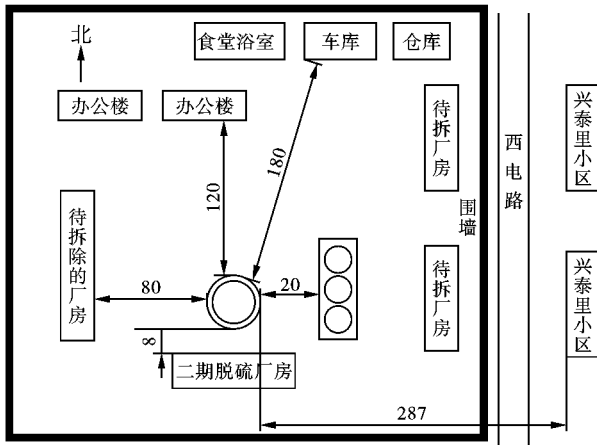


图1 周边环境示意图(单位:m)

Fig. 1 Surrounding environment of the kiln(unit:m)

## 2 爆破方案选择

根据对烟筒结构及周围环境的仔细勘查和分析,烟筒东北侧方向场地比较宽阔,倒塌空间有效长度约150m,所以烟筒采用双切口同向折叠爆破拆除技术。烟筒下部向正北方向倒塌,烟筒上部向北偏东 $16^\circ$ 方向倒塌。下切口设在烟筒+0.30m处,下切口在烟筒内侧钻孔,以有利于减少爆破飞石的安全影响,同时,降低上切口爆破时对下切口的爆破网路的安全影响,以免发生拒爆;上切口设在烟筒+110m处,以利用烟筒自身的检修平台作为上切口的施工平台<sup>[2]</sup>。

### 2.1 爆破切口形式及切口形成的实现

建筑物爆破拆除时,通常采用的爆破切口形式主要有两种,三角形切口和梯形切口,如图2所示。

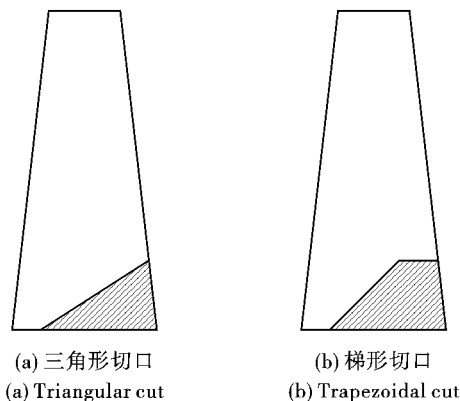


图2 爆破切口形式示意图

Fig. 2 Shapes of blasting cut

三角形和梯形爆破切口是爆破设计时所采取的主要切口形式,三角形爆破切口主要适用于高宽比较大的建筑结构体系,如图2中(a)。当下部三角形切口形成后,随着结构发生偏转,当结构切口上沿完全接触地面时,结构重心偏转出了切口外沿,且具备了较大的偏转速度,实现结构的顺利倒塌<sup>[3]</sup>。

梯形爆破切口适用于高宽比较小的建筑结构体系,由于结构的宽度较大,结构上沿切口触地时,结构重心往往不能够完全移到切口外,难以形成有效的倾覆力矩。采用梯形切口时,结构内部部分支撑立柱被破坏,使得结构对上部结构的支撑作用较小,结构发生触地后,形成多个点接触<sup>[4]</sup>,不能抵抗结构巨大的冲击作用,结构下部沿压碎边偏转,梯形切口有利于结构的顺利倒塌。

### 2.2 爆破切口设计

#### 2.2.1 下切口爆破设计

下切口设在烟筒+0.30m处,此处烟筒筒壁厚度 $\delta=60$ cm,筒壁外半径 $r=9.426$ m,东西方向上有高 $2.40$ m $\times$ 宽 $1.80$ m的出灰口门洞。

下切口圆心角: $\phi=220^\circ$

下切口长度: $L=\frac{\phi}{180}\pi r=36.2$  m

下切口高度: $h\geq(3.0\sim 5.0)\delta$ ,取 $h=3$  m

预留做支撑体的筒身长度为23 m。

按照“黄金分割”理论进行验算<sup>[5]</sup>:下切口圆心

角 $\phi=\left(\frac{\sqrt{5}}{2}-1\right)\times 360^\circ=222.48^\circ$ 。

选取下切口圆心角符合黄金分割理论。

在设计倾倒中心线两侧,对称布置定向窗,定向窗可利用烟筒底部的出灰口门洞加工而成,定向窗范围内的钢筋全部剔除,支撑部分筒壁的外侧钢筋也需割断,以充分减小烟筒倾倒时的阻力。见图3。

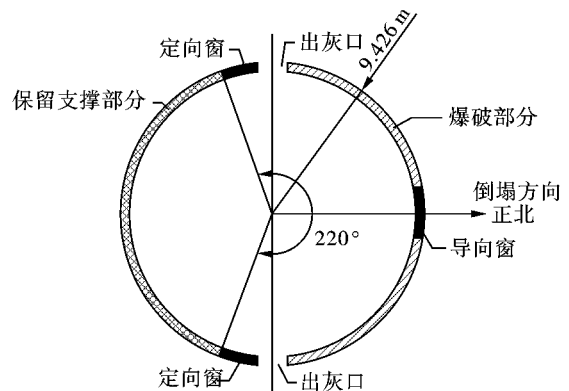


图3 下切口布置示意图

Fig. 3 Layout of the lower cut

### 2.2.2 上切口爆破设计

上切口设在烟筒的 +110 m 处的检修平台处,此处烟筒筒壁厚度  $\delta=36$  cm,筒壁外半径  $r=4.45$  m。

上切口圆心角: $\phi=220^\circ$

上切口长度: $L=\frac{\phi}{180}\pi r=17$  m

上切口高度: $h\geq(3.0\sim 5.0)\delta$ ,取  $h=1.5$  m

预留做支撑体的筒身长度为 11 m。

在设计倾倒中心线两侧,对称布置定向窗,定向窗范围内的钢筋全部剔除<sup>[6]</sup>。

按照“黄金分割”理论进行验算:下切口圆心角

$$\phi = \left(\frac{\sqrt{5}}{2} - 1\right) \times 360^\circ = 222.48^\circ。$$

选取下切口圆心角符合黄金分割理论。见图 4。

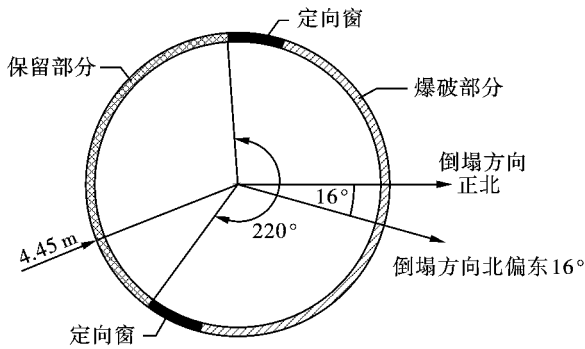


图 4 上切口布置示意图

Fig. 4 Layout of the upper cut

### 2.3 爆破参数设计

#### 2.3.1 爆破参数设计依据

(1)炸药:选用乳化炸药,规格:直径  $\phi 32$  mm、长度 300 mm、重量 300 g/卷。

(2)雷管:毫秒塑料导爆管雷管、半秒级塑料导爆管雷管。

(3)下部选取手持钻进行钻孔,钻头直径 38 mm;上部采用水钻进行钻孔,钻孔直径  $\phi=40$  mm。

(4)切口爆破参数设计:孔径,依据钻孔设备;孔深  $l=\frac{2}{3}\delta$ ;最小抵抗线  $w=\frac{1}{2}\delta$ ;孔距  $a=(1.2\sim 2)w$ ;排距  $b=0.87a$ ;单耗  $q=(2\sim 3)$  kg/m<sup>3</sup>;单孔装药量  $Q_{\text{单}}=qab\delta$ 。

#### 2.3.2 下切口爆破参数

孔径: $d=40$  mm;

最小抵抗线: $W=30$  mm;

孔深: $l=45$  cm;

间距: $a=0.45$  m;

孔距: $b=0.4$  m;

单耗: $q=2.8$  kg/m<sup>3</sup>;

单孔装药量: $Q_{\text{单}}=qab\delta=300$  g;

总孔数:64 孔/排  $\times$  8 排 = 512 孔;

总装药量:512  $\times$  0.3 kg = 153.6 kg。

装药结构:连续装药结构。见图 5。

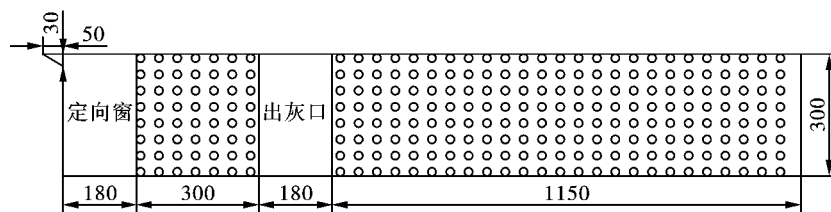


图 5 下切口炮孔布置示意图(对称结构,单位:cm)

Fig. 5 Layout of blast holes for the lower cut (symmetrical structure, unit: cm)

#### 2.3.3 上切口爆破参数

孔径: $d=40$  mm;

最小抵抗线: $W=18$  mm;

孔深: $l=25$  cm;

间距: $a=0.4$  m;

孔距: $b=0.35$  m;

单耗: $q=3$  kg/m<sup>3</sup>;

单孔装药量: $Q_{\text{单}}=qab\delta=150$  g;

总孔数:35 孔/排  $\times$  4 排 = 140 孔;

总装药量:140  $\times$  0.15 kg = 21 kg;

装药结构:连续装药结构。见图 6。

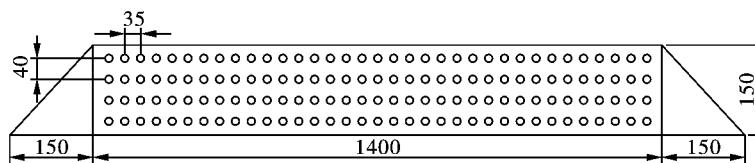


图 6 上切口炮孔布置示意图(单位:cm)

Fig. 6 Layout of blast holes for the upper cut (unit: cm)

### 2.4 利用应力分析和数值模拟确定上下段同向折叠的合理间隔时间

#### 2.4.1 不同时间上下段烟筒切口部位应力变化曲线

根据混凝土单元的应力变化曲线,上下切口延时间隔 3 s 情况产生的应力峰值最大,其他两种情况差别不大,三者都是先增大后减小再增大的一个变化过程,从而看出三者都经历了一个应力震荡过程,说明上部切口在闭合过程中经历反弹现象的发生。从图 7、图 8 中可以看出,由于上下延时间隔的不同,上部混凝土单元的应力变化过程截然不同,延时间隔 2 s 的情况下只受到压应力的作用,延时间

隔 3 s 的情况下受到压、拉的作用,延时间隔 5 s 的情况下基本在拉应力的作用下,说明上部切口的在闭合的时间长短,同时也说明了切口闭合后上部段的下落情况。可以看出延时间隔 3 s 的情况下,上部切口闭合时间最早,同时闭合后快速下落,混凝土单元应力在 4.5 s 左右为零,说明此时混凝土单元已经删除,切口闭合,上部滑落,这有利于整个烟筒的倾倒,保证安全<sup>[6,7]</sup>。

#### 2.4.2 模拟不同时间的状态图

模拟见图 9。

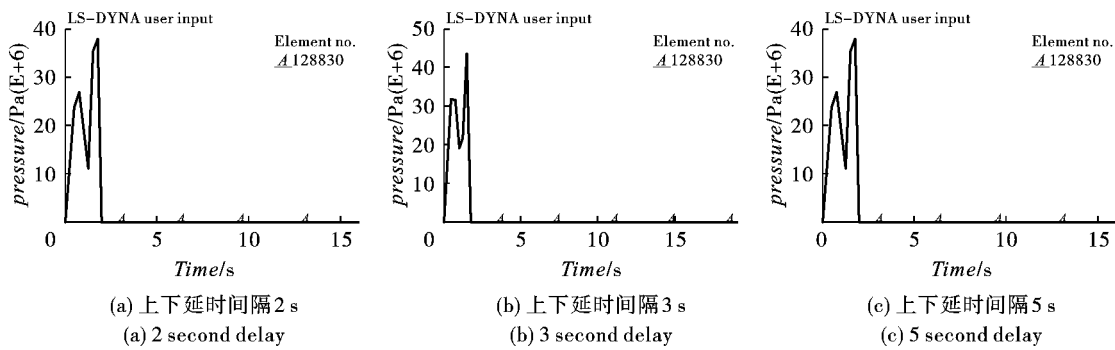


图 7 上部切口底部混凝土应力变化曲线

Fig. 7 Stress change curve of the lower part of the concrete in the upper cut

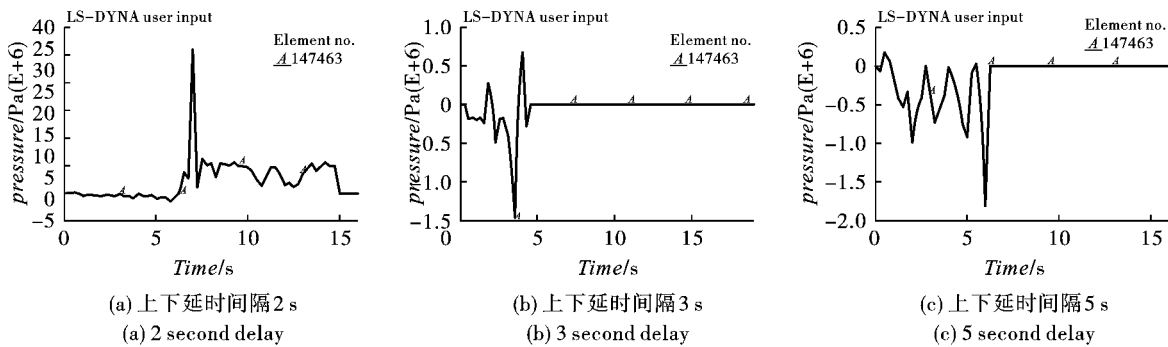


图 8 上部切口上部混凝土应力变化曲线

Fig. 8 Stress change curve of the upper part of the concrete in the upper cut

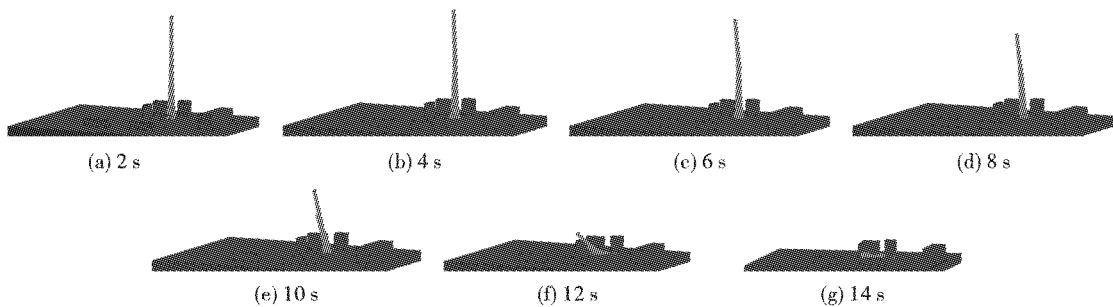


图 9 上下切口延时间隔 3 s

Fig. 9 Collapse process when the delay time between the upper and lower cuts is 3 s

### 2.4.3 不同延时间隔倒塌过程对比分析

图 9 给出了上下切口不同延时间隔情况下的倒塌形态,在图 9 中,上下切口延时间隔为 3 s 可以看出,在上段筒体发生下坐之后,同时发生倾覆角度,下段的倒塌速度较大,从而带动上部向前倾倒,同时下坐量大。图 9 中在 8 s 之前的倒塌形态三种延时间隔差别较小,上下切口延时间隔 2 s 情况下,在 10 s 之后上部的倒塌速度大于下部倒塌速度,从而上部的倒塌出现竖直状态,产生一种危险的情况,并出现向后反转的态势。图 9 中上下切口延时间隔 5 s 情况下,在 14 s 后下部的速度倒塌过快,上部的倒塌形态出现短暂竖直状态,并慢慢向前倾倒,这种情况也处于较危险。因此上下切口延时间隔 3 s 较为合理。

### 2.5 爆破网路设计

爆破网路采用塑料导爆管雷管的起爆网路,为了确保网路准爆性,每炮孔内装 2 枚雷管,上切口装入 MS-1 段毫秒塑料导爆管雷管,下切口装入 HS-6 段半秒塑料导爆管雷管。爆破网路采取“簇联”,从炮孔内引出的导爆管雷管就近以 16~20 根为一组,绑扎两发 1 段导爆管雷管,上下排炮孔间隔一排炮孔分组连接;整个爆区划分成多个分片,每个分片连成复式网路<sup>[8]</sup>。构成连线独立,而传爆相联;传爆路径通路相通,只有一个起爆点、一根传爆导爆管有效就会使整个网路可靠起爆,上下爆破切口网路没有时间间隔,两个起爆点都使用电雷管起爆。

## 3 烟筒塌落触地振动验算

根据量纲分析方法:集中质量(冲击或塌落)作用于地面造成的塌落振动速度可用下式确定<sup>[9]</sup>

$$V_t = K_t [(M \cdot g \cdot H / \sigma)^{1/3} / R]^\beta \quad (1)$$

式中: $V_t$  为塌落振动速度,cm/s; $K_t$  为衰减系数, $K_t = 3.37$ ; $\sigma$  为地面介质的破坏强度,一般取  $\sigma = 10 \text{ MPa}$ ; $\beta$  为衰减指数, $\beta = 1.66$ ; $R$  为观测点至撞击中心的距离,m; $M$  为下落构件的质量,t; $H$  为构件重心高度,m。

本次拟拆除 210 m 烟筒,烟筒采双切口同向折叠倒塌技术,若不考虑减震措施或其他因素,烟筒上部的总质量约  $M = 1755 \text{ t}$ ,重心高度  $H = 157 \text{ m}$ , $R = 287 \text{ m}$ (重心落地点到小区最近距离),则 110 m 以上的烟筒塌落触地振动的速度按公式计算得: $V = 0.28 \text{ cm/s}$ 。

烟筒下部的总质量约  $M = 6267 \text{ t}$ ,重心高度约  $H = 75 \text{ m}$ , $R = 287 \text{ m}$ ,则 110 m 处的烟筒塌落触地振动的速度按公式计算得  $V = 0.38 \text{ cm/s}$ 。

由计算可知,烟筒坍塌振动对周边建筑、设施是

安全的<sup>[10]</sup>。

## 4 超高烟筒爆破拆除减振措施

烟筒爆破中炸药引起的振动较小,而烟筒落地对地面产生的振动是主要的危害,对塌落振动进行防范与控制,为进一步降低本次爆破拆除时的有害效应,可综合采用以下措施,将其不利影响降到最小<sup>[11,12]</sup>。

(1)在烟筒倒塌方向范围内,每间隔 5~10 m 铺一条黄土包隔垫埂,垫埂垂直倒塌方向轴线,堆高 1.5~2 m,宽 1.5~2.0 m,垫埂的作用可缓冲筒体触地速度,(如图 10 所示)。

(2)在烟筒倒塌区域东侧开挖减振沟(2 m × 1 m),进一步阻断地震波的传播。

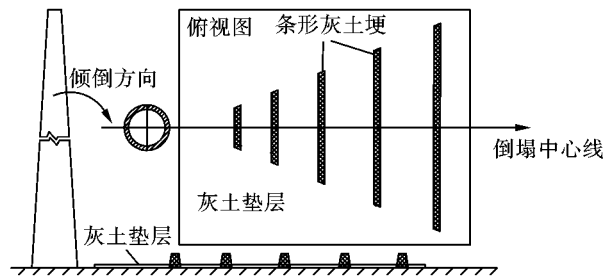


图 10 烟筒倒塌区域的土垛减振措施

Fig. 10 Soil piles for vibration reducing in the collapse area

## 5 烟筒振动测试

### 5.1 近距离烟筒振动测试

#### 5.1.1 近距离测点布置

烟筒爆破拆除及倾倒触地振动监测仪器为 TC4850 振动监测仪,平行烟筒倒塌轴线和垂直轴线共布置了 6 台监测仪,具体布置位置见图 11。

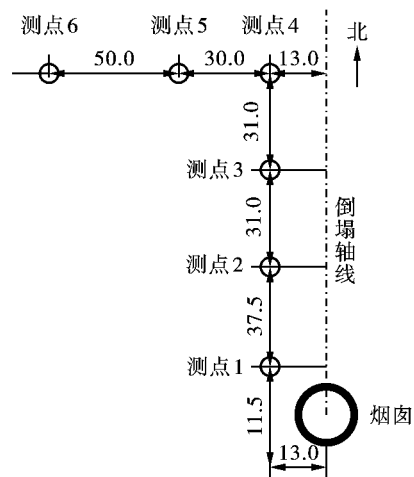


图 11 振动监测仪器布置图(单位:m)

Fig. 11 Arrangement of vibration monitors(unit:m)

### 5.1.2 近距离烟筒振动监测数据

每个测点均监测 XYZ 三个方向的振动,水平径向( $X$ 向)垂直于烟筒倒塌轴线,水平径向( $Y$ 向)平行于倒塌轴线,垂直方向为 $Z$ 向。

烟筒上部切口爆破引起的地面各测点振速值见表2;烟筒下部切口爆破引起的地面各测点振速值见表3;烟筒倾倒触地引起的地面振速值见表4。

表2 实测烟筒上部切口爆破振动速度值

Table 2 Blasting vibration velocities measured at the upper cut

测点 编号	测点位置 (距烟筒中心 距离)/m	水平径向振速( $X$ 向)		水平切向振速( $Y$ 向)		垂直方向振速( $Z$ 向)	
		振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz
1	17.4	0.53	9.3	0.95	11.1	1.71	12.9
2	50.7	0.42	14.9	0.58	9.0	1.16	13.3
3	81.0	<0.1	-	0.47	8.5	0.50	8.4
4	111.8	<0.1	-	0.46	8.3	0.48	9.2
5	119.0	<0.1	-	0.18	9.3	0.23	14.9
6	144.8	<0.1	-	0.11	13.3	0.12	10.8

表3 实测烟筒下部切口爆破振动速度值

Table 3 Blasting vibration velocities measured at the upper cut

测点 编号	测点位置 (距烟筒中心 距离)/m	水平径向振速( $X$ 向)		水平切向振速( $Y$ 向)		垂直方向振速( $Z$ 向)	
		振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz
1	17.4	1.15	16.5	1.19	13.4	2.66	11.4
2	50.7	0.57	16.2	0.66	6.8	1.50	11.6
3	81.0	<0.1	-	0.42	7.1	0.56	7.0
4	111.8	<0.1	-	0.38	8.1	0.45	7.7
5	119.0	<0.1	-	0.18	6.1	0.30	5.5
6	144.8	<0.1	-	0.16	5.3	0.25	8.1

表4 烟筒倾倒触地振动数据

Table 4 Vibration velocities at the point of chimney falling to the ground

测点 编号	测点位置 (距烟筒中心 距离)/m	水平径向振速( $X$ 向)		水平切向振速( $Y$ 向)		垂直方向振速( $Z$ 向)	
		振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz	振幅/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主振频率/ Hz
1	13.0	12.91	8.3	8.46	7.0	13.09	8.9
2	13.0	21.20	9.4	7.83	23.8	18.20	22.7
3	13.0	14.42	11.4	4.88	5.7	13.60	8.2
4	13.0	7.21	10.5	5.67	6.6	24.10	9.5
5	43.0	5.20	6.6	3.62	5.1	11.30	8.2
6	93.0	4.37	5.3	2.94	5.7	4.68	8.9

### 5.1.3 烟筒爆破拆除倾倒过程近距离测试振速图谱分析

测点1距离烟筒中心水平距离为13 m,纵向距离为11.5 m,直线距离17.4 m。如图12所示,从测点1的垂直方向的振动速度过程线,可以清晰分析出烟筒折叠拆除爆破的作用过程,引起近处质点的振动速度幅值大小。从烟筒上部切口爆破到整体倾倒触

地整个过程时间为15.2 s,大致可以分为四个阶段:

A:上部切口爆破,起始时间0.0 s,垂向振速1.70 cm/s;

B:底部切口爆破,起始时间3.0 s,垂向振速2.68 cm/s;

C:下半部切口闭合,起始时间9.0 s,垂向振速9.42 cm/s;

D: 倾倒触地: 起始时间 11.3 s, 垂向振速 13.09 cm/s。见图 12。

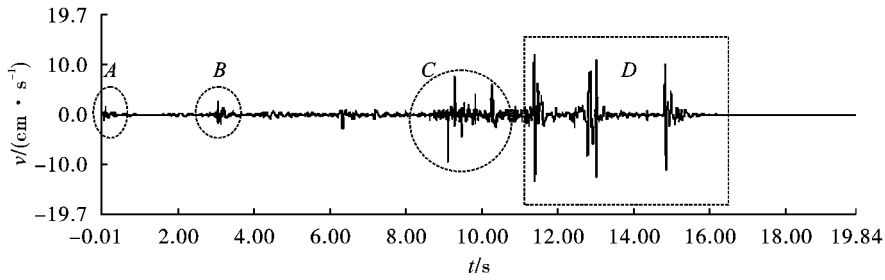


图 12 烟筒近处(测点1)质点振速图谱

Fig. 12 Particle velocity map at Measuring Point(No. 1) near the chimney

### 5.2 保护对象振动测试

#### 5.2.1 保护对象测点布置

根据甲方要求,在二期脱硫厂房、待拆除的一期厂房、北侧办公楼、食堂浴室、车库的地基上各布设 1 个点。在西电路厂区围墙 1 米外人行道上布设 1 个点。编号顺序为 1~6 号。

1~6#测点距爆源(烟筒中心)的直线距离分别为 14 m、129 m、155 m、198 m、221 m、310 m,如图 13 所示。

1~6#测点距烟筒下部倒塌中心线顶点的直线距离分别为 124 m、61 m、96 m、135 m、163 m、232 m,如图 14 所示。

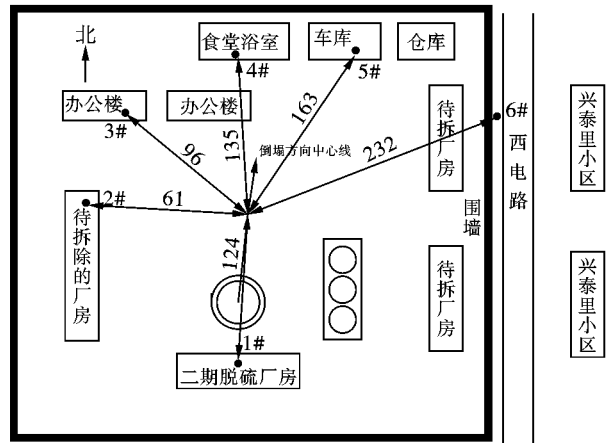


图 14 测点距下部塌落中心线顶点布置图

Fig. 14 Layout of Measuring Point distance from the vertex of the collapse center line at the lower part

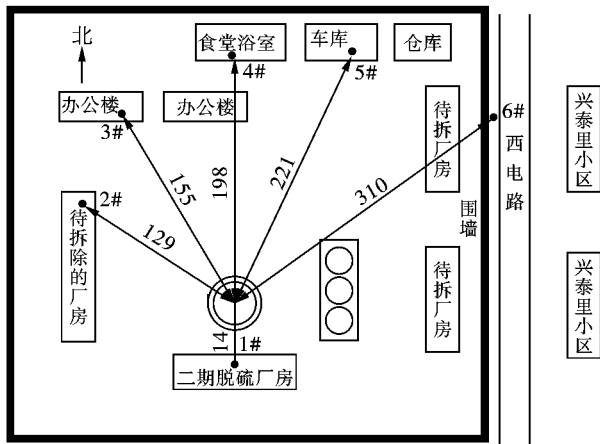


图 13 测点距爆源中心布置图(单位:m)

Fig. 13 Layout of Measuring Point distance to explosion source center(unit:m)

#### 5.2.2 保护对象各测点振动测试结果

实测数据表明,210 m 烟筒控制爆破拆除工程,爆破产生的地面质点峰值振动速度在 0.13 ~ 1.19 cm/s 之间,塌落产生的地面质点峰值振动速度在 0.23 ~ 2.20 cm/s 之间。监测数据均低于《爆破安全规程》振动安全允许标准 2.5 cm/s,对保护建筑物不造成损坏。见表 5、表 6。

表 5 爆破振动测试结果

Table 5 Blasting vibration test result

测点名称	距爆心距离/m	峰值速度/ (cm · s <sup>-1</sup> )	主振频率/ Hz
1#	14	1.19	8.01
2#	129	0.30	4.34
3#	155	0.23	5.03
4#	198	0.21	5.26
5#	221	0.13	4.80
6#	310	0.30	5.03

表 6 塌落振动测试结果

Table 6 Slump vibration test result

测点名称	距下部塌落中心线 顶点距离/m	峰值速度/ (cm · s <sup>-1</sup> )	主振频率/ Hz
1#	124	0.54	8.69
2#	61	2.20	4.11
3#	96	0.94	4.80
4#	135	0.29	5.49
5#	163	0.23	4.80
6#	232	0.35	5.72

## 6 结论

210 m 超高烟筒通过在  $\pm 110$  m 处设置上部爆破切口和在  $\pm 0.3$  m 处设置底部爆破切口,采用同向折叠爆破拆除设计方案,实现了上部 100 m 筒体前倾、下座、对冲而空中解体,大大降低了超高烟筒筒体触底振动值,有效的保护了周边的建筑物。爆破效果如图 15、16 所示。



图 15 倒塌过程图  
Fig. 15 Fall process



图 16 倒塌效果图  
Fig. 16 Collapse result

1) 通过力学分析和数值模拟确定了 210 m 超高烟筒的同向折叠爆破拆除方案。

2) 通过上下爆破切口间隔 2 s、3 s、5 s 的数值模拟不同倒塌形态的分析比较,确定了合理的间隔时间为 3 s。

3) 通过对超高烟筒的近距离布置测点监测数值和保护对象位置布置测点监测数值分析比较,所采取的减振措施效果很好。

4) 对于 210 m 超高烟筒采用同向折叠爆破设计方案,有利于降低超高烟筒筒体触地振动。

### 参考文献 (References)

[1] 于淑宝,汪旭光,杨 军,等. 210 m 高烟囱双切口同向折叠爆破拆除[J]. 工程爆破,2017,23(6):334-38.

- [1] YU Shu-bao, WANG Xu-guang, YANG Jun, et al. Blasting demolition of 210 m high chimney double notches by folding in the same direction[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6):334-38. (in Chinese)
- [2] 徐鹏飞,张英才,刘殿书,等. 180 m 钢筋混凝土烟囱爆破拆除振动监测及分析[J]. 爆破,2016,33(4):94-97.
- [2] XU Peng-fei, ZHANG Ying-cai, LIU Dian-shu, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration by demolishing 180 m reinforced concrete chimney[J]. Blasting, 2016, 33(4):94-97. (in Chinese)
- [3] 林谋金,薛 冰,傅建秋,等. 210 m 烟囱超高位切口爆破拆除数值模拟与实践[J]. 爆破,2018,35(3):103-107,146.
- [3] LIN Mou-jin, XUE Bing, FU Jian-qiu, et al. Application and numerical simulation of blasting demolition for 210 m chimney with super-high incision[J]. Blasting, 2018, 35(3):103-107,146. (in Chinese)
- [4] 孙 飞,周向阳,蒋新忠,等. 爆破拆除塔架式钢烟囱塔架对筒体的影响研究[J]. 爆破,2018,34(4):109-114.
- [4] SUN Fei, ZHOU Xiang-yang, JIANG Xin-zhong, et al. Study on effect of tower on chimney body in tower steel chimney explosive demolition[J]. Blasting, 2018, 34(4):109-114. (in Chinese)
- [5] 于淑宝,王伯银,付占华,等. “黄金分割法”在爆破工程中的应用探讨[J]. 工程爆破,2012,18(4):53-56.
- [5] YU Shu-bao, WANG Bo-yin, FU Zhan-hua, et al. Application of “golden section method” in blasting engineering[J]. Engineering Blasting, 2012, 18(4):53-56. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] SI Jun-ting, LYU 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)
- [7] 徐园园,段卫东,白 杨,等. 倾斜砖烟囱定向爆破拆除与数值模拟分析[J]. 爆破,2015,32(1):111-115.
- [7] XU Yuan-yuan, DUAN Wei-dong, BAI Yang, et al. Scheme and numerical simulation analysis on explosive demolition of weathered and inclined chimney[J]. Blasting, 2015, 32(1):111-115. (in Chinese)
- [8] 卢子冬,张世平,张昌锁. 永济市热电厂三座特殊结构冷却塔爆破拆除[J]. 爆破,2014,31(3):114-117,131.
- [8] LU Zi-dong, ZHANG Shi-ping, ZHANG Chang-suo, et al. Explosive demolition of three cooling towers with special construction in Yongji[J]. Blasting, 2014, 31(3):114-117,131. (in Chinese)