

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.017

## 100 m 钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除 实践与数值模拟

董星<sup>1</sup>, 张哲<sup>2</sup>, 刘永强<sup>1</sup>, 张坤麟<sup>1</sup>, 胡永玉<sup>1</sup>, 惠佳<sup>1</sup>, 谢少凯<sup>1</sup>

(1. 北京理工北阳爆破工程技术有限责任公司, 北京 100081; 2. 新时代辽科(阜新)爆破工程有限公司, 阜新 123000)

**摘要:** 为了顺利拆除复杂环境下 100 m 高钢筋混凝土烟囱, 针对该烟囱自身结构与烟囱周围环境特点选用梯形爆破切口并开设了定向窗与定位窗。经分析计算确定了切口圆心角为 230°、切口高度 2.5 m; 孔距 0.35 m、排距 0.30 m; 单孔药量 60 g、炮孔总数 522 个; 用 MS1、MS3、MS5 段毫秒导爆管雷管进行孔内毫秒微差起爆的爆破施工方案。对爆破振动、塌落振动、爆破飞石距离进行了安全校核并采取适当防护措施。通过 LS-DYNA 选取适当参数对该烟囱进行了 1:1 数值仿真模拟, 模拟倒塌过程与实际倒塌过程基本一致, 烟囱顶部触地时速度为 22.8 m/s, 在烟囱的爆破拆除中, 塌落振动比爆破振动影响大。起爆后经过 11 s 该烟囱按预定方向顺利倒塌, 未对附近建筑物造成影响。

**关键词:** 钢筋混凝土烟囱; 定向爆破; 数值模拟; 安全校核

中图分类号: TU746.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)04-0100-06

## Practice and Numerical Simulation of 100 m Reinforced Concrete Chimney by Directional Blasting

DONG Xing<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>2</sup>, LIU Yong-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Kun-lin<sup>1</sup>, HU Yong-yu<sup>1</sup>, HUI Jia<sup>1</sup>, XIE Shao-kai<sup>1</sup>

(1. Beijing BIT Blasting Engineering & Technology Co Ltd, Beijing 100081, China;

2. New Era Liaoke (Fuxin) Blasting Engineering Co Ltd, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to demolish the 100 m high reinforced concrete chimney in complex environment, according to the structure of the chimney and the characteristics of the surrounding environment of the chimney, the trapezoid blasting cut is selected and the directional window and positioning window are set up. Through analysis and calculation, the center angle of the cut is 230 and the height of the cut is 2.5 m, the spacing is 0.35 m and the row distance is 0.30 m, the single hole charge is 60 g and the total number of holes is 522. The blasting construction scheme of millisecond time delay blasting is carried out with MS1, MS3 and MS5 millisecond detonators. The blasting vibration, collapse vibration and the distance of flying rock are checked and the appropriate protective measures are taken. The chimney demolition blasting was simulated by 1:1 numerical simulation using LS-DYNA by selecting appropriate parameters. The simulated collapse process is basically consistent with the actual collapse process. When the top of the chimney touches the ground, the velocity is 22.8 m/s. In the practice of chimney blasting demolition, the collapse vibration has a greater than the blasting vibration. After 11 s of blasting, the chimney collapses smoothly in the predetermined direction, without any impact on nearby buildings.

**Key words:** reinforced concrete chimney; directional blasting; numerical simulation; safety check

收稿日期: 2020-07-24

作者简介: 董星(1981-), 男, 硕士、高级工程师, 从事岩土工程及爆破工程方面工作与研究, (E-mail)10238153@qq.com。

通讯作者: 谢少凯(1992-), 男, 硕士、工程师, 从事岩土工程及爆破工程方面工作与研究, (E-mail)403091575@qq.com。

随着社会经济的高速发展, 在城市扩建和企业升级改造中不可避免会遇到高耸建筑物的拆除, 如烟囱、水塔等。这种高耸建筑物有着高度远大于底

部直径的结构特点,当其所处环境复杂时大多采用爆破拆除,此方法不仅效率高且可以保证施工安全,在工程实践中得到了大量应用。关于高烟囱的爆破拆除国内有过一些实践,如福建省安溪某发电厂 150 m 钢筋混凝土烟囱拆除<sup>[1]</sup>、宝钢 120 m 钢结构烟囱定向爆破拆除<sup>[2]</sup>、河南某 210 m 高的双层套筒烟囱的爆破拆除等<sup>[3]</sup>。通过数值仿真模拟,能更好的为烟囱的爆破拆除效果进行预测并指导施工,如杨军<sup>[4]</sup>、林谋金<sup>[5]</sup>、张广荣等对不同高度的钢筋混凝土烟囱爆破拆除进行了数值模拟<sup>[6]</sup>,从而为具体工程实践提供参考,本文将对高烟囱定向爆破拆除作进一步阐述。

## 1 工程概况

### 1.1 周边环境

待拆除烟囱位于辽宁省铁岭市某供热公司院内,建于 2008 年。烟囱北侧 10 m 为暂缓拆除的锅炉房、150 m 为黑龙江路,西侧 150 m 为公司围墙及公司储煤场,南侧 120 m 为新建戒毒所,东侧 125 m 为公路,东北侧 100 m 为公司办公楼,待拆除周围环境见图 1。烟囱见图 2。

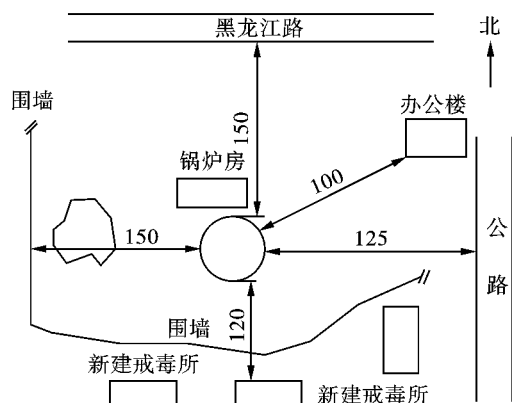


图 1 周边环境示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the surrounding (unit:m)

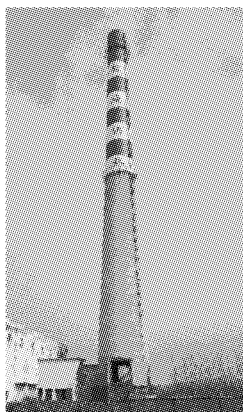


图 2 待拆烟囱

Fig. 2 Chimney to be removed

### 1.2 结构特征

该烟囱地面以上标高 100m,为钢筋混凝土筒式结构,如图 2 所示。烟囱筒身采用 C30 混凝土整体浇筑,竖向主要钢筋为  $\phi 10$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 16$ 、 $\phi 18$ ;环向钢筋为  $\phi 10$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 14$ 、 $\phi 16$ 。烟囱尺寸如表 1 所示,烟囱混凝土体积 880.0 m<sup>3</sup>、隔热层体积 216.0 m<sup>3</sup>、内衬体积 438.0 m<sup>3</sup>,总重量约为 3500 t。

表 1 烟囱尺寸参数

Table 1 Chimney size parameters

标高/m	外半径/m	筒壁/m	隔热层/m	内衬/m
0	6.25	0.38	0.08	0.23
40	4.48	0.34	0.08	0.23
60	3.74	0.26	0.08	0.12
80	2.90	0.22	0.08	0.12
100	2.58	0.18	0.08	0.12

## 2 爆破拆除方案设计

对于高耸建(构)筑物的拆除,一般是根据伐树原理,破坏底部支撑基座使其在自身重力作用下结构失稳而倾倒。

### 2.1 倒塌中心线

定向爆破拆除烟囱,要求在其倒塌方向必须具备一定宽度的狭长场地<sup>[7]</sup>,场地长度不得小于烟囱高度的 1.0~1.2 倍(自烟囱的中心点算起),垂直于倒塌中心线的横向宽度不得小于烟囱切口部位外径的 3.0~4.0 倍,对于钢筋混凝土烟囱等刚度好的结构,其倒塌的水平距离要求大一些。据此,在烟囱倒塌方向至少需要 120 m 长、50 m 宽的场地,只有西侧的一块露天煤炭堆放场具备倒塌条件,故设计爆破倒塌方为西侧。

### 2.2 爆破切口

#### (1) 切口形状

实践证明,烟囱切口形状应以梯形或者矩形为宜。这样在其初始倒塌过程中,原切口缓慢闭合,烟囱承压区逐渐增大,相应保证了压缩破坏过程在倒塌中心线上的对称,从而控制了烟囱倒塌的定向性。在切口圆心角相同时,梯形切口闭合所需时间短、对地面冲击小<sup>[8]</sup>,更好的保证了烟囱倒塌的可靠性,因此本文选择梯形切口施工。

#### (2) 切口位置及尺寸

为了钻孔方便,且考虑到烟囱底部烟道、出灰口等对结构对失稳的影响,切口由距地表 0.5 m 位置开始沿倒塌中心线对称布置。

#### ① 切口圆心角

切口处弧长一般不宜小于筒体外部周长的 1/2

到 $2/3$ ,这才能够满足初始定向倾倒失稳条件<sup>[9]</sup>。根据图纸和现场勘测,待拆烟囱切口部位筒体外径 $12.5\text{ m}$ ,则切口弧长

$$L = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right)\pi D = 19.63 \sim 26.17\text{ m} \quad (1)$$

式中, $D$ 为切口部位烟囱筒体的外直径。

现场根据具体施工情况 $L$ 取 $25\text{ m}$ 、开口角度 $230^\circ$ ,如图3所示。

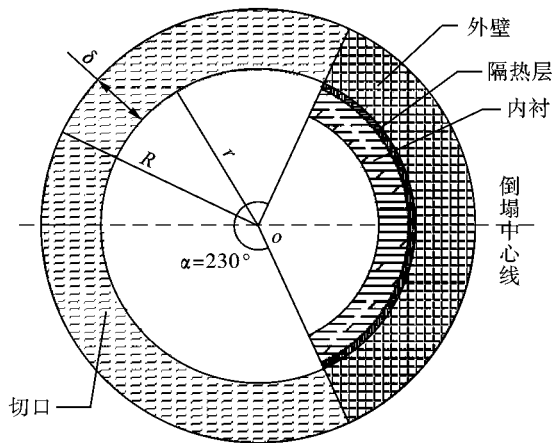


图3 切口截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of notch section

### ②切口高度

当切口上、下沿闭合时,烟囱的重心必须偏移出烟囱切口外边缘,即烟囱重心偏移的距离大于爆破切口处的外半径<sup>[10]</sup>。对于 $100\text{ m}$ 烟囱考虑到爆破后筒身下坐的可能和适当增加安全系数,爆破切口高度宜适当加大。爆破部位(爆破缺口)高度的确定与烟囱材质和筒壁厚度有关,钢筋混凝土烟囱钢筋分布密度大、筒壁较薄要取较大系数。

$$h \geq (3 \sim 6)\delta = 1.12 \sim 2.28\text{ m} \quad (2)$$

式中, $\delta$ 为爆破切口处烟囱壁厚, $0.38\text{ m}$ 。

根据工程经验取 $h=2.5\text{ m}$ 。

### ③定向窗、定位窗

定向窗、定位窗为保证爆破后烟囱沿着设定的方向倒塌,在主爆区爆破之前用风镐在倒塌中心线开凿一个定向窗同时在切口两端开凿两个定位窗,以保证烟囱沿倒塌中心线倒塌,并能在一定程度上降低一次起爆药量,减少因爆破产生的振动及其他危害。本次拆除爆破中,定向窗长 $3\text{ m}$ 、高 $2.5\text{ m}$ ,定位窗底边长 $2.5\text{ m}$ ,底角取 $45^\circ$ ,如图4。

### (3)内衬处理

为了确保倒塌方向的准确性,在钻凿炮孔时,人工将切口范围 $3\text{ m}$ 内衬预先拆除。

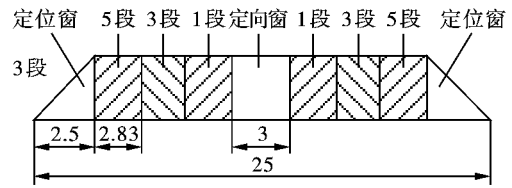


图4 切口布置及雷管段别示意图(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram of incision

layout and detonator segmen(unit:m)

## 2.3 孔网参数

(1)炮孔直径 $d$ :采用风动凿岩机钻孔,炮孔直径取 $40\text{ mm}$ ;

(2)最小抵抗线 $W$ :

$$W = 0.5\delta \quad (3)$$

则 $W=0.19\text{ m}$ ;

(3)炮孔孔深 $l$ :

$$l = (0.65 \sim 0.7)\delta \quad (4)$$

取 $l=0.25\text{ m}$ ;

(4)炮孔间距 $a$ :取 $a=0.35\text{ m}$ ;

(5)炮孔排距 $b$ :取 $b=0.30\text{ m}$ ;

(6)单孔药量:

$$Q_1 = qab\delta \quad (5)$$

式中, $q$ 为单位体积岩石所需炸药量,取 $1.5\text{ kg/m}^3$ ,计算得 $Q_1=0.06\text{ kg}$ ;

(7)炮孔总数 $N=522$ 个;

(8)总药量:

$$Q_{\text{总}} = N \cdot Q_1 \quad (6)$$

则 $Q_{\text{总}}=31.32\text{ kg}$ 。

## 2.4 起爆网路

爆破瞬间会产生巨大的向上推力,力矩方向与自身重力的力矩方向相反,这会对定向倾倒带来不利影响。为降低爆破推力对其倒塌方向干扰,孔内采用MS1、MS3、MS5段毫秒导爆管雷管进行毫秒微差起爆,即起爆顺序由中心到两侧。选择导爆管雷管簇联起爆网路,每 $10 \sim 15$ 发导爆管雷管组成一簇并用双发导爆管雷管起爆,最后用高能脉冲起爆器作为起爆源。

## 3 安全防护

### 3.1 爆破振动速度校核

爆破振动速度根据下式进行校核<sup>[11]</sup>

$$V = K'K(Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (7)$$

式中: $K'$ 为爆破拆除修正系数,取 $K'=0.25$ ; $K$ 、 $\alpha$ 为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数,取 $K=150$ , $\alpha=1.5$ ; $Q$ 为最大单段药

量,10.44 kg; $R$  为建筑物到爆破中心的距离,m。

核算出烟囱周围不同建筑物的爆破振动速度见表2,均远小于国家标准规定的爆破振动安全允许值,因此爆破地震效应不会对周围建筑物造成影响。

表2 爆破振动计算结果表

Table 2 Calculation results of blasting vibration

被保护物	办公楼	新建戒毒所	围墙
距离 $R/m$	100	120	150
爆破振动速度 $V/(cm \cdot s^{-1})$	0.12	0.09	0.07

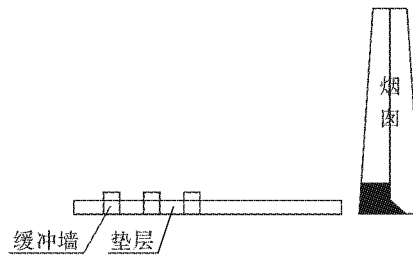
### 3.2 烟囱塌落振动校核

由于烟囱倒地会产生较大触地冲击振动,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>[12]</sup>

$$V_i = k_i \left[ L / \left( \frac{mgH_1}{\sigma} \right)^{1/3} \right]^\beta \quad (8)$$



(a) 开挖减振沟  
(a) Ditch of reducing vibration



(b) 缓冲墙、垫层侧面布置示意图  
(b) Layout of buffer wall and cushion

图5 烟囱触地时的减振及飞石防护措施

Fig. 5 Vibration reduction and protection measures for chimney when touching the ground

### 3.3 飞石距离校核及校核飞石防护

拆除爆破中飞石伤人、损物的事故也偶有发生,对爆破飞石范围进行校核能更好的划定警戒范围,由下式进行计算<sup>[13]</sup>

$$L_f = 70q^{0.53} \quad (9)$$

式中: $L_f$  为无阻飞石的最大飞散距离,m; $q$  为炸药单耗, $kg/m^3$ 。

计算得  $L_f = 87$  m,因此在 300 m 的警戒范围外是安全的。

(1)装药前测量炮孔尺寸,保证炮孔深度、实际抵抗线不小于设计值。

(2)加强填塞质量,严格控制炸药单耗。

(3)在爆破部位悬挂2~3层竹笆、草袋等。

(4)警戒人员佩戴安全帽在安全警戒线以外

式中: $V_i$  为塌落振动速度,cm/s; $k_i$  为衰减系数, $k_i = 4.09$ ; $\sigma$  为地面介质的破坏强度,一般取  $\sigma = 10$  MPa; $\beta$  为衰减指数, $\beta = -1.66$ ; $m$  为下落构件的质量,3500 t; $H_1$  为构件重心高度,35 m; $L$  为建筑物倒塌部位重心与被保护物距离,取最近的新建戒毒所所处距离 120 m。

将有关参数代入,计算得最近的新建戒毒所所处塌落振动  $V_i = 0.96$  m/s,小于国家相关标准<sup>[11]</sup>。

在烟囱倒塌落地撞击地面的位置铺垫一层大于 50 cm(近烟囱处 50 cm 厚、烟囱中部及顶部落地处 100 cm 厚)的粉煤灰或沙土,并每隔 40 m 用土袋或煤灰渣袋垒筑一定长度和高度的缓冲墙,并在缓冲墙上部垒三层装满细土的土袋或铺满三层草帘,缓冲墙长为烟囱宽的 1.2~1.3 倍,高约 4 m,宽约 3 m,以便减轻或避免烟囱落地撞击振动和飞石的危害,如图 5 所示。

作业。

## 4 数值模拟仿真

### 4.1 模型建立

采用 LS-DYNA 软件对该烟囱的爆破倒塌过程进行数值模拟,为更好反映烟囱的钢筋混凝土结构,选取分离式共节点模型,材料类型选择为:采用 LS-DYNA 单元库中的 beam161 单元、solid164 单元分别对钢筋、混凝土建立三维模型,钢筋和混凝土本构模型均采用经典塑性随动模型 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC \*,地面采用 solid164 单元,并配用 \* MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY \* 材料定义本构关系<sup>[14]</sup>,钢筋、混凝土主要参数见表 3,采用 kg-m-s 单位制建立 1:1 的模型。

表 3 模型参数设定  
Table 3 Material parameters

模型参数	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	切向模量/MPa
混凝土	3200	30	0.21	30	300
钢筋	7800	210	0.27	235	2100

## 4.2 仿真结果与分析

### (1) 倒塌过程

在  $t=0$  时爆炸形成缺口,由于重力作用,缺口

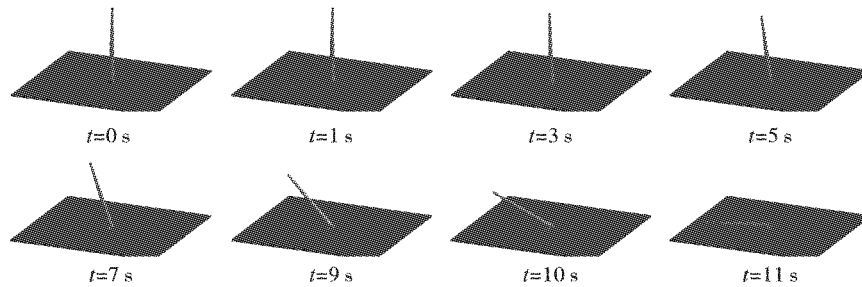


图 6 烟囱倒塌过程模拟

Fig. 6 Simulation of chimney collapse process

### (2) 烟囱顶部的速度及位移

为进一步研究烟囱倒塌过程中的位移、速度规律,在模型中取烟囱顶部倒塌方向上的节点进行研究,在 LS-PrePost 软件中分别导出该点倒塌方向( $X$ )、竖直方向( $Y$ )的位移、速度随时间变化的数据,由 Origin 软件绘图如图 7。

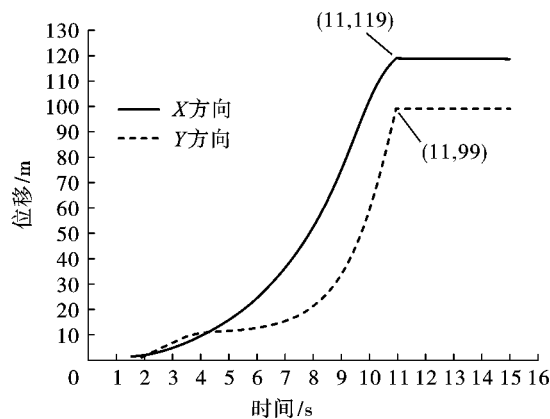


图 7 烟囱顶部位移—时间关系

Fig. 7 Displacement-time relationship of chimney top

由图 7 可知:刚起爆后,烟囱顶部位移变化不大;在 2~4 s 时  $Y$  方向位移增长加快,说明烟囱出现了短暂的下坐现象,同时在  $X$  方向也向设计的倒塌方向发生了倾斜;在 11 s 时, $X$ 、 $Y$  方向位移均达到最大值分别为 119、99 m,即 11 s 时烟囱倒塌触地;则,烟囱原高度:落地后长度 = 100 : 119 = 1 : 1.19,烟囱倒地后只发生了很小的前冲。

由图 8 可知:起爆后 0~4 s 时,烟囱顶部速度

处保留的筒体被部分压碎,在倾倒地矩的作用下烟囱开始加速倾斜,至起爆后 11 s 时最终整体触地,整个倒塌过程如图 6 所示。

变化不大;4~11 s 时,随着重力的作用  $Y$  方向速度不断增大至 22.8 m/s 后触地,而  $X$  方向速度先增大至 9.4 m/s 后因结构完整的烟囱筒身牵制作用,该点  $X$  方向速度急剧降低至趋近 0;在整个倒塌过程中,虽然  $X$  方向速度出现了先增后减的现象,但通过  $X$ 、 $Y$  方向矢量和速度曲线可知,烟囱顶部是逐渐加速至触地倒塌,触地时矢量和速度与  $Y$  方向速度接近。

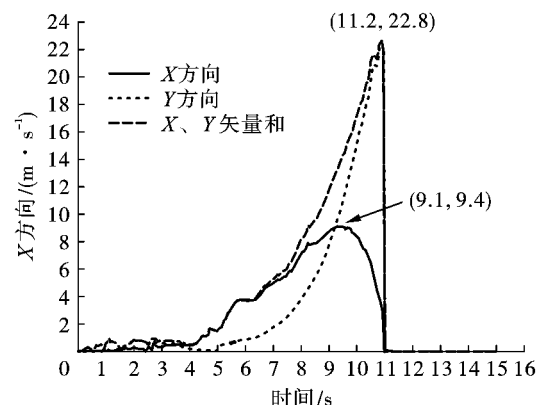


图 8 烟囱顶部速度—时间关系

Fig. 8 Velocity-time relationship of chimney top

### (3) 地面振动速度

提取烟囱倒塌方向上 100 m 处地面振动速度进行分析,由图 9 可知该位置的振动主要可以分为两个阶段:第一阶段为爆炸及烟囱在重力和弯矩共同作用中自身下坐、旋转产生的振动,第二阶段为烟囱倾倒地触地对地面强大冲击形成的坍塌振动。

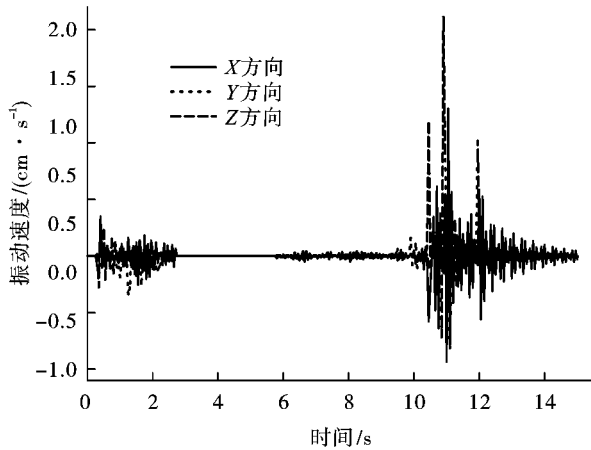


图9 地面振动速度—时间关系

Fig. 9 Ground vibration speed-time relationship

倒塌方向上100 m处地面上各阶段的振动速度数值如表4,可知在烟囱拆除中坍塌振动比爆破振动持续的时间长、振动幅度大,因此在进行烟囱爆破拆除设计时振动的校核以及施工过程振动防护措施

的选择中坍塌振动不容小觑。

表4 地面振动速度  
Table 4 Ground vibration speed

最大振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )	X方向	Y方向	Z方向
第一阶段	0.35	0.17	0.22
第二阶段	0.43	2.11	0.56

## 5 爆后效果

起爆后烟囱静止约1 s 随即发生倾倒,11 s 后全部落地。倒塌过程中发生轻微下坐现象,倒塌方向与设计方向基本一致。如图10,烟囱触地后筒身破碎解体,数值仿真模拟倒塌过程(图6)与实际倒塌过程(图10)基本一致。倒塌后溅起的飞散物距倒塌中心线不远,未发现拒爆药包,防护措施达到预期效果,未对周围建筑物及人员造成影响,爆破施工达到预期效果。

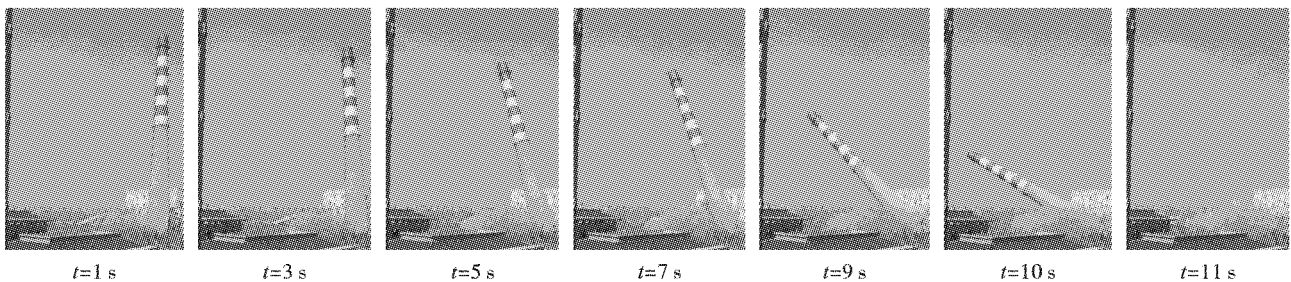


图10 烟囱倒塌过程

Fig. 10 Chimney collapse process

## 6 结语

通过对高烟囱的爆破拆除进行分析计算及数值模拟,提出切实可行的爆破方案,安全高效的实施了定向爆破拆除,可供类似工程参考。

切口设计时,应选择合适的切口位置、形状、高度、角度和其他几何参数。本工程中,切口圆心角可适当减小,减少爆破后烟囱下坐。

对高烟囱实施定向爆破拆除时,为降低一次爆破的上推力和爆破振动,宜采用分段起爆的方法,保证每次爆破范围关于倒塌中心线对称,中间先爆,两侧滞后。

通过数值仿真模拟技术能很好的预测烟囱倒塌的过程,可为实际施工提供参考。

烟囱爆破拆除中坍塌振动比爆破振动危害更大。对高耸建筑物拆除时,应仔细勘察严格按照预定设计方案进行施工,杜绝临时调整。

## 参考文献 (References)

- [1] 张建平,王俊生,胡俊涛. 150 m 钢筋混凝土烟囱爆破拆除[J]. 工程爆破,2016,22(1):82-85.
- [1] ZHANG Jian-ping, WANG Jun-sheng, HU Jun-tao. Blasting demolition of 150 m reinforced concrete chimney[J]. Engineering Blasting,2016,22(1):82-85. (in Chinese)
- [2] 孙飞,龙源,纪冲,等. 120 m 超高塔架式钢结构烟囱定向爆破拆除[J]. 工程爆破,2016,22(2):65-69.
- [2] SUN Fei, LONG Yuan, JI Chong. Demolition of a 120 m-high tower steel chimney by directional blasting[J]. Engineering Blasting,2016,22(2):65-69. (in Chinese)
- [3] 张英才,赵玉龙,高帅杰. 210 m 高的双层套筒烟囱的爆破拆除[J]. 工程爆破,2018,24(4):39-44.