

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.019

100 m 高钢筋混凝土烟囱双向切口爆破时差研究^{*}

高文乐¹, 刘志成¹, 李坤鹏¹, 史卓金²

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 青岛 266590; 2. 中铁十四局建筑分公司, 济南 250014)

摘要: 由于场地大小的限制, 高耸烟囱的爆破拆除需采用折叠倒塌的方式, 为进一步研究复杂环境下 100 m 钢筋混凝土烟囱的双向折叠定向倾倒爆破拆除中上下爆破切口的最优延时起爆时差, 利用 LS-DYNA 联合 Hypermesh 的数值模拟方法, 采用直接法建立共节点分离式模型, 将钢筋节点与混凝土节点直接产出单元体, 进行数值模拟仿真, 同时与工程实际进行对比分析。通过对烟囱上下切口不同起爆时差下的倒塌过程和结果进行模拟分析, 得出起爆时差分别为 1 s、1.5 s、2 s、2.5 s、3 s 下的倒塌过程、烟囱倒地破碎程度、爆堆范围和烟囱触地速度, 分析比较后确定上下切口的最优起爆时差为 2.5 s, 并且数值模拟计算的结果与工程实际高度吻合。

关键词: 钢筋混凝土烟囱; 双向折叠; 爆破拆除; 间隔时差; 数值模拟

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)02-0128-08

Delay Time of Two-way Cut Demolition Blasting of 100 m High Reinforced Concrete Chimney

GAO Wen-le¹, LIU Zhi-cheng¹, LI Kun-peng¹, SHI Zhuo-jin²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University
of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. China Railway 14th Bureau Construction Branch, Jinan 250014, China)

Abstract: Due to the limitation of the size of the site, the demolition blasting of the tall chimney needs to be collapsed. In order to further study the optimal delayed initiation time of the upper and lower blasting cuts in the two-way folding directional dumping blasting demolition of a 100 m reinforced concrete chimney in a complex environment, a common node separation model is established with LS-DYNA and Hypermesh, and the steel joints and concrete joints are directly produced as unit bodies. At the same time, the numerical simulation results are compared and analyzed with the actual project. Through the simulation analysis of the collapse process and results under different delay time of the upper and lower cuts of the chimney, 1 s, 1.5 s, 2 s, 2.5 s and 3 s, the collapse degree of the chimney, and the explosion range and after analyzing and comparing the speed of chimney touching the ground, it is determined that the optimal delay time of the upper and lower cuts is 2.5 s. The result of numerical simulation calculation is highly consistent with the actual project.

Key words: reinforced concrete chimney; bidirectional folding; blasting demolition; delay time; numerical simulation

收稿日期: 2021-02-05

作者简介: 高文乐(1966-), 男, 教授、硕士, 主要从事岩土力学和爆破安全技术的教学和科研工作, (E-mail) wenlegao@163.com。

通讯作者: 刘志成(1997-), 男, 硕士生, 主要从事岩土力学和爆破安全技术的科研工作, (E-mail) lzctop@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金(51874189)

随着国家对环境保护的重视, 一些高污染、高耗能火力发电被关停或者进行升级改造, 许多废弃的高耸烟囱等构筑物需要拆除。往往受场地大小的限制, 单向低位爆破切口的爆破形式已经不能满足

倒塌周围空间的要求,因此折叠爆破拆除的形式应用越来越多。为了确保烟囱爆破拆除的经济和安全,许多学者通过数值模拟对烟囱的爆破拆除的过程进行了计算。其中薛江波对砖烟囱破坏分析之后,通过分离式建模进行数值模拟的方式对钢筋混凝土烟囱单向倒塌爆破拆除进行计算,数值模拟得出的数据与在爆破现场测到的数据高度一致^[1]。Munjiza 和 Friedhelm 采集烟囱爆破过程中爆堆范围以及烟囱整体触地速度的数据,与数值模拟进行对比分析,试验证明数值模拟的模型和前处理数据可以用到工程实际中^[2,3]。武哲分析了处于复杂环境中的一栋 90 m 高框架剪力墙结构楼房采用三个爆破切口进行爆破拆除的技术,最终得到了理想的爆破效果^[4]。任江通过对烟囱的结构分析,考虑烟道和灰斗板对烟囱倒塌的不利影响,通过封堵现有烟道,应用复式梯形的切口形式,开设定向窗和导向窗对爆破方向精准定位等,最终实现了烟囱按照预定方向倒塌^[5]。叶家明通过应力条件计算出水塔爆破缺口的圆心角大小和刚度条件计算出水塔爆破缺口高度,并基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,对水塔的定向倒塌进行数值模拟,数值模拟分析也验证了水塔不能倒塌的结果^[6]。采用基于 LS-DYNA 联合 Hypermesh 的方法对寿光巨能热电厂 100 m 高的烟囱进行了数值模拟,并进一步利用数值模拟的方法对上下爆破切口的最佳起爆时差进行研究,对相似工程爆破设计和施工具有较大参考价值。

1 工程概述

寿光市侯镇南部巨能热电厂,是一座废弃电厂,内部发电设备已经拆除。其院内有一高为 100 m 的钢筋混凝土烟囱需进行爆破拆除。周围环境为:烟囱东距 3 层厂房 50 m,南距鲁丽热电厂 120 m、本厂平房 80 m,西、北距最近厂房 70 m。如图 1。

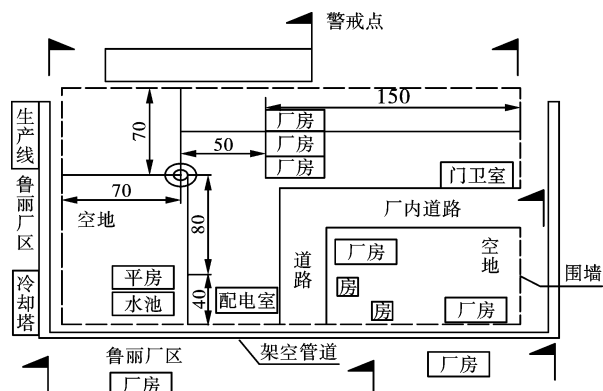


图 1 爆破周围环境示意图(单位:m)

Fig. 1 Surrounding environment of blasting(unit:m)

烟囱顶部排烟口直径 3.5 m,壁厚 160 mm,烟囱底部外直径 8.3 m、壁厚 360 mm。混凝土烟囱内部设置有耐火砖内衬和隔热层,其中隔热层厚 50 mm,内衬在 5 m 以下的厚度为 230 mm,5 m 以上为 120 mm;竖向配筋为 0~15 m 为 $\phi 22$ 、15~50 m 为 $\phi 20$ 、50~80 m 为 $\phi 16$,底部为双层钢筋网片结构,上部为单层钢筋网片结构。烟囱底部基座为直径 15 m,深 1.8 m 钢筋混凝土结构^[7]。

2 爆破方案及爆破参数

2.1 爆破拆除方案的选择

烟囱的爆破拆除主要有定向倒塌、原地坍塌和折叠倒塌三种方式,折叠倒塌又分为异向和同向折叠倒塌^[8]。待拆烟囱在烟囱向下的冲击力不够的情况下,原地坍塌方案很难对烟囱的倒塌方向进行控制;同时,周围距离明显无法满足高度 100 m 烟囱的定向倒塌爆破;根据待拆烟囱的周围环境以及对烟囱结构的分析,选择折叠倒塌爆破方案。由于作业场地大小的限制,爆破拆除时不仅在烟囱底部设置爆破切口,还要在其中部的适当位置炸开一个或一个以上的切口,使烟囱朝向两个或两个以上的方向进行同向或反向分段折叠倒塌。在正南正北方向上距离最近建筑物的距离大于 70 m,满足倒塌范围需求,有足够的安全距离,故选用双向折叠倒塌爆破拆除^[9]。即充分利用中间平台,分 +0~+50 m 和 50~100 m 两段,分别设计上下两个爆破切口,上部向正北、下部向正南方向倒塌的双向折叠倒塌。

2.2 爆破切口参数

(1) 切口位置

根据充分的研究和分析得出,烟囱的下部爆破切口设置为 0.5 m 以上,此位置外径为 8.3 m、壁厚 0.36 m,重量为 1200.98 t,重心高度为 23.6 m。上部切口设置在烟囱 50.5 m 处,此位置外径为 5.6 m、壁厚 0.24 m,重量为 322.37 t,重心高度为 18.8 m。

(2) 切口高度

切口高度是保证定向倒塌的一个重要参数。一般情况下^[1],爆破切口的高度通常取为 $h = (1.5 \sim 2.0)\delta$ 。为确保爆破时烟囱按预定方向准确倒塌和减小爆堆范围,实际工程中切口高度通常取大于切口位置的壁厚 5 倍以上,因此得出其下部切口 $h = 5.0 \times 0.36 = 1.8$ m,取 3 m;烟囱上部切口取 $h = 5 \times 0.24 = 1.2$ m,考虑上切口打眼施工困难,实际取 1 m。

(3) 切口长度

烟囱倒塌方向和爆堆范围较大地受到切口长度的影响。为取最佳的切口长度,应根据式(1)进行取值

$$\frac{3}{4}s \geq L \geq \frac{1}{2}s \quad (1)$$

式中: L 为爆破切口长度; s 为烟囱爆破部位的外周长。

烟囱的爆破切口圆心角取 $\alpha = 210^\circ$, 下部的切口长度取 14 m, 上部切口长度取 10 m。

(4) 上下切口的起爆时差

折叠爆破达到最佳效果应当满足: 保证下切口起爆时, 防止上、下段筒体间出现倾倒方向偏差。

通过计算切口高度可知, 在切口闭合瞬间, 上段筒体重心在切口水平面的投影到塔心的距离大于或等于该处半径^[10], 因此, 起爆时差为

$$t = \sqrt{\frac{J_1}{2mgL_1}} \int_{\varphi_a}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{\cos\varphi_a - \cos\varphi}} + \Delta t = \ln \frac{1 - \cos \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \Big|_{\varphi_a}^{\varphi} + \Delta t \quad (2)$$

式中: φ 为烟囱与 Y 轴的夹角; J_1 为转动惯量; L_1 为烟囱计算长度; Δt 为经验值, 一般取 100 ~ 500 ms (筒体材料强度高时取小值)。

目前, 国内上、下爆破切口的起爆时差选 1.4 ~ 7.0 s, 根据理论和工程经验分析得出^[7], 实际爆破采用半秒 6 段雷管, 即在上部爆破烟囱形成 5° 的倾斜时下部切口开始起爆^[11], 上部与下部的起爆时差约为 2.5 s。

3 烟囱倾倒过程的动能分析

烟囱折叠倒塌过程中形成了铰接双连杆折叠下落的现象, 为双自由度动力学的问题, 采用拉格朗日方程建立动力学模型^[12]。见图 2。

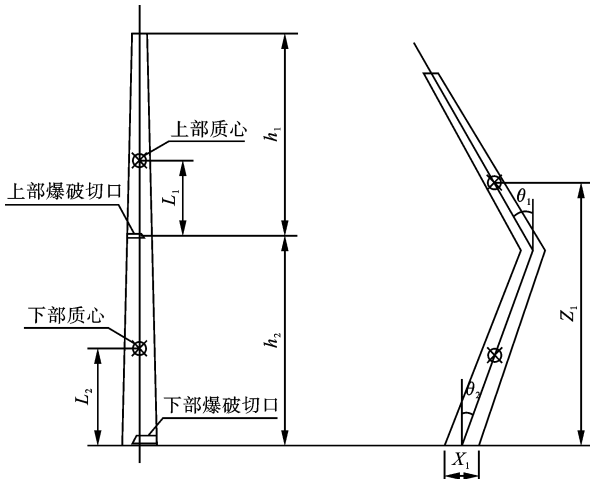


图 2 烟囱折叠倒塌过程图

Fig. 2 Schematic diagram of the collapse of the chimney

(1) 上段筒体的几何学关系

$$x_1 = h_2 \cdot \cos\theta_2 - L_1 \cdot \sin\theta_1 \quad (3)$$

$$Z_1 = h_2 \cdot \cos\theta_2 + L_1 \cdot \cos\theta_1 \quad (4)$$

式中: X_1 为烟囱上段质心水平位移; Z_1 为烟囱上段质心垂直位移; h_1 为上段筒体长度; h_2 为下段筒体长度; L_1 为上段筒体质心到上部切口的距离; L_2 为下段筒体质心到下部切口的距离; θ_1 为上段筒体转角; θ_2 为下段筒体转角。

将 X_1, Z_1 进行微分, 可得出烟囱上段质心水平向及垂直向速度分量, 从而得出上段平动部分动能

$$T'_1 = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 \quad (5)$$

$$v_1 = \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \quad (6)$$

$$T'_1 = \frac{1}{2} m_1 [h_2^2 \dot{\theta}_2^2 + L_1^2 \dot{\theta}_1^2 - 2h_2 L_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (7)$$

m_1 为上段筒体的质量, 而上段绕其重心转动的转动部分动能为

$$T''_1 = \frac{1}{2} J_{1c} \dot{\theta}_1^2 \quad (8)$$

J_{1c} 为上段绕其质心的转动惯量。

由式(7)和式(8)两式可得上段的总动能为

$$T_1 = T'_1 + T''_1 = \frac{1}{2} m_1 [h_2^2 \dot{\theta}_2^2 + L_1^2 \dot{\theta}_1^2 - 2h_2 L_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)] + \frac{1}{2} J_{1c} \dot{\theta}_1^2 \quad (9)$$

(2) 下段筒体的动能为

$$T'_2 = \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (10)$$

J_2 为下段筒体绕其质心的转动惯量。

(3) 从而得到运动过程中系统的总动能为

$$T = T_1 + T_2 \quad (11)$$

$$T = \frac{1}{2} m_1 [h_2^2 \dot{\theta}_2^2 + L_1^2 \dot{\theta}_1^2 - 2h_2 L_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)] + \frac{1}{2} J_{1c} \dot{\theta}_1^2 + J_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (12)$$

4 计算模型

采用 SolidWorks 建立精准三维立体模型, 之后导入到 Hypermesh 软件中对其进行细化处理。利用 Hypermesh 软件强大的网格划分功能, 对模型网格进行加密划分。考虑到烟囱模型关键地方的约束较多, 后期需要添加大量的约束, 采用直接法建立钢筋混凝土共节点分离式模型^[13], 将钢筋节点与混凝土节点直接产出单元体。模型材料参数设定中, 钢筋设置为 BEAM161, 混凝土设置为 SOLID164 实体单元。据钢筋混凝土结构的力学特征研究得出, 将混凝土模型设置为 * MAT_BRITTLE_DAMAGE, 混凝土的弹性模

量为 20 GPa,泊松比为 0.2,拉伸极限强度为 5.0 MPa,剪切极限强度为 6.0 MPa,钢筋模型设置为 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC,其密度为 7825 kg/m^3 ,弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.25,屈服强度为 335 MPa,爆破切口失效模型设置为 * MAT_ADD_EROSION,将钢筋的抗拉失效应变定义为 0.15。

通过修改关键字中的 CONTROL_TIMESTEP 中的 DT2MS 控制计算时间,当 $\text{DT2MS} > 0$ 时,模型中离散的所有小单元都会以软件内部设定好的时间步长进行计算,全部的小单元都会被质量缩放。当 $\text{DT2MS} < 0$ 时,

并不是所有的小单元都会质量缩放了,只有时间步长小于 DT2MS 的单元才会被质量缩放^[14]。

5 上下切口最佳延时时差研究

前面已经对该爆破过程进行了数值模拟,模拟结果与实际爆破结果高度一致。在此基础上对其进一步研究,分别设置上下切口的起爆时差为 1 s、1.5 s、2 s、2.5 s、3 s,通过爆堆最远距离、烟囱倒地破碎程度和烟囱触地速度这三个变量对起爆时差进行优化。

(1) 倒塌过程的对比(见图 3)

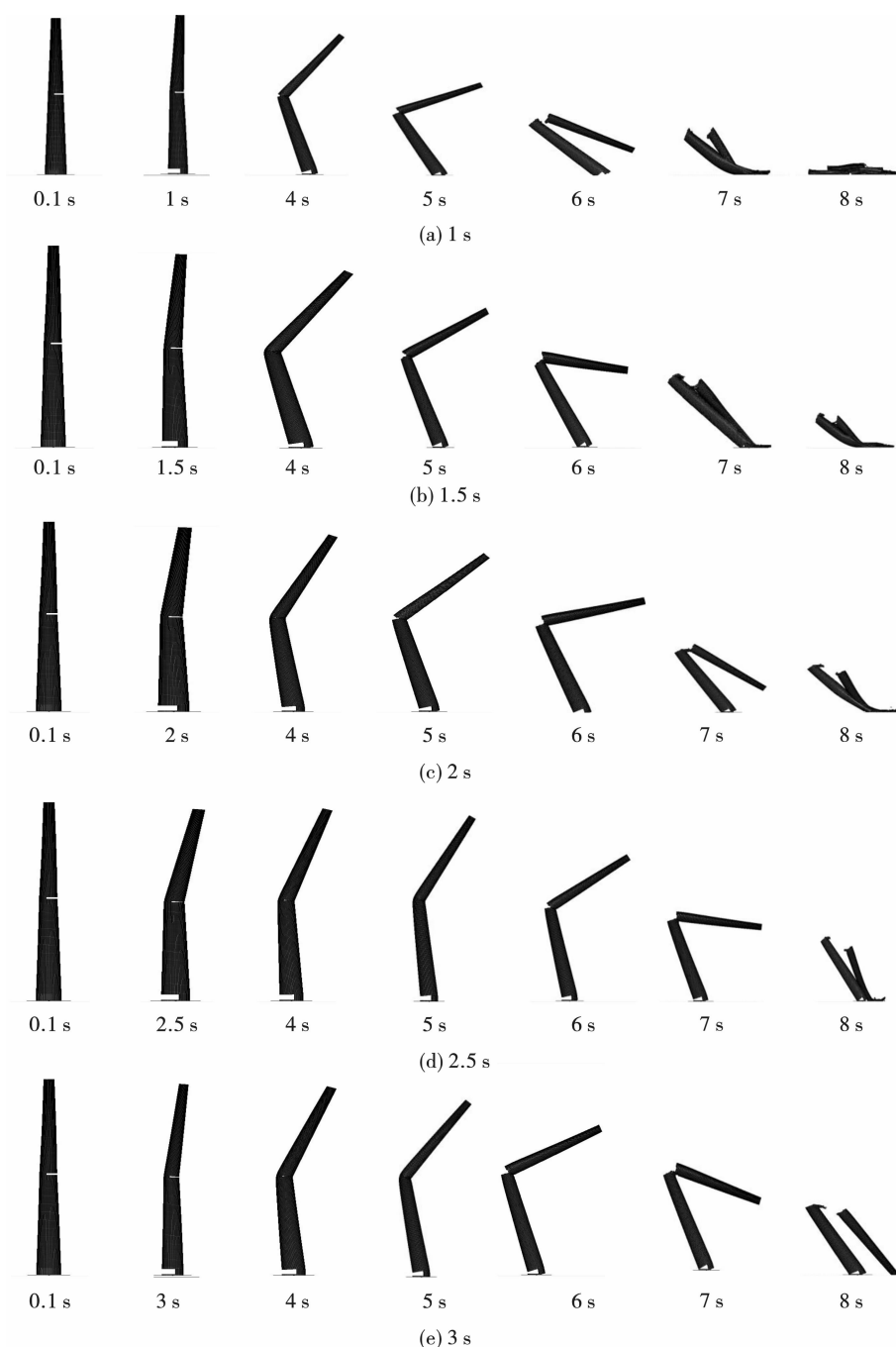


图 3 不同起爆时差下的倒塌过程模拟效果比较

Fig. 3 Comparison of simulation effects of collapse process with different delay time

通过对比分析图 3,可以看出随着上下切口起爆时差的增大,烟囱上半段的倒塌角度越小,上半段触地的时间越晚。分析倒塌过程图可以看出上部爆破切口部分的闭合受到下部爆破切口影响,当上下部爆破切口的起爆时差相差较小时,烟囱上下两段的倒塌方向相反。烟囱下半段倒塌会通过爆破切口保留部分的烟囱向反方向拉动上半部分,导致上半部分落地速度较快。当起爆时差为 3 s 时,上部和下部爆破切口起爆时差相差较大,上部烟囱爆破切口部分的钢筋混凝土已经被拉坏,下半段烟囱对上半段的倒塌速度影响较小,上部分烟囱断裂后下部分烟囱才开始倾斜,是两个独立的爆破过程。上下部烟囱爆破倒塌没有衔接起来,会导致爆破倒塌方向的不确定性增大^[15]。

(2) 爆堆倒塌最远距离的对比

通过分析图 4 不同起爆时差下的爆堆范围及倒塌最远距离得出不同起爆时差下的烟囱触地后基本破碎,只有起爆时差为 2.5 s 时的倒塌最远距离最小为 50 m,其他起爆时差的倒塌最远距离均为 55 m 左右。因此起爆时差为 2.5 s 时的倒塌范围是最小的,即为最安全的爆堆范围。

(3) 烟囱触地速度的对比

通过图 5 不同起爆时差下的烟囱触地速度可以分析得出:最大触地速度发生时刻随着起爆时差的增大而越来越大,起爆时差为 1 s、1.5 s、2 s、2.5 s、3 s 下的最大触地速度出现时刻分别为 6.5 s、6.9 s、7.5 s、7.9 s、8.2 s,同时证明图 3 中得出的随着上下切口起爆时差的增大触地时间越来越晚的结论正确。起爆时差为 1 s 的烟囱整体最大触地速度为 16 m/s,其余起爆时差的最大整体触地速度随起爆时差增大而逐渐减小。

6 数值模拟结果及分析

分析各项指标,双向折叠倒塌爆破的上下切口的最优起爆时差为 2.5 s,和爆破设计的公式计算得出的上下爆破切口的起爆间隔时差相同。图 6 显示了烟囱倒塌与工程实际的比较,数值模拟结果精确仿真了工程实际的倒塌过程。烟囱倒塌的方向也按照爆破设计的方向倒塌,折叠爆破实现了减小爆堆范围的要求。0 s 时上部爆破切口起爆,在重力作用下开始向着爆破切口方向倾斜。2.5 s 时下部爆破切口起爆,此时上部烟囱大概倾斜了 5°,减小了烟囱出现前冲现象的概率。4.2 s 时上下段的烟囱倾斜角度不断加大,倾斜速度不断加快。6.6 s 时近乎自由落体式的速度触地破坏,实际的烟囱倒塌过程与数值模拟计

算相同时刻的烟囱倒塌的过程基本一致。

结合数值模拟的结果可以将烟囱的倒塌过程分为三个阶段:第一阶段为上切口的形成至保留区出现裂缝的阶段;钢筋和混凝土共同承担上部烟囱的压力作用、上部切口形成而产生弯矩,出现拉应力作用。此时处于弹性阶段,应力与应变呈线性正比例关系。随着弯矩的增大,爆破切口保留处的应变也越来越大,由于混凝土抗拉强度远小于抗压强度,混凝土在拉应力作用下开始出现塑性变形,但钢筋弹性模量较大,其仍然属于弹性阶段^[16]。当上部切口保留处的拉应力大于混凝土所能承受的最大拉应力时,爆破切口保留处开始出现裂缝。裂缝的出现标志进入第二阶段,随着弯矩和变形的增加混凝土逐渐退出工作,在受拉钢筋达到屈服之前,所有的拉应力由钢筋承担。接下来进入破坏阶段,为第三阶段,钢筋达到屈服值以后进入强化和颈缩阶段,此时裂缝快速变大、上部烟囱倾斜角逐渐增大直到从爆破切口处断开触地破坏,下部切口爆破后也会产生和上部切口相同的三个阶段^[17]。

7 结论

(1) 基于 LS-DYNA 联合 Hypermesh 的数值模拟方法对 100 m 高钢筋混凝土烟囱的双向折叠爆破进行了仿真模拟,数值模拟的结果与工程现场数据高度一致。

(2) 分析了烟囱倒塌的触地快慢受到起爆时差的影响,得出起爆时差越大,触地时间就越晚的结论。同时起爆时差越大,上部爆破切口倒塌方向的爆堆就越大。爆破时差为 2.5 s 时的爆堆堆积范围是最小的。

(3) 分析了烟囱的触地速度,得出整体触地速度越快对地面的振动也就越大,越不安全的结论。分析得出起爆时差为 1 s 时的烟囱整体触地速度最大为 16 m/s,其余起爆时差下烟囱整体触地最大速度随起爆时差增大而逐渐减小。也就意味着起爆时差越大对地面的振动越小,越有利于周边建筑物的安全。

(4) 综合分析模拟结果,爆破时差为 2.5 s 时爆堆的范围最小,烟囱整体倒塌触地速度也相对较小为 13.8 m/s,爆堆破碎程度与时差影响关系不明显,所以 2.5 s 是最佳的起爆时差。从而也证明了爆破时差计算公式是正确可行的,对类似的爆破工程具有一定的指导意义。

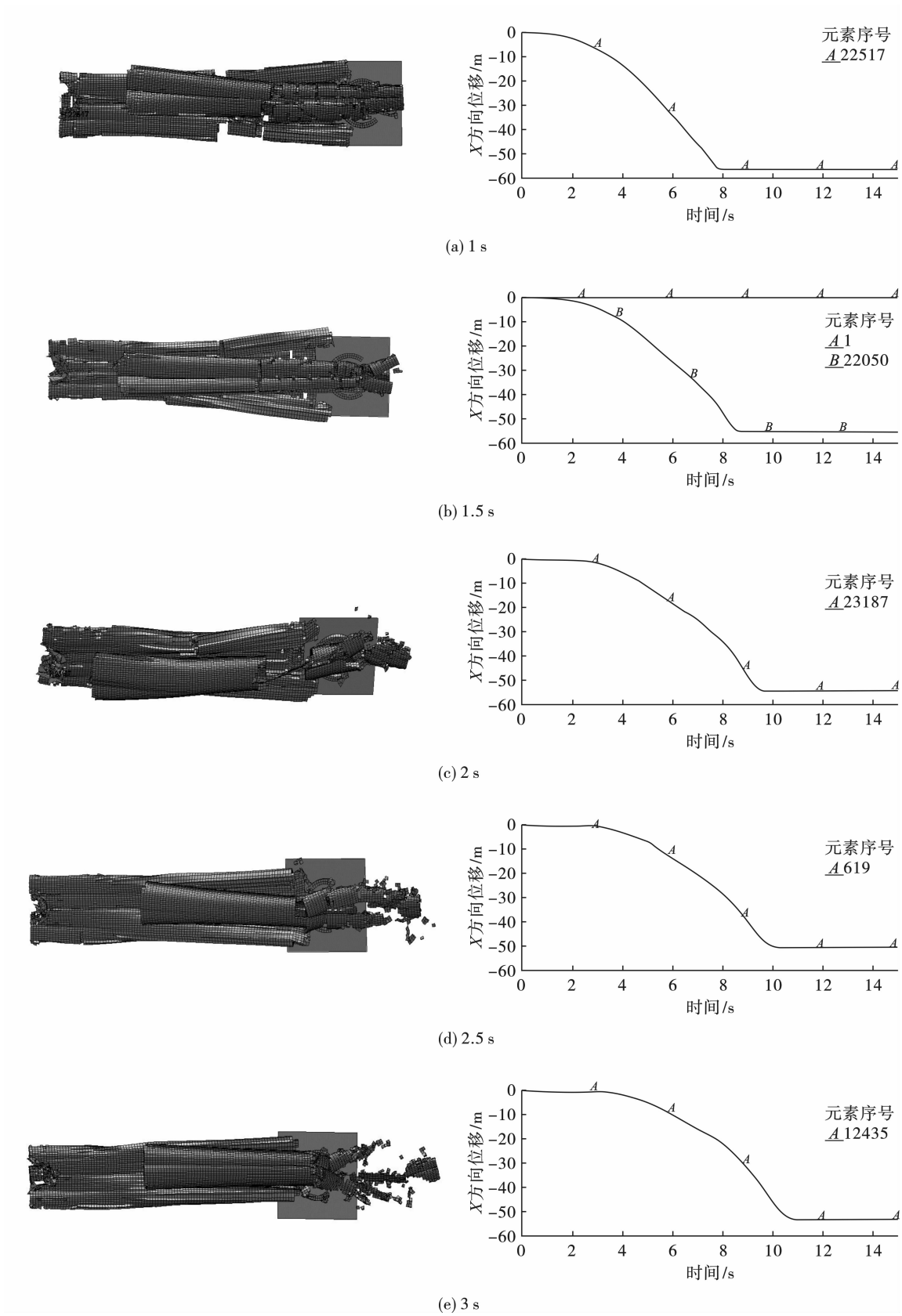


图 4 不同起爆时差下的爆堆范围及倒塌最远距离

Fig. 4 Explosion range and maximum collapse distance with different delay time

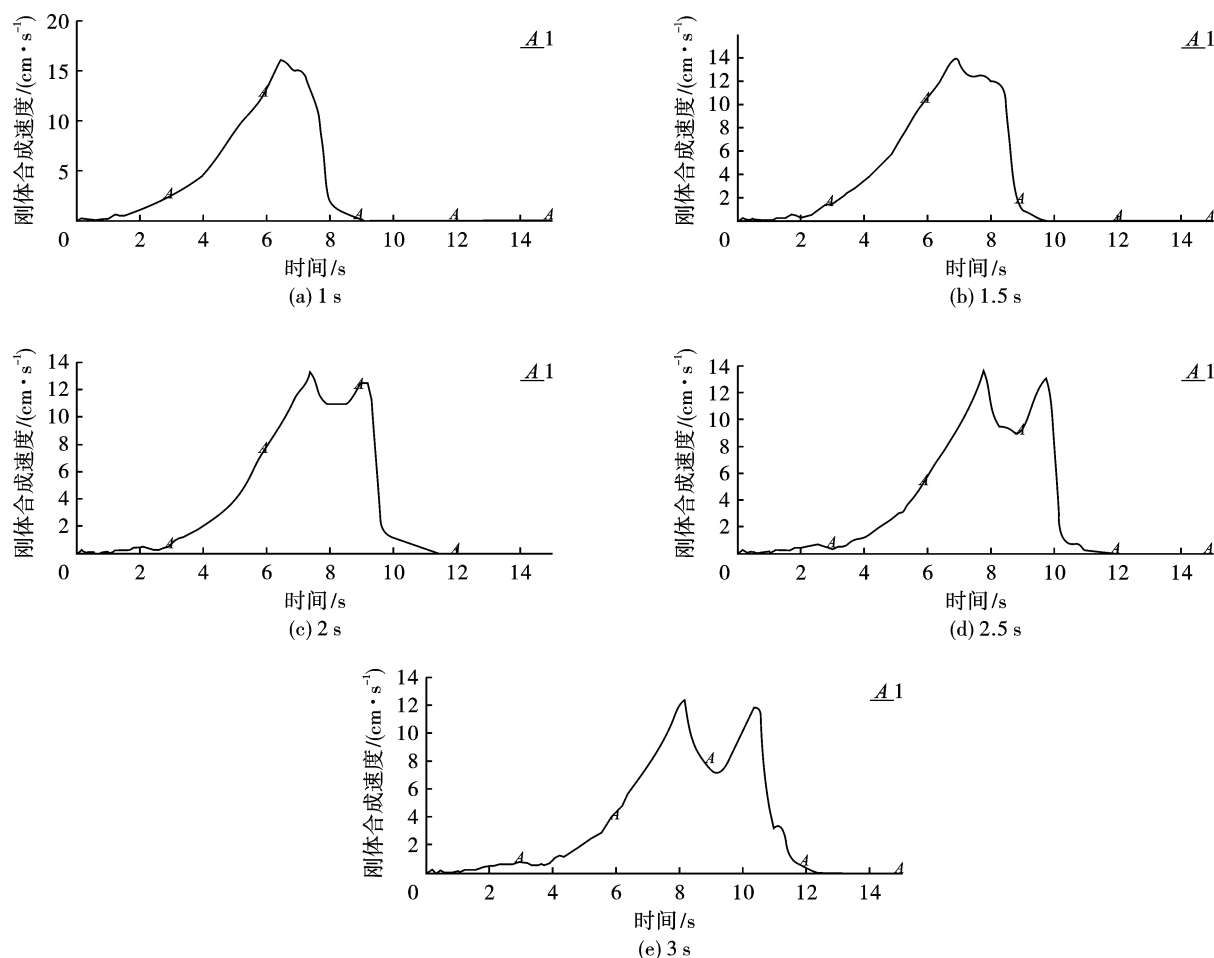


图 5 不同起爆时差下的烟囱整体触地速度

Fig. 5 The overall velocity of the chimney touching the ground with different delay time

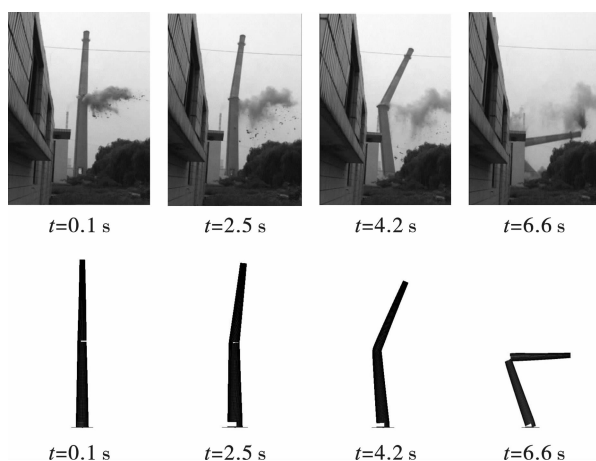


图 6 实际爆破效果与模拟效果的比较

Fig. 6 Comparison of actual blasting effect and simulation results

参考文献 (References)

- [1] XUE Jiang-bo. Simulation of blasting demolition of tall structures[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [2] MUNJZA A. The combined finite-discrete element method [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2004: 9-13.
- [3] STANGERBERG. Blasting demolition of reinforced concrete industrial chimneys[J]. Proceeding of the IASSASCE International Symposium 1994 on Spatial, 1994: 290-299.
- [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 a 90 m high building[J]. Blasting, 2019, 36(2): 78-84. (in Chinese)
- [5] 任 江, 汪高龙, 王 潇. 两座 150 m 高钢筋混凝土烟囱同时爆破拆除[J/OL]. 爆破: 1-8. [2020-10-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200925.1758.004.html>.
- [5] REN Jiang, WANG Gao-long, WANG Xiao. Simultaneous blasting of two 150 m high reinforced concrete chimneys [J/OL]. Blasting: 1-8. [2020-10-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200925.1758.004.html>.

[1] 薛江波. 高耸构筑物爆破拆除模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

- net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200925.1758.004.html. (in Chinese)
- [6] 叶家明,戴春阳,李洪伟,等.伞形水塔拆除爆破关键参数计算与数值模拟[J/OL].爆破,1-12.[2020-10-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200803.1248.010.html.
- [6] YE Jia-ming, DAI Chun-yang, LI Hong-wei, et al. Calculation and numerical simulation of key parameters for the demolition of an umbrella-shaped water tower[J/OL]. Blasting, 1-12. [2020-10-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200803.1248.010.html. (in Chinese)
- [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.
- [7] WANG Chen, GAO Wen-le, FANG Chang-hua, et al. Demolition of a 100m high reinforced concrete chimney by bidirectional folding blasting[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(3): 68-71. (in Chinese)
- [8] 沈朝虎,杜云鹤.钢筋混凝土烟囱折叠爆破间隔时间确定[C]//中国工程爆破协会、中国力学学会.中国爆破新技术Ⅲ,2012:4.
- [8] SHEN Chao-hu, DU Yun-he. Determination of the interval between folding blasting of reinforced concrete chimneys[C]//China Engineering Blasting Association, Chinese Society of Mechanics. New Technology of China Blasting III, 2012: 4. (in Chinese)
- [9] 董星,张哲,刘永强,等.100 m 钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除实践与数值模拟[J/OL].爆破,1-11.[2020-10-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200803.1438.018.html.
- [9] DONG Xing, ZHANG Zhe, LIU Yong-qiang, et al. Practice and numerical simulation of demolition of a 100 m reinforced concrete chimney by directional blasting[J/OL]. Blasting, 1-11. [2020-10-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200803.1438.018.html. (in Chinese)
- [10] 郑桂初,王友新,段丽环,等.180 m 高钢筋混凝土烟囱的拆除爆破[J].工程爆破,2019,25(6):56-60.
- [10] ZHENG Gui-chu, WANG You-xin, DUAN Li-huan, et al. Demolition and blasting of 180 m high reinforced concrete chimney[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(6): 56-60. (in Chinese)
- [11] 刘士兵,贺攀,程赛珍.单向三折叠拆除爆破技术在复杂环境下的应用[J].工程爆破,2019,25(5):57-62.
- [11] LIU Shi-bing, HE Pan, CHENG Sai-zhen. The application of one-way three-folding demolition blasting technology in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(5): 57-62. (in Chinese)
- [12] 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.
- [12] CHU Huai-bao, XU Peng-fei, YE Hong-yu, et al. Research on the collapse and stress process of reinforced concrete chimney demolition by blasting[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(22): 183-186, 198. (in Chinese)
- [13] 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.
- [13] TU Sheng, ZHOU Xian-zhong, HU Fang-hua. Blasting demolition of 85 m two reinforced concrete chimneys standing side by side in a complex environment[J]. Blasting, 2018, 35(4): 99-103. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] LIN Mou-jin, XUE Bing, FU Jian-qiu, et al. Numerical simulation and practice of 210 m chimney super-high cut blasting demolition[J]. Blasting, 2018, 35(3): 103-107, 146. (in Chinese)
- [15] 于淑宝.复杂环境下超高烟囱同向折叠爆破拆除原理及应用研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2019.
- [15] YU Shu-bao. Research on the principle and application of simultaneous folding blasting demolition of ultra-high chimneys in complex environments[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019. (in Chinese)
- [16] 谢亮波,王铭,张西良,等.薄壁型钢混结构烟囱控制爆破拆除[J].爆破,2020,37(2):75-79.
- [16] XIE Liang-bo, WANG Ming, ZHANG Xi-liang, et al. Controlled blasting demolition of a thin-walled steel-concrete chimney[J]. Blasting, 2020, 37(2): 75-79. (in Chinese)
- [17] 邢光武,耿鹏.复杂环境厚壁砖混烟囱拆除的精准定向控制爆破[J].工程爆破,2020,26(3):45-48,62.
- [17] XING Guang-wu, GENG Peng. Precision directional controlled blasting for the demolition of a thick brick-concrete chimney in a complex environment[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3): 45-48, 62. (in Chinese)