

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0063-06

# 烟囱不同爆破缺口下的定向倒塌效果数值模拟

吴庆<sup>1</sup>, 夏云鹏<sup>1,2</sup>, 张耀良<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江, 212000; 2. 江苏长江爆破工程有限公司, 江苏 镇江, 212000)

**摘要:** 为研究不同爆破缺口下烟囱的定向倒塌, 以实际需拆除的烟囱作为研究对象, 应用ANSYS/LS-DYNA软件分别建立烟囱在不同高度和不同形状爆破缺口下的定向倒塌模型。研究表明: 相比爆破缺口高度0.50m及1.94m, 爆破缺口高度为1.05m的倒塌效果较好, 倒塌用时较少; 相比倒梯形、矩形缺口形状, 正梯形缺口倒塌效果最优。最终采用缺口高度为1.05m的正梯形爆破缺口进行实际爆破, 实际爆破效果较好, 并且仿真和试验振动数据最大偏差不超过9.5%, 说明了仿真的可靠性。

**关键词:** 爆破; 烟囱; 爆破缺口; 定向倒塌; 偏移角度; 振动响应

中图分类号: TD235 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.014

## Numerical Simulation of Directional Collapse Effect under Different Blasting Gap of Chimney

WU Qing<sup>1</sup>, XIA Yun-peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yao-liang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212000; 2. Jiangsu Changjiang Blasting Engineering Co. Ltd., Zhenjiang, 212000)

**Abstract:** To study the method of directional chimney collapse under different blasting gaps, aimed at the chimney to be removed, by use of ANSYS/LY-DYNA software, the directed collapse models of the chimney under different heights and different shapes of blasting gap were established. The study results show that compared with the height of the blasting gap of 0.50m and 1.94m, the collapse effect of the height of 1.05m is better, and it takes less time. Compared with the gap shape of inverted trapezoidal and rectangular, the collapse effect of positive trapezoidal is the best. Finally, the positive ladder blasting gap with a gap height of 1.05m was used, the actual blasting effect is good. And the peak deviation of the simulation and test vibration data is less than 9.5%, indicating the reliability of the simulation.

**Key words:** Demolition; Chimney; Blasting incision; Directional collapse; Offset angle; Vibration response

随着我国现代化经济的快速发展, 爆破拆除由于其高效性被广泛使用, 但爆破拆除是不可逆的, 并对地面和周边建筑造成较大的瞬时振动, 该振动主要包括爆破引起的爆破振动和塌落振动, 因此在爆破前期应对爆破方案进行较好的设计及评估。大量的爆破实践表明, 烟囱、冷却塔、水塔等高耸构筑物塌落振动比爆破振动破坏强度大, 因此, 控制定向倒塌方向和倒塌引起的振动极其重要。张广荣等<sup>[1]</sup>针对烟囱切

口高度对烟囱拆除爆破塌落振动的影响进行了研究, 得出烟囱倒塌方向第2次的触地振动远远大于第1次, 随着爆破缺口高度的增加, 烟囱的触地振动对周围建筑物的影响变小; 胡锐<sup>[2]</sup>对框架结构定向拆除爆破触地振动进行数值模拟, 提出当缺口高度较小时, 缺口闭合所产生的触地振动较之主体触地时的振动影响要小得多; 王铁等<sup>[3]</sup>提出了对于高层建筑物的多缺口爆破拆除方案, 采用自上而下的引爆方式可以显

收稿日期: 2021-08-20

作者简介: 吴庆 (1971-), 男, 教授, 主要从事混凝土结构及其耐久性、高性能混凝土研究。

著降低塌落振动。

本文以实际工程为背景,采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对不同缺口高度和不同缺口形状的烟囱进行定向爆破倒塌模拟,通过倒塌效果选取最优一组爆破缺口,对该爆破缺口进行爆破振动模拟,并与实测结果进行比对,为爆破安全控制研究提供参考。

## 1 烟囱定向爆破计算模型

### 1.1 工程概况

#### 1.1.1 周边环境

待爆烟囱位于江苏省丹阳市访仙镇访玻璃厂,烟囱北侧距离待拆民房 6m,西侧距离待拆厂房为 3m,南侧距离内有运行设备的厂房为 13.3m,东侧距离仓库仅有 0.7m,见图 1。

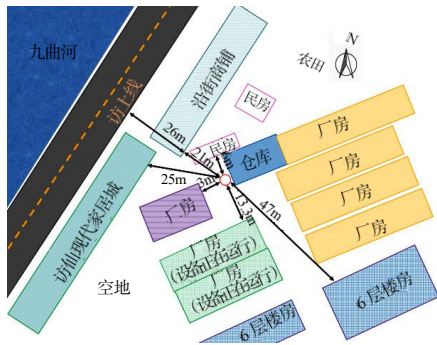


图 1 待爆烟囱具体位置环境图

Fig. 1 Specific location of chimney to be exploded

#### 1.1.2 结构特点

烟囱属于砖结构,高度为 32m,底部外径 2.8m,底部壁厚 0.49m,内衬厚度 0.12m,内衬与筒壁之间的夹层为 0.10m,烟囱整体自下而上呈收缩性,底部西侧有一宽 1.2m、高 1.3m 的烟道口,南侧有一宽 1.5m、高 1.6m 的出灰口,整体自重约为 220t。

#### 1.1.3 研究内容

(1) 采用的爆破缺口下沿圆角为  $216^\circ$ ,对应下沿缺口周长为 5.28m,缺口梯形角度为  $50^\circ$ ,爆破缺口位置距离地面 2.8m。

(2) 研究不同爆破缺口高度下烟囱的倒塌效果,分别建立 0.5m, 1.05m, 1.94m 3 组缺口高度下的有限元网格模型。

(3) 分析不同爆破缺口形状的倒塌效果,分别

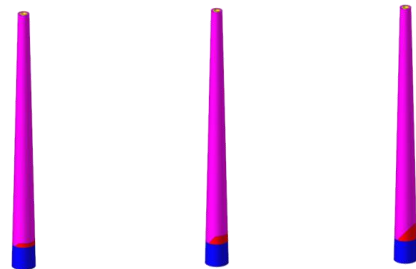
建立倒梯形、矩形以及正梯形爆破缺口的有限元网格模型。

(4) 爆破采用非电毫秒起爆网路,考虑到炮孔布局较多,在研究爆破引起的振动时主要以总药量单个炸药进行爆破。

### 1.2 有限元模型建立

利用 Hypermesh14.0 联合 LS-DYNA 软件建立不同缺口高度烟囱定向爆破倒塌的有限元模型,模型共分为烟囱上部、内衬、爆破缺口、烟囱底部 4 个部分,整体网格尺寸为 0.15m,总网格数量 60 200 个,节点总数为 72 581 个。图 2 为 3 种不同缺口高度的烟囱有限元网格模型,图 3 为不同缺口形状的烟囱有限元网格模型。

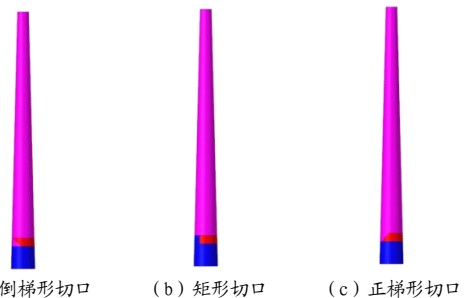
本文建立 2 个接触点,分别为烟囱和地面的接触点、烟囱顶部和底部的接触点,并建立实际的地面模型。图 4 (a) ~ (b) 分别为烟囱定向倒塌有限元模型和烟囱爆破有限元模型,其中图 4 (b) 底部长方体为空气。图 5 为将空气和缺口失效部件隐藏后的有限元模型,其中缺口内小型的长方体为炸药,共布置在 3 处位置,同时起爆,炸药总质量为 24kg。



(a) 缺口高度 0.5m (b) 缺口高度 1.05m (c) 缺口高度 1.94m

图 2 不同爆破缺口高度烟囱有限元网格模型

Fig. 2 Finite element grid model of chimney with different blasting gap heights



(a) 倒梯形切口 (b) 矩形切口 (c) 正梯形切口

图 3 不同爆破缺口形状烟囱有限元网格模型

Fig. 3 Finite element grid model of chimney with different blasting gap shapes

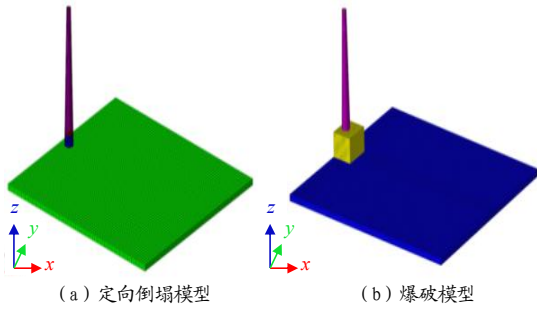


图4 烟囱定向倒塌及爆破有限元模型

Fig.4 Finite element model diagrams of the directional collapse of the chimney and the chimney blasting

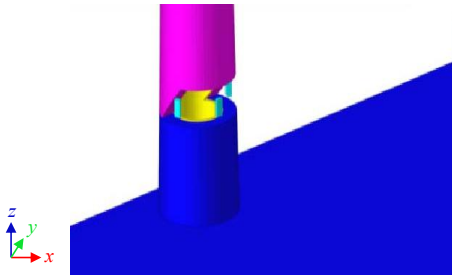


图5 烟囱爆炸炸药布置位置

Fig.5 Arrangement position of chimney blasting explosives

### 1.3 材料模型确定

烟囱倒塌模型共有烟囱、内衬和地面3种材料，烟囱底部、爆破缺口部分材料和烟囱一样，采用能够反映塑性变形特征的T\_PLASTIC\_KINEMATIC材料本构；内衬也采用该材料模型，地面采用弹性MAT\_ELASTIC材料本构，烟囱爆破缺口不设定失效应变，通过MAT\_ADD\_EROSION设定其删除时间为0.1s。

### 1.4 其他参数设定

定向爆破倒塌模型4个部件均采用Soild164单元划分，采用Lagrange单元算法，爆破振动模型考虑到空气和炸药的较大变形，采用ALE单元算法。为研究烟囱定向爆破倒塌的下坐力，对烟囱和内衬在爆破缺口上部节点和烟囱底部结构建立点面侵蚀接触；为研究烟囱倒塌时对地面的冲击接触力，对烟囱整体和地面建立面面侵蚀接触，对地面底部采用全部约束。对烟囱整体和地面添加竖直向下的重力加速度，通过关键字LOAD\_BODY\_Z来定义其重力载荷，通过\*CONTROL\_TERNIATION设定烟囱定向爆破倒塌的求解时间为10s，设定烟囱爆破振动模型的求解时间为0.5s。

## 2 有限元计算结果分析

### 2.1 不同爆破缺口高度结果分析

图6为爆破缺口高度为分别0.50m、1.05m及1.94m在不同时刻烟囱的倒塌效果。

由图6可以看出，爆破缺口高度越小时，烟囱倒塌接触地面时间越快，高度越高，烟囱倒塌接触地面时间越久。这主要是因为高度越小时，烟囱在自重作用下会产生后坐和向设计方向倾斜倒塌两种情形，缺口高度决定了烟囱后坐的时间，因此缺口高度越小，后坐所需的时间就越短，由于后坐倾斜时间也比较短。

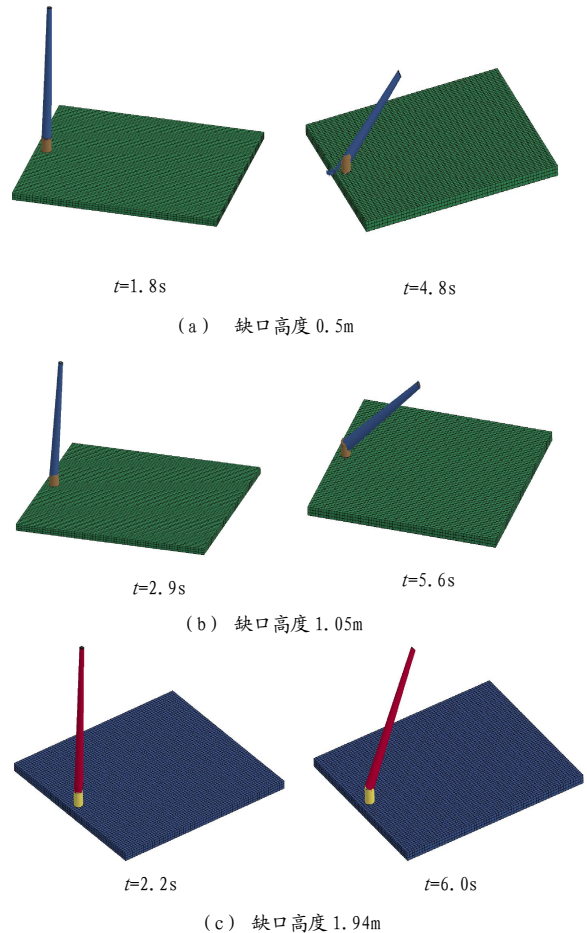


图6 不同爆破缺口高度下不同时刻倒塌效果图

Fig.6 Collapse effect drawing of different blasting gap height at different moments

图7为爆破缺口高度分别为0.5m、1.05m、1.94m时的落地情形。

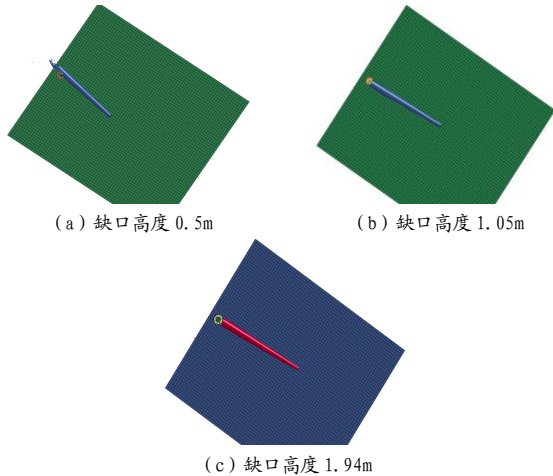


图7 不同爆破缺口高度时落地情形

Fig.7 Floor cases for different blasting gap heights

由图7可知, 0.5m 爆破缺口由于缺口高度偏小, 使得烟囱倒塌时后坐, 而 1.05m 和 1.94m 的爆破缺口烟囱均是向着定向方位倒塌。不同缺口高度下倒塌的偏移位移有很大差别, 通过测量可以得出 0.5m、1.05m、1.94m 缺口高度偏移角度分别为 10.77°、3.35°、4.76°, 从偏移位移和爆破效果来看, 1.05m 的爆破缺口高度为最佳, 其偏移位移最小, 且没有后坐现象。

为了研究烟囱倒塌时缺口闭合情况, 对烟囱上层和烟囱下端建立接触点, 并提取接触点的受力曲线。图8为3种不同缺口高度下烟囱的下坐力时程曲线。

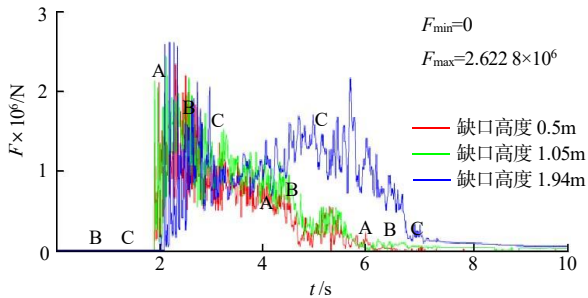


图8 不同缺口高度下坐力时程曲线

Fig.8 Time range curve of seat force under different blasting gap heights

由图8可以看出 0.5m 和 1.05m 的下坐力曲线走势趋势基本一致, 而缺口高度为 1.94m 时由于结构爆破区域较大, 造成爆破后缺口同高度的烟囱区域材料抵抗不了上层的重力, 因此在自重下爆破缺口不断闭合, 直到上层未爆破区域与底部烟囱接触, 才真正开始倒塌, 其缺口闭合时间从 2s 开始至 7s 结束。因烟囱自身接触失效容易导致烟囱的不稳定, 也容易造成不可预计的轨迹偏离, 因此从下坐力时程曲线可以看

出, 缺口高度为 1.94m 时由于缺口闭合时间过长, 对定向倒塌不利。

为了研究烟囱倒塌时与地面的接触力, 对烟囱整体和地面建立接触对。图9为不同缺口高度烟囱倒塌时与地面的接触力时程曲线, 可以看出当缺口高度为 0.5m 时, 由于烟囱发生了后坐现象, 使得烟囱倒塌时与自身接触, 最终与地面的接触力较小, 但后坐现象会引起较大的轨迹偏移, 对于定向倒塌是不允许的; 缺口高度为 1.05m 和 1.94m 时两者的峰值基本一致, 最大值均在 9 000kN 附近。

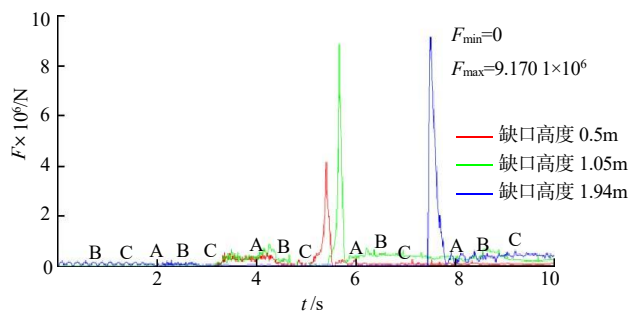


图9 不同缺口高度烟囱倒塌与地面接触力时程曲线

Fig.9 Time range curve of stack collapse and ground contact force under different blasting gap heights

综上所述, 3 种不同缺口高度中 1.05m 为最佳, 爆破缺口高度为 0.5m 时会发生后坐现象, 使得烟囱倒塌时轨迹偏离比较严重, 爆破缺口高度为 1.94m 时缺口闭合时间过长, 烟囱自身接触时间较长, 最终使得倒塌也有所偏移, 且倒塌用时最久。

### 2.2 不同爆破缺口形状结果分析

倒梯形和矩形缺口不同时刻的倒塌效果如图10所示。

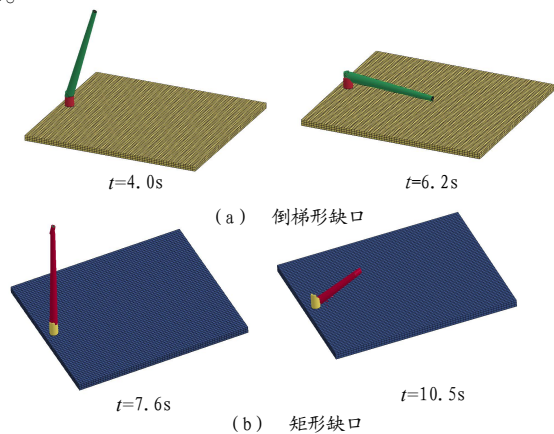


图10 不同缺口形状下不同时刻倒塌效果图

Fig.10 Collapse effect drawing of different shape of blasting gaps at different moments

由图 10 可以看出，倒梯形缺口在 4.0s 时刻已有明显的倾斜倒塌状态，在 6.2s 时接近触地状态，而矩形缺口由于不稳定性造成烟囱晃动，导致顶部烟囱在 7.6s 时出现断裂，在 10.5s 时下坐到一定程度后开始倾斜倒塌。可见缺口形状为矩形时不利于定向倒塌。

图 11 为爆破缺口形状为倒梯形和矩形落地时的形态，通过测量得到倒梯形、正梯形、矩形 3 种缺口形状偏移角度分别为 3.46°、3.35°、15.8°，可见缺口形状采用正梯形为最优，偏移角度最小。

提取不同缺口形状的下坐力时程曲线进行分析，如图 12 所示，可以看出矩形缺口在 6.7s 时开始下坐，下坐力峰值明显高于其他 2 种形状，而倒梯形和正梯形两种缺口形状下坐力时程曲线相差不大，二者虽然下坐时间相差不大，不过倒梯形在后半段的下坐力明显大于正梯形，后半段正梯形已经开始倒塌，而倒梯形依旧在下坐，分析认为正梯形爆破缺口优于其他 2 种形状。

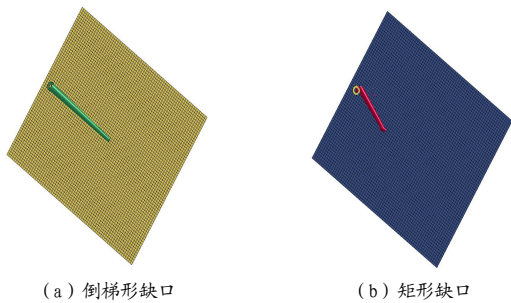


图 11 缺口形状为倒梯形和矩形时的落地情形  
Fig.11 Floor cases of the inverted trapezoidal and rectangular gap

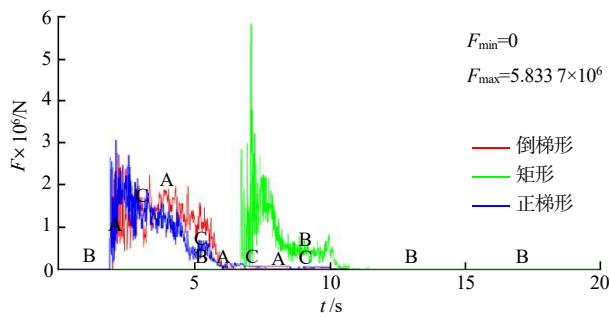


图 12 不同缺口形状下坐力时程曲线  
Fig.12 Time range curve of seat force under different gap shapes

提取不同缺口形状下烟囱倒塌时与地面的接触力时程曲线进行分析，如图 13 所示，可以看出正梯

形和倒梯形两者与地面接触力相差不大，倒梯形要略小于正梯形，而矩形由于下坐较多，因此接触力要明显小于前两者，从触地峰值时间可以看出，正梯形缺口最先倒塌，其次为倒梯形，矩形落后两者较多，可见正梯形缺口更有利于烟囱倒塌。

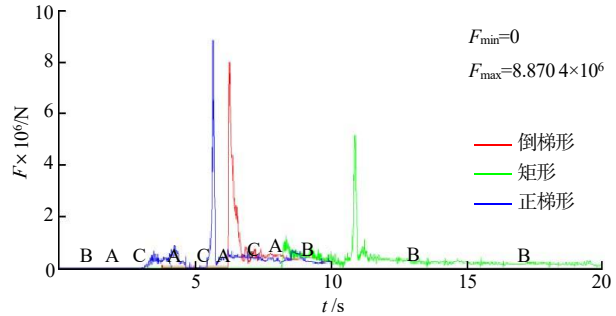


图 13 不同缺口形状下烟囱倒塌与地面接触力时程曲线  
Fig.13 Time range curve of stack collapse and ground contact force under different gap shapes

综上所述，3 种不同缺口形状中正梯形缺口为最佳，缺口形状为矩形时在开始阶段未完全失稳，烟囱一直在摇摆，之后由于底部承受不住上面结构的重力，逐渐下坐出现倒塌，且倒塌偏移较大；缺口形状为倒梯形时，偏移角度略大于正梯形，且倒塌用时明显多于正梯形。最终采用缺口形状为正梯形、缺口高度为 1.05m 做定向倒塌。

### 2.3 试验结果对比分析

实际施工中采用缺口形状为正梯形，缺口高度为 1.05m 做定向倒塌。烟囱在该爆破缺口下不同时刻的倒塌形态如图 14 所示，可以看出最终烟囱按照指定轨迹顺利倒塌，说明设计符合要求。

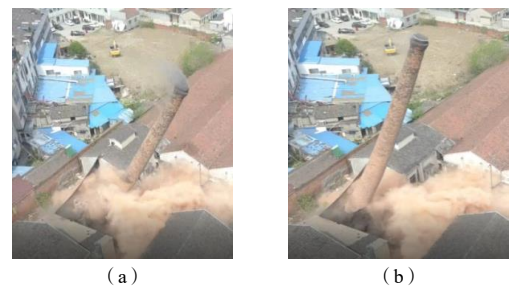


图 14 实际爆破烟囱倒塌不同时刻  
Fig.14 Actual blasting chimney at different moments

为预防爆破产生的振动效应影响爆区周围建筑设施安全，依照《爆破安全规程》的有关规定，对待拆烟囱东北侧的商铺进行检测保护，保护位置距离爆

心最近为 36 m。实际试验时对该位置进行检测,并通过 Blasting Vibration Analysis 软件对数据进行采集显示。通过爆破模拟和倒塌模拟对测点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 向振动速度进行提取,并将爆破和倒塌的振动速度时程曲线进行合并,实测和仿真数据对比见表 1。

表 1 实测振动速度和仿真数据对比 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Tab.1 Comparison of the measured and simulation data

方向	实测	仿真	偏差/%
$x$	0.323	0.336	4.02
$y$	0.316	0.286	9.50
$z$	0.113	0.110	2.65

由表 1 可以看出,仿真和实测数据具有较好的一致性,偏差最大为 9.5%,仿真和试验的数据走势也基本一致,可见仿真的正确性。

### 3 结论

(1) 利用 Hypermesh14.0 联合 LS-DYNA 软件建立了不同缺口高度定向爆破、不同缺口形状定向爆破的倒塌模型,并建立了炸药对烟囱爆破的仿真模型。

(2) 通过对不同缺口高度定向爆破倒塌模拟,得出当缺口高度为 0.5 m 时,会引起后坐现象,使得烟囱倒塌偏移轨迹较多;当缺口高度为 1.94 m 时,会引起烟囱下坐后倒塌,缺口闭合时间较长;当缺口高度为 1.05m 时,倒塌偏移角度  $3.35^\circ$ ,且倒塌触地时间较快。研究表明缺口高度为 1.05 m 时爆破效果最

优。

(3) 通过对不同缺口形状定向爆破倒塌模拟,得出当缺口形状为矩形时不利于定向失稳倒塌,效果最差,会出现较严重的下坐现象;缺口形状为倒梯形和正梯形两者相差不大,不过正梯形略优于倒梯形,最终采用缺口高度为 1.05m 的正梯形爆破缺口进行实际爆破。

(4) 通过实际爆破可以看出,最终采用的方案成功爆破,且实测振动速度和仿真得出的振动速度误差最大不超过 9.5%,说明了仿真的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 张广荣,池恩安.切口高度对烟囱拆除爆破塌落振动的模拟研究[J].爆破,2013,30(3):135-141.
- [2] 胡锐.框架结构定向拆除爆破触地震动数值模拟研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [3] 王铁,刘立雷,刘伟.建筑物爆破拆除塌落震动数值模拟研究[J].爆破,2010,27(4):74-77.
- [4] 李本平.烟囱定向爆破仿真模拟[J].爆破,2003,20(3):10-13.
- [5] 赵福兴.控制爆破工程学[M].西安:西安交通大学出版社,1988.
- [6] 戴晨,朱传云,舒大强.DDA 及其爆破过程仿真模拟中的应用[J].爆破,2001,18(增刊):4-6.