

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.015

## 120 m 高钢筋混凝土排气塔爆破拆除数值模拟研究\*

高文乐<sup>1</sup>, 段耀奎<sup>1</sup>, 柳鹏辉<sup>1</sup>, 方昌华<sup>2</sup>, 李传水<sup>3</sup>, 吴超<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 青岛 266590; 2. 山东同利爆破有限公司, 潍坊 262400;

3. 枣庄市金星爆破有限公司, 枣庄 277116)

**摘要:** 针对120 m高钢筋混凝土排气塔爆破拆除工程,利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,采用分离式共节点模型,对其倒塌过程进行数值模拟研究,并结合录像资料进行对比,分析其倒塌过程中结构支撑部、断裂部、顶部位置的失稳破坏过程及其运动状态。结果表明:长细比很大的筒体结构,因其自重惯性大,并且结构外形有截面突变,下坐过程中冲击破坏与加速下落相互作用,故筒体在倒塌时在断面缺陷部位急剧收缩极易发生断裂;由模拟得0.2 s时爆破切口形成,应力集中首先在切口顶角出现,倾倒一定角度后背部拉裂,应力集中转移至切口底角;前期应力重分布时间约4.5 s,9 s时在结构75 m位置处出现裂隙,筒体分离,下筒体绕塑性铰缓慢倾倒,上筒体自由落体;录像得8.5 s时在结构约70 m位置出现裂隙约为截面突变处;模拟倒塌长度范围为104 m,在触地时速度达最大,上筒体最大触地速度为49 m/s,下筒体速度达最大为29 m/s;模拟倒塌时间约12 s实际为11.8 s,与实际工程吻合得较好。

**关键词:** 钢筋混凝土排气塔;定向爆破;数值模拟;倒塌过程分析

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)01-0101-06

## Numerical Simulation on Blasting Demolition of 120 m High Reinforced Concrete Exhaust Tower

GAO Wen-le<sup>1</sup>, DUAN Yao-kui<sup>1</sup>, LIU Peng-hui<sup>1</sup>, FANG Chang-hua<sup>2</sup>, LI Chuan-shui<sup>3</sup>, WU Chao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Tongli Blasting Co., Ltd., Weifang 262400, China;

3. Zaozhuang Jinxing Blasting Co., Ltd., Zaozhuang 277116, China)

**Abstract:** Aiming at the blasting demolition project of a 120 m high reinforced concrete exhaust tower, the finite element software ANSYS/LS-DYNA was used to simulate the collapse process by a separate common node model. Compared with the video data, the movement state of the structural support part, the fracture part, and the top position of the instability failure process were analyzed. The results show that the cylinder structure with a large slenderness ratio was prone to fracture due to its large self-weight inertia and section mutation in the structure shape, and the interaction between impact failure and accelerated fall appeared in the process of sitting down. It was found that the blasting cut was formed at 0.2 s, and the stress concentration first appeared was at the top angle of the cut. After tipping at a certain angle, the back part was pulled and the stress concentration was transferred to the bottom angle of the cut. Furthermore, the initial stress redistribution time was at about 4.5 s, and there was a crack at 75 m of the structure at 9 s. Meanwhile, the cylinder was separated, the lower cylinder was slowly overturned around the plastic hinge, and the upper cylinder fell freely. The recorded video showed that the crack appeared at the position of the structure at about 70 m with a sudden mutation of the cross section at 8.5 s. The simulated collapse length was 104 m, the vibration velocity of cylinder collapse reached the maximum, the maximum velocity of the upper cylinder was 49 m/s, and the maximum velocity of the lower cylinder was 29 m/s. Besides, the simulated collapse time was a-

bout 12 s and the actual collapse time was 11.8 s, these two times were very close.

**Key words:** reinforced concrete exhaust tower; directional blasting; numerical simulation; collapse process analysis

近年来,国内爆破拆除烟囱的高度不断增大,高烟囱具有长细比大、自重大、壁厚与半径比小等特点,故容易倾倒,爆破拆除此类烟囱会出现压溃、下坐、碰撞、偏转等复杂现象,国内普遍使用基于支撑部破坏失稳的静固中性轴“塑性铰”模型的切口设计原理。王宇等对180 m高钢筋混凝土烟囱爆破拆除过程中的下坐和空中断裂现象研究得,减速运动使烟囱受到强烈的惯性力,产生较高的竖向动荷载,导致空中断裂<sup>[1]</sup>;孙金山等对拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的建模及参数取值方法研究得,采用应变率相关的本构模型时,应变率的强烈波动导致材料性能变化过于复杂<sup>[2]</sup>;王云茂等对薄壁式伞形水塔爆破拆除倾倒失稳验算得,爆破切口圆心角取值越大,越有利于水塔的顺利倒塌<sup>[3]</sup>;任江等对两座150 m高钢筋混凝土烟囱同时爆破拆除研究分析<sup>[4]</sup>;费鸿禄等对切口形状对高烟囱拆除爆破倾倒后坐的影响研究得,合理减小切口圆心角,可以有效减小高烟囱的后坐范围等<sup>[5]</sup>。

在前人研究的基础上,针对120 m高钢筋混凝土排气塔爆破拆除工程进行数值模拟研究,随着爆破拆除高度不断增加,在爆破拆除倒塌过程中烟囱断裂现象时常发生,为此结合有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对排气塔爆破倾倒过程进行预演,并对结构顶部、折断部位、底部支撑部位的运动问题进行探讨分析,并探究烟囱倒塌和断裂过程中的运动状态和倒塌过程中断裂缘由,为以后类似工程的爆破拆除提供一定参考<sup>[6-13]</sup>。

## 1 工程概况

新材料排气塔位于潍坊市寒亭区,实体图见图1。塔高120 m,结构为钢筋砼结构,底部直径10 m,壁厚0.4 m,离地10 m处有排气管道接口,排气塔上口直径为6.4 m,壁厚0.25 m,在70 m位置出现截面突变。排气塔在厂区东北方,距北院墙约110 m,距禹王路150 m;距东院墙约120 m,南距厂

区内道路约150 m,西距待拆除厂房50 m,西北距待拆除配电所70 m。根据现场情况,拟向正南方向整体放倒后破碎。周边环境如图2所示。



图1 新材料排气塔立体图

Fig. 1 Three-dimensional view of new material exhaust tower

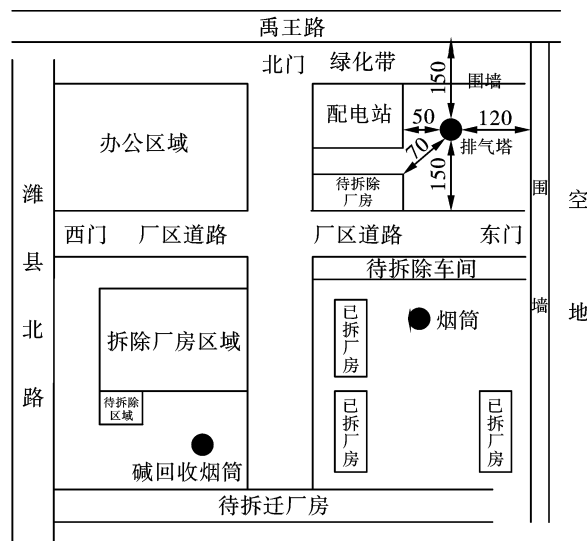


图2 排气塔周围环境示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of the surrounding environment of the exhaust tower(unit:m)

## 2 爆破方案设计

本工程两侧导向窗与定向窗提前用机械破碎,中间部分钻孔爆破。以排气塔塔基地表为基准面,在排气塔南侧塔身0.5 m以上开设定向窗和导向窗,保证两侧定向窗在同一高程,确保倒塌方向按指定方向倾倒,提前将排气塔内的底部一小部分内衬拆除以防影响倒塌。

收稿日期:2021-09-23

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:段耀奎(1996-),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)2308738096@qq.com。

基金项目:深部高应力岩巷掏槽爆破破岩过程与机理研究(51874189)

为保证排气塔不发生后坐并按照预定方向倾倒,爆破切口形成后,排气塔前倾产生的压应力远大于切口内的钢筋抗压屈服强度,预留支撑面需提供足够的支撑能力,来保证排气塔按设计方向倾倒。钢筋混凝土抗压强度为 7.2 MPa,在离地面 0.5 m 处对应爆破下切口弧度为 20.9 m,预留支撑面截面面积为 4.02 m<sup>2</sup>,排气塔重量引起压应力为 3.66 MPa,说明爆破切口形成时,余留截面有足够支撑力确保排气塔不产生后坐。

切口高度决定切口范围内混凝土被炸离钢筋骨

架后竖向钢筋的稳定性,也是衡量排气塔爆破切口上下闭合时排气塔重心偏移距离能否大于切口处排气塔外半径的重要指标,为保证倒塌根据经验并结合本工程实际情况排气塔切口高度取 3.5 m。排气塔爆破切口参数表见表 1,排气塔切口布置图见图 3。本工程最小抵抗线  $W = 0.2$  m,炮孔孔距 0.4 m,炮孔排距 0.3 m,孔深 0.3 m,炸药单耗 3.2 kg/m<sup>3</sup>,单孔药量 150 g,布孔方式采用正方形布孔,从离地高 0.5 m 处布孔,炮孔排数取 13,共钻凿 234 个孔。

表 1 排气塔爆破切口参数

Table 1 Blasting incision parameters of exhaust tower

对象	开口角/°	下切口弧长 L/m	上切口 弧长/m	切口 高度/m	定向窗 底长/m	定向窗 高度/m	导向缝 宽度/m
排气塔	240	20.9	13.9	3.5	3.5	3.5	5.5

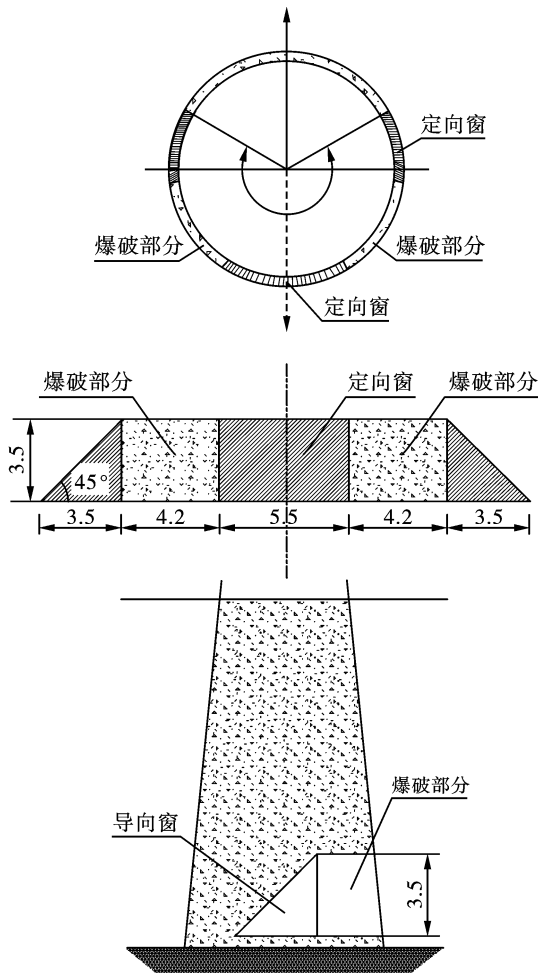


图 3 爆破切口布置图(单位:m)

Fig. 3 Layout of blasting cuts(unit:m)

### 3 有限元数值模拟

钢筋混凝土排气塔有限元模型按照排气塔实际

尺寸建立,为了能体现钢筋和混凝土在定轴转动过程中各自受力状态,采用分离式共节点模型。混凝土和地面均采用 SOLID164 单元,共建立四个 part,分别为地面、排气塔主体、爆破部分及钢筋,钢筋混凝土模型采用 96 号模型材料 MAT\_BRITTT LE\_DAMAGE 见表 2,这是一种比较理想的钢筋混凝土材料模型,这种材料模型可以支持钢筋截面配筋率的设定和混凝土失效定义。

地面单元尺寸设置为 10 m,排气塔主体爆破失效部分模型单元尺寸为 0.1 m,运用 sweep 扫掠网格,网格划分保证计算结果的精确性,排气塔主体结构共划分 144660 个单元,地面共划分 100 个单元,爆破失效部分共划分 1506 个单元,通过关键字 \* MAT\_ADD\_OSION 控制排气塔爆破切口形成,材料失效通过定义材料的 Fs 参数控制,选取 Fs 值为 0.11。

在倒塌过程中建筑物与地面的接触非常复杂,爆破切口形成后,排气塔在自重作用下支撑部位发生脆性断裂,排气塔底部一般不会发生破坏,因此,建模时选用 CONTACT\_ERODING\_SINGLE\_SURFACE 定义混凝土单元之间以及混凝土单元和地面的接触,通过向节点组元施加重力加速度,施加重力载为 9.8 m/s<sup>2</sup>,对结构距地面 0.5 m 以下位置施加 xyz 方向的约束,模拟时设定的静摩擦系数为 0.5,动摩擦系数为 0.4。

#### 3.1 排气塔爆破拆除倒塌过程数值模拟结果

采用 LS-PrePost 对数值模拟结果进行后处理,爆破切口形成后,钢筋混凝土排气塔切口支撑部位变形破坏状态数值模拟如图 4,对应实际倒塌过程图 5 进行对比,排气塔筒体倒塌过程数值模拟计算

结果分别取2 s、4 s、6 s、8 s、10 s、11 s时的倒塌状态 如图4所示。

表2 96号材料钢筋混凝土的材料模型参数选取

Table 2 Selection of material model parameters for material No. 96 reinforced concrete

弹性模量 $E/\text{Pa}$	屈服应力 $\sigma_y/\text{Pa}$	切线模量 $E_t/\text{Pa}$	材料密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	硬化参数 $\beta$	失效应变 $\varepsilon_f/\%$
$2.5e^{10}$	$5.34e^7$	$1.5e^8$	$2.5e^3$	0.2	0	0.25

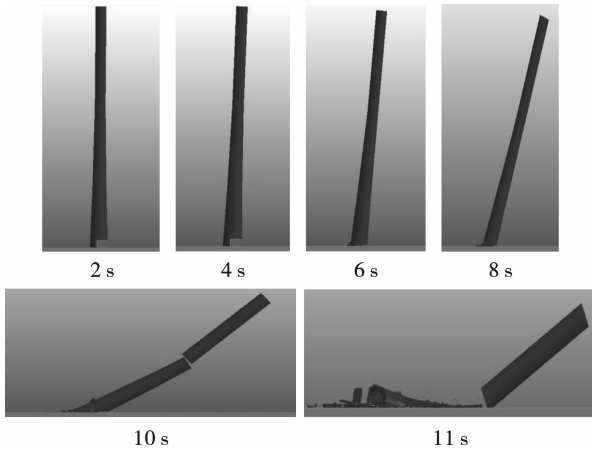


图4 钢筋混凝土排气塔数值模拟倒塌过程  
Fig. 4 Numerical simulation collapse process of reinforced concrete Exhaust tower

### 3.2 排气塔爆破拆除倒塌过程摄影观测结果

为实际观测爆破切口形成后筒体定向倒塌过程,对筒体倒塌过程进行拍摄。爆破切口形成后,筒体开始下座定向偏转,结构经历约4.5 s左右的应力重分布后,定向窗角混凝土压碎,在第6 s左右破坏贯穿整个支撑截面,在8.5 s左右在结构约70 m位置出现断裂,随后筒体分离成两部分,下筒体绕塑性铰缓慢倾倒,上半筒体做自由落体运动,直至倒塌触地结束,倒塌过程共约11.8 s。选取倒塌过程中的第2 s、4 s、6 s、8 s、10 s、11 s的倒塌状态见图5。

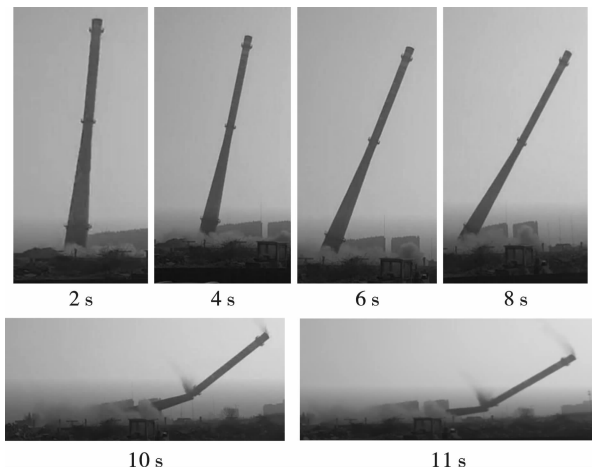


图5 钢筋混凝土排气塔爆破拆除倒塌过程  
Fig. 5 The collapse process of reinforced concrete Exhaust tower demolition by blasting

图4与图5对比分析得,数值模拟筒体的倒塌过程姿态与实际爆破的倒塌过程姿态高度一致,其中数值模拟计算的排气塔整体触地时间为12 s,实际爆破的排气塔整体触地时间约11.5 s,模拟时间与实际倒塌大致相同;根据模拟计算与实际爆破的结果,可将结构倒塌过程分为切口形成阶段(0.2 s)、大偏心受压脆性断裂倾倒阶段(0.2 ~ 4.7 s)、下坐阶段(4.7 ~ 5.6 s)、空中下落倾倒阶段(5.6 ~ 11.4 s)以及触地阶段(11.3 ~ 12 s)。由模拟得,结构在9 s时在结构约75 m位置出现裂隙,观察得在8.5 s时,在结构约70 m位置出现断裂迹象,数值模拟与实际筒体断裂位置大致相符,模拟效果较理想。

### 3.3 排气塔筒体整体下坐过程速度分析

为研究排气塔顶部单元运动情况,更好的分析建筑物爆破倒塌的运动状态,在排气塔顶部选取一个混凝土A单元。

在排气塔整体下坐减速阶段,在结构中部发生混凝土压缩破坏,断裂位置发生在距地面75 m左右高度处。断裂发生后,下半筒体沿倒塌方向继续倾倒,上半筒体与下半筒体分离,绕断裂面旋转做自由落体运动,对其断裂面进行分析,为更好的分析建筑物爆破倒塌过程中的断裂原因,选取排气塔断裂部位B单元。

爆破切口高度是保证排气塔稳定倒塌的重要参数,确定切口高度要确保切口形成后切口内裸露的竖向钢筋失稳,还要考虑切口上下沿闭合线相撞时,结构倾倒角度能防止相撞时使倾倒方向不发生偏离。爆破切口形成后,混凝土抗拉强度低很快失效,切口内纵筋失稳退出工作,预留支撑面作用则由重力压缩产生的压应力和重力矩,对支撑面中性轴的弯曲所产生的拉应力。切口形成后开始下坐,为研究结构底部支撑部位单元运动情况,在结构底部选取一个混凝土C单元,输出竖向速度曲线图6。

由图6得,排气塔在 $t=4.7$  s之前竖向速度没有明显变化,故此为应力重分布阶段。由折线A知在4.7 s左右之后,结构竖向塌落速度明显加快,在9 s时结构出现断裂竖向加速度出现短暂为零,结构

匀速下降持续时间约 0.15 s,在 11.3 s 时排气塔上半筒体顶部位置单元速度达最大值。数值模拟计算得,结构最大触地速度约为 46 m/s,在 11.3 s 时上半筒体底部触地,之后做减速运动直至倒塌结束,其他单元触地后弹起该单元速度有所波动,12 s 时倒塌运动结束。

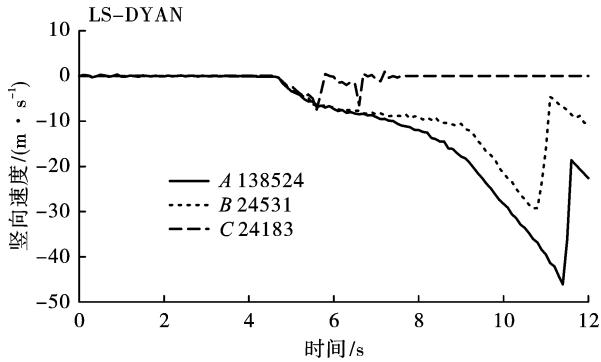


图 6 排气塔所选部位单元竖向速度曲线图  
Fig. 6 The vertical velocity curve of selected parts of the exhaust tower

由折线 B 知,4.7 s 左右之后结构竖向倾倒速度明显加快,在 5.6 s 至 9 s 时结构加速度几乎为零,

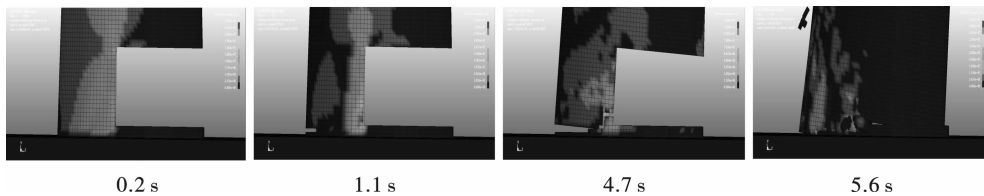


图 7 支撑部位数值模拟受力变形破坏过程

Fig. 7 Numerical simulation of the deformation and failure process of the support part

由数值模拟观察可得,在 0.2 s 时结构爆破部分失效,在切口顶角出现应力集中,在 1.1 s 时底部支撑开始出现裂隙。有应力云图得,在切口底角处出现应力集中,4.7 s 时裂隙贯通整个结构,结构主体与基础部分完全分离,结构做自由落体运动,在 5.6 s 时爆破切口闭合,结构做倾倒运动。

### 3.4 排气塔筒体整体下坐过程位移分析

为更好地分析建筑物爆破倒塌的运动状态,现研究其顶部、断裂部及底部支撑部横向位移,输出单元位移图 8

由图 8 所选的顶部 A 单元的位移为 104 m,在 4.7 ~ 11.3 s 阶段排气塔顶部向下速度处于加速过程,9 s 后结构分离顶部单元竖向速度在下坐阶段以自由落体的形式进行加速,结构截断现象对上半部分结构位移几乎无影响。

说明在该时间段内结构下半筒体底部触地处于破碎状态。9 s 之后下半筒体破碎部分与完整部分脱离结构继续做缓慢倾倒运动,速度开始逐渐加快,结构在 10.8 s 时速度达最大为 29 m/s,之后速度突减持续 0.15 s 左右清零,故在 10.8 s 时下半筒体底部部分触地,在 11.2 s 时下半筒体顶部触地。在 11.2 ~ 12 s 之间,速度持续波动是由于结构组合复杂内附钢筋等原因,该单元触地后被连续弹起,故速度有所波动。

由折线 C 知,0 ~ 4.7 s 之间速度稍有波动是因爆破区域震动的影响,支撑部混凝土受拉区在拉应力作用下开始产生一些微小裂纹,4.7 s 左右之后结构竖向塌落速度明显加快,即整个底部支撑区域的裂纹贯通并断裂,在 5.6 s 时排气塔底部支撑位置单元速度达到最大。数值模拟计算得,所选结构单元最大速度约为 7.6 m/s,之后经过 0.4 s 左右减速运动速度恢复零值,即所选支撑位置单元触地,之后经 1.5 s 左右的速度波动稳定下来是因其他单元触地对该单元引起震动。现对结构支撑部位数值模拟受力变形破坏过程图,分别取 0.2 s、1.1 s、4.7 s、5.6 s 的倒塌状态,如图 7 所示。

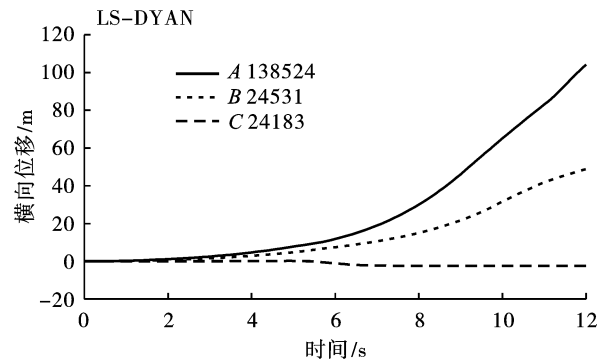


图 8 排气塔所选部位单元横向位移曲线图

Fig. 8 The vertical displacement curve of selected parts of the exhaust tower

由折线 B 可知 4.7 s 之后倒塌横向位移开始急速下降,横向总位移为 50 m,底部触地破碎高度为 21 m,其中切口高度为 4 m,因塑性铰原因,故下半

结构处于缓慢下落过程,在 9 s 时结构断裂,对结构位移几乎无影响。由折线 C 得,所选底部单元在 5.6 s 时开始出现微小移动,产生约 2 m 后座距离,倒塌范围为 106 m。

结构中间位置出现缺陷主要是因为随着结构高度的增加,结构相应的直径会减小,从结构底部直径 10 m 到顶口直径 6.4 m,又因 120 m 高排气塔长细比大、自重力大、惯性大更容易倾倒,故排气塔在倾倒过程中,中间位置极易容易出现裂隙,还有结构经多年的风化侵蚀,混凝土本身饱和度低,容易吸水且其抗拉强度低,内部钢筋吸水已锈蚀,故所承受的拉应力下降,还可能是施工时该部位钢筋搭接不牢固及多次浇筑等多方面原因,造成结构倾覆断裂现象。

## 4 结 论

(1)运用有限元分析软件 LS-DYNA 模拟排气塔倒塌过程与实际倒塌过程进行对比分析,由模拟计算可得,排气塔倾倒的位移时程曲线和速度曲线与实际倒塌吻合较好,数值模拟结果可靠。

(2)在排气塔下坐过程中,冲击破坏与加速下落相互作用。在结构倒塌过程中,结构缺陷部位混凝土被破碎,在倾倒过程中直径突变部位被折断,且该部位混凝土风化严重,内部钢筋锈蚀抗拉应力降低,容易折断。

(3)通过对折断部位、底部支撑部位单元分析得:在爆破切口形成后结构开始下坐,应力集中位置随倾角变化而改变,首先切口角顶先出现应力集中,背部裂开之后切口底角出现应力集中;筒体断裂后,下半筒体因塑性铰原因缓慢倾倒,上半筒体做自由落体运动,倒塌结束破碎长度为 106 m,触地时速度达最大,上筒体最大触地速度为 49 m/s,下筒体速度达最大为 29 m/s;整个倒塌过程约 12 s,实际为 11.8 s,模拟时间与实际倒塌时间基本相符。

(4)运用数值模拟对结构速度位移分析,可以有效确定倒塌范围和最大冲击力,来设定安全警戒范围,为以后拆除此类相似工程提供经验借鉴,做出合理的设计方案。

### 参考文献 (References)

- [1] 王 宇,姚颖康,贾永胜,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除失稳下坐和空中断裂现象研究[J]. 爆破,2018,35(4):116-123.
- [1] WANG Yu, YAO Ying-kang, JIA Yong-sheng, et al. Research on the phenomenon of instability sitting down and aerial fracture in blasting demolition of reinforced concrete chimney[J]. Blasting, 2018, 35(4):116-123. (in Chinese)
- [2] 孙金山,贾永胜,姚颖康,等. 拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的建模及参数取值方法[J]. 爆破,2020,37(3):115-121.
- [2] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Modeling and parameter selection method of reinforced concrete members in numerical simulation of demolition blasting[J]. Blasting, 2020, 37(3):115-121. (in Chinese)
- [3] 王云茂,罗福友,刘成敏,等. 薄壁式伞形水塔爆破拆除倾覆失稳验算与实践[J]. 爆破,2020,37(4):111-115.
- [3] WANG Yun-mao, LUO Fu-you, LIU Cheng-min, et al. Blasting demolition of a thin-walled umbrella-shaped water tower toppling instability check and practice[J]. Blasting, 2020, 37(4):111-115. (in Chinese)
- [4] 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]. 爆破,2020,37(4):94-99.
- [4] REN Jiang, WANG Gao-long, WANG Xiao. Simultaneous blasting demolition of two 150 m high reinforced concrete chimneys[J]. Blasting, 2020, 37(4):94-99. (in Chinese)
- [5] 费鸿禄,钱起飞,刘 雨,等. 切口形状对高烟囱拆除爆破倾覆后坐的影响[J]. 工程爆破,2021,27(1):53-60.
- [5] FEI Hong-lu, QIAN Qi-fei, LIU Yu, et al. The influence of the shape of the incision on the demolition of a high chimney by blasting and dumping[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1):53-60. (in Chinese)
- [6] 高文乐,李元振,赵德龙,等. 多截面承重立柱框架结构爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破,2021,38(1):93-98.
- [6] GAO Wen-le, LI Yuan-zhen, ZHAO De-long, et al. Numerical simulation study on blasting demolition of a frame structure with multi-section load-bearing columns[J]. Blasting, 2021, 38(1):93-98. (in Chinese)
- [7] 程 楠. 复杂环境下 210 m 烟囱定向爆破拆除[J]. 爆破,2011,38(1):100-104.
- [7] CHENG Nan. Demolition of a 210 m chimney by directional blasting in a complicated environment[J]. Blasting, 2011, 38(1):100-104. (in Chinese)
- [8] 薛克军,胡坤伦,杨 辉,等. 复杂环境下 108 m 高造粒塔定向控制拆除爆破[J]. 工程爆破,2021,27(2):100-106.
- [8] XUE Ke-jun, HU Kun-lun, YANG Hui, et al. Directional controlled demolition of a 108m high prilling tower in a complex environment [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):100-106. (in Chinese)