

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.015

180 m 高钢筋混凝土烟囱定向爆破 拆除设计与数值模拟*

刘建程¹, 李毅², 夏治园³, 杨帆³, 王刚⁴, 杨翎³, 马立飞³, 张魏³, 高朋飞³

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 长沙 410000; 2. 南京理工大学 安全科学与工程学院, 南京 210094;
3. 安徽江南爆破工程有限公司, 宣城 242300; 4. 安徽江南化工股份有限公司, 合肥 230000)

摘要: 针对某地 180 m 高钢筋混凝土烟囱爆破拆除工况, 详细分析了烟囱爆破倒塌过程的重难点并制定了相应解决措施。设计中通过开设高度对称的定向窗、定位窗控制筒体倒塌方向并依据相关工程经验公式进行推算, 最终确定爆破切口圆心角为 216°, 爆破切口高度 3.5 m 时, 筒体沿设计方向倒塌且不发生明显后座。为验证设计方案的可行性, 采用界面应力元法建立等比例烟囱模型, 对倒塌过程进行了预分析, 仿真结果表明: 烟囱历时 14.0 s 完成倒塌, 基本无偏移, 下座和前冲都得到有效控制。对比烟囱爆破拆除界面元模型与分离式共节点模型在切口闭合、筒体后座程度和顶部破碎形态发现, 界面元模型可有效模拟切口形成时, 切口闭合处钢筋与混凝土脱离效果。钢筋、混凝土组分异节点分别承担荷载, 避免了材料单元过度失效, 筒体后座减小 1 m 左右。烟囱顶部筒体触地破碎时, 由于弹簧单元的粘结力, 界面元模型中未出现钢筋飞散现象, 综合对比发现界面元模型仿真精度更高, 能有效模拟烟囱倾倒状态。现场爆破效果与仿真计算结果基本一致, 烟囱顺利倒塌, 无明显偏移, 触地解体完全。

关键词: 高耸建筑物; 钢筋混凝土结构; 爆破拆除; 数值模拟; 界面应力元法

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)03-0135-10

Design and Numerical Simulation of 180 m-High Reinforced Concrete Chimney Directional Blasting Demolition

LIU Jian-cheng¹, LI Yi², XIA Zhi-yuan³, YANG Fan³, WANG Gang⁴,
YANG Ling³, MA Li-fei³, ZHANG Wei³, GAO Peng-fei³

(1. SINOHYDRO BUREAU 8 Co., Ltd., Changsha 410000, China; 2. School of Safety Science
and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. Anhui Jiangnan Blasting Engineering Co., Ltd., Xuancheng 242300, China;
4. Anhui Jiangnan Chemical Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: This study investigates the blasting demolition of a 180 m-high reinforced concrete chimney under site-specific conditions, systematically addressing critical challenges in collapse control through targeted engineering

收稿日期 (Date of reception): 2024-11-29

网络首发日期 (Published online): 2025-06-15

作者简介: 刘建程 (1986-), 男, 湖南省长沙市, 硕士、工程师, 从事采矿工程及爆破技术研究工作, (E-mail) 15096026293@126.com。

通讯作者: 李毅 (1995-), 男, 安徽省淮北市, 博士、助理研究员, 从事安全工程及爆破技术研究工作, (E-mail) yilisafety@163.com。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (30923010308); 国家资助博士后研究人员计划 (GZC20242240); 江苏省卓越博士后计划 (2024ZB339)

About the author: LIU Jian-cheng (1986-), male, master, engineer, engaged in mining engineering and blasting technology research, (E-mail) 15096026293@126.com.

Corresponding author: LI Yi (1995-), male, doctor, assistant researcher, engaged in safety engineering and blasting technology research, (E-mail) yilisafety@163.com.

Fund Programs: Special fund support for basic scientific research business expenses of central universities (30923010308), State-funded postdoctoral researcher program (GZC 20242240), Jiangsu Excellent Postdoctoral Program (2024ZB339)

solutions. By designing symmetrically arranged directional and positioning windows, combined with empirical formula calculations, optimal blasting parameters were determined to be a 216 central angle and a 3.5 m cut height, effectively guiding the chimney's collapse along the predetermined trajectory without significant backward displacement. A 1:1 scale numerical model employing the Interface Stress Element Method was developed to simulate the collapse process, showing complete structural failure within 14.0 seconds with controlled lateral deviation ($< 0.5\%$) and minimal settlement/forward surge. A comparative analysis with the Decoupled Co-node Model revealed the superior performance of the Interface Stress Element Method in simulating rebar-concrete decoupling at cut closures, reducing backward displacement by approximately 1.0 m through differentiated load-bearing mechanisms at material component nodes. The model successfully replicated restrained rebar scattering during top section ground impact, due to the bonding forces of the spring elements, confirming enhanced simulation accuracy in collapse kinematics. Field implementation validated the numerical predictions, achieving precise directional collapse, complete structural disintegration, and compliance with safety thresholds, thereby establishing a replicable framework for ultra-high chimney demolition engineering.

Key words: tall structures; reinforced concrete structures; blasting demolition; numerical simulation; interface stress element method

为响应国家“上大压小、节能减排”政策号召,越来越多的老旧高耸建筑物,如化工造粒塔、钢筋混凝土烟囱等^[1,2],因工艺老旧、环境污染等问题需拆除重建^[3,4]。由于高耸建筑物存在结构截面小,高度高,采用机械拆除法较为困难,因此常会采用爆破拆除法。爆破拆除法具有缩短工期、促进烟囱破碎解离、提高本质安全性等多重优点,因此在高耸建筑物爆破拆除过程中得到了广泛应用。

在高耸钢筋混凝土建筑物爆破拆除研究方面,董星结合烟囱自身结构与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顺利拆除了100 m 钢混结构^[5],徐顺香对一座150 m 高和2座210 m 高烟囱采用正梯形爆破切口^[6],分三次实施定向倾倒爆破,采用孔内、孔外相结合的延时起爆技术顺利克服了倒塌空间不足的工程难点,高文乐研究了复杂环境下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^[7],胡葵为成功爆破拆除一座120 m 高钢筋混凝土烟囱^[8],根据实际工程环境、工程结构特点完成爆破方案的设计,并运用有限元软件 LSDYNA 进行了爆破设计的合理性验证。杨辉分析了烟囱筒体结构及其具体尺寸设计爆破切口参数^[9],同时采用孔内延时、孔外接力的复式闭合双回路起爆技术,并且通过铺设缓冲层减缓筒体直接冲击地面的速度,减小了倒塌烟囱触地振动效应。袁方采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件论证了“开凿超大拱形导向窗^[10],提高爆破切口”优化方案的可行性。

现有某地老旧发电厂内1座180 m 高钢筋混凝土结构烟囱需进行爆破拆除,设计人员通过分析烟囱结构特性,拟采用理论分析确定爆破参数,数值仿

真技术预测分析,从而确保现场烟囱顺利倾倒。

1 工程概况

1.1 项目背景

某地电厂拟对综合利用自备电厂机组关停并拆除,建筑群中现有180 m 钢筋混凝土结构烟囱需要爆破拆除,见图1。



图1 待拆除烟囱

Fig. 1 Chimney to be demolished

1.2 烟囱结构

待爆破的烟囱高180 m,筒身采用标号C30的钢筋混凝土浇筑而成,筒身为双层钢筋网(30 m 以下外层钢筋网为 $\phi 20@200$,内层钢筋网为 $\phi 14@200$)。底部、顶部外径分别为17.6 m 和5.88 m,底部、顶部壁厚分别为0.55 m 和0.27 m。在 ± 0 标高处烟囱的底部南、北方向各有1个1.5 m \times 2.5 m 的门洞,其外径17.6 m、壁厚0.55 m,无隔热层和内衬;烟囱+12~+19 m 标高处,东、西方向各有1个3.4 m \times 7 m 的烟道口,其外径为16.4 m、壁厚0.55 m,隔热层厚度为0.08 m,内衬厚度为0.24 m;烟囱0~

12 m 标高处内部中间有 4 个横断面为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 井字梁支撑上部出灰平台,下部为金属(钢制)灰斗,井字梁放在筒壁的牛腿上;出灰平台直径为 15.3 m,厚 1 m。 $\pm 0 \text{ m}$ 以上筒壁体积 2476.58 m^3 ,隔热层体积 386.54 m^3 ,内衬体积 663.95 m^3 。烟囱总重约 7850 t,重心高度约在 60 m。烟囱平面结构见图 2。

1.3 烟囱周边环境

烟囱周边环境相对复杂。南侧距离烟囱 36.6 m 为围墙,围墙南边为一报废厂房(距离烟囱 121.6 m),报废厂房南边距离烟囱直线距离约 220 m 为道路,道路南侧有零星房屋(多数无人居住);西南有待拆栈桥,距离烟囱 45 m;西侧是围墙,距离烟囱 136 m,围墙外有一栋办公楼(距离烟囱 226 m),西北办公楼(距离烟囱 180 m);北边是待拆厂房,距离烟囱 88 m,再往北为围墙,距离烟囱 210 m;东北为一栋办公楼,距离烟囱 125 m,再往东为食堂(暂时留用),

距离烟囱 230 m;正东有一栋 6 层宿舍楼,距离烟囱 360 m,再往东有一栋楼房,距离烟囱超过 400 m,周边环境见图 3。

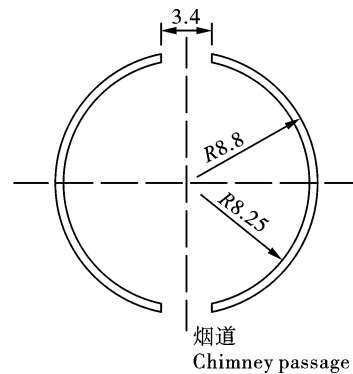


图 2 烟囱 + 12 m 结构平面图(单位:m)
Fig. 2 Structural schematic of chimney + 12 m position(unit:m)

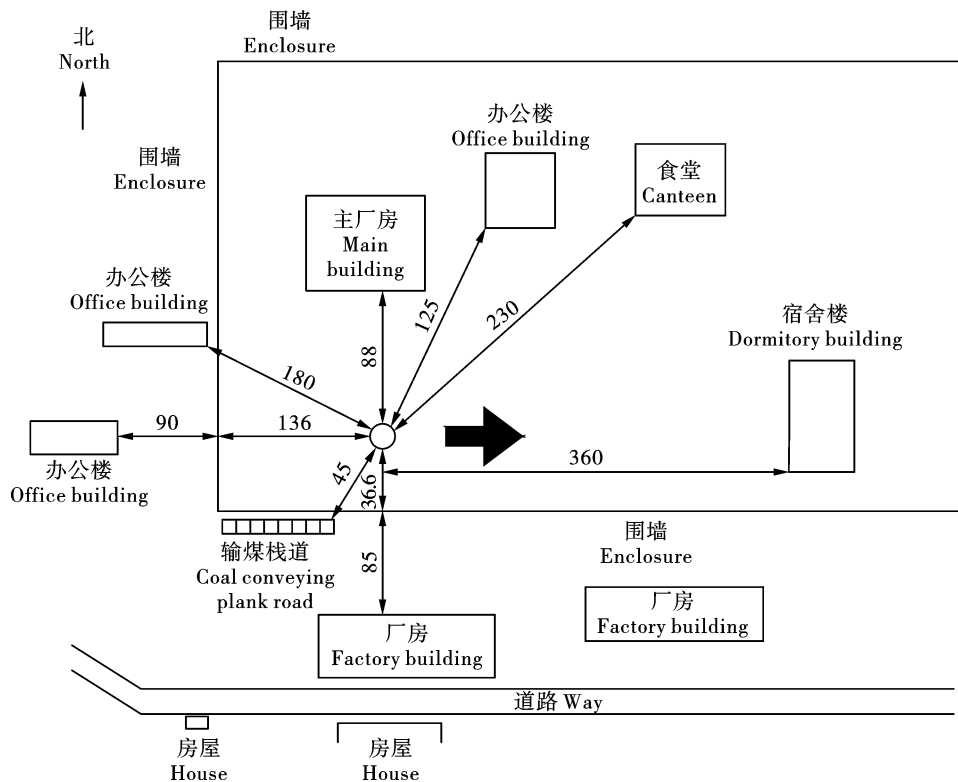


图 3 烟囱周边环境(单位:m)

Fig. 3 Surrounding environment of the chimney(unit:m)

1.4 烟囱爆破拆除重难点分析及应对措施

(1) 钢筋混凝土烟囱高度达 180 m,爆破倾倒角度即使出现较小偏差,也易筒体顶部触地点发生明显变化。为避免触及周边建筑物,需精确设计定向窗参数。

(2) 烟囱整体质量较大,爆破切口形成后,易产生下座,从而改变倾倒方向。针对此问题,需合

理选择爆破切口高度和切口开口位置,合理控制筒体切口圆心角,控制余留体长度,控制筒体下座程度。

(3) 烟囱高且重,下落势能大,倾倒触地的冲量大,需制定减振措施,防止前冲现象等。针对此问题,在爆破倒塌方向上均匀布置三个减振土堤,减小触地冲能。

2 烟囱控制爆破技术设计

2.1 切口设计

2.1.1 设计原则

爆破切口大小、高低、位置是决定烟囱能否按设计方向顺利倒塌的主要因素,因此,应按下述原则进行设计:

(1)尽量降低切口高度,避免高空作业,同时切口高度应满足筒身倒塌失稳要求。

(2)切口大小应满足筒身在爆破后能按设计方向倾倒。

(3)切口部位余留截面,应具有一定的抗压强度,保证定向倾倒。

(4)切口范围内预拆除量应能创造良好的临空面和防护条件。

2.1.2 倒塌方向

根据烟囱周围环境和现场测量结果发现烟囱东部空间较为广阔,便于烟囱整体倾倒,故选择正东方向作为本次烟囱爆破拆除的倒塌方向,见图 3。

2.1.3 切口形式

为控制倾倒方向,设计采用正梯形切口,切口两

边开定向窗,沿倾倒中心线开凿导向窗。

2.1.4 切口尺寸

(1)切口长度:根据筒形结构抗压不抗弯的结构特点,长度取该处周长的 3/5,切口长度按下式确定

$$L = 3/5\pi D \quad (1)$$

式中: L 为爆破切口弧长,m; D 为烟囱切口处外径,m。

(2)切口高度:烟囱的爆破切口可分为两部分组成,即爆破切口区和导向窗切口区。

$$H_p \geq (1/6 \sim 1/4)D \quad (2)$$

计算可得:烟囱爆破切口高度 $H_p = 2.93 \sim 4.4$ m,取 3.5 m,以爆破倾倒中心线为中轴,利用机械开凿宽 4 m、高 4.5 m 的导向窗。

切口自 +0.5 m 标高处筒壁起,切口底边弧长对应圆心角为 216° ,弧长为 33.2 m,预留支撑筒体弧长 22.1 m。定向窗宽 1.3 m,高 0.75 m,角度为 30° ,其位置在南北对称门洞的西侧边缘向西,导向窗在切口的中间,切口布置见图 4。

图中阴影部分为待爆破区域,共分为 6 个区域,左右沿定位窗中轴线对称,切口参数见表 1。

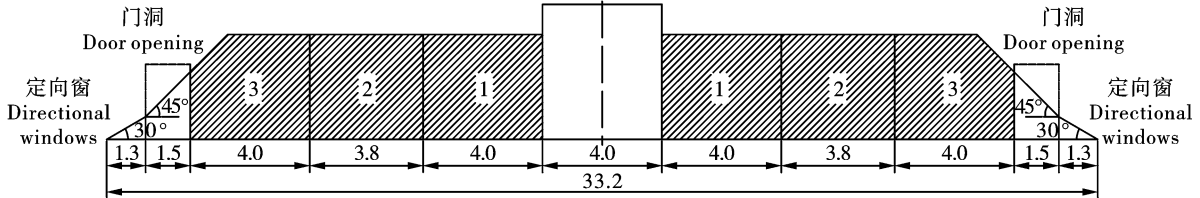


图 4 爆破切口及炮孔布孔区域示意图(单位:m)

Fig. 4 Schematic diagram of blasting notch and hole distribution area(unit:m)

表 1 烟囱爆破切口参数表

Table 1 Parameter table of chimney blasting notch

爆破切口参数/m Blasting incision parameter/m	切口底弧长/m Incision bottom arc length/m	余留弧长/m Residual arc length/m	切口圆心角/ $^\circ$ Incision central angle/ $^\circ$	切口高度/m Cut height/m
+0.5	33.2	22.1	216	3.5

2.2 爆破参数及装药量设计

2.2.1 爆破参数设计

根据炮孔参数设计原则,设计确定如下:

炮孔深度

$$L = (0.6 - 85)\delta \quad (3)$$

式中, δ 为壁厚,取 0.55 m。计算可得 $L = 0.33 \sim 0.47$ m,取 0.4 m。

炮孔孔排距

$$a = (1.0 - 1.2)L \quad (4)$$

$$b = (0.8 - 1.0)a \quad (5)$$

计算可得: $a = 0.4 \sim 0.48$ m,取 0.4 m, $b = 0.32 \sim 0.4$ m,取 0.35 m。

炸药单耗根据类似工程经验,取 $q = 1.6 \sim 3.3$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,取 2.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.2.2 装药量设计

(1)孔径: $d = 40$ mm

(2)单孔装药量

$$Q = qab\delta \quad (6)$$

计算可得: $Q = 0.2 \text{ kg}$,为提高爆破效果,下面两排孔适当增加药量。

(3) 总装药量计算

根据设计爆破切口大小,需要布置 10 排炮孔,扣除定向窗、导向窗和底部东西门洞减少的钻孔,共需爆破钻孔数约为 628 个,装药量为: $628 \times 0.2 = 125.6 \text{ kg}$ 。

2.3 起爆网路设计

为控制齐发最大装药量,降低爆破振动给周边带来的影响,采用孔内延期,分区域起爆。结合图 4,烟囱由倾倒中心线开始,将整个切口分为 3 个爆破区域,1 区设置延期时间 30 ms、2 区设置延期时间 60 ms、3 区设置延期时间 90 ms。

3 数值模拟

3.1 界面应力元法

不同于分离式共节点建模方式,界面元计算模型是具有有限个自由度的离散体,属于有限离散模型^[11,12]。界面元法采用的模型是基于单元累积变形于界面层的假定而建立的有限多块体元-界面元组合的离散体。鉴于单元变形累积于界面层,块体元只有刚体位移,采用块体元形心点的广义位移为参数的分片刚体位移模式,各个块体元形心点的位移分布既可控制整个结构的位移场,也可以描述各个界面上的相对位移。界面上点对的位移是不协调的,由相邻两块体元形心点的位移决定,由界面上点对的位移求得界面的应变,然后再由材料的本构关系式求得界面上的应力,即相邻两块体单元的相互作用力。采用的分离式模型中,钢筋和混凝土之间可以插入联结单元来模拟钢筋和混凝土之间的黏结和滑移。在 LSDYNA 中用三维非线性弹簧单元来模拟钢筋与混凝土间的黏结滑移,取得了很好的模

拟效果。

计算模型中,采用梁单元或杆单元建立钢筋模块,六面体单元建立混凝土模块,钢筋节点与混凝土节点重合但不共节点,重合节点之间采用弹簧单元进行连接,从而建立起界面元计算模型,见图 5。

3.2 单元定义

采用 LSDYNA 软件前处理模块建立钢筋混凝土烟囱等比例模型,其中混凝土模块、烟囱底部地面采用 SOLID164 单元进行划分,钢筋模块采用 BEAM161 单元划分,钢筋与混凝土节点重合处,采用 COMBI165 单元进行连接。

3.3 材料选取

钢筋材料与混凝土材料均采用塑性随动模型 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 加以描述,材料参数如表 2 所示^[13]。

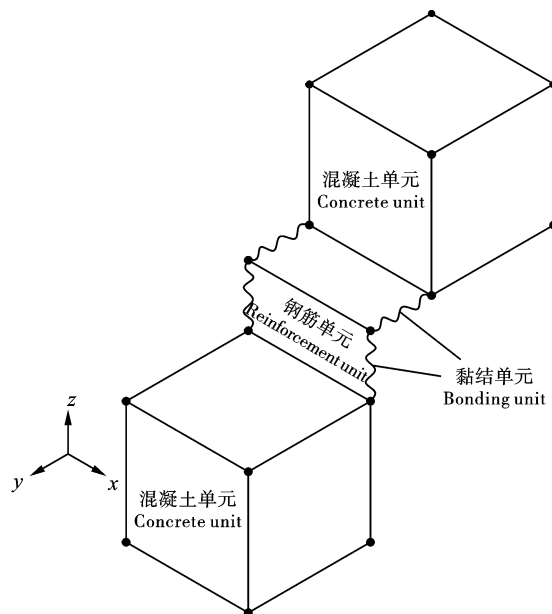


图 5 三维弹簧黏结单元

Fig. 5 Three-dimensional spring bonding unit

表 2 有限元模型材料参数

Table 2 Material parameters of finite element model

材料 Material	材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ Material density $\rho / (\text{kg m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa Elastic modulus E / GPa	泊松比 ν Poisson ratio ν	切线模量 E_t / GPa Tangent modulus E_t / GPa	屈服应力 σ / MPa Yield stress σ / MPa
钢筋 Reinforcing steel bar	7.85×10^3	210	0.29	20	26
混凝土 Concrete	2.6×10^3	25	0.20	0.5	52.4

弹簧材料采用 * MAT_DAMPER_VISCOUS 定义钢筋与混凝土之间的黏结力。地面材料采用 * MAT

_RIGID 刚体材料,采用选取爆破切口处筒体单独定义 MAT_ADD_EROSION 关键字,通过控制单元失效

时间以模拟爆破延期时间,同时定义钢筋、混凝土材料失效应变模拟倾倒过程中材料压碎失效现象。

3.4 载荷及约束施加

在烟囱模型上施加自身重力载荷和重力加速度 $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 烟囱底部施加固结约束^[14]。

3.5 接触设置

选用单面自动接触关键字模拟各组分间的接触,采用节点-单元穿透控制接触关键字模拟钢筋与地面的接触,防止钢筋穿透地面^[15]。

3.6 模型建立

钢筋混凝土烟囱钢筋骨架与混凝土筒体有限元模型,见图 6。同时为对比界面元模型与传统分离式共节点模型计算效果差异,另外建立烟囱分离式共节点模型。

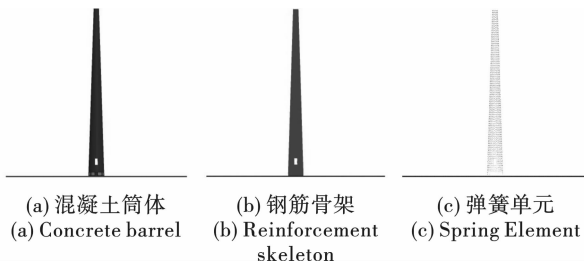


图 6 钢筋混凝土烟囱模型组分

Fig. 6 Components of reinforced concrete chimney model

3.7 数值模拟结果分析

采用 LS-PrePost 对数值模拟结果进行后处理,钢筋混凝土烟囱倒塌过程如图 7 所示。

根据延期设置,爆破切口在 90 ms 后完全形成,由图 7(b)中可以看出,0 ~ 3 s 范围内,自爆破切口形成之后,受筒体重力荷载,余留截面部分开始短时间处于完全受压状态,与地面接触区域产生应力集中。之后余留部分逐渐无法支撑整个筒体,筒体重心位置开始发生偏移,筒体以余留部分应力集中点作为支点,形成倒塌中性轴,开始做圆周运动,朝倒塌方向开始倾倒。3 ~ 9 s 范围内,筒体继续沿原有支点进行圆周运动,9 s 左右产生轻微下座,筒体下部部分单元触地失效,同时产生了新支点,筒体围绕新支点继续做圆周运动。14.0 s 筒体完全触地。整体来看,余留支撑体大致经过了爆破切口形成、中性轴形成、中性轴后退、断裂微倾 4 个过程。筒体触地状态见图 8(仅显示混凝土单元)。

图 8 中,可以看出烟囱上中部筒体基本压扁,破碎失效明显,筒体中下部保留较为完好,由于圆周运动特点,上部线速度较高,动能较大,故触地时破碎失效更为明显。提取筒体顶部一端点观察起三方向

位移变化情况,见图 9。

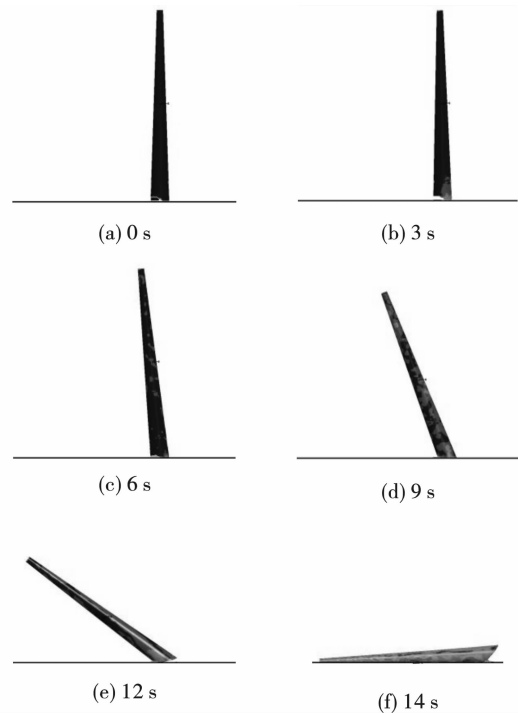


图 7 钢筋混凝土烟囱模拟倒塌过程

Fig. 7 Simulation of the collapse process of a reinforced concrete chimney

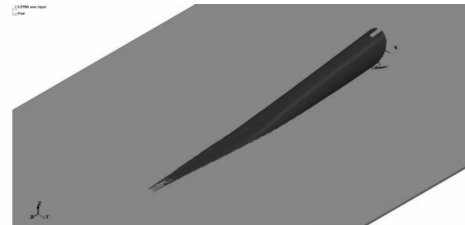


图 8 烟囱触地形态

Fig. 8 Chimney touchdown form

由图 9 中可以看出,Z 方向在 0 ~ 10 s 时位移较小,合计仅 -20 m,10 ~ 14 s 范围内,位移突跃变化至 -180 m 左右,在该时间段内,筒体下座完成,产生新支点,筒体围绕新的支点定轴旋转,旋转角度及速度进而迅速增大。节点在 X 方向上位移 167.5 m,由于筒体下座导致部分材料单元失效,同时伴随有一定程度后座,导致节点 X 方向低于筒体长度(180 m)。Z 方向上位移 179.8 m,基本接近筒体长度。Y 方偏移 0.3 m,基本无偏移,由此可以判断筒体沿预定方向倒塌。

3.8 界面元模型与分离式共节点模型倒塌形态对比

进一步对界面元模型与分离式共节点模型烟囱倒塌形态差异进行对比分析,观察烟囱切口闭合时钢筋、混凝土组分运动状态,如图 10 所示。

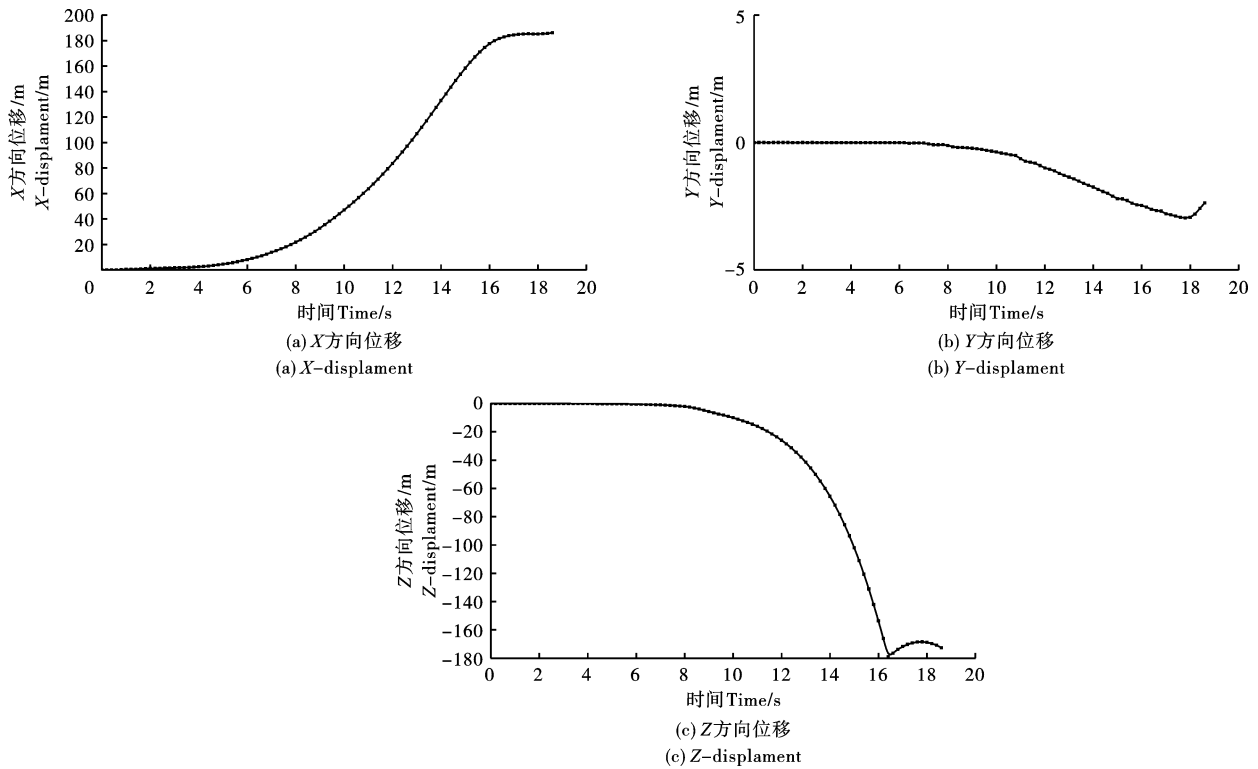


图 9 筒体顶部节点三方向位移变化

Fig. 9 Three-dimensional displacement change of the top node of the cylinder

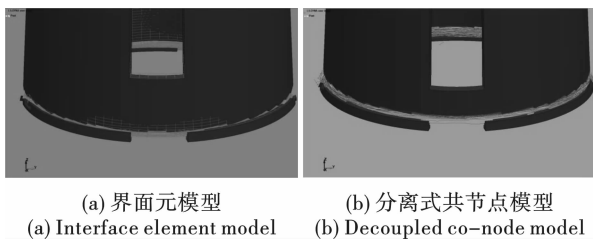


图 10 切口形态差异对比

Fig. 10 Comparison of morphological differences of incisions

由图 10 中可以看出,切口闭合时,界面元模型中出现钢筋与混凝土脱离现象,钢筋与混凝土呈现出不同的运动状态,由于失效条件差异,部分混凝土单元受压失效,但与其节点重合的钢筋单元尚未失效,依旧起到承载烟囱筒体作用,更加贴合烟囱倒塌实际形态。而分离式共节点模型中,由于钢筋混凝土材料共用节点,未出现钢筋脱离现象。钢筋混凝土材料共节点导致混凝土单元失效后,钢筋材料承担荷载加剧,故其失效较界面元模型明显增多,模型中仅残留部分横向钢筋。

继续观察筒体后座情况,见图 11。筒体轻微下座后,底部单元受到触地冲击作用,部分单位受压失效。此时筒体新支点尚未形成,由于切口闭合后,切口闭合点附近单元承担更多的重力荷载,余留部分区域承担荷载较小,故切口处单元失效加剧,筒体与

地面接触面积逐渐增大,呈现细长椭圆形,筒体后座。在筒体与地面摩擦力作用下,后座逐渐减弱,直至形成新支点时,筒体围绕新支点旋转,余留区域开始翘起,直至筒体完全落地,部分前冲。

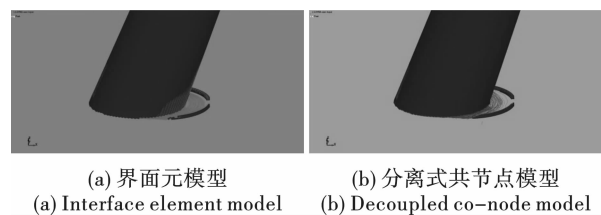


图 11 筒体后坐情况

Fig. 11 The backward collapse of the chimney barrel

选取切口附近观测点,对比两模型后座程度,如图 12 所示。由图中可以看出,界面元模型中筒体后座 5.36 m,分离式共节点模型后座 6.31 m,对比发现界面元模型后座程度较小,

分析其原因主要是界面元模型中钢筋、混凝土材料各自承担荷载,一定程度上减少了节点应力集中,材料单元失效数量减少。同时钢筋单元与混凝土单元脱离后与地面产生摩擦,增加了部分摩擦阻力,两种效果叠加,从而降低了筒体后座。

继续观察烟囱顶部触地时钢筋混凝土组分形态,如图 13 所示。

由图 13 中可以看出,分离式共节点模型由于钢筋单位周围混凝土单元失效,钢筋单元失去约束,触地后呈现飞散状态,与实际建筑物倾倒后筒体顶部

状态存在极大差异,而界面元模型由于钢筋混凝土单元之间存在弹簧单元粘结,触地后,钢筋单元受弹簧单元约束,未出现飞散现象。

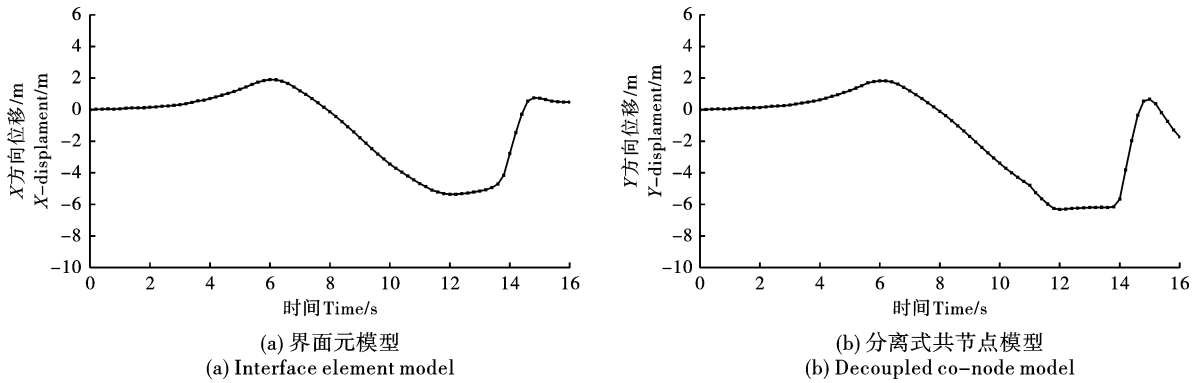


图 12 测点运动曲线
Fig. 12 Motion curve of measuring point

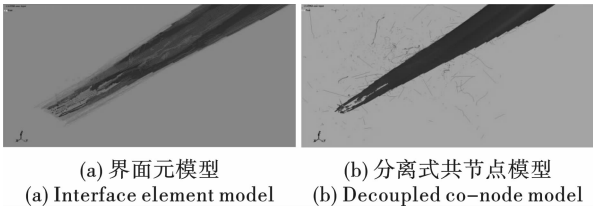


图 13 烟囱顶部触地后形态
Fig. 13 Shape of chimney top after touching the ground

通过对比筒体切口形成,后座距离和筒体顶部触地状态发现,钢筋混凝土界面元模型仿真精度明

显高于分离式共节点模型,能更精确模拟高耸烟囱倒塌过程。

4 现场爆破情况

根据爆破设计,现场施工时作业人员精细划定定位窗、定向窗位置,并采用液压破碎锤开凿切口范围内的定向窗,之后采用风镐、手锤修凿到设计尺寸。之后在爆破区域钻凿均匀炮孔,装入电子雷管起爆药包和药卷进行了爆破。现场爆破倒塌效果如图 14 所示。

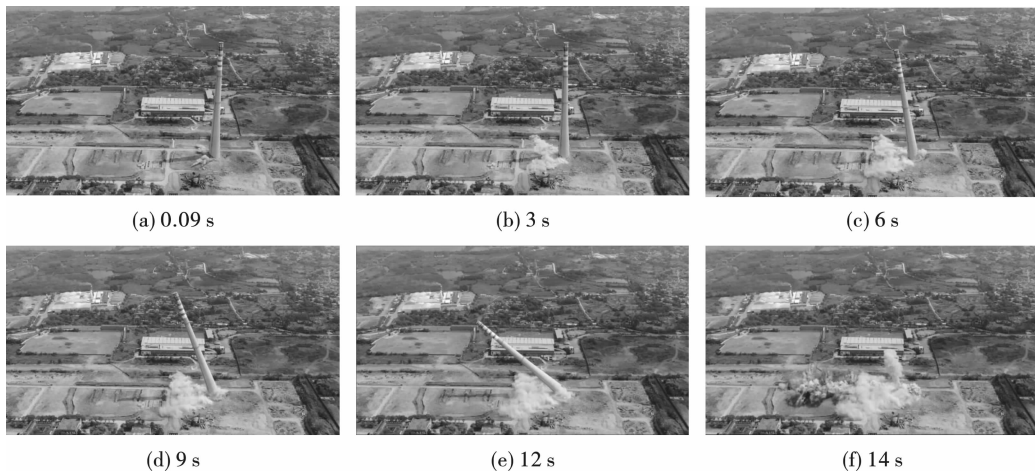


图 14 筒体倒塌过程
Fig. 14 Collapse process of the cylinder

对比数值模拟和烟囱现场倒塌结果可以看出,烟囱倒塌轨迹与数值模拟结果基本相同,倒塌时间历程较为接近,约为 14 s,基本沿设计方向倒塌,未发生过于明显的前冲、下座现象,现场测量烟囱后座约 5.1 m,对比图 12 两模型后座距离发现,界面元

模型后座程度更接近实际结果。最终倒塌形态如图 15 所示。

触地后筒体上中部基本压扁,破碎解离明显,筒体下部基本保存较为完好,相较于模拟结果,筒体破坏更为明显,推测是建筑物使用年限较长,整体结构

强度明显下降,故较模拟结果解离更为明显。由现场结果来看,爆破效果基本满足设计要求,为类似工程提供了借鉴。



图 15 最终倒塌形态

Fig. 15 Final collapse form

5 结论

针对某地 180 m 高烟囱爆破拆除工况,设计人员系统罗列爆破拆除重难点并采取相关措施进行处理,同时进行了仿真预分析和现场试验,并得出以下结论:

(1) 针对高耸建筑物整体质量大、易下座问题,合理选择爆破切口高度和切口开口位置,合理控制筒体切口圆心角,控制余留体长度,可有效降低余留体横向裂缝生成位置,从而降低裂缝贯通后筒体下座程度;

(2) 高耸建筑物倒塌范围不易控制,爆破设计时可设计高度对称定位窗、定向窗,同时采用测量手段,精确找准定位窗开设部位,精细划线,确定爆破区域和定向窗位置,同时采用风镐对定向窗、定位窗进行修边,从而有效保障倾倒方向。

(3) 针对高耸烟囱爆破工况,采用界面应力元模型和分离式共节点模型对高耸烟囱爆破倒塌过程分别进行仿真计算,同时对切口咬合过程混凝土失效与约束钢筋脱离情况、烟囱底部破裂形态对下座的影响、烟囱顶部钢筋混凝土脱离情况进行了对比分析,发现界面元模型仿真结果更贴合实际,预测精准度更高,充分证明了界面应力元法在高耸建筑物爆破拆除仿真计算过程中的精确性。

参考文献 (References)

- [1] 田水龙,张程娇,黄雄,等. 8 层框架结构楼房爆破拆除后坐数值模拟[J]. 工程爆破,2019,25(1):13-18.
- [1] TIAN Shui-long, ZHANG Cheng-jiao, HUANG Xiong, et al. Numerical simulation of recoil after demolition of an 8-story frame structure building by blasting[J]. Engineering Blasting,2019,25(1):13-18. (in Chinese)
- [2] 王铁,刘伟,李洪伟. 小高宽比框架结构建筑物拆除爆破数值模拟分析[J]. 现代矿业,2015,31(6):149-150.
- [2] WANG Tie, LIU Wei, LI Hong-wei. Numerical simulation analysis of demolition blasting of frame structure buildings with small height-width ratio[J]. Modern Mining,2015,31(6):149-150. (in Chinese)
- [3] 杨帆,张新雨,胡坤伦,等. 大跨距高楼房爆破拆除控制技术与倒塌形态分析[J]. 爆破,2021,38(1):87-92.
- [3] YANG Fan, ZHANG Xin-yu, HU Kun-lun, et al. Blasting demolition control technology and collapse form analysis of long-span tall buildings[J]. Blasting,2021,38(1):87-92. (in Chinese)
- [4] 高文乐,赵德龙,李元振,等. 延期时差对多截面承重立柱框架结构拆除爆破效果的影响[J]. 爆破器材,2021,50(2):50-54.
- [4] GAO Wen-le, ZHAO De-long, LI Yuan-zhen, et al. Influence of delayed time difference on demolition blasting effect of multi-section load-bearing column frame structure[J]. Blasting Equipment,2021,50(2):50-54. (in Chinese)
- [5] 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]. 爆破,2020,37(4):100-105,115.
- [5] DONG Xing, ZHANG Zhe, LIU Yong-qiang, et al. Demolition practice and numerical simulation of 100 m reinforced concrete chimney by directional blasting[J]. Blasting,2020,37(4):100-105,115. (in Chinese)
- [6] 徐顺香,谢广波,陈德志,等. +40 m 高位切口定向爆破拆除一座 150 m 和两座 210 m 高烟囱[J]. 爆破,2022,39(4):120-124,137.
- [6] XU Shun-xiang, XIE Guang-bo, CHEN De-zhi, et al. Demolition of a 150-m and two 210-m-high chimneys by directional blasting with a high gap of +40 m[J]. Blasting,2022,39(4):120-124,137. (in Chinese)
- [7] 高文乐,刘志成,李坤鹏,等. 100 m 高钢筋混凝土烟囱双向切口爆破时差研究[J]. 爆破,2021,38(2):128-135.
- [7] GAO Wen-le, LIU Zhi-cheng, LI Kun-peng, et al. Study on time difference of blasting for two-way notch of 100 m high reinforced concrete chimney[J]. Blasting,2021,38(2):128-135. (in Chinese)
- [8] 胡葵,柴亚博,罗宁,等. 120 m 高钢筋混凝土烟囱拆除爆破与数值模拟研究[J]. 工程爆破,2024,30(3):62-68.
- [8] HU Kui, CHAI Ya-bo, LUO Ning, et al. Study on demolition blasting and numerical simulation of 120 m high reinforced concrete chimney[J]. Engineering Blasting,2024,30(3):62-68. (in Chinese)

- [9] 杨 辉,袁翊硕,柴亚博,等. 复杂环境下 180 m 高烟囱定向拆除爆破[J]. 工程爆破,2022,28(2):84-92.
- [9] YANG Hui, YUAN Yi-shuo, CHAI Ya-bo, et al. Directional demolition blasting of 180 m high chimney in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2):84-92. (in Chinese)
- [10] 袁 方,罗 鹏,王 威,等. 复杂环境下含人字形内衬的 180 m 烟囱爆破拆除[J]. 爆破,2024,41(1):120-126.
- [10] YUAN Fang, LUO Peng, WANG Wei, et al. Demolition of a 180 m chimney with herringbone lining by blasting in complex environment[J]. Blasting, 2024, 41(1):120-126. (in Chinese)
- [11] 杨 军,陈国梁,张光雄. 建筑物结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [11] YANG Jun, CHEN Guo-liang, ZHANG Guang-xiong. Numerical simulation of blasting demolition of building structures[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [12] 孔庆亮,夏治园,王 刚,等. 高耸钢混结构造粒塔的定向爆破拆除设计及分离式共节点模拟研究[J]. 爆破器材,2024,53(1):57-64.
- [12] KONG Qing-liang, XIA Zhi-yuan, WANG Gang, et al. Directional blasting demolition design of high-rise granulating tower with steel-concrete structure and research on separate common node simulation[J]. Blasting Equipment, 2024, 53(1):57-64. (in Chinese)
- [13] 李 勇. 高耸构筑物拆除爆破倒塌过程的数值模拟与应用[D]. 贵阳:贵州大学,2016.
- [13] LI Yong. Numerical simulation and application of demolition blasting collapse process of high-rise buildings[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016. (in Chinese)
- [14] 孔庆亮,夏治园,王 刚,等. 双筒型旧硝酸造粒塔爆破拆除数值模拟与施工设计[J]. 爆破,2024,41(2):151-159.
- [14] KONG Qing-liang, XIA Zhi-yuan, WANG Gang, et al. Numerical simulation and construction design of blasting demolition of double-barrel old ammonium nitrate prilling tower[J]. Blasting, 2024, 41(2):151-159. (in Chinese)
- [15] 刘健修,高朋飞,马国强,等. 18 层框-筒结构楼房拆除爆破数值模拟分析[J]. 工程爆破,2024,30(3):74-81.
- [15] LIU Jian-xiu, GAO Peng-fei, MA Guo-qiang, et al. Numerical simulation analysis of demolition blasting of 18-story frame-tube building[J]. Engineering blasting, 2024, 30(3):74-81. (in Chinese)

(上接第 94 页)

- [9] 贾后省,王 林,彭 博,等. 弱黏结复合顶板沿空留巷分级“控顶-卸压”机理与应用[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(6):1191-1202.
- [9] JIA Hou-sheng, WANG Lin, PENG Bo, et al. Mechanism and application of classification “roof control-pressure relief” of gob-side entry retained with weakly caking compound roof[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2023, 52(6):1191-1202. (in Chinese)
- [10] 王玉杰. 爆破工程[M]. 2 版. 武汉:武汉理工大学出版社,2018.
- [10] WANG Yu-jie. Engineering blasting[M]. Second edition. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018. (in Chinese)
- [11] 辛春亮,薛再清,涂 建,等,编. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京:机械工业出版社,2021.
- [11] XIN Chun-liang, XUE Zai-qing, TU Jian, et al. Handbook of common material parameters for finite element analysis[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2021. (in Chinese)
- [12] 史维升. 不耦合装药条件下岩石爆破的理论研究和数值模拟[D]. 武汉:武汉科技大学,2004. DOI:10.7666/d.Y683189.
- [12] SHI Wei-sheng. Numerical simulation and theory study of rock blasting without interaction charge[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2004. DOI:10.7666/d.Y683189. (in Chinese)
- [13] BANADAKI MMD, MOHANTY B. Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 40(2):16-25.
- [14] 吴 波,任子明,刘 聪,等. JH2 模型参数的确定及动静荷载耦合作用下隧道围岩损伤研究[J]. 爆破,2023,40(3):68-78.
- [14] WU Bo, REN Zi-ming, LIU Cong, et al. Determination of Johnson-Holmquist-II constitutive model parameters and study on tunnel surrounding rock damage under coupling of dynamic and static loads[J]. Blasting, 2023, 40(3):68-78. (in Chinese)
- [15] PU Chuan-jin, YANG Xin, ZHAO Han, et al. Numerical investigation on crack propagation and coalescence induced by dual-borehole blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157:103983.
- [16] 赵 凯. 分层防护层对爆炸波的衰减和弥散作用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
- [16] ZHAO Kai. The attenuation and dispersion effects on explosive wave of layered protective engineering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)