

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.04.007

爆破切口高度对钢筋混凝土烟囱爆破拆除效果的影响*

高文乐^① 闫桐庆^① 孙 鸿^① 寇玉明^① 刘卫东^② 徐 明^② 段耀奎^③

①山东科技大学土木工程与建筑学院(山东青岛,266590)

②保利澳瑞凯管理有限公司(山东威海,264205)

③德州市齐河县交通运输局(山东德州,251100)

[摘要] 为了研究爆破切口高度对120 m高钢筋混凝土烟囱爆破拆除效果的影响,通过有限元软件 Ansys LS-DYNA 建立了整体式模型。对2.5、3.0、3.5、4.0 m和4.5 m的5种爆破切口高度方案进行数值模拟,比较分析在各切口高度下结构的倒塌形态及运动时程曲线,并与实际工程进行对比。对不同爆破切口高度下筒体的倒塌范围、后坐距离、倒塌速度和前冲距离等参数进行研究。结果表明:爆破切口高度过小,会导致筒体产生较大的前冲距离;随着爆破切口高度的增加,筒体破碎倒塌范围逐渐变小,但是筒体下坐距离越来越大。通过对比分析,确定最佳爆破切口高度为3.5 m。实际倒塌效果和数值模拟结果基本吻合,数值模拟结果可靠。

[关键词] 钢筋混凝土烟囱;爆破拆除;切口高度;数值模拟

[分类号] TU746.5

Influence of Blasting Cut Height on the Blasting Demolition Outcomes of a Reinforced Concrete Chimney

GAO Wenle^①, YAN Tongqing^①, SUN Hong^①, KOU Yuming^①, LIU Weidong^②, XU Ming^②, DUAN Yaokui^③

① College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology (Shandong Qingdao, 266590)

② Poly Orica Management Co., Ltd. (Shandong Weihai, 264205)

③ Transportation Bureau of Qihe County, Dezhou City (Shandong Dezhou, 251100)

[ABSTRACT] In order to study the influence of blasting cut height on the blasting demolition outcomes of a 120 m-high reinforced concrete chimney, a comprehensive model was established using finite element software Ansys LS-DYNA. Five blasting cut height schemes of 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m, and 4.5 m were numerically simulated, and the collapse morphology and motion time history curves of the structure at each cut height were compared and analyzed. It was also compared with engineering practice. A study was conducted on factors such as the collapse range, recoil distance, collapse speed, and forward impact distance of the cylinder under different blasting cut heights. Results show that a too small blasting cut height can lead to a larger forward impact distance of the cylinder. With the increase of blasting cut height, the range of collapse of the cylinder gradually decreases, but the downward impact distance of the cylinder also increases. Through comparative analysis, the optimal height of the blasting cut is determined to be 3.5 m. The actual collapse outcomes are basically consistent with the numerical simulation results, and the numerical simulation results are reliable.

[KEYWORDS] reinforced concrete chimney; blasting demolition; cut height; numerical simulation

* 收稿日期:2023-11-17

基金项目:国家自然科学基金(51874189)

第一作者:高文乐(1966—),男,硕士,教授,主要从事岩土力学和爆破安全技术的研究。E-mail: wenlegao@163.com

通信作者:寇玉明(1999—),男,硕士研究生,主要从事岩土力学和爆破安全技术的研究。E-mail: yumingk@163.com

0 引言

我国逐渐进入新、旧动能转换时代,人民对高品质的环境质量的追求越来越强烈。因此,对拆除严重污染环境的烟囱提出了迫切要求。如今,被拆除烟囱的高度越来越高,内部结构变化多样,周围环境越来越复杂,拆除难度进一步增加。随着对爆破拆除理论和方法进行了越来越多的深层次研究和讨论,爆破拆除技术在理论和施工工艺等方面均取得了较大的发展^[1]。

柴亚博等^[2]对超高钢筋混凝土烟囱的爆破切口角度的选取进行了研究:预留支撑体截面的最大拉应力达到材料强度时,可得到切口角度的选取上限;外力产生的截面弯矩和截面的抵抗力矩相等时,可以确定切口角度的选取下限。张建华等^[3]对复杂环境下 62.8 m 高的砖结构烟囱的爆破拆除方案进行了数值优化研究,确定了上切口高度为 1 m 以及上、下切口延期时差为 1 s 时,烟囱折叠效果最好,倒塌空间小。高文乐等^[4]对 120 m 高钢筋混凝土排气塔结构的顶部、断裂部位和底部支撑部位的移动问题进行了讨论和分析。结果表明:筒体结构在下沉和倒塌过程中,冲击破坏和加速坠落相互作用,筒体表面缺陷位置极易发生断裂。孙金山等^[5]就钢筋混凝土烟囱爆破拆除过程中出现的烟囱断裂情况进行了研究,发现当烟囱以一定的初速度撞击地基时,会产生冲击载荷,在烟囱中部引起较大的应变,导致烟囱早期断裂。胡彬等^[6]采用理论计算和数值模拟相结合的方法,验证了使用应力破坏准则确定烟囱爆破切口角度的优越性。田灵伟等^[7]对裂缝砖烟囱的爆破拆除进行了探讨,当待拆除的烟囱存在缺陷时,需要采取一些必要措施去确保烟囱的各个部分强度大体一致,才能使烟囱顺利倒塌。梁书锋等^[8]通过计算分析,实现了复杂环境下 40 m 高青砖混凝土结构烟囱的爆破拆除。袁方等^[9]针对含人字形内衬的 180 m 高烟囱的爆破拆除,提出了开凿大拱形导向窗的方案,取得圆满成功。徐鹏飞等^[10]研究了正三角矩形与倒三角矩形组合切口对烟囱爆破拆除中倒塌及受力过程的影响,发现倒三角矩形组合切口能够延迟切口角端压剪破坏的发生,有利于安全、精确定向和避免烟囱的过早下坐。

通过以往的工程实践可以发现,合理的爆破切口高度对爆破拆除效果至关重要。本文中,基于 LS-DYNA 软件对 5 种爆破切口方案进行数值模拟。导出不同位置单元的速度-位移曲线,并对照数值模

拟结果,对每种方案的前冲、后坐距离等参数进行分析,最终确定了最佳的爆破切口高度,可以为相似工程提供参考。

1 工程概况

待爆破拆除的钢筋混凝土动力锅炉烟囱位于山东省潍坊市寒亭区。烟囱高 120 m,底部直径 10 m,底部壁厚 0.4 m。在距地面 4 m 处有南、北 2 个烟道口,烟道口高约 3 m,宽约 2 m;东、西面有 2 个高约 1.2 m、宽约 1.2 m 的扒灰口。烟囱位于厂区东部,周围都是待拆的厂房和仓库。北部 70 m 为待拆厂房;东部 226 m 为围墙,围墙外为荒地;南部为厂区;西部 305 m 为厂区道路,300 m 范围内无其他需要保护的建(构)筑物。根据烟囱结构和现场情况,拟向正南方向爆破。周边环境如图 1 所示。

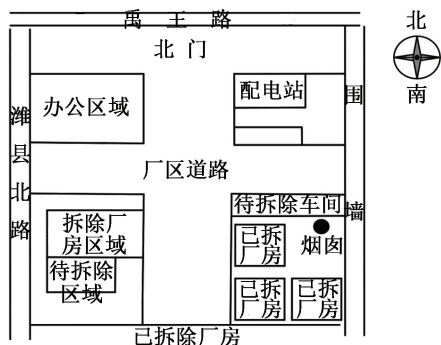


图 1 周边环境

Fig. 1 Surrounding environment

2 爆破设计

以待爆破烟囱处的地面为基准面,在烟囱南部筒身 +0.5 m 以上,采用机械破碎的方式设置定向窗和导向窗。两侧定向窗的高度相同,使结构向预定位置进行倒塌,确保筒体触地后破碎解体。在烟囱倾覆、倒塌过程中,根据烟囱的布筋情况,为使切口逐渐闭合,采用正梯形切口^[11]。切口高度设计应使烟囱切口闭合时结构重心偏移距离大于烟囱支撑面,同时,保证切口范围内混凝土被炸离钢筋骨架后竖向钢筋失稳。根据以往经验,切口高度

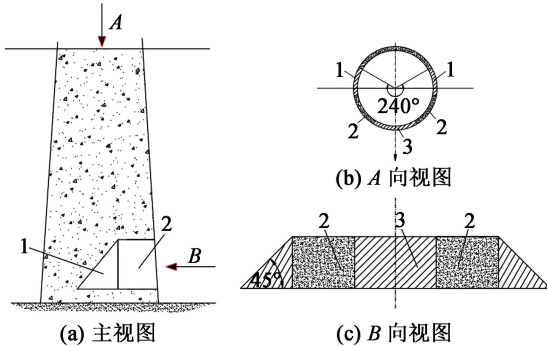
$$h \geq (3.0 \sim 7.0)\delta. \quad (1)$$

式中: δ 为切口处壁厚。

为确保爆破时烟囱按预定方向准确倒塌,实际工程中,切口高度通常大于切口位置处壁厚的 5 倍,即 $h = 5.0 \times 0.4 \text{ m} = 2.0 \text{ m}$ 。结合工程实际情况,选取切口高度 2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 m 5 种爆破方

案,根据数值模拟结果选取最佳爆破切口高度,确保拆除爆破顺利进行。

定向窗底角为 45° ,切口中间设置导向窗,破碎高度与切口高度一致,烟囱切口布置如图2所示。



1 - 定向窗;2 - 爆破部分;3 - 导向窗。

图2 切口布置

Fig.2 Cutting arrangement

为保证烟囱可以按照预定方向顺利倒塌,且不发生较大下坐及后坐,预留支撑面需受拉部分的最大压力 $\sigma_{tmax} > [\sigma_{拉}]$,受压部分的最大压力 $\sigma_{tmax} > [\sigma_{压}]$ 。 $[\sigma_{拉}]$ 为抗拉强度; $[\sigma_{压}]$ 为抗压强度。在烟囱形成爆破切口后,因为结构前倾引起的压力远超过切口内钢筋的抗压强度,只需对烟囱支撑面进行安全校核,就能保证烟囱沿设计方向倾倒^[12]。

设爆破下切口弧长 L 所对应圆心角为 β ,钢筋混凝土的抗压强度 $[\sigma_{压}] = 7.2 \text{ MPa}$ 。根据工程经验, β 取 240° ,烟囱内壁半径 $R = 5 \text{ m}$ 。在离地面 0.5 m 处,采用正梯形爆破切口,对应爆破下切口弧度

$$L = \frac{\beta}{360} \pi \times 2 \times R = 20.9 \text{ (m)}. \quad (1)$$

切口形成时,校核预留支撑面的抗压能力。

预留支撑面截面面积

$$S = \frac{120}{360} \times 3.14 \times (5.4^2 - 5.0^2) = 4.35 \text{ (m}^2\text{)}. \quad (2)$$

式中: 5.4 m 为烟囱的外壁半径; 5.0 m 为烟囱的内壁半径。

由动力锅炉烟囱重力引起的压应力

$$\sigma_{压} = \frac{2\,500 \times 1\,041 \times 9.8}{4.35} =$$

$$5.86 \text{ (MPa)} < [\sigma_{压}] < \sigma_{tmax}. \quad (3)$$

式中: $2\,500 \text{ kg/m}^3$ 为钢筋混凝土密度; $1\,041 \text{ m}^3$ 为钢筋混凝土体积; 4.35 m^2 预留支撑面截面面积。

计算结果说明:预留截面有足够的支撑力,可以确保在爆破切口形成时烟囱不产生后坐。

3 最佳爆破切口高度分析

3.1 计算模型的建立

利用有限元软件对烟囱按照实际尺寸建立整体式模型^[13]。炸药和钢筋混凝土烟囱采用 Solid164 单元;地面选择 Rigid 刚性材料。

数值模型的结构主体单元尺寸与爆破部分单元尺寸设置为 0.2 m ;地面单元尺寸设置为 20 m 。结构主体采用 Sweep 划分网格;爆破部分采用映射网格划分。爆破切口使用关键字 * Mat_Add_Erosion 进行控制。钢筋混凝土选用 96 号模型材料 * Mat_Brittle_Damage。这种材料模型支持钢筋截面配筋率的设定和混凝土失效定义,可以有效地模拟钢筋混凝土烟囱的爆破拆除倒塌过程^[14]。具体参数见表1。

3.2 不同切口高度对结构倒塌的影响

在该钢筋混凝土烟囱模型的基础上,不改变模型的其他要素,仅对爆破切口高度作适当的改变,设置方案 1# ~ 5#, 对应的爆破切口高度分别为 2.5 、 3.0 、 3.5 、 4.0 、 4.5 m 。对比5种方案的模拟结果,比较分析在各切口高度下结构的倒塌形态及运动时程曲线,选择最佳爆破方案。不同切口高度下结构倒塌过程如图3所示。

分析图3可以发现,各方案在 0.1 s 时刻爆破切口形成,都经历 4 s 左右的应力重分布时间之后,筒体开始做倾倒运动。随着切口高度的增加,切口闭合时间呈现先增加、后减小的趋势。切口高度为 3.0 m 时,爆破切口在 8.3 s 时刻闭合,闭合时间最长;之后,随着切口高度的增加,切口闭合时间开始减小。在切口高度为 4.0 m 时,倒塌时间最短,为 11.5 s 。切口高度对倒塌总时间的影响几乎无规律可循,而上、下筒体的触地时间几乎随切口高度的增

表1 钢筋混凝土材料模型参数

Tab.1 Parameters of material model of the reinforced concrete

弹性模量 E/MPa	屈服应力 σ_y/MPa	切线模量 E_t/MPa	材料密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	硬化参数 β_1	失效应变 $\varepsilon_f/\%$
25 000	53.4	150	2 500	0.2	0	0.25

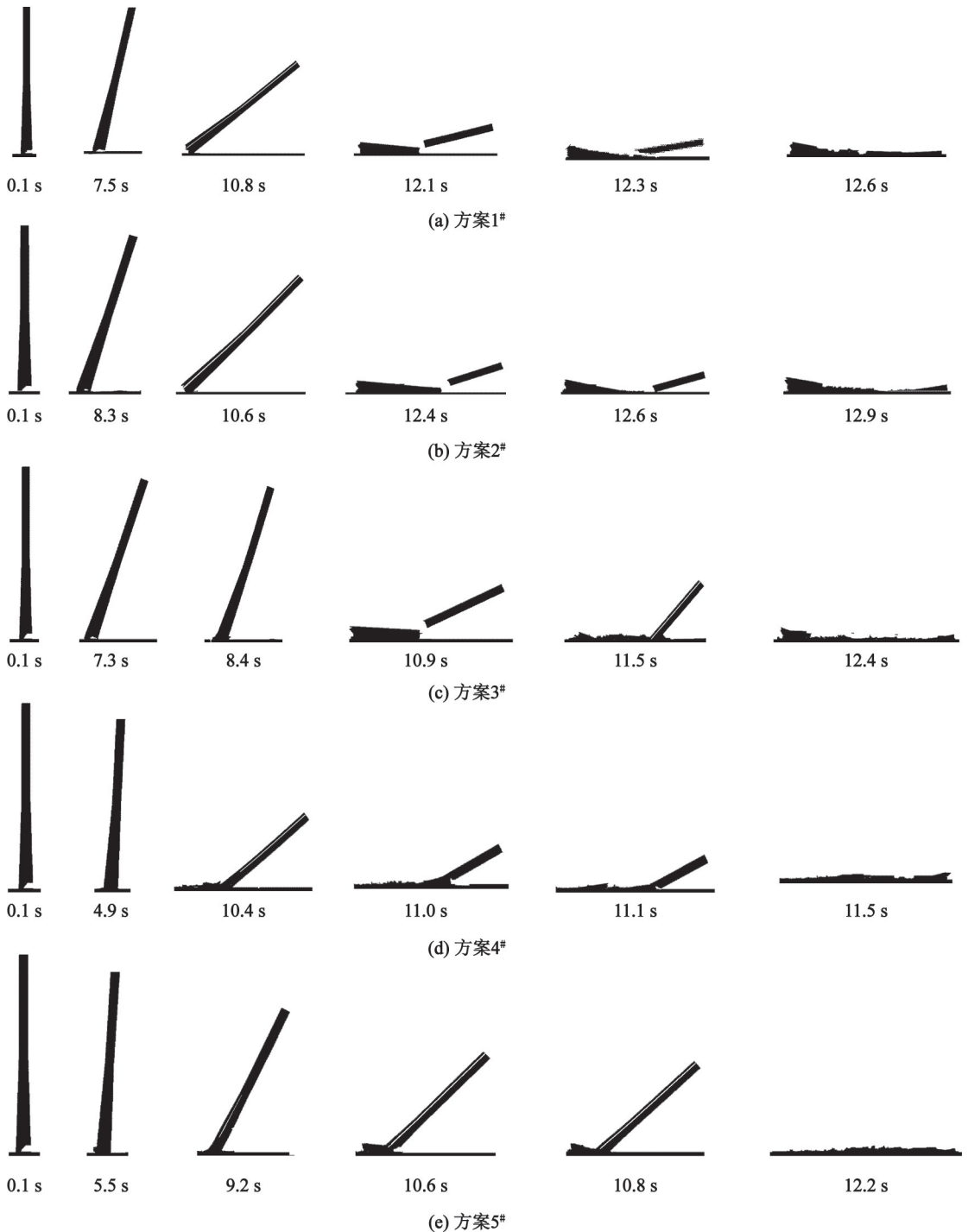


图 3 不同切口高度下结构的倒塌过程

Fig. 3 Collapse processes of the structure under different cut heights

加而逐渐减少,故要进一步分析切口高度和烟囱倒塌、破碎之间的关系。

烟囱爆破拆除的前冲距离决定了烟囱倒塌的范围^[15],顶部单元的横向位移反映出结构的前冲距离,顶部单元的横向位移曲线如图 4 所示。从图 4 中可以发现,在 0~4 s 内,各方案顶部单元的横向位移几乎为 0。这主要是因为,当切口形成后,整个

筒体处于应力重分布时间,筒体倾倒幅度不明显;4 s 以后,结构的横向位移开始增大,上部筒体开始有明显的倾倒趋势。对比 5 种方案,当倒塌结束时,根据顶部单元的最终位移可以发现,随着切口高度的增加,筒体倒塌、破碎的范围逐渐变小。即随着爆破切口高度的增加,在爆破切口形成时,筒体下坐越来越厉害。当切口高度为 4.0 m 和 4.5 m 时,倒塌范

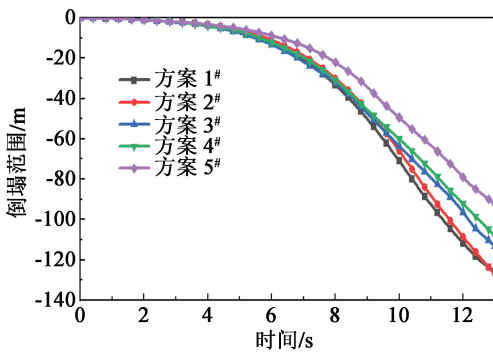


图4 顶部位置单元横向位移曲线

Fig. 4 Lateral displacement curves of the unit at the top position

围分别为 108.0 m 和 92.4 m, 远小于筒体原高度 120 m, 意味着筒体将产生很大的下坐距离。下坐距离偏大, 在现场结构倒塌时极易造成安全事故以及拆除不成功, 甚至出现倒塌方向偏离的状况, 故切口高度不宜太大。

3.3 不同切口高度下烟囱后坐距离与倒塌范围

由图 5 底部单元横向位移曲线可知, 在 5 种方案下, 结构均会发生不同程度的后坐现象。当切口高度为 4.0 m 和 4.5 m 时, 2 条曲线一直未达到峰值, 故 2 个方案所选底部单元一直向后位移, 后坐距离很大。当切口高度分别为 2.5、3.0、3.5 m 时, 筒体底部单元的位移曲线出现峰值, 筒体后坐基本完成。在烟囱倾倒之后, 伴随着前冲现象, 带动达到后坐极值的底部单元向前位移, 在曲线上表现为递减段。切口高度为 2.5 m 和 3.0 m 时, 筒体的前冲距离完全抵消筒体的后坐, 烟囱存在着较大的前冲现象。当切口高度为 3.5 m 时, 结构前期应力重分布时间较长, 后坐距离与前冲距离均较小。

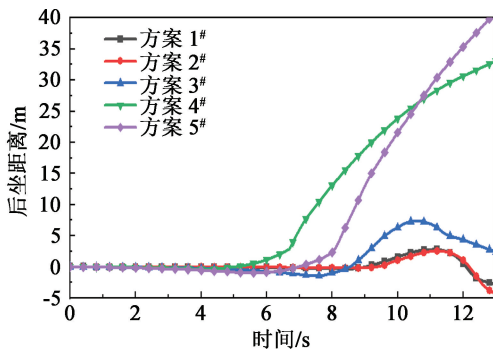


图5 底部单元横向位移曲线

Fig. 5 Lateral displacement curves of the unit at the bottom position

通过分析图 6 中爆堆形态及范围可以发现, 切口高度为 3.5 m 和 4.0 m 时, 筒体的破碎程度高, 破碎效果最好。对于切口高度 2.5 m 和 3.0 m, 筒体

未完全破碎, 爆堆宽度较小, 破碎效果不佳, 当筒体倾倒后发生明显的前冲现象, 爆堆之间存在一定的距离间隔^[16]。

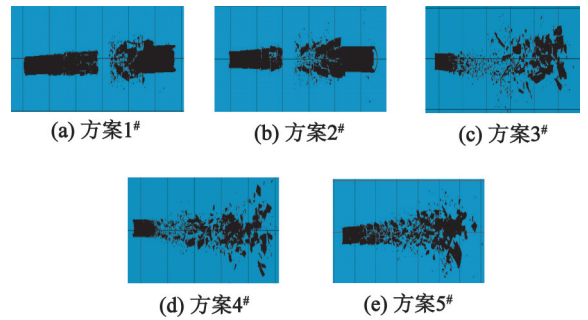


图6 爆堆形态及爆堆范围

Fig. 6 Shape and stacking range of the explosive pile

3.4 不同切口高度下烟囱的触底速度

为更好地研究在不同切口参数下结构的破坏形态, 给出了结构顶部单元的倒塌速度时程曲线, 如图 7 所示。

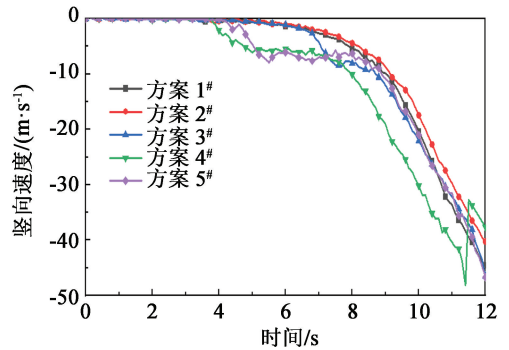


图7 顶部单元竖向速度时程曲线图

Fig. 7 Time history curves of vertical velocity of the unit at the top position

分析图 7 可知, 在 0 ~ 4 s 内, 单元速度波动幅度微小, 结构处于应力重分布阶段, 筒体倾倒缓慢。随着时间的递增, 烟囱倾倒角度越来越大, 烟囱在前冲过程中的竖向速度逐渐增加。当切口高度为 4.0、4.5 m 时, 曲线出现拐点。这主要是因为, 烟囱在倾倒过程中发生明显的下坐, 底部筒体会对结构竖向速度的增加起到延缓作用; 下坐结束后, 烟囱又继续以倾倒过程中产生的速度向下运动。当切口高度为 2.5、3.0、3.5 m 时, 烟囱下坐不明显, 曲线没有呈现明显的突变, 曲线的斜率逐渐增大, 单元的竖向加速度不断变大。当切口高度为 4.0 m, 由于地面单元为刚性单元, 在 11.3 s 时刻, 所选顶部单元碎块触地后又被弹起做抛物运动, 竖向速度出现明显的波动。

为更好地分析结构倒塌速度, 根据速度时程曲

线进行汇总,倒塌触地最大瞬时速度如表 2 所示。

表 2 结构倒塌触地的最大瞬时速度

Tab.2 The maximum instantaneous velocity of the structure when it collapses and touches the ground

切口高度/ m	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
触地速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	45.4	42.1	52.1	48.2	47.9

通过表 2 可以看出,切口高度为 3.5 m 时,触地速度最大,说明在此高度下应力重分布时间较长,结构倒塌积攒的能量较大,筒体具有良好的倒塌破碎效果。但是,此时需要防范触地振动对临近建(构)筑物的影响。

4 数值模拟与实践结果对比

综合分析各项因素,切口高度为 3.5 m 时,筒体前期应力重分布时间较长,后坐与下坐距离较小,倒塌范围长,破碎程度高,利于后期清理。因此,选取切口高度 3.5 m 进行现场爆破施工。

导入切口高度为 3.5 m 时烟囱的数值模拟结果,观测烟囱的倒塌破碎形态,并与实际爆破倒塌过程进行对比分析。在爆破切口形成后,根据两者的倒塌运动情况,输出主要关键时间节点的过程如图 8、图 9 所示。

由图 8 和图 9 对比可知,数值模拟的结构倒塌过程姿态与实际倒塌姿态高度相似。根据模拟结果,结构在 0.1 s 时形成爆破切口,支撑部分进入应力重分布阶段;筒体经历约 2.8 s 的应力重分布,在结构底部支撑区受集中力作用的单元开始失效^[17];

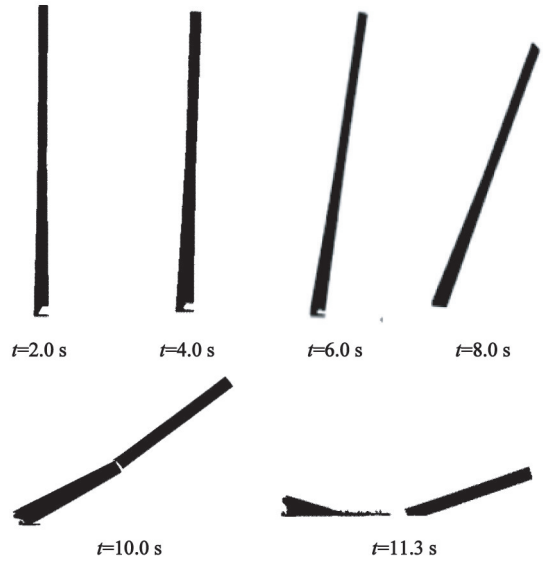


图 9 数值模拟倒塌过程

Fig.9 Numerical simulation of the collapse process

之后,结构缓慢倾倒。在前 4.0 s 内,因塑性铰原因,结构上部主体始终与底部支撑处未完全分离,烟囱筒体的倾倒角度很小,未做自由落体运动;在 7.3 s 时,底部下切口闭合,结构继续倾倒;在 8.0 s 时,结构支撑部断裂,与地面接触完全分离;10.9 s 时,下筒体结构顶部触地;11.2 s 时,上筒体结构底部触地;11.7 s 时,上筒体结构顶部触地;后经历 0.1 s 的时间后,结构完全触地,整个倒塌过程结束。结构实际快速倒塌并于 11.8 s 左右全部触地倒塌、破碎,与模拟结果基本相符^[18]。因此,数值模拟结果可靠性好。

5 结论

1) 运用 LS-DYNA 软件,对烟囱爆破拆除进行数值模拟。经过对比发现,模拟的爆破拆除倒塌时间、倒塌效果和实际爆破的倒塌时间、倒塌效果相同,数值模拟结果可靠。

2) 烟囱定向爆破拆除的前冲距离决定着烟囱的倒塌范围。随着爆破切口高度的增加,筒体的倒塌范围逐渐变小,结构的下坐距离逐渐增大,不宜选取过大的爆破切口高度。

3) 爆破切口高度为 2.5 m 和 3.0 m 时,烟囱存在着较大的前冲现象,爆堆之间存在一定的距离间隔,筒体未完全破碎,爆破效果不佳。

4) 分析、对比不同的爆破切口高度模型对类似结构的爆破拆除具有一定的借鉴意义。综合考虑各种因素,当切口高度为 3.5 m 时,烟囱倒塌破碎姿态

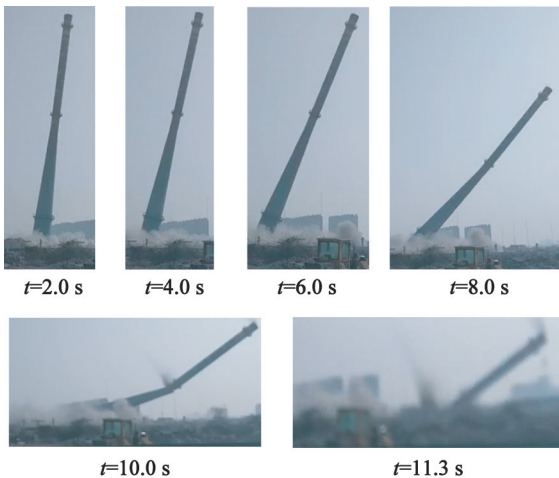


图 8 烟囱实际的爆破倒塌过程

Fig.8 Blasting collapse process of the chimney in practical engineering

与爆破效果较为理想,可以为相关工程提供参考。

参 考 文 献

- [1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2): 1-12.
XIE X Q. Development situation and trend of demolition blasting technology [J]. *Blasting*, 2019, 36(2): 1-12.
- [2] 柴亚博, 罗宁, 袁翊硕, 等. 超高钢筋混凝土烟囱爆破切口角度选取的研究[J]. 爆破, 2023, 40(4): 124-131.
CHAI Y B, LUO N, YUAN Y S, et al. Research on the selection of cutting angle for blasting of ultra high reinforced concrete chimney [J]. *Blasting*, 2023, 40(4): 124-131.
- [3] 张建华, 李江江, 黄刚, 等. 复杂环境下高耸烟囱爆破拆除方案优化数值研究[J]. 爆破, 2023, 40(1): 115-123.
ZHANG J H, LI J J, HUANG G, et al. Numerical study on blasting demolition scheme optimization of high-rise chimney in complex environment [J]. *Blasting*, 2023, 40(1): 115-123.
- [4] 高文乐, 段耀奎, 柳鹏辉, 等. 120 m 高钢筋混凝土排气塔爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2022, 39(1): 101-106, 129.
GAO W L, DUAN Y K, LIU P H, et al. Numerical simulation on blasting demolition of 120 m high reinforced concrete exhaust tower [J]. *Blasting*, 2022, 39(1): 101-106, 129.
- [5] 孙金山, 谢先启, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除的下坐及早期断裂预测[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(8): 085202.
SUN J S, XIE X Q, JIA Y S, et al. Prediction of sinking down and early break in the air of reinforced concrete chimney during blasting demolition [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(8): 085202.
- [6] 胡彬, 杨赛群, 李洪伟, 等. 超高钢混烟囱爆破切口角度计算及数值模拟[J]. 工程爆破, 2022, 28(1): 99-106.
HU B, YANG S Q, LI H W, et al. Calculation and numerical simulation of blasting cutting angle of an ultra-high reinforced concrete chimney [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(1): 99-106.
- [7] 田灵伟, 周浩仓, 龚杰. 裂缝砖烟囱爆破拆除的工程实践与技术探讨[J]. 工程爆破, 2018, 24(4): 25-29.
TIAN L W, ZHOU H C, GONG J. Engineering practice and technical discussion on blasting demolition of cracked brick chimney [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(4): 25-29.
- [8] 梁书锋, 王建国, 李鹏飞, 等. 40 m 青砖烟囱定向控制爆破拆除技术[J]. 爆破器材, 2018, 47(4): 60-64.
LIANG S F, WANG J G, LI P F, et al. Demolition of a 40 m-high black brick chimney by directional controlled blasting [J]. *Explosives Materials*, 2018, 47(4): 60-64.
- [9] 袁方, 罗鹏, 王威, 等. 复杂环境下舍人字形内衬的180 m 烟囱爆破拆除[J]. 爆破, 2024, 41(1): 120-126.
YUAN F, LUO P, WANG W, et al. Blasting demolition of a 180 m chimney with herringbone lining in complex environment [J]. *Blasting*, 2024, 41(1): 120-126.
- [10] 徐鹏飞, 刘殿书, 张英才. 烟囱高位组合切口定向爆破倒塌过程数值研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 265-270.
XU P F, LIU D S, ZHANG Y C. Numerical study on the directional blasting collapse process of chimney with high combined incision [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(15): 265-270.
- [11] 费鸿禄, 钱起飞, 刘雨, 等. 切口形状对高烟囱拆除爆破倾倒后坐的影响[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 53-61.
FEI H L, QIAN Q F, LIU Y, et al. Effect of cut shapes on dumping backward collapse of high chimney in demolition blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(1): 53-61.
- [12] 杜引刚. 钢筋混凝土烟囱承载力计算[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1995(3): 284-287.
DU Y G. Calculation formula for bearing capacity of RC chimney [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 1995(3): 284-287.
- [13] 江平, 王军良, 言志信. 钢筋混凝土框架结构爆破拆除仿真分析[J]. 爆破, 2013, 30(2): 59-63.
JIANG P, WANG J L, YAN Z X. Simulation analysis on explosive demolition of reinforced concrete frame structures [J]. *Blasting*, 2013, 30(2): 59-63.
- [14] 张振浩, 隗磊军, 杨伟军, 等. 基于 ANSYS 的钢筋混凝土圆管式空心板非线性有限元分析[J]. 空间结构, 2016, 22(1): 79-96.
ZHANG Z H, KUI L J, YANG W J, et al. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete tubular hollow slab based on ANSYS [J]. *Spatial Structures*, 2016, 22(1): 79-96.
- [15] 费鸿禄, 王帅, 钱起飞. 烟囱定向爆破拆除前冲及塌落触地振动研究[J]. 爆破, 2021, 38(3): 95-103.
FEI H L, WANG S, QIAN Q F. Research on forward

- Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [2] 胡伟才, 吴立, 舒利, 等. 不同设置方式下气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(17): 33-38.
- HU W C, WU L, SHU L, et al. Influence of water shock wave on attenuation characteristics under bubble curtain with different settings [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(17): 33-38.
- [3] 司剑峰. 深水钻孔爆破的冲击波衰减规律及防护研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- SI J F. Research on attenuation law of shock wave and protection in deep-water drilling and blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.
- [4] 谢金怀, 何树斌, 屈科, 等. 气泵法生成气泡帷幕的特性研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(1): 12-17.
- XIE J H, HE S B, QU K, et al. Study on the characteristics of bubble curtain generated by the air pump method [J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(1): 12-17.
- [5] 刘天云, 龚书堂, 胡伟才, 等. 水下钻孔爆破水击波的传播规律及气泡帷幕对水击波的削减作用[J]. 爆破器材, 2020, 49(2): 16-22.
- LIU T Y, GONG S T, HU W C, et al. Propagation law of water hammer wave in underwater drilling blasting and reduction of bubble curtain on water hammer wave [J]. Explosive Materials, 2020, 49(2): 16-22.
- [6] 贾虎, 郑伟花, 罗强, 等. 爆炸气泡帷幕对水中冲击波能量的衰减特性[J]. 含能材料, 2015, 23(10): 1015-1019.
- JIA H, ZHENG W H, LUO Q, et al. Attenuation characteristics of underwater explosion bubble curtain on the shock [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(10): 1015-1019.
- [7] 胡亚峰, 金建峰, 顾文彬, 等. 爆炸实验水池防护性能及动力学响应分析[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1001-1009.
- HU Y F, JIN J F, GU W B, et al. Protective performance and dynamic response analysis of explosion testing pool [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1001-1009.
- [8] 孙文豪, 刘钊, 刘成洲, 等. 基于气泡帷幕的大连湾海底隧道水下炸礁消压分析研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 1-6.
- SUN W H, LIU Z, LIU C Z, et al. Research on pressure dissipation of underwater reef blasting for Dalian Bay Subsea Tunnel based on bubble curtain method [J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(12): 1-6.
- [9] 张兵文, 张文扬, 吴暖, 等. 预裂爆破与气泡帷幕技术在水下爆破中的应用[J]. 工程爆破, 2015, 21(5): 6-9.
- ZHANG B W, ZHANG W Y, WU N, et al. Application of presplitting blasting and air bubble curtain technologies in underwater blasting [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(5): 6-9.
- [10] GAO Y N, MA J, DING Y. Numerical simulation on the noise reduction of underwater pile-driving using a bubble curtain [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1865(3): 032027.
- [11] FEELY J R, SORENSEN P W. Effects of an ensouffled bubble curtain and a cyclic sound on blocking 10 species of fishes including 4 invasive carps in a laboratory flume [J]. Biological Invasions, 2023, 25(6): 1973-1989.
- [12] 司剑峰, 钟东望, 李雷斌. 基于气泡形态影响的水下气幕对冲击波衰减效果分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 073201.
- SI J F, ZHONG D W, LI L B. Analysis of attenuation effect of underwater gas curtain on shock wave based on bubble shape [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(7): 073201.
- (上接转 51 第)
- thrust and ground impact vibration of chimney demolition by directional blasting [J]. Blasting, 2021, 38(3): 95-103.
- [16] 杨建华, 马玉岩, 卢文波, 等. 高烟囱爆破拆除倾倒折断力学分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 459-464.
- YANG J H, MA Y Y, LU W B, et al. Analysis of fracture mechanics for falling tall chimneys during demolition blasting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 459-464.
- [17] 徐鹏飞, 刘殿书, 张英才, 等. 钢筋混凝土烟囱高位切口爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2016, 33(3): 96-100.
- XU P F, LIU D S, ZHANG Y C, et al. Numerical simulation study on explosive demolition of reinforced concrete chimney with high incision [J]. Blasting, 2016, 33(3): 96-100.
- [18] 郑长青, 张静, 赖经建, 等. 钢筋混凝土烟囱拆除爆破倾倒过程摄影分析[J]. 爆破, 2017, 34(4): 106-108, 114.
- ZHENG C Q, ZHANG J, LAI J J, et al. Photography analysis of toppling process of reinforced concrete chimney during explosive demolition [J]. Blasting, 2017, 34(4): 106-108, 114.