

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.02.019

双筒型旧硝铵造粒塔爆破拆除 数值模拟与施工设计

孔庆亮¹, 夏治园², 王刚², 刘明锋², 钱明渊², 杨帆², 高朋飞²

(1. 浙江省第一水电建设集团股份有限公司, 杭州 310051; 2. 安徽江南爆破工程有限公司, 宁国 242300)

摘要: 针对复杂环境下 57 m 高双筒型旧硝铵造粒塔拆除爆破工况, 通过分析双筒型造粒塔存在下落势能大与质量分布不均的结构特点, 设计了中间起爆、逐段向双侧的爆破方式, 以实现“定向爆破+内合”的倒塌效果。爆破设计方案中采用梯形爆破切口, 并严格控制其周长及高度, 适当保留底部支撑墙体并开设精确对称定向窗, 使用高精度导爆管雷管结合孔内延时、孔外接力的复式闭合双回路起爆技术进行爆破施工。经理论分析计算, 最终确定爆破切口长度为 13.5 m、高度 3.5 m。为验证设计方案的合理性, 使用 LS-DYNA 仿真软件建立造粒塔三维有限元模型并进行了倒塌预分析。仿真计算结果显示: 造粒塔爆破倒塌过程共历时约 8.8 s, 通过对造粒塔倒塌形态和顶部关键质点位移变化进行分析发现倒塌过程存在轻微下座, 未发生前冲现象, 总体方案的爆破参数选取合理, 拆除爆破可达到预期效果。现场爆破完成后发现爆破倒塌效果与仿真计算结果基本一致, 为同类型爆破工程提供了一定参考。

关键词: 双筒造粒塔; 定向爆破; 分离式共节点; 数值模拟; 爆破设计

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)02-0151-09

Numerical Simulation and Construction Design of Blasting Demolition of Double-cylinder Old Ammonium Nitrate Granulation Tower

KONG Qing-liang¹, XIA Zhi-yuan², WANG Gang², LIU Ming-feng²,
QIAN Ming-yuan², YANG Fan², GAO Peng-fei²

(1. Zhejiang First Hydropower Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

2. Anhui Jiangnan Blasting Engineering Co., Ltd., Ningguo 242300, China)

Abstract: In order to demolish a 57 m high double-cylinder ammonium nitrate granulation tower in a complex environment, this study analyzes the structural characteristics of the tower, including its large potential energy and uneven mass distribution. A blasting method was designed with intermediate initiation and sequential detonation towards both sides to achieve a controlled collapse effect through “directional blasting + internal convergence”. The blasting design includes trapezoidal cut notches with strictly controlled perimeter and height. The bottom supporting walls are partially retained, and highly symmetric directional windows were created at specific heights. The demolition was carried out using high-precision nonel detonators combined with delayed initiation inside the holes and external relays outside the holes. Through theoretical analysis and calculations, the final blast notch length was determined as 13.5 m with a height of 3.5 m. To validate the design scheme, LS-DYNA simulation software was used to establish a

收稿日期 (Date of reception): 2023-04-14

网络首发日期 (Published online): 2023-10-19

作者简介: 孔庆亮 (1981-) 男, 高级工程师、本科, 从事爆破施工管理与爆破技术的研究工作, (E-mail) 66239746@qq.com。

通讯作者: 高朋飞 (1989-) 男, 高级工程师、博士, 从事爆破施工管理与爆破技术的研究工作, (E-mail) 568662152@qq.com。

About the author: KONG Qing-liang (1981-), born in Hangzhou, Zhejiang Province, male, undergraduate, senior engineer, engaged in the research of blasting construction management and blasting technology, (E-mail) 66239746@qq.com.

Corresponding author: GAO Peng-fei (1989-), born in Huaibei, Anhui, male, doctor, senior engineer, engaged in the research of blasting construction management and blasting technology, (E-mail) 568662152@qq.com.

three-dimensional finite element model of the granulation tower for pre-collapse analysis. Simulation results show that the collapse process takes approximately 8.8 seconds without any significant forward movement or toppling during collapse, indicating that the overall blasting parameters selected in this scheme are reasonable and can achieve the desired demolition effect.

Key words: double-cylinder granulation tower; directional blasting; separate common node; numerical simulation; blasting design

为响应国家的节能减排号召,老式造粒塔作为高耗能、高污染行业的代表建筑物须逐步进行拆除^[1-3],拆除过程中不可避免地需要用到爆破方式以确保施工效率和本质安全^[4-5]。在高耸造粒塔等建筑物爆破拆除课题研究方面,国内外学者主要针对建筑物塌落过程防护、失稳破坏运动状态和爆破切口参数的计算进行了较多研究,同时随着有限元仿真技术的兴起,越来越多的学者采用 LSDYNA 等数值模拟软件预测高耸建筑物倒塌形态,辅助判断爆破方案的合理性。胡彬采用理论计算和数值模拟相结合的方法对切口角度理论计算方法进行了优选^[6],杨辉通过分析造粒塔筒体结构及其具体尺寸设计爆破切口参数成功拆除复杂环境下 180 m 高钢筋混凝土造粒塔^[7]。李玉景借用烟囱原有检修门洞设计对称卸荷槽、采用水钻取芯密孔切割工艺精准开设定向窗拆除了一座废弃的 100 m 高钢混烟囱^[8],李飞在首层检修平台切口侧对称设置 4 道 6 股的钢丝绳对钢内筒进行约束^[9],成功爆破拆除了 120 m 高钢内筒钢混烟囱,孙金山通过建立烟囱下坐冲击作用下爆破切口以上烟囱的动力响应模型^[10],分析了下坐冲击附加动应变波在烟囱中的传播特征。王建国考虑烟囱周边环境较复杂、烟囱年久未用且表观风化致裂等因素的影响^[11],采用经济适用的防护材料进行近体防护,使飞散物得到有效控制。

综合来看,国内外学者对于结构形态迥异的双筒型高耸造粒塔爆破拆除研究相对较少,缺乏相关理论研究成果及工程实践案例。现有某化工厂旧式双筒造粒塔须进行爆破拆除,设计人员通过分析双筒型结构爆破拆除技术难点,通过合理设计爆破方案,精确选取了爆破切口周长、高度等爆破参数,并结合 LSDYNA 建立有限元分析模型对造粒塔倒塌过程进行数值仿真分析,为类似爆破拆除施工方案提供指导性意见。

1 工程概况

1.1 周边环境

造粒塔建于 20 世纪五六十年代,前苏联风格,

周边环境如图所示:东侧距 40 m 为厂区道路、管道和输送栈桥(待拆除),南侧距 20 m 为生产楼(待拆除),西南距 68 m 为新硝酸铵造粒塔(待拆除),西侧距 50 m 为生产厂房(待拆除),由产品输料带相连(待拆除),西北距 20 m 有一储罐,北侧距约 35 m 即为液汽管道(待拆除)。待周边建构物全部拆除后再进行造粒塔的爆破拆除施工。见图 1。

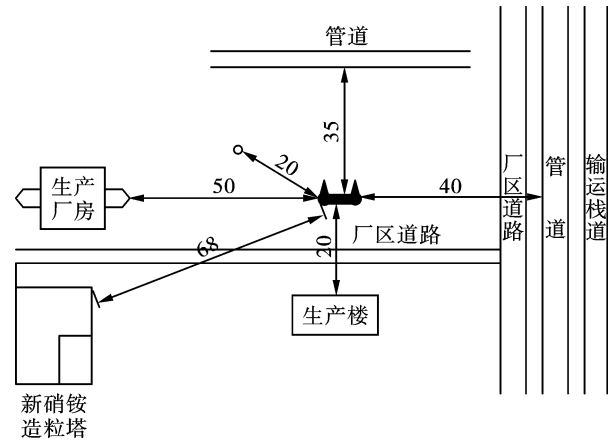


图 1 旧硝酸铵造粒塔爆破环境图(单位:m)

Fig. 1 Blasting environment diagram of old ammonium nitrate prilling tower(unit:m)

1.2 工程结构

造粒塔为双圆筒形砖混-钢筋混凝土混合结构,双圆筒间由加工设备间连成整体,如图 2 和图 3。造粒塔主体结构高 57 m,加上顶部构筑物 8 m,总高 65 m。两造粒塔筒身完全一致且对称,底部 9.5 m 为砖混结构,外径 13.5 m,内径 12.5 m,壁厚 50 cm;9.5 m 处圈梁以上为钢筋混凝土结构,外径约 13 m,内径 12.5 m,壁厚约 0.25 m;塔身筒体底部周长 42.4 m。两塔筒体之间设备间与筒身结构相同,北侧一面为楼梯间,薄壁剪力墙结构,外部用红砖贴壁砌筑。

1.3 技术难点

(1) 造粒塔塔高且重,高径比为 4.3,下落势能大,倾倒触地的冲量大,须制定减震措施,防止前冲现象等。

(2) 该造粒塔为对称双筒型结构,呈现出两端重,中部轻的质量分布形态,倒塌时重心偏移设计倒

塌方向。

(3)该造粒塔上部为钢筋混凝土结构,底部支撑部分为砖混结构,呈现出上部质量高的特征,爆破作业时易产生明显下座。

(4)待拆造粒塔地处厂区、施工过程中不得影响厂区的其他工作任务。



图2 旧硝酸造粒塔外观图

Fig. 2 Exterior view of old ammonium nitrate prilling tower

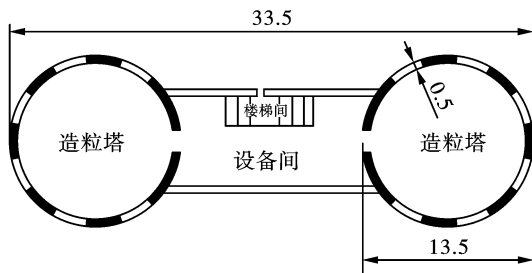


图3 造粒塔结构平面图(单位:m)

Fig. 3 Structural plan of granulating tower(unit:m)

2 爆破拆除方案设计

双筒造粒塔完全对称且结构一致,考虑到+9.5 m以下为砖混结构,而双筒体设备间有薄壁剪力墙结构的楼梯间,综合考虑上述结构和造粒塔所处环境,选择定向倾倒方案,倾倒方向选择为正北方向。考虑到双筒型造粒塔结构特点,拟定采用中间起爆、逐段向两侧起爆的方式,实现“向北定向+内合”的倒塌效果,对设计切口范围内连接双筒身的设备间、楼梯间进行机械预拆除,仅对双塔身筒体进行钻孔爆破,由于筒体有间隔窗口,可先将窗口捣空,对切口范围内砖混结构进行钻孔爆破。

针对筒体上部质量集中、两端重,中部轻等特

点,爆破设计时须精确选取爆破切口周长及圆心角,控制切口高度,适当保留底部支撑墙体,避免严重下座。同时开设的定向窗须精确对称,爆破作业中选用高精度雷管并严格控制延期,保障筒体重心不发生偏移,严格按照设计方向倒塌。本次爆破依据“多打孔、少装药、适度破坏”的原则,采用孔内延时、孔外接力的复式闭合双回路起爆技术进行爆破。

2.1 爆破切口设计

2.1.1 切口形式

根据双造粒塔的对称结构情况,设计切口形状为正梯形,切口部位距地面以上+1 m标高处。梯形底部用破碎锤修凿两个小角度定向窗。

2.1.2 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 为爆破切口长度; D 为造粒塔切口处外径, $D = 13.5$ m。

计算得: $L = 25.4$ m,取25 m。

(2)切口高度:切口高度 H_p 根据以往经验按下列公式确定

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

式中, H_p 为切口高度,m。

按照此式计算,切口高度为: $H_p = 2.25 \sim 3.38$ m。根据造粒塔的实际情况及计算结果综合考虑:为保证塔体倒塌精准,本次爆破切口高度取3.5 m。见表1。

表1 爆破切口参数表

Table 1 Parameter table of blasting incision

爆破切口参数/m	+1.0
切口长度/m	25.0
余留长度/m	17.4
切口圆心角/°	216
切口高度/m	3.5

2.2 筒体定向窗的布置及尺寸

开凿定向窗是保证支撑区对称的主要技术措施,根据确定的切口形状,定向窗为三角形,底角选择为 34° ,三角形底边长为3.0 m,高为2.0 m。先用液压破碎锤将双塔筒身之间设备间、楼梯间拆除,拆除纵深与切口长度一致,拆除高度与筒身爆破切口高度一致。见图4、图5。

2.3 爆破参数及装药量设计

2.3.1 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： $L = (3/5 \sim 2/3)B = 0.3 \sim 0.33$ m，式中， B 为壁厚，取 0.32 m。

最小抵抗线： $W = 0.5B = 0.25$ m。

炮孔孔距： $a = (1.0 \sim 2.0)W = 0.25 \sim 0.50$ m，取 0.50 m。

炮孔排距： $b = 0.866a = 0.43$ m，取 0.40 m。

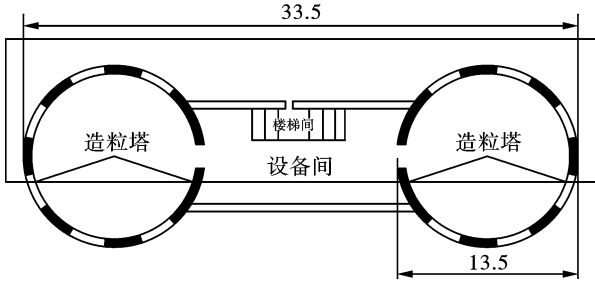


图 4 切口平面图(单位:m)

Fig. 4 Plan view of incision(unit:m)

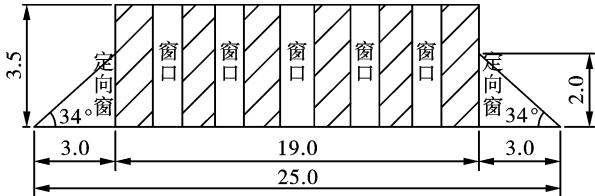


图 5 切口展开图(单位:m)

Fig. 5 Incision development diagram(unit:m)

2.3.2 装药量设计

(1)人工钻孔孔径为 40 mm。

(2)单孔药量计算

$$Q = q \times a \times b \times B \quad (3)$$

式中： Q 为单孔装药量，kg； q 为单位体积炸药消耗量， kg/m^3 ； a 为炮孔孔距，m； b 为炮孔排距，m； B 为壁厚，m。

根据公式计算，造粒塔爆破孔网参数见表 2。

表 2 造粒塔筒壁孔网参数表

Table 2 Parameter table of hole network of pelletizing tower wall

炮孔位置	筒壁
最小抵抗线/m	0.25
炮孔孔距/m	0.50
炮孔排距/m	0.40
单耗/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.5
单孔药量/g	150

2.4 起爆网路设计

为控制齐发最大装药量，采用孔内延期起爆技术。如图 6 所示，对于单个筒体来说，由筒体连接设备间一侧向一侧，将切口范围分为 3 个爆破区域，

1 区装填 MS3 导爆管雷管、2 区装填 MS5 导爆管雷管、3 区装填 MS7 导爆管雷管。孔外使用 MS3 导爆管雷管捆扎形成簇连网路。

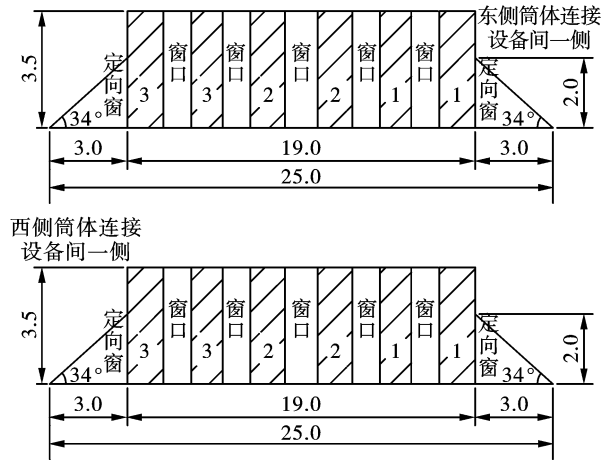


图 6 起爆网路设计图(单位:m)

Fig. 6 Design drawing of initiation network(unit:m)

图 6 中，斜线部位即为钻孔爆破区域，经现场实测，钻孔爆破区域长度占切口总长度的 65%，方向朝向造粒塔中心，相邻排间炮孔采用梅花形布置，计算得：每个塔身钻爆区域内可布设 9 排炮孔，每排约 35 个炮孔，共约 310 个炮孔，两个塔身合计 620 个炮孔，装药量为 $620 \times 0.15 = 93$ kg，取 96 kg。

3 造粒塔拆除爆破数值模拟

3.1 模型建立

为进一步验证爆破设计方案的适用性，采用 LSDYNA 模拟造粒塔在自重作用下的受力状态与支撑部结构破坏过程，根据造粒塔自身结构特点，建立等比例三维分离式共节点有限元模型并进行求解。模型单位制选取为 kg-m-s，其中钢筋材料分别采用梁单元 BEAM 161、石砖、混凝土采用实体单元 SOLID 164 单元进行建模，地面单元同样采用实体单元建模。

3.2 材料选择

钢筋、砖头、混凝土材料采用均采用经典塑性随动模型 * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 加以描述，地面材料采用 * MAT_RIGID 刚体材料描述，材料参数如表 3 所示^[12]。

3.3 有限元模型

造粒塔整体模型及钢筋骨架如图 7 所示，如图 7(a)中，模型 Y 方向为倒塌方向(正北方向)，Z 方向为垂直方向。其中底部标高 +9.5 m 以下，图中红色区域为砖混结构组分，标高 +9.5 m 至 +57 m，即图中绿色区域为钢筋混凝土组分，标高 +57 m 至

65 m 是造粒塔顶部组件,模型中对顶部部件进行了适当简化。在底部标高 +1.0 m 处设置 3.5 m 高, 25 m 宽的爆破切口,即图 7(a) 蓝色区域,按延期时间定义材料失效以模拟爆破切口形成过程,钢筋与混凝土材料采用分离式共节点建模方式以还原钢混结构物理力学特征。

表 3 有限元模型材料参数

Table 3 Material parameters of finite element model

材料	钢筋	混凝土	砖头
材料密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7850	3200	1800
弹性模量 E / Pa	2.1×10^{11}	2.5×10^{10}	2.1×10^{10}
泊松比 ν	0.29	0.21	0.29
抗压强度 / MPa	300	30	20
抗拉强度 / MPa	30	2	1.5

3.4 其他设置

首先施加造粒塔自身重力载荷和重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,筒体与地面接触部分施加边界全方向约束载荷,造粒塔底部施加固结约束^[13]。由于底部砖混结构与筒体钢混结构组分连接较为紧密,强度较高,故在建模时正对两组分采用共节点连接方式,即每个单元之间均涉及共用节点,并根据共用节点的受力和运动状态而产生相应物理力学状态变化,同时选用 CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 模拟各组件之间的自动接触,CONTACT_

NODES_TO_SURFACE 模拟钢筋与地面的接触, MAT_ADD_EROSION 定义爆破切口并模拟混凝土的压碎破坏过程,以钢筋混凝土失效应变为失效条件模拟延期爆破^[14],定义钢筋失效应变为 0.1,混凝土、砖体失效条件为 0.02。

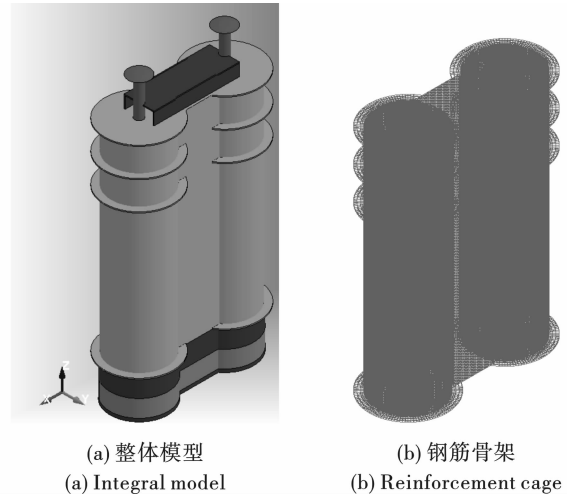


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

3.5 数值模拟结果分析

数值计算的结果文件采用 LS-PrePost 进行后处理,然后将模拟计算进行截图处理并进行比较,最后以造粒塔触地破碎为结束时刻,如图 8、图 9 所示。

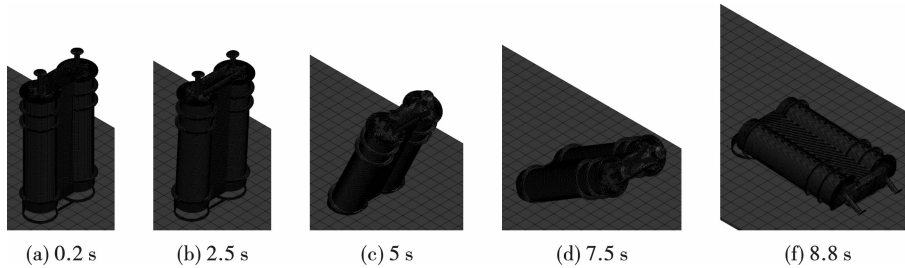


图 8 造粒塔爆破拆除数值模拟倒塌过程

Fig. 8 Numerical simulation of collapse process of blasting demolition of granulation tower

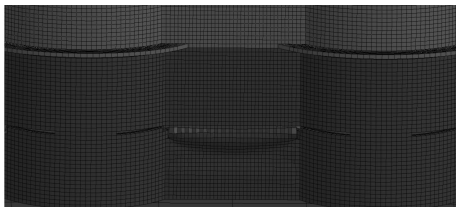


图 9 受拉产生裂缝

Fig. 9 Cracks caused by tension

图 8(a) 是 $t = 0.1 \text{ s}$ 时造粒塔的状态图。在数值模拟时,设置 $t = 0.1 \text{ s}$ 从模型中删除设置好的切口物理单元,模拟爆炸形成的爆破切口。切口形成

后造粒塔的整体性受到破坏,切口部分失去承载力,造粒塔上部结构的重力全部作用于余留的支撑部分。

图 8(b) 是 $t = 2.5 \text{ s}$ 时造粒塔的状态图。爆破切口形成后,底部砖混结构余留支撑部位开始受压。随着造粒塔缓慢前倾,支撑部位同时承受拉、压应力,逐渐达到失效应变条件。受拉部位从中间向两边发展,因砖体抗拉强度低,逐渐出现横向裂缝,如图 9 所示。在上部筒体自重及重力矩的作用下,当受力超出承载极限时,余留的支撑部位发生破坏,造粒塔开始下坐,如图 10 所示。

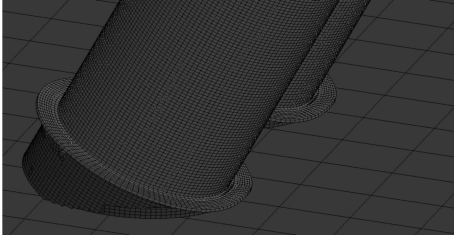


图 10 筒体下座

Fig. 10 Lower cylinder seat

图 8(c) 是 $t = 5 \text{ s}$ 时造粒塔的状态图。在此刻造粒塔处于下坐状态,底部砖混余留结构裂缝完全扩展生成,与顶部较高质量的钢混结构脱节,顶部结构失去底部支撑,整体竖直下座,顶部竖直方向速度突跃增长,整体结构呈弧线倾倒。

图 8(d) 是 $t = 7.5 \text{ s}$ 时造粒塔的状态图,在此刻造粒塔下坐完成。在造粒塔下坐到触地的过程中,底部余留部分因不断的冲击地面而破碎,造粒塔的竖向速度也会急剧减小。此时造粒塔处于加速下倾阶段。在造粒塔下坐完成后,随着造粒塔切口触地完全闭合,烟筒筒体将绕形成新的转动支线下倾。在加速下倾前,造粒塔将有一段相对稳定的下倾阶段,该阶段的时长与下坐完成时造粒塔的下倾速度

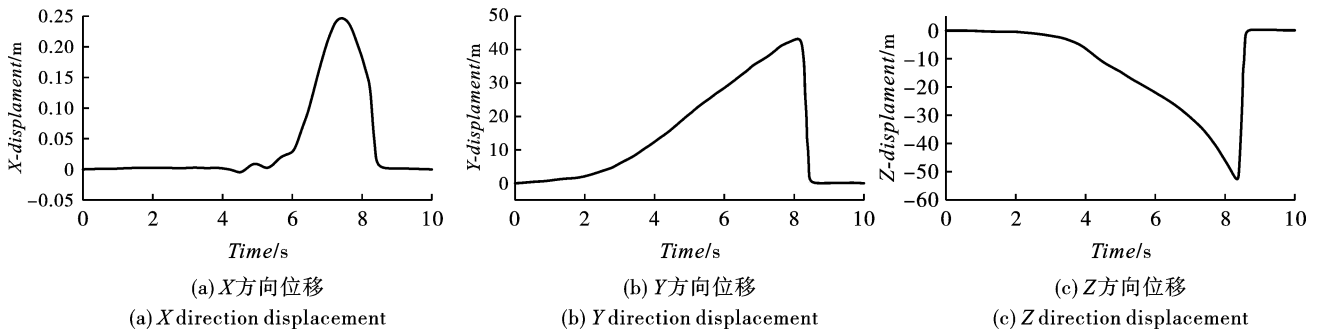


图 12 测点 1 三方向位移变化曲线

Fig. 12 Three-direction displacement change curve of measuring point

由图 12 可得,竖直方向即 Z 方向在切口形成约 2.5 s 内,造粒塔顶部竖直位移与速度时程曲线趋于水平线,说明造粒塔在自重作用下重心开始偏移并旋转而还没开始下落,处于造粒塔大偏心受压脆性断裂阶段。在 $2.5 \sim 8.4 \text{ s}$ 阶段,造粒塔顶部的速度处于均匀加速过程,说明造粒塔顶部竖直方向的速度在下坐阶段也近似以自由落体的形式进行加速。在 $8.4 \sim 8.8 \text{ s}$ 内,测点所在单元碰撞地面,材料失效,由于仿真软件计算特点,测点位移经曲线平滑后归零。

模拟计算得到的着地后的上段筒体测点 Z 方向位移为 54.2 m ,与实际造粒塔筒体高度的 57 m 较吻合, Y 方向位移 43.8 m ,结合计算过程显示造粒

有关。

图 8(f) 是 $t = 8.8 \text{ s}$ 时造粒塔的状态图,此时造粒塔倾覆倒塌完成。造粒塔倒塌触地后,筒体高速冲击地面,筒体混凝土被摔碎,靠近底部部分被压扁。

进一步观察造粒塔筒体顶部节点位移、速度变化规律,综合分析校核判断出该造粒塔筒体结构倒塌倾覆过程中是否发生前冲或方向偏移,选取造粒塔顶部部分特征点,观察其三方向位移变化情况,如图 11 所示。

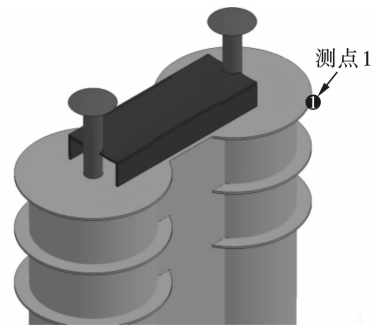


图 11 特征点

Fig. 11 Characteristic points

三方向位移变化曲线如图 12 所示。

塔的上段筒体存在下座,下座程度较大,主要原因为底部有 9.5 m 砖体结构,抗压强度较低,受上部筒体压缩破坏较大。造粒塔 X 方向上位移 0.25 m ,说明筒体依照设计方向倒塌,未发生明显偏移。

图 13(c) 是造粒塔顶部测点 1 在 Z 方向的速度时程曲线。可以看到,在 2.0 s 之前,纵向速度基本为零,说明在爆破切口形成瞬间,造粒塔底部余留截面能够承受来自上部筒体的荷载,没有被迅速压碎,有利于造粒塔定向。在 $2.0 \sim 4.2 \text{ s}$ 时间内造粒塔预留部位混凝土发生破坏,结构开始下坐, Y 方向速度开始增大,最大速度达到 -9.81 m/s ,此时下坐基本完成。在 $4.2 \sim 4.75 \text{ s}$ 时间内爆破切口开始触

地,下部砖体会被压碎,吸收了大部分能量,导致Y方向速度部分减小。4.75~6.2 s时间内造粒塔有一个相对稳定期,6.2 s之后Y方向速度逐渐增大,触地瞬间速度达到最大-23.3 m/s左右,之后速度迅速的降为零,整个倒塌过程结束。图14(b)Y方向速度根据造粒塔弧形运动曲线特征,0~2 s时造粒塔与水平面夹角的较大,速度相对较小,2~4.2 s,在4.2~8 s时速度较快,之后随着造粒塔与水平面夹角的不断减小,速度不断变小直至归零。图14(a)是造粒塔顶部测点1在X方向的速度时程

曲线。从图中可以看到,在开始阶段速度出现了负值,说明切口形成瞬间,造粒塔在顶部出现了轻微的摆动,之后开始沿着预定的倒塌方向倾倒。

4 现场实际爆破效果

经过理论分析和数值模拟相互结合得到,采用上述爆破方案可完成双筒造粒塔爆破拆除工作,现场爆破依照方案对57 m高双筒造粒塔烟囱采用单切口爆破,向正北倒塌,现场爆破效果如图14所示。

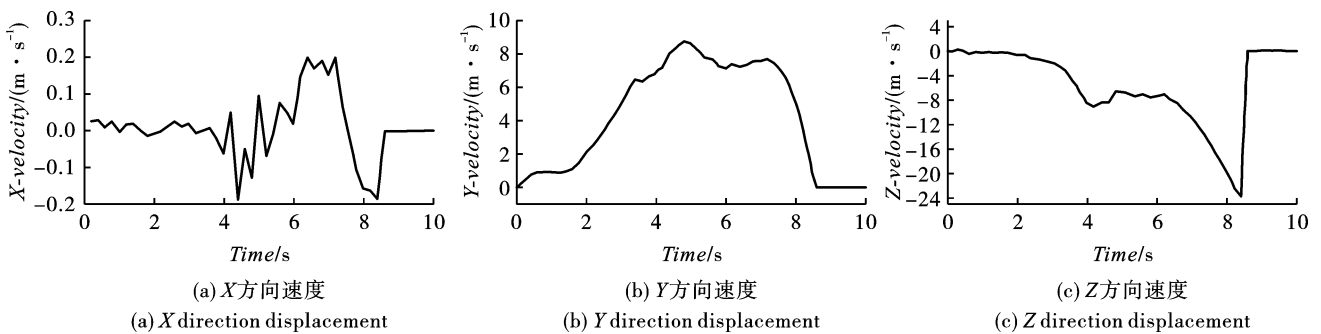


图13 测点1三方向速度变化

Fig. 13 Changes of velocity in three directions of measuring point

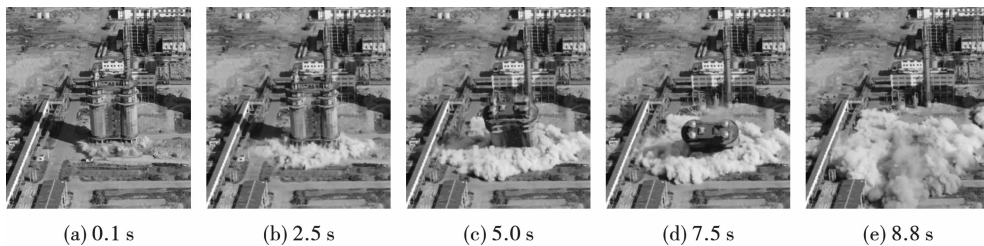


图14 双筒造粒塔倒塌过程

Fig. 14 Collapse process of double-cylinder prilling tower

由图14中可以看出,实际倒塌结果与数值模拟倒塌过程基本一致,均发生了一定下座,但整体未发生前冲,造粒塔整体朝设计方向倒塌,符合设计要求,爆堆形态如图15所示。

员通过分析双筒型高耸造粒塔拆除爆破技术难点,依据“开窗口、断钢筋、余留支撑板块”和“多打孔、少装药、适度破坏”的原则,通过理论分析计算爆破技术参数并结合数值仿真模拟的方式进行预分析,数值仿真结果显示筒体倒塌时相较于原设计正东方向上往右偏移约0.2 m,筒体倒塌后长度为43.8 m,现场爆破作业成功拆除了一座双筒型造粒塔,整体倒塌过程基本符合设计要求,与仿真结果基本一致。研究得出以下结论:



图15 造粒塔最终倒塌形态

Fig. 15 Final collapse form of prilling tower

5 结论

基于双筒型造粒塔实际爆破拆除工况,设计人

(1) 面对对称双筒型结构整体质量大,质量分布呈现出两端重,中部轻的特点,考虑采用中间起爆、逐段向双侧起爆的方式,实现“定向倾倒+内合”,可取得较为良好的倒塌效果。

(2) 面对双筒型造粒塔上部筒体质量高,易出现严重下座情况,精确选取爆破切口周长及圆心角,控制切口高度、适当保留底部支撑墙体,开设高度精

确对称定向窗,辅以高精度雷管网络爆破底部缺口,可有效降低下座程度。

(3)采用分离式共节点建模方法建立造粒塔三维有限元模型,对造粒塔爆破倒塌过程进行仿真计算,模拟过程中有效还原了余留体裂缝扩展、筒体下座等倒塌过程现象及质点运动状态,模拟结果与现场实际倒塌工况较为接近,进一步证实了分离式共节点建模法数值模拟建筑物爆破倒塌过程准确性。

参考文献 (References)

- [1] 雷 振,章征成,宋文峰,等.两座85m钢筋砼烟囱同时爆破拆除振动研究[J].爆破,2014,31(4):92-95,139.
- [1] LEI Zhen,ZHANG Zheng-cheng,SONG Wen-feng,et al. Vibration study on demolition of two 85 m reinforced concrete chimneys by simultaneous blasting[J]. Blasting, 2014,31(4):92-95,139. (in Chinese)
- [2] 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.
- [2] GAO Wen-le,DUAN Yao-kui,LIU Peng-hui,et al. Numerical simulation study on blasting demolition of a 120 m high reinforced concrete exhaust tower[J]. Blasting, 2022,39(1):101-106,129. (in Chinese)
- [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.
- [3] ZHANG Jian-hua,LI Jiang-jiang,HUANG Gang,et al. Numerical study on optimization of blasting demolition scheme of high-rise chimney in complex environment[J]. Blasting,2023,40(1):115-123. (in Chinese)
- [4] 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):100-107.
- [4] XUE Ke-jun,HU Kun-lun,YANG Hui,et al. Directional controlled demolition blasting of 108 m high prilling tower in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2):100-107. (in Chinese)
- [5] 盖四海.90 m高造粒塔控制爆破拆除[J].工程爆破,2016,22(6):55-57.
- [5] GAI Si-hai. Controlled blasting demolition of 90 m high prilling tower[J]. Engineering Blasting,2016,22(6):55-57. (in Chinese)
- [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.
- [6] HU Bin,YANG Sai-qun,LI Hong-wei,et al. Calculation and numerical simulation of blasting cut angle of ultra-high steel mixed chimney[J]. Engineering Blasting, 2022,28(1):99-106. (in Chinese)
- [7] 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.
- [7] 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)
- [8] 李玉景,赵 文,张宝亮,等.100 m高钢混烟囱小倒塌夹角拆除爆破[J].工程爆破,2021,27(6):80-85,91.
- [8] LI Yu-jing,ZHAO Wen,ZHANG Bao-liang,et al. Demolition blasting of a 100-m high-steel concrete chimney with small collapse angle[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6):80-85,91. (in Chinese)
- [9] 李 飞,孙 飞,顾 云,等.120 m高钢内筒钢混烟囱爆破拆除技术[J].爆破器材,2021,50(3):45-50.
- [9] LI Fei,SUN Fei,GU Yun,et al. Demolition technology of steel-concrete chimney with 120 m high steel inner tube by blasting[J]. Blasting Equipment,2021,50(3):45-50. (in Chinese)
- [10] 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):160-174.
- [10] SUN Jin-shan,XIE Xian-qi,JIA Yong-sheng,et al. Downsit and early fracture prediction of reinforced concrete chimney blasting demolition[J]. Explosion and Impact,2022,42(8):160-174. (in Chinese)
- [11] 王建国,罗世云,尹久清,等.极近保护条件下烟囱爆破拆除技术[J].施工技术,2021,50(3):49-51.
- [11] WANG Jian-guo,LUO Shi-yun,YIN Jiu-qing,et al. Blasting demolition technology of chimney under extremely close protection conditions[J]. Construction Technology, 2021,50(3):49-51. (in Chinese)
- [12] 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.
- [12] 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)
- [13] 高文乐,朱茂迅,李元振,等.发电厂双曲线型冷却塔定向爆破拆除及爆破效果数值分析[J].爆破器材,2020,49(4):52-57.
- [13] GAO Wen-le,ZHU Mao-xun,LI Yuan-zhen,et al. Directional blasting demolition of hyperbolic cooling tower in power plant and numerical analysis of blasting effect[J]. Blasting Equipment,2020,49(4):52-57. (in Chinese)
- [14] 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.

[14] YU Shu-bao. Study on demolition principle and appli-

cation of ultra-high chimney by co-directional folding blasting in complex environment[D]. Beijing:China University of Mining and Technology(Beijing),2019. (in Chinese)

(上接第150页)

[8] CHEN Y B,FENG Q. A technique to improve the empirical mode decomposition in the Hilbert-Huang transform [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,2(1):75-85.

[9] 赵玲,刘小峰,秦树人,等. 消除经验模态分解中混叠现象的改进掩膜信号法[J]. 振动与冲击,2010,29(9):13-17,239.

[9] ZHAO Ling, LIU Xiao-feng, QIN Shu-ren, et al. Use of masking signal to improve empirical mode decomposition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9):13-17,239. (in Chinese)

[10] 汤宝平,董绍江,马靖华. 基于独立分量分析的EMD模态混叠消除方法研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(7):1477-1482.

[10] TANG Bao-ping, DONG Shao-jiang, MA Jing-hua. Study on the method for eliminating mode mixing of empirical mode decomposition based on independent component analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012,33(7):1477-1482. (in Chinese)

[11] 易文华,刘连生,闫雷,等. 基于EMD改进算法的爆破振动信号去噪[J]. 爆炸与冲击,2020,40(9):77-87.

[11] YI Wen-hua, LIU Lian-sheng, YAN Lei, et al. Vibration signal de-noising based on improved EMD algorithm [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(9):77-87. (in Chinese)

[12] WANG C S, SHA C Y, SU M, et al. An algorithm to remove noise from locomotive bearing vibration signal based on self-adaptive EEMD filter [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(2):478-488.

[13] WU E Q, WANG J, PENG X Y, et al. Fault diagnosis of rotating machinery using Gaussian process and EEMD-treelet [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2019, 33(1):52-73.

[14] YE H J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2):135-156.

[15] 刘志慧,徐兴平,牛怀磊,等. 基于EEMD的立管涡激振动响应最优降噪光滑模型参数识别研究[J]. 振动与冲击,2022,41(12):254-260.

[15] LIU Zhi-hui, XU Xing-ping, NIU Huai-lei, et al. A study on parameter identification of optimal noise reduction

smooth model for vortex-induced vibration response of riser based on EEMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(12):254-260. (in Chinese)

[16] 陈克,张晓冬,李宁. 基于CEEMD与自适应小波阈值组合降噪在OPAX方法的应用[J]. 振动与冲击,2021,40(16):192-198.

[16] CHEN Ke, ZHANG Xiao-dong, LI Ning. Application of CEEMD and adaptive wavelet threshold combined noise reduction in the OPAX method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16):192-198. (in Chinese)

[17] 彭亚雄,刘广进,苏莹,等. 基于变分模态分解算法的隧道爆破振动信号光滑降噪模型[J]. 振动与冲击,2021,40(24):173-179.

[17] PENG Ya-xiong, LIU Guang-jin, SU Ying, et al. A smooth denoising model of tunnel blasting vibration signal based on VMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(24):173-179. (in Chinese)

[18] 钟聪,彭育辉,黄炜. 采用余弦相似度和变预测时域的汽车轨迹追踪控制[J]. 福州大学学报(自然科学版),2022,50(6):803-810.

[18] ZHONG Cong, PENG Yu-hui, HUANG Wei. Trajectory tracking control based on cosine similarity and varied prediction time domain [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2022, 50(6):803-810. (in Chinese)

[19] 孙苗,吴立,周玉纯,等. 水下钻孔爆破地震波信号的最优降噪光滑模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(8):31-37.

[19] SUN Miao, WU Li, ZHOU Yu-chun, et al. Optimal denoising smooth model of underwater drilling blasting seismic wave signal [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8):31-37. (in Chinese)

[20] 中国国家标准化管理委员会. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[21] 王海龙,赵岩,王海军,等. 基于CEEMDAN-小波包分析的隧道爆破信号去噪方法[J]. 爆炸与冲击,2021,41(5):125-137.

[21] WANG Hai-long, ZHAO Yan, WANG Hai-jun, et al. Denoising method of tunnel blasting signal based on CEEMDAN decomposition-wavelet packet analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5):125-137. (in Chinese)