

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.013

爆破切口圆心角及高度对冷却塔 倒塌效果的影响研究*

高文乐¹, 李云飞¹, 寇玉明¹, 孙鸿¹, 张建伟², 柳姬³

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 青岛 266590; 2. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014;
3. 山西朔州平鲁区龙矿大恒煤业有限公司, 朔州 036899)

摘要: 为探究不同爆破切口圆心角及高度对冷却塔整体倒塌效果的影响, 采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 对结构的倒塌过程进行复现, 验证数值模拟的可靠性。在原模型基础上, 仅改变爆破切口圆心角和高度, 选定 14 m、15 m、16 m、17 m、18 m 五种爆破切口高度和 190°、210°、230° 三种爆破切口圆心角, 将其正交排列组合, 探究两者对爆破效果的影响。得到以下结论: 爆破切口圆心角对冷却塔爆堆范围的变化起着主要作用, 爆破切口高度起次要作用; 爆堆最高点基本位于倒塌中心线上, 且分布在塔壁横向断裂位置附近, 结构后方塔壁的裂隙出现位置和破碎程度决定了结构爆堆高度和爆堆高度最高点出现的位置; 在爆破切口高度一定时, 结构的竖向触地速度随爆破切口圆心角的增加而减小; 当爆破切口角度圆心角一定时, 随着爆破切口高度的不断增加, 结构的竖向触地速度呈现先减后增的趋势; 此类冷却塔结构爆破拆除时的最优爆破切口圆心角为 210°, 最优爆破切口高度为 17 m。

关键词: 爆破拆除; 爆破切口参数; 数值模拟; 冷却塔; 爆破效果

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)01-0107-09

Influence Study of Blast Incision's Central Angle and Height on Collapse Effect of Cooling Tower

GAO Wen-le¹, LI Yun-fei¹, KOU Yu-ming¹, SUN Hong¹, ZHANG Jian-wei², LIU Ji³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China Construction eighth Bureau Second construction Co., Ltd., Jinan 250014, China; 3. Shanxi Shuozhou Pinglu District Longkuang Daheng Coal Industry Co., Ltd., Shuozhou 036899, China)

Abstract: To investigate the influence of different blast incision central angles and heights on a cooling tower's overall collapse effect, the structure's collapse process was simulated by ANSYS/LS-DYNA finite element software. The original model was modified to explore the effects of various blasting incision's central angles and heights. Five different blasting incision heights (14 m, 15 m, 16 m, 17 m, 18 m) and three blasting incision central angles (190°, 210°, 230°) were selected for orthogonal combination to analyze their impact on the collapse effect. The results indi-

收稿日期 (Date of reception): 2024-05-20

网络首发日期 (Published online): 2024-06-20

作者简介: 高文乐 (1966-), 男, 教授, 硕士, 山东栖霞人, 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: 寇玉明 (1999-), 男, 硕士生, 山东惠民人, 主要从事岩土力学和爆破安全技术的科研工作, (E-mail) ymingk@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (51874189)

About the author: GAO Wen-le (1966-), male, professor, master, from Qixia, Shandong Province, mainly engaged in teaching and scientific research of geotechnics and blasting safety technology, (E-mail) wenlegao@163.com.

Corresponding author: KOU Yu-ming (1999-), male, master candidate, from Huimin, Shandong Province, mainly engaged in scientific research on geotechnics and blasting safety technology, (E-mail) ymingk@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (51874189)

cate that the blasting incision's central angle significantly influences the distribution range of the collapse debris, while the blasting incision height plays a secondary role. The highest point of the pile is generally located along the collapse centerline and near the transverse fracture of the tower wall. The degree of fragmentation and location of fissures on the rear tower wall determine the height and location of the highest point of the debris pile. At a fixed blasting incision height, the vertical touchdown velocity of the structure decreases as the incision's central angle increases. Conversely, at a fixed incision central angle, the vertical touchdown velocity decreases and then increases with increasing incision height. The optimal demolition parameters for the cooling tower are a blasting incision angle of 210° and a blasting incision height of 17 m.

Key words: blasting demolition; blasting incision parameter; numerical simulation; cooling tower; blasting effect

拆除爆破是拆除大型建(构)筑物和大型设备的主要手段,在社会和经济发展过程中发挥着重要的作用^[1]。但随着建筑物向着更高和周边环境更加复杂的方向发展,拆除爆破的难度不断加大,对拆除爆破的要求也在不断提高。高文乐等以十里泉电厂92 m高冷却塔定向爆破拆除为例^[2],根据现场的结构尺寸大小,复现结构在爆破拆除中的倒塌过程。张宝岗等探究爆破切口圆心角对冷却塔结构爆破拆除的影响^[3],以分离式共节点法建立冷却塔爆破拆除的有限元模型,对其倒塌过程进行研究。费鸿录等对冷却塔爆破拆除时塔体触地瞬间受力分析^[4],得到关于结构母线的几何方程。谢钱斌等使用多段毫秒延时导爆管雷管起爆网路^[5],确保冷却塔在下坐前和下坐的过程中按预定的倾倒方向倒塌并解体,实现冷却塔的定向爆破拆除。蒋超等利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对某冷却塔爆破拆除的倒塌过程进行模拟^[6],与现场的爆破效果进行对比,发现两者的爆破效果较为一致。Ruan Jinkui 等以云南利阳兴城二期建筑群为例^[7],基于高层建筑物爆破拆除的定向倒塌和双向倒塌构建了高层建筑物爆破堆预测模型。段海霞等通过5组不同切口尺寸的倒塌模拟方案^[8],研究在冷却塔爆破拆除中爆破切口尺寸对其倒塌过程的影响,选出最优的爆破切口尺寸。张建华依托某发电厂冷却塔的爆破拆除工程^[9],对比分析两种爆破技术的爆破效果,发现后者对于改善结构的倒塌速度和触地破碎程度有着良好的效果。Song Qianqian 利用数值模拟对某电厂冷却塔拆除爆破过程中的失稳运动特性进行了深入研究^[10],对模型的准确性进行了验证。张焜琨通过选择切口位置、精确定位倒塌方向和开设定向窗等措施^[11],两座烟囱在空中实现对碰,且周边保护目标安全无恙。

以威海市热电集团某工厂2#冷却塔为研究背景,分析冷却塔的实际倒塌过程与仿真模拟结果,验证数值模拟的可靠性。其次在保证模型尺寸和其他

爆破参数不变的情况下,仅改变原结构模型的爆破切口圆心角和高度,利用数值模拟得到在不同爆破切口参数下冷却塔的爆堆高度、爆堆范围和触底速度等爆破效果,确定最优的爆破切口圆心角和爆破切口高度,为类似冷却塔爆破拆除工程提供指导^[12-16]。

1 工程实例

1.1 工程概况

威海市热电集团某工厂2#冷却塔需进行爆破拆除。北侧5 m、76 m处为板房和1#冷却塔;东北侧97 m处为储存厂棚;南侧距离3#冷却塔为18 m和南侧35 m处为12 m高的待建道路;东南侧8 m处为块石挡墙(可预拆除);西侧距离储存厂棚为39 m;西北侧39 m处为厂棚,地下无保护管线,地上20 m内无保护管线。周边环境如图1所示。

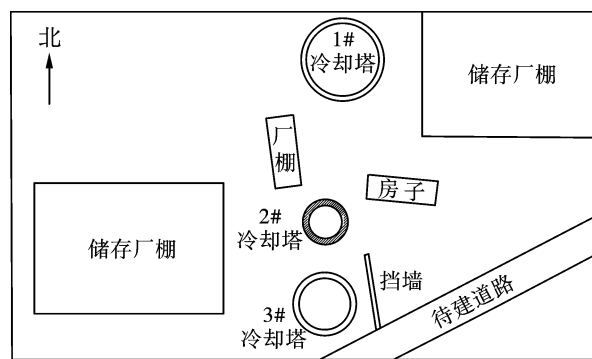


图1 爆破区域周边环境图

Fig. 1 Map of the surrounding environment of blasting area

1.2 结构特点

2#冷却塔的标高为47 m,上部直径为19.36 m,下部直径为35.19 m,筒体下部壁厚350 mm,中间壁厚127 mm,上部壁厚120 mm,人字形支撑立柱共有32对,垂直高度4 m,截面尺寸为36 cm×36 cm。2#冷却塔示意图和立面结构图如图2、图3所示。



图 2 冷却塔示意图

Fig. 2 Cooling tower diagram

标号	标高/m	半径/mm	壁厚/mm
	45.000	47.000	
14	43	9041	120
13	40	8927	120
12	37	8950	120
11	34	9109	120
10	31	9395	121
9	28	9800	121
8	28	10308	122
7	22	10904	125
6	19	11576	129
5	16	12311	136
4	13	13098	149
3	10	13930	173
2	7	14797	218
1	5	15392	280
0	4	15696	350

图 3 2#冷却塔立面结构图

Fig. 3 2# Cooling tower facade structure

2 爆破方案设计

2.1 工程方案

此次爆破工程选用“预开导向窗、定向窗、卸荷槽,预处理部分塔壁板块、预留部分塔体支撑板块、切断圈梁、最后爆破支撑人字柱”的定向倒塌方案。

2#冷却塔倒塌方向为东偏南 45°,冷却塔爆破切口角度示意图如图 4 所示。

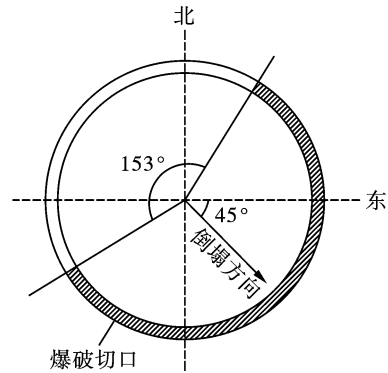


图 4 冷却塔爆破切口角度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of blasting incision angle of cooling tower

2.2 倒塌切口设计

爆破切口高度 H_p 由人字柱高度 h_1 、圈梁高度 h_2 以及塔身处高度 h_3 三部分组成。

2#冷却塔爆破时, $h_1 = 4.0\text{ m}$ 、 $h_2 = 1.0\text{ m}$, 导向窗开设到距离地面垂直距离 16 m 高度处, 2#冷却塔爆破切口形状立面示意图见图 5 所示。

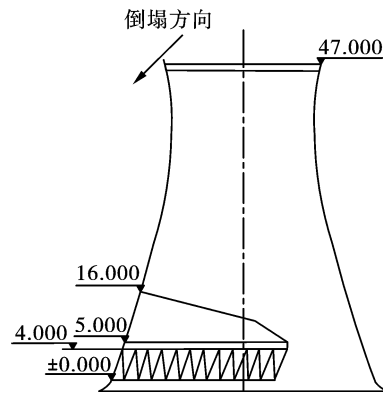


图 5 冷却塔爆破切口形状立面示意图(单位:m)

Fig. 5 Facade diagram of incision shape of 2# cooling tower(unit:m)

2.3 爆破参数设计

本次冷却塔爆破拆除采用钻孔爆破,药包布置在爆破切口部分人字柱的两端部位。每根人字柱的两端分别布置 3 个炮孔,且均为水平钻孔。冷却塔切口爆破参数如表 1 所示。

表 1 冷却塔切口爆破参数表

Table 1 Cutting blasting parameters of cooling tower

名称	爆破位置	宽/cm	抵抗线/cm	孔距/cm	孔深/cm	单药量/g	根数	总孔数	总药量/kg
2#冷却塔	人字柱上部	36	18	27	25	50、75	36	216	14.40
	人字柱下部	36	18	27	25	75	48	288	19.20

3 数值模拟分析

3.1 模型参数设置

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件对钢筋混凝土冷却塔进行实体建模时,通常采用 3D 单元类型。由于本次模拟采用整体式建模,故选用 SOLID164 单元来模拟冷却塔倒塌过程。

在建筑物的爆破拆除数值模拟中,* MAT_BRITTLE_DAMAGE 材料本构模型可以通过对参数的调整,较好地模拟钢筋混凝土结构的配筋率,同时由于冷却塔的配筋布置较为规整,因此采用该本构模型来模拟钢筋混凝土材料,将钢筋弥散于整个单元之中^[17]。对此材料本构进行赋值时需要设置混凝土参数、配筋率和钢筋参数,其中钢筋、混凝土构件的物理力学参数如表 2 所示。

表 2 材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of materials

名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa
钢筋	7850	210	0.30	335.0
混凝土	2500	35	0.18	1.5

在实际爆破拆除过程中材料的失效过程十分复

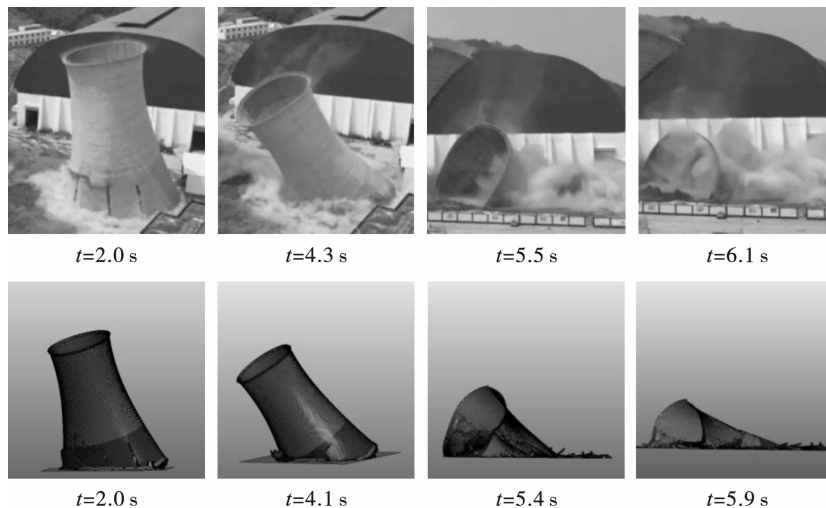


图 6 现场与数值模拟倒塌过程对比图

Fig. 6 Comparison of collapse process between field and numerical simulation

将模拟结果与实际倒塌过程进行对比,发现冷却塔爆破拆除的数值模拟结果与实际倒塌过程中的倒塌姿态和倒塌时间保持高度吻合,证实了数值模拟的有效性和准确性。

3.3 方案组合与倒塌形态

在合理范围内选定 14m、15m、16m、17m 和 18m 五种爆破切口高度和 190°、210°和 230°三种爆破切

杂,目前应用较广的失效模型有以下四种:

第一种强度理论模型

$$\sigma_1 \leq [\sigma] \quad (1)$$

第二种强度理论模型

$$\sigma - \mu(\sigma_2 - \sigma_3) \leq [\sigma] \quad (2)$$

第三种强度理论模型

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (3)$$

第四种强度理论模型

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (4)$$

式中:[σ]为许用应力,[σ] = 屈服极限/安全系数; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为三个主应力。

基于以上失效原则,考虑到混凝土在失效时主要发生断裂破坏,因此选择第一与第二强度理论对其失效进行控制,数值模型中利用关键字 * MAT_ADD_EROSION 控制材料的失效。

3.2 数值模拟与实际对比

2#冷却塔模型采用 * MAT_BRITTLE_DAMAGE 材料本构模型来模拟钢筋混凝土冷却塔的爆破拆除倒塌过程。求解完成的 d3plot 文件导入 LS-PrePost 进行处理,将实际拍摄的倒塌图片与模拟结果进行对比。如图 6 所示。

口圆心角进行正交排列组合,得到 15 种爆破切口参数组合,组合方案如表 3 所示。

根据表 3 所示的 15 种方案建立数值模型并计算求解,将求解得到的 d3plot 文件导入 LS-PrePost 中进行处理分析,不同方案下结构的倒塌过程如图 7 所示。

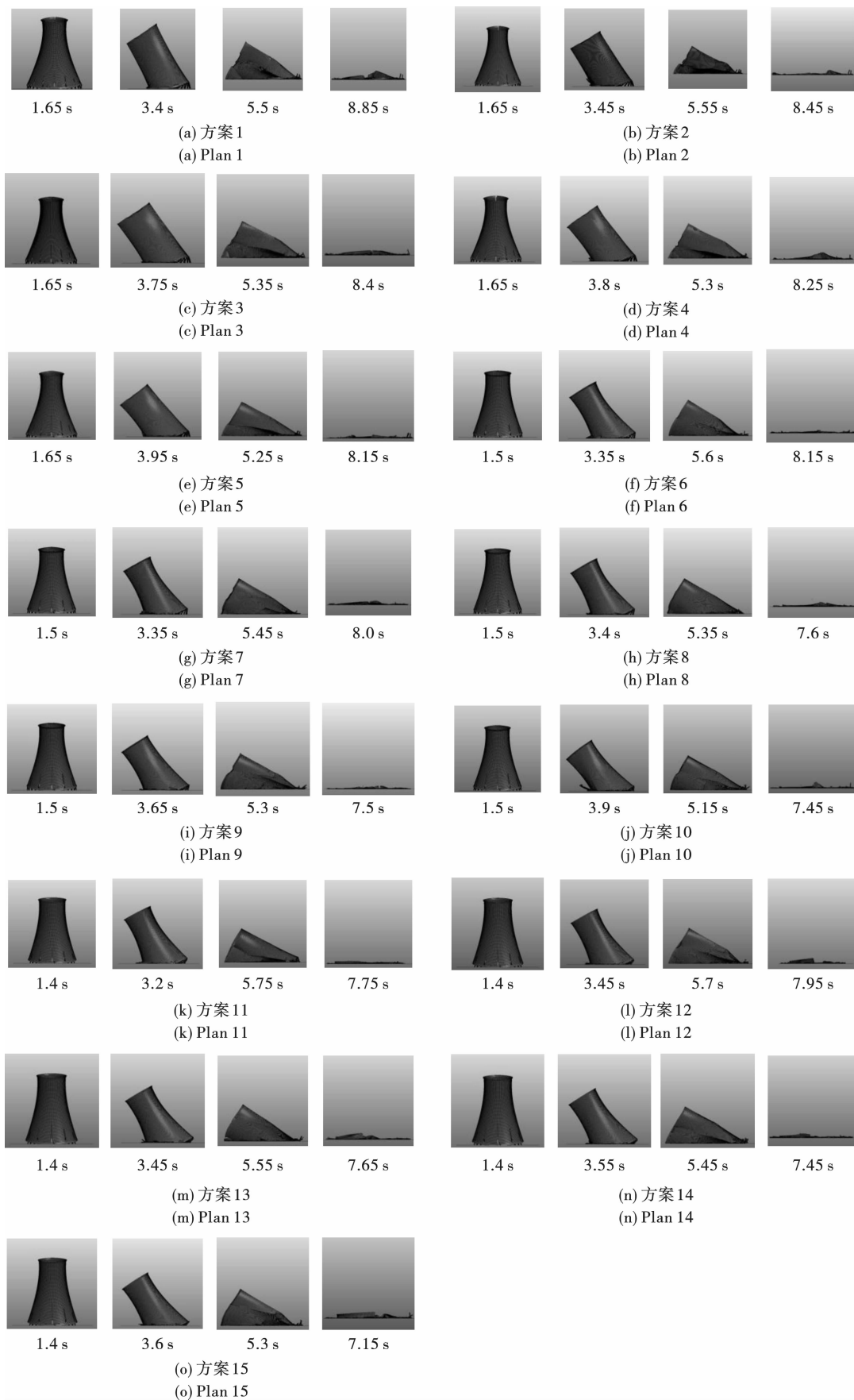


图 7 不同方案下冷却塔模型倒塌过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the collapse process of cooling tower model under different schemes

表3 方案情况表

Table 3 Program information table

	14 m	15 m	16 m	17 m	18 m
190°	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
210°	方案6	方案7	方案8	方案9	方案10
230°	方案11	方案12	方案13	方案14	方案15

3.4 爆堆范围与高度

利用后处理软件读取15种方案的爆堆范围数据,采用Origin软件绘制点线图并进行比较分析,爆堆长度点线图和爆堆宽度点线图如图8和图9所示。

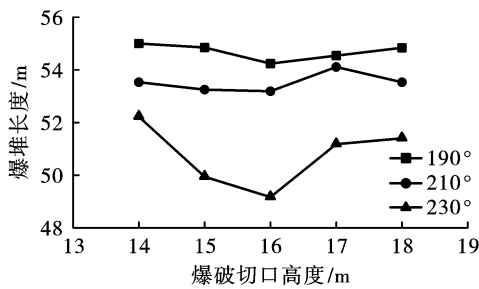


图8 不同方案下爆堆长度点线图

Fig. 8 Point diagram of detonation length under different schemes

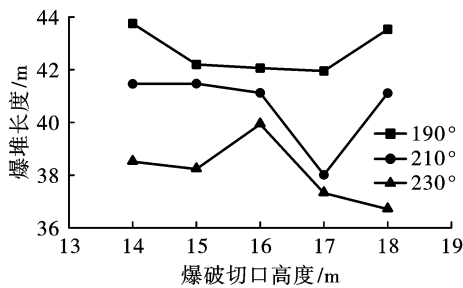


图9 不同方案下爆堆宽度点线图

Fig. 9 Point diagram of explosion width under different schemes

对图8和图9分析:在爆破切口高度一定的条件下,爆堆长度和宽度均随爆破切口圆心角的增加而减小,最大分别可达5.07 m、6.82 m。在爆破切口高度一定时,爆破切口圆心角越大,爆破切口后方保留塔壁面积越少,结构倒塌后爆堆宽度越小。当爆破切口圆心角越小时,爆破切口后方保留塔壁的面积越大,对上方塔壁倒塌的约束作用越大,当塔壁之间的作用力达到结构的失效值时,后方塔壁开始出现横向裂隙,在裂隙上方塔壁失去下方塔壁的约束作用力后,沿新支撑点向前翻转倒塌,导致爆堆长度较长。

根据图8发现:当爆破切口圆心角为190°时,

爆堆长度保持在54.24~55 m,最大爆堆长度与最小爆堆长度相差仅有0.76 m;在爆破切口圆心角为210°时,爆堆长度处于53.19~54.11 m,长度相差不到1 m。当爆破切口圆心角为190°和210°时,在五种不同爆破切口高度下,冷却塔爆破倒塌完成后爆堆长度的变化很小。而当爆破切口圆心角为230°时,在爆破切口高度由14 m增长至16 m的过程中,爆堆长度从52.22 m减小至49.17 m,当爆破切口高度增长至18 m时,爆堆长度再次增长至51.4 m,爆堆长度随爆破切口圆心角的增大,整体呈现出先减后增的趋势。

从图9中看出,当爆破切口圆心角为190°时,相较于其他两种角度,在五种爆破切口高度下的爆堆宽度变化相差较小。在爆破切口圆心角为210°时,除爆破切口高度为17 m外的4种方案下的爆堆宽度基本一致,仅在爆破切口高度17 m时发生突变,爆堆宽度减小。当爆破切口圆心角为230°时,除爆破切口高度为16 m时发生突变,剩余四种方案下的爆堆宽度随爆破切口高度的增加而减小。

通过以上对不同爆破切口参数下爆堆长度和宽度的分析,发现爆破切口圆心角对于结构爆堆范围的影响较大,而爆破切口高度对于爆堆范围的影响相对较小,因此认为爆破切口圆心角对冷却塔爆堆范围的变化起着主要作用,爆破切口高度起次要作用。

利用后处理软件读取的爆堆高度数据列于表4。

表4 不同方案下爆堆高度表(单位:m)

Table 4 Blasting pile heights under different schemes (unit:m)

	14m	15m	16m	17m	18m
190°	5.90	2.50	3.25	4.90	2.45
210°	1.90	2.90	2.65	2.20	3.65
230°	2.15	4.55	4.05	3.55	4.10

从表4中发现,不同爆破切口圆心角和爆破切口高度下冷却塔倒塌后的爆堆高度不一,但是爆堆的最高点基本位于结构的倒塌中心线上,且分布在塔壁横向断裂位置附近。由于结构形状特殊且塔壁较薄,最薄处厚度只有120 mm,最厚处的塔壁也只有280 mm,导致在倒塌过程中结构发生扭曲变形情况较为复杂,所以在不同爆破切口圆心角和高度下塔壁的横向断裂位置与爆堆最高处所在位置也有所不同。

方案1的爆堆高度高达5.9 m。在结构倒塌过程中,由于导向窗、卸荷槽和定向窗的存在,爆破切口区域内塔壁整体性较差,沿爆破切口边缘破碎,但是由于爆破切口高度较低,结构在倒塌过程中积蓄

的能量不足使得上部塔体在触地时发生解体破碎,所以上部塔壁发生内折,如图 10(a)所示。同时,顶端圆形塔口发生变形,沿倒塌中心线被拉长为椭圆形。由于顶部与底部塔壁的变形方向相反,距离顶端 1/3 高度处的塔壁单元在两种变形方向下达到设定的材料失效值,塔壁开始发生破碎产生裂隙,如图 10(b)所示。当顶端塔壁变形一定程度时,在背部塔壁处也开始产生横向裂隙,塔壁上存在纵向裂隙

的产生趋势,如图 10(c)所示。随着结构的继续倒塌,纵向裂隙逐渐形成,背部横向裂隙与纵向裂隙相互贯通,导致后续结构倒塌过程中背部塔壁分为上下两部分,如图 10(d)所示。下部塔壁在缺少上部塔壁的作用后,只能依靠自身重力以及现有的动能继续倒塌,最终因为积蓄的能量不足使得部分塔壁触地无法解体,导致爆堆高度过高。

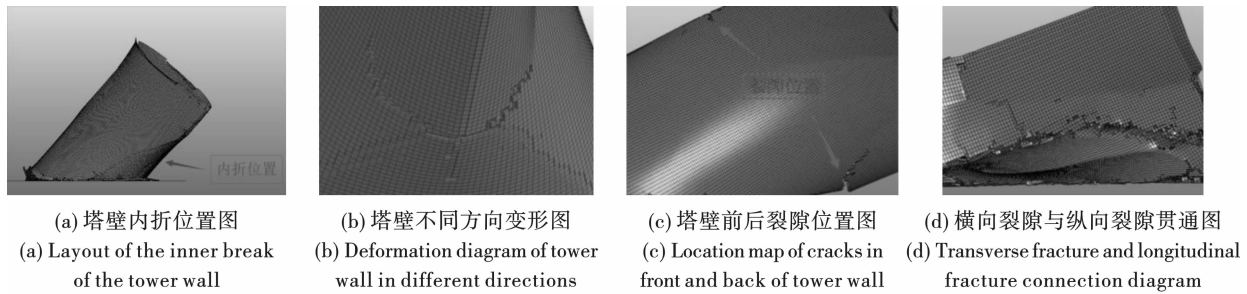


图 10 塔壁裂隙

Fig. 10 Fracture diagram of tower wall

爆堆高度最低的是方案 6,仅为 1.9 m。结构在爆破切口完全闭合后,上部塔壁在破碎到一定程度后同样发生内折现象。但方案 6 中的爆破切口圆心角大于方案 1,使得方案 6 中塔壁内折的最远端基本到达了塔顶,而在方案 1 中当塔壁内折最远端到达距离塔顶 1/3 高度处时,塔壁就因自身上部与下部变形方向不同产生了裂隙,方案 6 中的后方塔壁出现裂隙的高度也低于方案 1 中的高度。因为后方塔壁产生的裂隙仅向塔底斜向延伸,倒塌中心线两侧塔壁依旧和上部塔壁相连,上部塔壁依旧对下部塔壁产生拉应力,促使了下部塔壁的触地解体。方案 6 的爆破切口圆心角较大且圈梁被提前切断破坏了整体性,使得结构底部在触地时塔壁破坏程度同样高于方案 1。因此,结构后方塔壁的裂隙出现位置和破碎程度决定了结构爆堆高度和爆堆高度最高点出现的位置。

为了观察爆破切口圆心角和高度对爆堆最高点出现位置的影响,测量爆堆最高点所处位置与圈梁之间的水平距离,利用 origin 软件绘制出点线图,如图 11 所示。

对不同方案下爆堆最高点与圈梁之间的距离进行对比发现:当爆破切口圆心角为 190° 和 210° 时,爆堆最高点与圈梁之间的距离先随爆破切口高度的增加先减小后增加,而当爆破切口圆心角为 230° 时,爆堆最高点出现的位置极其不稳定。但是当爆破切口高度达到一定高度时,三种爆破切口圆心角

方案下爆堆最高点与圈梁之间的距离极为接近。当爆破切口圆心角为 210° 时,不同爆破切口高度下的爆堆最高点出现的位置相对集中。

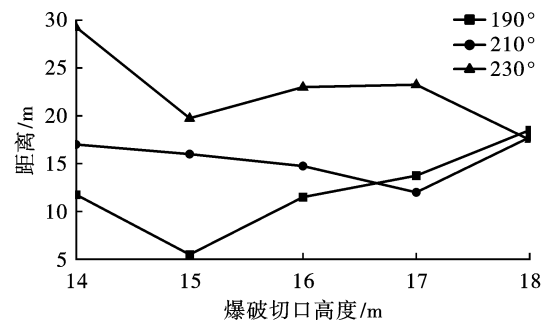


图 11 爆堆最高点与圈梁出现距离点线图

Fig. 11 Point diagram of the distance between the highest point of the blasting pile and the circle beam

将爆破切口圆心角为 210° 时的 5 种不同爆破切口高度方案下的冷却塔爆堆范围和高度分析:当爆破切口高度为 17 m 时,结构的爆堆宽度最小,与最大爆堆宽度相差高达 3.45 m;爆堆长度虽然最大,但与最小长度相差仅不到 1 m;当爆破切口高度为 17 m 时,结构的爆堆范围最小。在此爆破切口高度下的爆堆高度也仅有 2.2 m,有利于后期对爆堆的清理和运输。虽然在爆破切口高度为 14 m 时,爆堆高度最低,但是其整体的爆堆范围相对较大。所以,对于此类结构的最优爆破切口圆心角为 210° ,最优爆破切口高度为 17 m。

3.5 触地速度分析

结构倒塌后的破碎程度和触地后造成的塌落振动都是衡量爆破效果的重要指标,为研究爆破切口圆心角和高度对结构触地速度的影响,读取15种不同方案结构顶部同一位置处的单元竖向速度最大值,如图12所示。

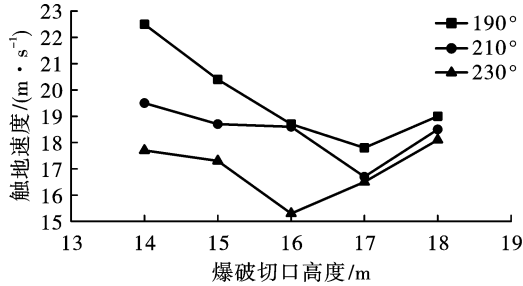


图12 不同方案单元下最大触地速度点线图

Fig. 12 Point diagram of maximum ground touch velocity under different schemes

从图12看到,在爆破切口圆心角一定时,随着爆破切口高度的不断增加,结构单元最大竖向触地速度呈现先减后增的趋势。在爆破切口高度一定时,单元的竖向触地速度随爆破切口圆心角的增大而减小。但随着爆破切口高度的不断增加,三种爆破切口圆心角下的结构竖向触地速度逐渐接近。

为了进一步研究爆破切口圆心角和高度对于结构最大竖向速度的影响,对图中的不同方案下的结构最大竖向触地速度进行拟合。爆破切口圆心角和爆破切口高度作为自变量,竖向触地速度作为因变量,拟合公式为

$$v_{\lambda} = -0.00018\lambda^2 + 0.43h^2 - 0.38\lambda - 19.21h + 0.02\lambda h + 235.41 \quad (5)$$

式中: λ 为爆破切口圆心角角度,°; v_{λ} 为竖向倒塌速度,m/s。

该公式的拟合程度指标达到了0.889,表明其拟合程度较好,结构触地速度公式拟合曲面图如图13所示。

在保证爆堆范围和高度最优的同时,还应考虑结构倒塌速度过快而造成塌落振动过大问题。通过公式1和图13可以分析出,在最优爆破切口圆心角下,当爆破切口高度为17.45 m时,结构的竖向倒塌速度最小,为16.68 m/s,与爆破切口高度为17 m时的触地速度仅相差0.02 m/s。但同时随着爆破切口高度从17 m增长到18 m,爆堆高度也从2.2 m增长至3.6 m,呈现上升趋势。因此综合考虑到结构的触地速度和爆堆高度的影响,进一步佐证了最优的爆破切口高度为17 m。

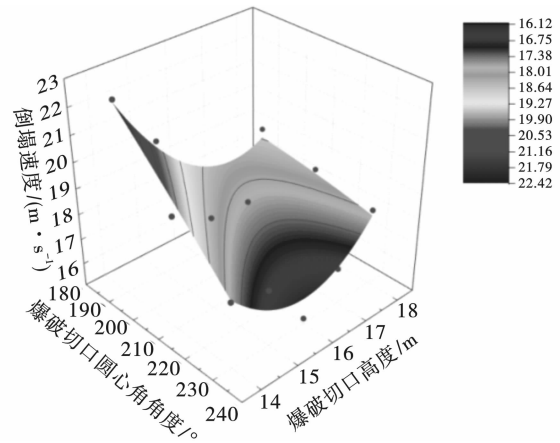


图13 结构触地速度公式拟合曲面图

Fig. 13 Fitted diagram of touchdown velocity

4 结论

(1)爆破切口圆心角对冷却塔爆堆范围的变化起着主要作用,爆破切口高度起次要作用。爆堆最高点基本位于倒塌中心线上,且分布在塔壁横向断裂位置附近,结构后方塔壁的裂隙出现位置和破碎程度决定了结构爆堆高度和爆堆高度最高点出现的位置。

(2)在爆破切口高度一定时,结构的竖向触地速度随爆破切口圆心角的增加而减小。通过对触地速度数据进行拟合,得到了结构倒塌速度关于爆破切口圆心角与高度的拟合公式,当爆破切口角度圆心角一定时,随着爆破切口高度的不断增加,结构的竖向触地速度呈现先减后增的趋势。

(3)综合对比爆堆高度、爆堆范围以及触地速度,此类冷却塔结构爆破拆除时的最优爆破切口圆心角为210°,最优爆破切口高度为17 m。

参考文献 (References)

- [1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2): 1-12.
- [1] XIE Xian-qi. Development and prospect of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2): 1-12. (in Chinese)
- [2] 高文乐, 朱茂迅, 李元振, 等. 发电厂双曲线型冷却塔的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.
- [2] GAO Wen-le, ZHU Mao-xun, LI Yuan-zhen, et al. Numerical analysis of directional blasting demolition and blasting effect of hyperbolic cooling tower in power plant[J]. Explosive Materials, 2020, 49(4): 52-57. (in Chinese)
- [3] 张宝岗, 赵明生, 余红兵, 等. 切口角度对冷却塔爆破

- 拆除影响研究[J]. 爆破, 2018, 35(1): 109-115.
- [3] ZHANG Bao-gang, ZHAO Ming-sheng, YU Hong-bing, et al. Study on effect of incision angle on blasting demolition of cooling tower[J]. *Blasting*, 2018, 35(1): 109-115. (in Chinese)
- [4] 费鸿禄, 高建军, 张超逸, 等. 冷却塔爆破拆除塔壁触地解体规律研究[J]. 爆破, 2019, 36(4): 86-95.
- [4] FEI Hong-lu, GAO Jian-jun, ZHANG Chao-yi, et al. Study on the law of touchdown disintegration of cooling tower wall by blasting and demolition [J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 86-95. (in Chinese)
- [5] 谢钱斌, 熊万春. 2座90 m高的双曲线冷却塔爆破拆除[J]. 工程爆破, 2018, 24(3): 44-49.
- [5] XIE Qian-bin, XIONG Wan-chun. Demolition of two 90 m high hyperbolic cooling towers by blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(3): 44-49. (in Chinese)
- [6] 蒋超, 郭子如. 冷却塔爆破拆除的数值模拟研究[J]. 爆破, 2014, 31(1): 92-95.
- [6] JIANG Chao, GUO Zi-ru. Numerical simulation of demolition of cooling tower by blasting [J]. *Blasting*, 2014, 31(1): 92-95. (in Chinese)
- [7] RUAN Jin-kui, SHENG Dong-fa. Prediction model of demolition stack for high-rise buildings under extremely close protection conditions [J]. *Iranian Journal of Science and Technology- Transactions of Civil Engineering*, 2023, 47(5): 2639-2647.
- [8] 段海霞, 强智铎, 姜夏冰, 等. 某冷却塔拆除爆破切口尺寸的数值模拟设计[J]. 煤矿爆破, 2022, 40(1): 15-19, 28.
- [8] DUAN Hai-xia, QIANG Zhi-duo, JIANG Xia-bing, et al. Numerical simulation design of cutting size for demolition blasting of a cooling tower [J]. *Coal Mine Blasting*, 2022, 40(1): 15-19, 28. (in Chinese)
- [9] 张建华, 谌彪, 黄刚, 等. 卸荷槽对冷却塔拆除爆破的数值模拟研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 122-128.
- [9] ZHANG Jian-hua, SHEN Biao, HUANG Gang, et al. Numerical simulation study on the demolition blasting of cooling towers by unloading slots [J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 122-128. (in Chinese)
- [10] SONG Qian-qian. The analysis of the destabilizing motion of a hyperbolic cooling tower during demolition blasting [J]. *Journal of Measurements in Engineering*, 2023, 11(4): 482-495.
- [11] 张焜琨, 张耀良, 夏云鹏, 等. 两座210 m高烟囱定向爆破拆除空中对碰技术研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(1): 96-103. DOI: 10. 19931/j. EB. 20220280.
- [11] ZhANG Kun-kun, ZHANG Yao-liang, XIA Yun-peng, et al. Two 210 m high chimney directional blasting demolition of air touch technology research [J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(1): 96-103. The DOI: 10. 19931/j. b. (20220280). (in Chinese)
- [12] 叶海旺, 吴家鹏, 郑长青. 钢筋砼烟囱拆除爆破切口高度优选及效果分析[J]. 工程爆破, 2023, 29(3): 117-122.
- [12] YE Hai-wang, WU Jia-peng, ZHENG Chang-qing. Height optimization and effect analysis of blast incision for reinforced concrete chimney demolition [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(3): 117-122. (in Chinese)
- [13] 汪高龙, 王潇, 李跟, 等. 复杂环境90 m高双曲线冷却塔拆除爆破[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 62-68.
- [13] WANG Gao-long, WANG Xiao, LI Gen, et al. Demolition blasting of 90 m high hyperbolic cooling tower in complex environment [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(1): 62-68. (in Chinese)
- [14] 崔建林, 林代恒, 欧正保. 61 m高双曲线冷却塔爆破拆除失败原因分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(5): 78-82.
- [14] CUI Jian-lin, LIN dai-heng, OU Zheng-bao. Cause analysis of blasting demolition failure of 61 m hyperbolic cooling tower [J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(5): 78-82. (in Chinese)
- [15] 高文乐, 李琛豪, 张建伟, 等. 切口形状对冷却塔爆破拆除倒塌效果的影响[J]. 爆破器材, 2023, 52(5): 57-64.
- [15] GAO Wen-le, LI Chen-hao, ZHANG Jian-wei, et al. Effect of cut shape on collapse effect of cooling tower demolition by blasting [J]. *Explosive Materials*, 2023, 52(5): 57-64. (in Chinese)
- [16] 刘桂勇, 李坤鹏. 复杂环境61 m高双曲线冷却塔拆除爆破[J]. 工程爆破, 2021, 27(6): 86-91. DOI: 10. 19931/j. EB. 20210362.
- [16] LIU Gui-yong, LI Kun-peng. Complex environment 61 m high hyperbolic cooling tower demolition blasting [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(6): 86-91. The DOI: 10. 19931 / j. b. (20210362). (in Chinese)
- [17] 储照权. 高耸钢筋混凝土烟囱爆破拆除的理论研究和数值模拟[D]. 宁波: 宁波大学, 2011.
- [17] CHU Zhao-quan. Theoretical research and numerical simulation of blasting demolition of tall reinforced concrete chimneys [D]. Ningbo: Ningbo University, 2011. (in Chinese)