

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.021

卸荷槽对冷却塔拆除爆破的数值模拟研究*

张建华¹, 谌彪¹, 黄刚¹, 周文涛², 姜婷婷¹, 罗余祥¹

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 北方爆破科技有限公司, 北京 100089)

摘要: 为了研究卸荷槽对冷却塔拆除爆破的作用及影响。以黔北某发电厂冷却塔为背景, 根据冷却塔双曲线薄壁型的结构特点, 从力学角度分析冷却塔的倒塌条件和倒塌机理, 运用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟的方法研究卸荷槽在冷却塔拆除爆破过程中所起的作用。分析不同数目卸荷槽下冷却塔的切口形成、闭合、扭曲变形、触底破碎的整个过程, 以及不同宽度、不同高度的卸荷槽对冷却塔的倒塌位移、倒塌速度、塌落振动、爆堆宽度的影响。研究表明: 不同宽度卸荷槽不会改变冷却塔运动趋势; 适量的卸荷槽数目和高度能够改变冷却塔倒塌中的运动状态、促进塔体解体、缩短倒塌时间以及降低爆破振动所造成的危害, 有效地提高冷却塔的爆破效果。

关键词: 拆除爆破; 双曲线冷却塔; 卸荷槽; 数值模拟

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)03-0122-07

Numerical Simulation Study on the Influence of Unloading Tank for Cooling Tower Blasting Demolition

ZHANG Jian-hua¹, CHEN Biao¹, HUANG Gang¹, ZHOU Wen-tao², JIANG Ting-ting¹, LUO Yu-xiang¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Northern Blasting Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: In order to study the effect and influence of the unloading tank on the demolition blasting of the cooling tower, the collapse condition and mechanism are analyzed from the mechanical point of view based on the structural characteristics of the hyperbolic thin wall in a cooling tower of a power plant in northern Guizhou Province. Using ANSYS/LS-DYNA numerical simulation method to study the role of unloading tank in the process of demolition blasting of cooling tower, the whole process of forming, closing, twisting, and touching ground failure of the cooling tower's incision was analyzed with different numbers of unloading tanks, as well as the influence of the unloading tank of different widths and heights on the collapse displacement, collapse speed, collapse vibration and explosion width of the cooling tower. The results show that the unloading tanks of different widths will not change the movement trend of the cooling tower; the appropriate number and height of the unloading tanks can change the movement state of the cooling tower collapse, promote the disintegration of the tower body, shorten the collapse time, reduce the blasting vibration hazard, and effectively improve the blasting effect of the cooling tower.

Key words: demolition blasting; hyperbolic cooling tower; unloading tank; numerical simulation

收稿日期: 2020-03-03

作者简介: 张建华(1963-), 男, 博士、教授, 从事采矿、爆破、安全等方面教学研究, (E-mail) zjhwt@sina.com。

通讯作者: 黄刚(1986-), 男, 博士研究生、副教授, 主要从事矿产资源开采、尾矿材料方面的研究工作, (E-mail) huang-gang2016@whut.edu.cn。

基金项目: 青年自然科学基金(NO. 51804235); 国家重点研发计划(NO. 2018YFC0808405); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(批准号: 2019IBV033)

随着时代的变化、科技的进步, 城市的建设发展也越来越成为国家发展的重点工程。在城市发展建设过程中一些较为老化且有一定危险性的工厂、楼房、冷却塔等需要重建, 对这些建筑物进行人工或机械拆除, 不仅速度较慢且会对人员或设备造成一定

的影响,因此选择爆破拆除技术是一个很好拆除方法^[1,2]。该技术因其高效、安全、经济及环保的优势得到快速发展^[3]。近年来,在高空建筑物拆除方面爆破拆除技术得到广泛使用,且完成了多起高危楼房、烟囱、冷却塔的拆除工作,也为拆除爆破技术提供了丰富的经验。然而我国许多高危楼在拆除爆破时由于技术理论不足,依靠爆破师的多年工作经验及总结公式来施工^[4-6],有时也不一定准确而造成爆破建筑物倒塌方向不对、飞石没有得到很好控制等爆破事故。因此,将数值模拟合理运用到工程实例中进行拆除爆破预演,进行试验得到合理的参数为爆破拆除提供有力依据使爆破拆除效果达到最大化,减少不必要的爆破事故发生。

国内大量研究学者在拆除爆破上做了很多研究。如徐轩^[7]、王宁^[8]、张文龙^[9]、高文乐^[10]、贾永胜^[11]、林谋金等人在爆破施工前运用数值模拟软件对需拆除的构筑物进行数值模拟分析^[12],实现拆除爆破的预演,将数值分析结果与实际进行比较,发现较为吻合。为研究卸荷槽对冷却塔拆除爆破的作用^[13],结合工程实例从力学角度分析冷却塔的倒塌条件及机理,并运用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟的方法分析卸荷槽在冷却塔倒塌过程中的作用,及不同宽度、不同高度的卸荷槽对冷却塔的倒塌位移、倒塌速度以及塌落振动和爆堆宽度的影响。

1 工程概况

1.1 工程简介

黔北某电厂冷却塔为钢筋混凝土结构,高 105.25 m,塔底径长 80 m,塔顶径长 51.26 m,喉部径长 45.58 m。该塔由 40 对人字柱支撑,高 7.3 m,其截面长 0.6 m。圈梁壁厚为 0.7 m,其厚度由塔底向塔顶逐渐缩小,通风筒的底部厚为 0.7 m,筒体最薄的壁厚 0.16 m。

1.2 周边环境

该冷却塔处在黔北某发电厂内,除东侧外其余三侧被围墙围绕,生活用水位于北侧 25 m 处,西侧 30 m 处是几排居民房,东侧是办公区、材料间、配电室等。周边环境较为复杂,如图 1 所示。

2 冷却塔爆破拆除倒塌机理分析

2.1 冷却塔的结构特点

结构材料在建筑物拆除爆破中起重要作用;以下对双曲线冷却塔结构材料进行描述:该冷却塔属于钢筋混凝土结构,厚高细比大约为 1.18 ~ 1.13,塔高约为 75 ~ 150 m;由于双曲线冷却塔筒身上下

直径不同,底部直径最大接着持续减小,到腰部直径为最小,至顶部继续增大但小于底部直径,从而导致塔身的重心偏低不同于普通的高耸建筑物。

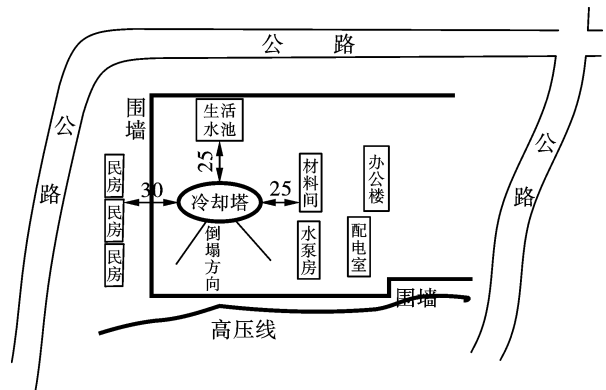


图 1 冷却塔现场图(单位:m)

Fig. 1 Cooling tower site map

由上述原因影响,冷却塔整体配筋率比较高,所以表现为塔身整体质量大、结构完整具有良好的塑性体现。

2.2 冷却塔倒塌分析

2.2.1 应力分析

在缺口形成后在重力的条件下由于冷却塔背部分受到拉应力的作用,当拉应力达到材料的极限抗拉强度时则会发生破坏,混凝土抗压性好抗拉性差,钢筋抗拉性好抗压性差所以对应的表现为冷却塔塔身出现裂缝混凝土开裂。见图 2。

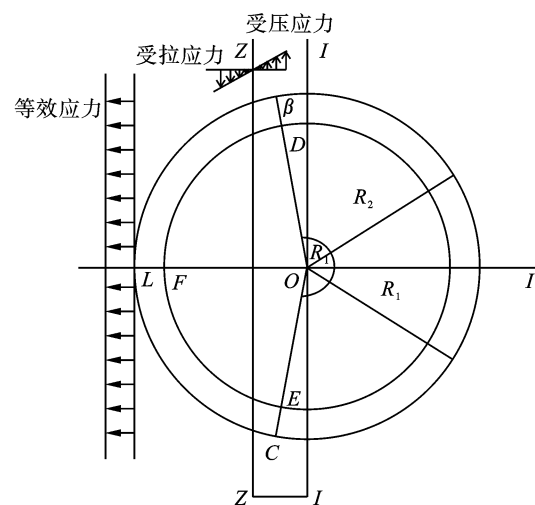


图 2 爆破切口截面图

Fig. 2 Sectional view of the blasting cut

如图 2 所示,取某段塔壁进行受力分析,根据拉应力公式

$$\sigma_M = \frac{M_g(r-e)}{I} - \frac{mg}{A} \quad (1)$$

式中： σ_M 为爆破切口处的最大拉应力，Pa； R 为爆破切口处外半径，m； e 为偏心距，m； M_g 为重力倾覆力矩，kN/m； I 偏心距，kN/m； A 为冷却塔结构配筋率等参数。

缺口形成后预留支腿受压区的最大压应力应当小于混凝土极限抗压强度以避免支腿受压破坏提前下座。即

$$\sigma_{c \max} \leq f_c \quad (2)$$

2.2.2 弯矩分析

冷却塔顺利倒塌弯矩条件：缺口形成后冷却塔在重力的情况下产生的倾覆弯矩必须大于结构自身的抵抗弯矩，即 $M_g \geq M_u$

(1) 拉应力区混凝土的极限弯矩

$$M_1 = 2 \int_0^\beta [R \cos \theta - e] f_t R \delta d\theta / (R - e) = 2 f_t R \delta [R \sin \beta - e\beta] / (R - e) \quad (3)$$

(2) 拉应力区钢筋的极限弯矩

$$M_2 = \rho f_y M_1 / f_t \quad (4)$$

(3) 压应力区混凝土的极限弯矩

$$M_3 = 2 f_u R \delta \int_\beta^{\alpha+\beta} [e - R \cos \theta]^2 d\theta / [e - R \cos \theta(\alpha + \beta)] \quad (5)$$

(4) 压应力区钢筋的极限弯矩

$$M_4 = \rho f_y M_3 / f_u \quad (6)$$

总弯矩和为

$$M_u = M_1 + M_2 + M_3 \quad (7)$$

式中： δ 为结构体的厚度，m； f_t 为混凝土的抗拉强度，MPa； f_u 为混凝土的抗压强度，MPa； β 为拉应力区圆心角的一半； α 为拉应力区两侧对应圆心角； F 为钢筋极限屈服强度，MPa。

3 卸荷槽下冷却塔的模拟分析

3.1 数值模型建立

为和实际工程实例进行对比，以黔北某电厂冷

却塔爆破拆除为例进行建模计算，如图 3 所示。

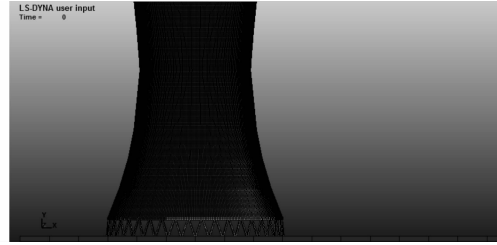


图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

3.2 不同数量卸荷槽对冷却塔拆除爆破的影响

3.2.1 数值模拟方案

在数值模拟的过程中，根据工程实际情况对卸荷槽进行数值模拟研究，在卸荷数目的研究中只改变卸荷槽的数目其他参数都不发生变化，根据此原则一共设置四个方案，具体方案如下表 1 所示。

表 1 不同卸荷槽数目

Table 1 Number of different unloading tanks

方案	缺口角度	卸荷槽数目
方案一	220°	无
方案二	220°	1
方案三	220°	3
方案四	220°	5

3.2.2 数值计算结果及分析

(1) 数值模拟方案一

图 4 为方案一中的倒塌过程。 $t = 0.5$ s 时，爆破切口形成，冷却塔发生倾倒； $t = 1.5$ s 时，冷却塔倒塌开始接触地面，但倒塌速度较缓慢； $t = 3$ s 时，冷却塔缺口上方受剪破坏消失对应的表现为冷却塔此处混凝土破碎，而冷却塔上部整体完整性较好并未有大的扭曲变形。之后的整个过程表现为原地坐塔而不是倾倒。

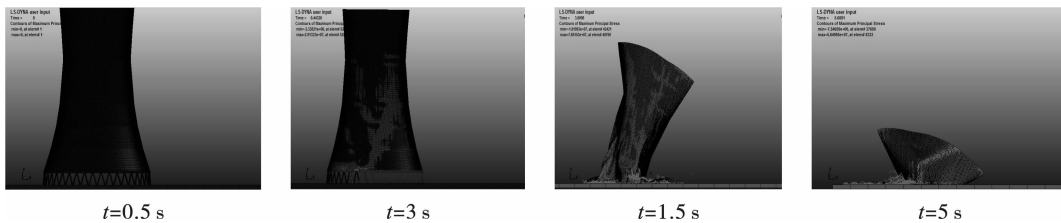


图 4 方案一中冷却塔倒塌模型

Fig. 4 Cooling tower collapse model in scenario 1

(2) 数值模拟方案二

上图 5 为第二方案的倒塌过程，在 0.5 s 时缺口形成； $t = 1.5$ s 时冷却塔切口闭合。由于方案二

开设了一个卸荷槽，弱化了冷却塔切口处上方的刚度，切口闭合后应力集中在卸荷槽上方，从而导致切口处率先破碎，且切口闭合后冷却塔上部分开始出

现明显的扭曲变形。随后冷却塔在重力的条件下继续倾覆撕裂倒塌。对比发现方案二和方案一两者的

运动趋势基本保持一致,并未发生太大的变化。

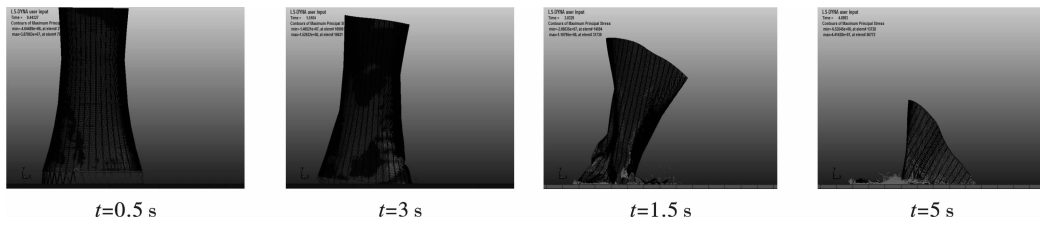


图 5 方案二中冷却塔倒塌模型

Fig. 5 Cooling tower collapse model in scenario 2

(3) 数值模拟方案三

如图 6 可以看出,当卸荷槽增加到 3 个时,冷却塔缺口依然在 0.5 s 时形成,缺口形成的一瞬间应力集中于预留支腿上方和切口上方。随后在重力的作用下切口在 1.5 s 时闭合,卸荷槽作为新支

撑点率先破碎,接着冷却塔背部受拉腹部受剪,冷却塔腹部产生新的裂隙开始扭曲撕裂变形,且随着冷却塔的倾倒上部扭曲程度略大于方案二,整体运动趋势也基本保持不变。

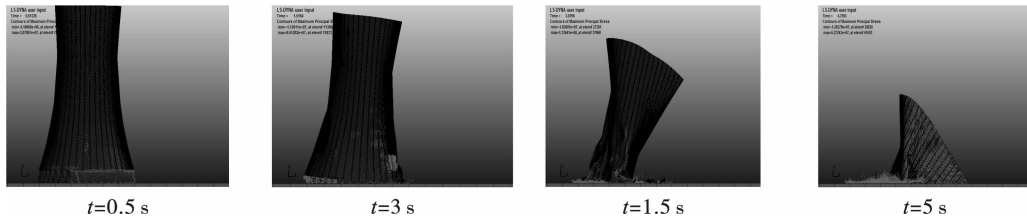


图 6 方案三中冷却塔倒塌模型

Fig. 6 Cooling tower collapse model in scenario 3

(4) 数值模拟方案四

从图 7 中可以看出,当卸荷槽为 5 个时,与上述方案相同,缺口在 0.5 s 时形成,此时应力集中与上述方案一致位于预留支腿上方和卸荷槽上方,随后冷却塔开始在重力弯矩的作用下开始倾覆,应力集中发生转移,此时主要位于缺口与预留支腿交界处预留支腿的上方且斜向上延伸。t = 1.5 s 时切口闭合,先触地的卸荷槽率充当新的支撑点,后背部分冷

却在重力的作用下继续向前倾覆,从而使得冷却塔两侧受剪部分受剪应力,而混凝土抗剪应力较差所以在此处表现为混凝土破碎形成一道裂缝,在重力下冷却塔发生倾覆而导致裂缝继续发育,继而在冷却塔腹部产生新的裂缝,在应力的作用下裂缝产生,形成塔腹凹陷区,进而塔腹被压碎,表现为塔体的倒塌过程。可明显看到。随后冷却塔上部也开始发生扭曲变形,且变形程度明显大于上述方案。

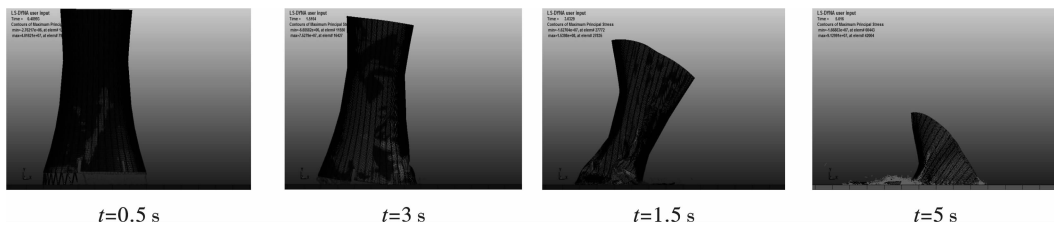


图 7 方案四中冷却塔倒塌模型

Fig. 7 Cooling tower collapse model in scenario 4

通过不同方案的模拟计算分析过程发现:冷却塔在倒塌过程中受卸荷槽的影响还是比较明显,当不设卸荷槽的时候,在冷却塔倒塌过程中由于刚度较好加上塔体本身破碎消耗太多能量,是倒塌速度

减慢。塔的上部整体完整性较好未有大的变形,在随后也均未发生大的变形过程,整个过程表现为原地坐塔而不是倾倒。随着卸荷槽的增加冷却塔的刚性也随之减弱,而这就导致了在切口闭合后冷却塔

腹部受压破碎程度和倒塌速度发生了一定的变化,随着卸荷槽数量的增加冷却塔的倒塌速度和破碎程度也随之增加。但当卸荷槽数量增加到一定的数量时冷却塔腹部的刚性大大降低,导致冷却塔在爆破前发生失稳提前坍塌造成事故。

通过对倒塌过程的模拟计算可以分析出:适量的卸荷槽可以减弱冷却塔的刚性,提高冷却塔的倒塌速度和破碎程度,有效促进冷却塔的解体破碎。

冷却塔的数值模拟可以有效的还原塔的倒塌过程。

3.3 不同宽度卸荷槽对冷却塔拆除爆破的影响

3.3.1 数值模拟计算

在此次模拟过程中只改变卸荷槽的宽度,其他参数皆与工程设计方案相同。方案一:卸荷槽宽1 m;方案二:卸荷槽宽2 m;方案三:卸荷槽宽3 m。方案如图8所示。

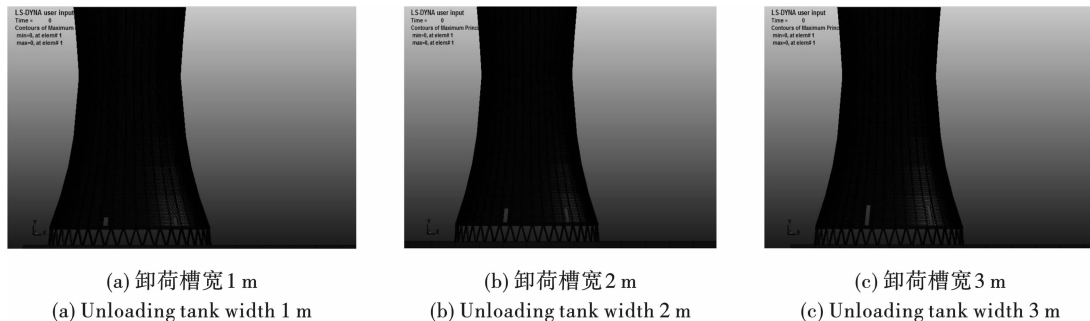


图8 数值模拟方案计算

Fig. 8 Numerical simulation scheme calculation

3.3.2 槽宽对倒塌位移的计算

选取模型中轴线方向冷却塔顶端单元点来计算

冷却塔的倒塌位移,该单元点的时间位移曲线如图9所示。



图9 不同宽度卸荷槽的位移、速度曲线

Fig. 9 Displacement and velocity curves of unloading tanks of different widths

通过上图9(a)对比可得,卸荷槽的宽度不同时运动趋势基本一致,冷却塔的倒塌速率和倒塌位移基本没有发生变化,所以改变卸荷槽的宽度对冷却塔的运动趋势基本不会造成影响。

3.4 不同高度卸荷槽对冷却塔拆除爆破的影响

通过改变卸荷槽的高度来研究槽高对冷却塔拆除爆破的影响,方案一:卸荷槽高3 m;方案二:卸荷槽高5 m;方案三:卸荷槽高7 m,其他参数均不改变,方案如图10所示。

通过对比三个不同高度卸荷槽的顶端单元点的

时间位移曲线图、地面60 m处单元点的y方向时间速度曲线图、以及爆堆宽度来研究不同高度卸荷槽对冷却塔拆除爆破的影响。具体对比如图11、图12所示。

根据图11(a)、11(b)可以发现卸荷槽高7 m时的倒塌位移和塌落振动最小,卸荷槽高5 m时的次之,这表明增加卸荷槽高度可以缩短倒塌位移降低爆破振动,而从图12中发现爆堆宽度三者并未有明显的变化。

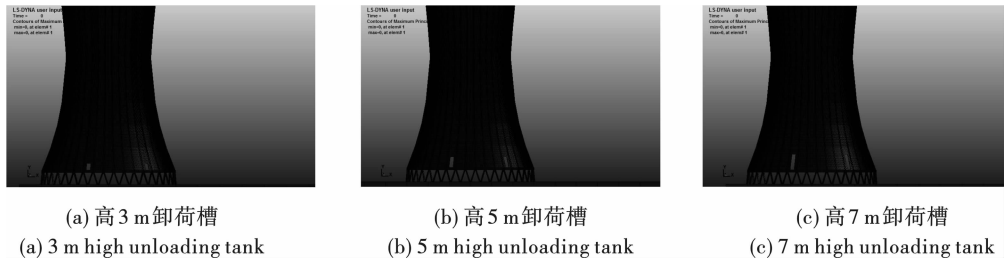


图 10 不同方案数值计算模型

Fig. 10 Numerical calculation model for different scenarios

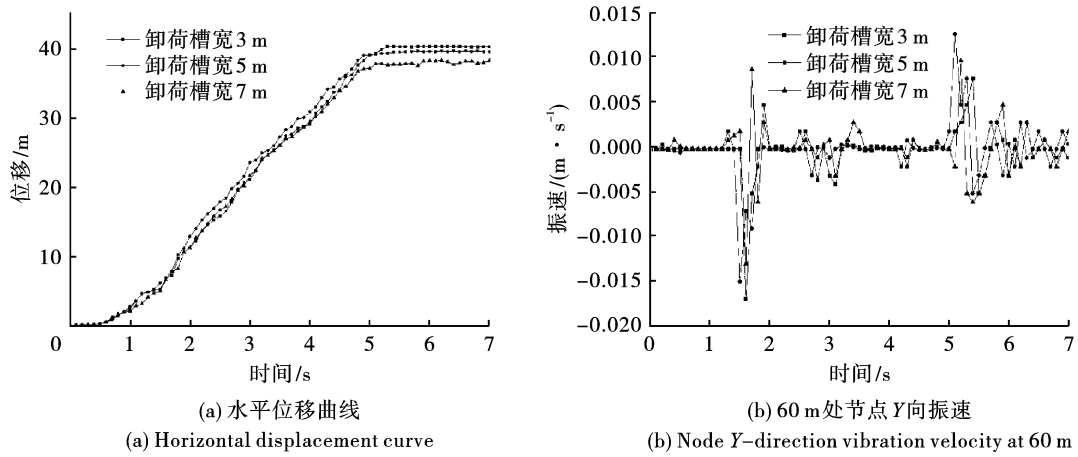


图 11 不同高度卸荷槽的位移、速度曲线

Fig. 11 Displacement and velocity curves of unloading tanks of different heights

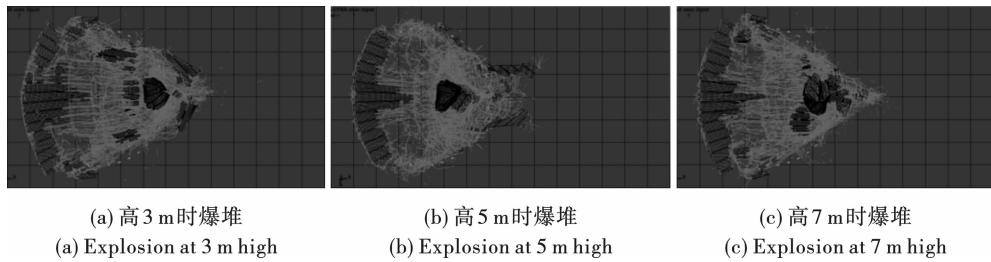


图 12 不同高度卸荷槽下的爆堆

Fig. 12 Explosion piles under different height unloading tanks

所以根据以上卸荷槽高对塔的倒塌位移和振速以及爆堆宽度可以分析出,一定高度的卸荷槽可以使塔的倒塌动态发生变化,促进解体进而提高倒塌速度,但对爆堆宽度并无明显影响。

4 结论

(1) 当塔体不设卸荷槽时冷却塔整体刚性比较完整,切口触底闭合后需要大量能量来破碎圈梁以及塔体,因此产生的阻力比较大导致冷却塔上部分基本未发生形变可能发生坐而不倒的情况,随着卸荷槽开设数量的增加冷却塔腹部的刚性得到一定弱化,在切口闭合后对冷却塔倾倒阻力减小有利于加速冷却塔的倒塌和破坏。

(2) 改变卸荷槽的宽度对冷却塔的运动趋势不

会造成太大影响,同时对冷却塔倒塌产生的爆破振动影响也不大,但宽卸荷槽可以提高破冷却塔的破碎程度。

(3) 通过对改变卸荷槽的高度可以看出,随着卸荷槽高的增加冷却塔的顶端触地时间减少,即高卸荷槽可以有效缩短冷却塔倒塌时间,减小水平位移量和降低爆破振动,但对爆堆的宽度并无明显的影响。

参考文献 (References)

[1] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 731.
 [2] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007: 324.
 [3] 何 松. 高耸烟囱爆破拆除的数值模拟研究[D]. 湖南: 湖南科技大学, 2017.

- [3] HE Song. Numerical simulation study on blasting demolition of towering chimney[D]. Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] 徐鹏飞. 拆除爆破中钢筋混凝土本构模型及应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- [4] XU Peng-fei. Constitutive model of reinforced concrete in demolition blasting and its application[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese)
- [5] 冯剑平. 桥梁结构的爆破拆除数值模拟优化研究[D]. 陕西: 长安大学, 2016.
- [5] FENG Jian-ping. Numerical simulation optimization of blasting demolition of bridge structures [D]. Shanxi: Chang'an University, 2016. (in Chinese)
- [6] 禹兵兵. 桥梁结构爆破拆除数值模拟的研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2018.
- [6] YU Bing-bing. Research on numerical simulation of bridge structure blasting demolition [D]. Hunan: Xiangtan University, 2018. (in Chinese)
- [7] 徐 轩, 徐 颖, 刘 伟, 等. 延期间隔对建筑物拆除爆破效果的影响[J]. 爆破, 2017, 34(1): 143-147.
- [7] XU Xuan, XU Ying, LIU Wei, et. Influence of delay interval on demolition blasting effect of buildings [J]. Blasting, 2017, 34(1): 143-147. (in Chinese)
- [8] 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.
- [8] WANG Yu, YAO Ying-kang, JIA Yong-sheng, et al. Study on the instability and sitting and air fracture phenomenon of reinforced concrete chimney by blasting demolition[J]. Blasting, 2018, 35(4): 116-123. (in Chinese)
- [9] 张文龙. 钢筋混凝土结构冷却塔爆破拆除设计与数值仿真[D]. 湖南: 南华大学, 2016.
- [9] ZHANG Wen-long. Design and numerical simulation of blasting demolition of reinforced concrete structure cooling tower [D]. Hunan: Nanhua University, 2016. (in Chinese)
- [10] 高文乐, 吴 超, 张泽华, 等. 复杂环境下烟囱的机械与定向爆破联合拆除[J]. 爆破, 2018, 35(4): 94-98.
- [10] GAO Wen-le, WU Chao, ZHANG Ze-hua, et al. Combination of mechanical and directional blasting of chimney in complex environment [J]. Blasting, 2018, 35(4): 94-98. (in Chinese)
- [11] 贾永胜, 谢先启, 李欣宇, 等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 285-288.
- [11] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, LI Xin-yu, et al. Simulation of controlled blasting demolition of building (construction) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 285-288. (in Chinese)
- [12] 林谋金, 薛 冰, 傅建秋, 等. 210 m 烟囱高位切口爆破拆除数值模拟与实践[J]. 爆破, 2018, 35(3): 103-107, 146.
- [12] LIM Mo-jin, XUE Bing, FU Jian-qiu, et al. Numerical simulation and practice of ultra-high incision blasting demolition of 210 m chimney [J]. Blasting, 2018, 35(3): 103-107, 146. (in Chinese)
- [13] 徐鹏飞. 高卸荷槽在冷却塔爆破拆除中的应用数值研究[D]. 河南: 河南理工大学, 2014.
- [13] XU Peng-fei. Numerical study on application of high unloading trough in blasting demolition of cooling tower [D]. Henan: Henan Polytechnic University, 2014. (in Chinese)

英文编辑: 张 燕

(上接第 98 页)

- [3] 叶海旺, 余红兵, 周建敏, 等. 复杂环境下危桥控制爆破拆除[J]. 爆破, 2015, 32(1): 116-120.
- [3] YE Hai-wang, YU Hong-bing, ZHOU Jian-min, et al. Explosive demolition of unsafe bridge in complex environment [J]. Blasting, 2015, 32(1): 116-120. (in Chinese)
- [4] 张兆龙. 复杂环境下基坑支撑梁爆破拆除[J]. 爆破, 2015, 32(4): 94-98.
- [4] ZHANG Zhao-long. Explosive demolition of foundation pit support beams under complex environment [J]. Blasting, 2015, 32(4): 94-98. (in Chinese)
- [5] 井红兵. 桥梁爆破拆除方案的设计[J]. 交通建设与管理月刊, 2014(12): 228-230.
- [5] JING Hong-bing. Design of blasting demolition of bridge [J]. Transport Construction & Management, 2014(12): 228-230. (in Chinese)
- [6] 张志毅, 王钟黔. 交通土建工程爆破工程师手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [7] 国家安全生产监督管理总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [8] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 1-4.
- [8] ZHOU Jia-han. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition [J]. Engineering Blasting, 2009, 15, (1): 1-4. (in Chinese)
- [9] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [10] 熊炎飞, 董正才, 王 辛. 爆破飞石飞散距离计算公式浅析[J]. 工程爆破, 2009, 15(3): 31-34.
- [10] XIONG Yan-fei, DONG Zheng-cai, WANG Xin. Analysis of the formula for calculating the flying distance of blasting rocks [J]. Engineering Blasting, 2009, 15, (3): 31-34. (in Chinese)

英文编辑: 柯 波