

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.020

减荷槽数量对双曲线冷却塔倒塌效果的影响研究*

高文乐¹,李坤鹏¹,刘志成¹,史卓金¹,李传水²

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,青岛 266590;2. 枣庄市金星爆破有限公司,枣庄 277100)

摘要: 双曲线冷却塔爆破拆除通常采用机械破碎锤预先在塔壁上开设减荷槽的方法简化爆破切口,为进一步研究不同数量减荷槽对双曲线冷却塔倒塌效果的影响,利用 ANSYS/ls-dyna 有限元分析软件,采用共节点整体式建立双曲线冷却塔的三维立体模型,对冷却塔的爆破拆除倒塌过程进行了数值模拟,同时与工程实际进行对比分析。通过改变减荷槽的数量对冷却塔的倒塌过程、爆堆形态、倒塌范围以及触地速度进行数值模拟,确定最佳的减荷槽切口数量。研究表明:冷却塔倒塌的最远距离、冷却塔触地速度与减荷槽数量均呈现正态分布,减荷槽数量为6个、7个时冷却塔倒塌距离最近,塔壁破碎彻底,触地速度小。另外,爆破圆周角在180°到270°,尤其在235°左右的情况下,最佳的减荷槽切口数量为6个或7个,与实际工程相吻合。

关键词: 减荷槽;双曲线冷却塔;整体式共节点;数值模拟;倒塌效果

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0116-11

Research on Influence of Number of Load Reducing Slots on Collapse Effect of Hyperbolic Cooling Towers

GAO Wen-le¹, LI Kun-peng¹, LIU Zhi-cheng¹, SHI Zhuo-jin¹, LI Chuan-shui²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Zaozhuang Venus Blasting Co., Ltd., Zaozhuang 277100, China)

Abstract: When conducting demolition of hyperbolic cooling towers, usually the mechanical breakers are used to preload load-reducing slots on the wall of the tower to simplify the blasting cut. To further study the effect of different numbers of load-reducing slots on the collapse effect of hyperbolic cooling towers, the finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA was adopted. A three-dimensional model of a hyperbolic cooling tower was established using a common node to simulate the collapse process of the cooling tower under demolition blasting. The results were compared with those of actual projects. Changing the number of load-reducing slots, the numerical simulation was conducted to determine the optimal number of cuts in the load-reducing slots by analyzing the collapse process of the cooling tower, the shape of the blasting pile, the collapse range and the ground contact speed. The results showed that the longest distance of the cooling tower collapse, the cooling tower ground contact speed and the number of load-reducing slots all present normal distribution. When the number of load-reducing slots was set as 6 or 7, the distance of the cooling tower collapse was the shortest and the tower wall was completely broken. The ground contact speed was also small. The results of the study show that the optimal number of cuts in the load-relief slots is 6 or 7 when the circumferential angle of the blasting is between 180° and 270°, especially around 235°, which is consistent with those of actual projects.

Key words: load-relief slot; hyperbolic cooling tower; integral common node; numerical simulation; collapse effect

拆除爆破技术近年来广泛应用在建(构)筑物的拆除工程中,但也带来了许多包括爆破振动、爆破飞散物等在内的有害效应。为了减少这些有害效应,在双曲线冷却塔爆破拆除工程中,通常采用机械破碎锤预先在塔壁上切除减荷槽进行爆破拆除。高文乐等统计了几十座国内冷却塔的爆破拆除的案例,归纳了冷却塔爆破拆除的特点和选择合理的爆破切口、爆破参数、起爆网路及振动控制的方法,最后总结了冷却塔在爆破切口、预拆除处理以及安全防护方面的内容。并运用动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对冷却塔的爆破拆除倒塌过程进行了数值模拟,进一步验证爆破拆除方案的合理性^[1,2]。孙志刚等通过设置生死单元的方法对双曲线冷却塔进行了模拟,得到塔体的最远倒塌距离与实际工程相符合^[3]。姬云峰首先对烟囱的切口角度进行了理论计算和验证,并首次提出可以利用减荷槽来防止烟囱反向倒塌^[4,5]。詹振铨等采用分离式共节点的建模方法对双曲线冷却塔爆破拆除进行了数值模拟,更加真实的体现了钢筋在冷却塔倒塌过程中的受力情况^[6]。赵楚等对两座高度为 42.5 m 的双曲线冷却塔采用定向爆破技术,2 座冷却塔倒按照爆破设计的方向顺利倒塌,爆堆粉碎程度较好,利于后期的清理工作,不用二次机械破碎^[7]。徐鹏飞等对 70 m 高的双曲线冷却塔的爆破拆除采用了高卸荷槽的方式,最高处的卸荷槽高 15.4 m,切口角度为 216°,炸掉 24 对人字柱的方法进行了成功拆除了当时国内体积最大的冷却塔^[8]。Utogawa 等采用离散单元法对冷却塔的模拟分析中解释了爆破切口角度是冷却塔能否按预期方向成功倒塌的关键,并在较高建筑物爆破倒塌的工程案例中总结了许多的安全解决突发问题方案^[9]。蒋超等对相同爆破切口角度不同的切口形状进行了数值模拟,得出 B 型爆破切口形式倒塌破碎效果最好,但是前期施工复杂^[10]。张建华等对双曲线冷却塔的爆破切口进行了改进,在塔壁上炸开数量较多的小切口,得出的数值模拟结果显示这种方法减小了对地面的振动^[11]。张建华等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^[12]。叶家明等为了确定合理的爆破缺口关键参数,通过应力条件计算出水塔爆破缺口的圆心角大小和刚度条件计算出水塔爆破缺口高度,并基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,对水塔的定向倒塌进行数值模拟^[13]。张宝岗等为了研究切口角度对冷却塔的拆除爆破影响,利用 Ansys/Ls-dyna 建立共节点分离式模型,对冷却塔的倒塌过程进行了简要分析^[14]。费鸿禄等针对爆破拆除冷却塔倒塌过程中的偏转形态与钢混材料破坏之间的关系,采用最大线应变理论方法建立关于母线 L 的函数表达式,利用 LS-DYNA 软件模拟倒塌过程中对材料设置多因素破坏条件,据此分析塔体在触地碰撞瞬间结构体的破碎位置及塑性较转角极值 $[\theta]$ ^[15]。张龙飞等利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对三种不同的延期时间下冷却塔爆破倒塌进行数值模拟,并对三种条件下冷却塔的倒塌效果进行对比分析^[16]。本文依托十里泉电厂 3#机组冷却塔爆破拆除工程,获取冷却塔失稳倒塌过程的图片数据,并对该冷却塔倒塌过程进行了数值模拟分析,以此探究不同数量的减荷槽对冷却塔倒塌效果的影响,为类似工程提供一定的参考。

1 有限元模型

1.1 计算模型建立

十里泉电厂 3#机组冷却塔,塔高 92 m,底部外径 73.6 m,顶部外径为 43.2 m,塔壁为双曲线型,下部壁厚 0.433 m,中间壁厚 0.14 m,上部壁厚 0.25 m,标高 5.8 m 以下为人字形支撑立柱。人字柱一共有 40 对,其断面尺寸为 0.4 m × 0.4 m。环形梁高度为 1.8 m,厚度为 0.5 m,混凝土强度等级为 C30。

首先在 SolidWorks 软件中建立双曲线冷却塔的三维立体模型,将生成的 step 格式三维立体模型导入 Hypermesh 中,然后在 Hypermesh 中将爆破设计中预拆除的部分包括:减荷槽、定向窗、圈梁、中间的一对人字柱以及圈梁上的切除部分,按照工程实际情况对模型进行处理,以保证模拟的准确性。最后,单元类型都选择实体 solid164 单元,建立的有限元模型如图 1 所示。

1.2 模型的材料选择

钢筋混凝土模型采用 96 号模型材料 MAT_BRITTT LE_DAMAGE,这种模型是一种理想的钢筋混凝土材料模型,这种材料模型可以支持钢筋截面

收稿日期:2020-07-04

作者简介:高文乐(1966-),男,教授、硕士,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:李坤鹏(1995-),男,硕士在读,主要从事岩土力学和爆破安全技术的科研工作,(E-mail) 1263294166@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(51874189)

配筋率的设定和人字柱失效定义。地面采用 Hypermesh 中的 RIGIDWALL 刚性地面材料,卡片中阻挡的物体中选择 All,保证地面以上任何物体都不会穿透地面,地面的摩擦系数为0.5,模型中材料的参数选取如表1。

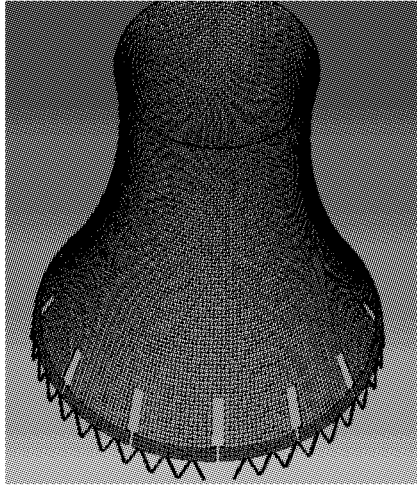


图1 冷却塔前处理的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of cooling tower pretreatment

1.3 边界条件

冷却塔倒塌过程中的边界条件复杂多变,会出现各种情况,统一在地面和人字柱最底端和地面接触的部分采用完全固结的边界条件,限制人字柱的一切转动和水平或垂直方向的移动,边界条件的设置如图2所示。

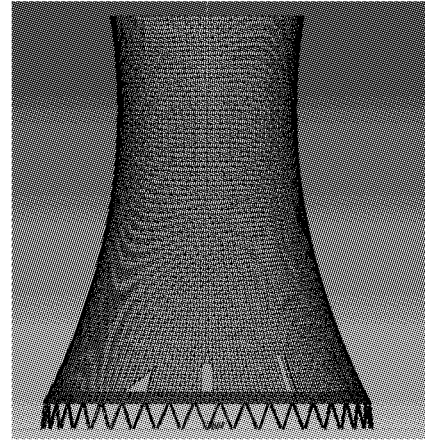


图2 施加边界条件

Fig. 2 Imposed boundary conditions

表1 96号材料钢筋混凝土的材料模型参数选取

Table 1 Selection of material model parameters for material No. 96 reinforced concrete

弹性模量 E/Pa	屈服应力 σ_y/Pa	切线模量 E_t/Pa	材料密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 ν	硬化 参数 β	失效应变 $\varepsilon_f/\%$
2.5e10	5.34e7	1.5e8	2.5e3	0.2	0	0.25

1.4 接触与加载方式

倒塌时塔壁、圈梁和人字柱之间会相互剪切、挤压和碰撞,最终触地碰撞。刚性地面 RIGIDWALL 中阻挡了任何物体,Hypermesh 中的 RIGIDWALL 是二维的平板,不是 ANSYS 中的三维有厚度的板,避免了对地面网格划分的不均匀或不合理,同时也避免了对地面材料的选用与数据定义,减少了计算时间。由于塔壁在倒塌过程中裂缝不断发展,塔壁在未触地之前相互扭曲、相互接触,所以定义塔壁自身的接触为 CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 为自动单面接触。倒塌时圈梁和人字柱也会接触,因为建立的模型为装配体,圈梁和人字柱是相互独立的。它们之间的接触定义为 CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE 这里的关键字 TIED 将圈梁和人字柱绑定,这样圈梁和人字柱就不会分开,保证两个部件的受力特点更符合实际情况。最后定义塔壁与圈梁之间的接触,塔壁和圈梁之间采用的是共节点的模型,所以塔壁和圈梁之间的接触类型采用的是自动面面接触 CONTACT_AUTOMATIC_

SURFACE_TO_SURFACE。

为了让冷却塔倒塌需要给模型施加扰动和重力加速度。因为冷却塔是静止不动的,根据牛顿第一定律,需要施加一个很小的力来打破这个静止状态。很小的重力加速度 $e-6 \text{ m/s}^2$ 。静止状态打破后,需要加载重力加速度 9.81 m/s^2 。

2 工程概况

2.1 周围环境

十里泉电厂 3#机组冷却塔东面 20 m 是 4#冷却塔;北面 80 m 是厂办公大楼,办公大楼与 3#冷却塔之间有大量设施;南面 3 m 是一条东西方向的供热管道,再向南 40 m 是电厂围墙,院墙与供热管道之间堆放着数千立方土石垃圾,高出地面 3~4 m,围墙外是精密铸造西厂以及东西交通大道泉头东路,泉头东路对面是橡胶厂,已停止使用多年;距塔基外缘 25 m 有一条东西方向的架空光缆,距地面高 6 m;在西北方向距塔基外缘 19 m 是车库,在东北方向距塔 19 m 是水井,靠近冷却塔 3 m 和 6 m 的地下,还

有一趟6 kV 电缆和一趟循环水管横穿东西,周围环境十分复杂,见图3。

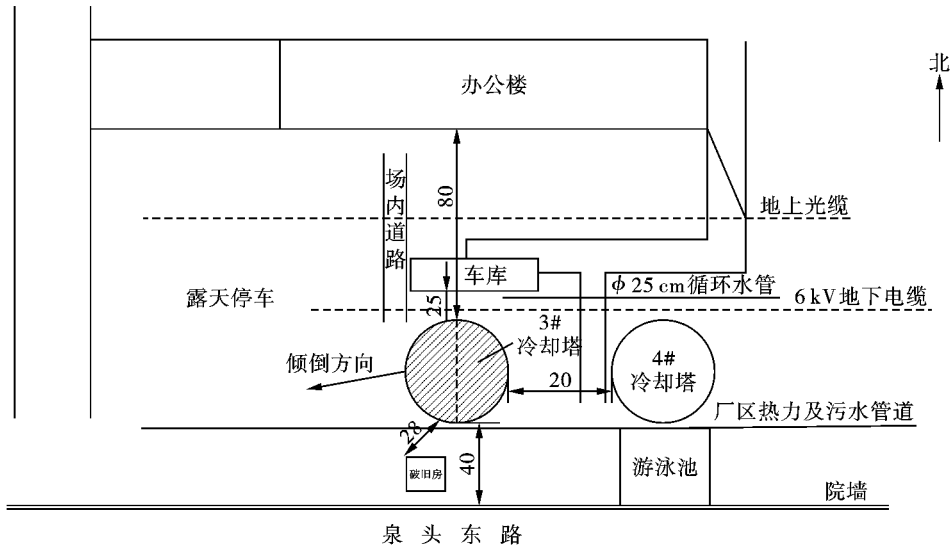


图3 3#号冷却塔平面位置图(单位:m)

Fig. 3 3# cooling tower plan location(unit:m)

2.2 结构特点

十里泉电厂3#机组冷却塔,塔高92 m,底部外径73.6 m,顶部外径为43.2 m,塔壁为双曲线型,下部壁厚0.433 m,中间壁厚0.14 m,上部壁厚0.25 m,标高5.8 m 以下为人字形支撑立柱,简称人字柱。人字柱一共有40对,其断面尺寸为0.4 m×0.4 m,整个筒体靠环梁下的人字形立柱支撑。环形梁高度为1.8 m,厚度为0.5 m,混凝土强度等级为C30。塔内淋水装置支柱共152根,蓄水池深2 m。混凝土总量约3100 m³,重量约7440 t,整体结构图见图4。

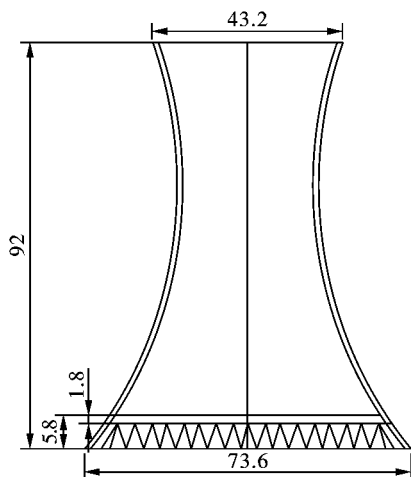


图4 3#号冷却塔整体结构图(单位:m)

Fig. 4 Overall structure of No. 3# cooling tower(unit:m)

2.3 爆破方案

2.3.1 爆破方案选择

调取拆除冷却塔附近的卫星云图,现场量测各

种数据结合现今可以采取的施工方式,该工程有两种拆除方案:机械拆除方案和定向倒塌爆破方案。

第一种方案:机械拆除方案。

采用机械破岩锤将下部的塔壁和圈梁凿出缺口,当缺口范围的不断增大,冷却塔塔壁剩余没有拆除的部分无法支撑上部塔壁的重力倾倒下落坍塌,从而达到拆除的目的。

该方案的优点:方案设计简单;不需要进行爆破审批;施工准备期短。

缺点是:由于使用机械设备拆除冷却塔,缺口形成时间长,使塔体不能快速按照倒塌方向倒塌,倒塌距离不好确定,可能导致倒塌缺口弯曲,倒塌过程中造成偏移或空中解体,容易造成机械损坏和人员伤亡以及对周边建筑造成损坏。机械拆除没办法准确判断冷却塔倒塌的时间点,任意时刻都可能倒塌,尤其是这种服役年限比较久的建筑,另一个原因是机械拆除人员没办法快速撤离。

第二种方案:定向倒塌爆破方案。

爆破钻孔前,将冷却塔爆破部分与保留部分采用人工办法彻底分离,也就是在冷却塔壁上切出减荷槽和定位窗,取消在塔壁上钻孔装药来炸出爆破切口的方式。然后在爆破冷却塔下部,只将爆破设计规定的爆破角度范围内的人字柱用炸药炸除。缺口范围内的钢筋混凝土在爆破作用下,混凝土与钢筋分离,钢筋在重力作用下弯曲,从而使整个塔体在重力形成的弯矩作用下发生定向倒塌,从而达到爆破拆除目的。

该种方案的优点:爆破缺口形成时间非常快,定

向准确,能够保证冷却塔塔壁在倒塌过程中不对周围任何物体产生较大的危害,较为安全。

缺点:爆破方案设计较为复杂,需要较大的爆破倒塌场地。

根据现场勘查和结合目前施工方法,采用倒塌方向为西偏南 10° 的定向倒塌爆破方案。为减少倒塌长度和宽度,每个减荷槽的形状应取矩形,切口长度取 151 m。

2.3.2 预拆除方案

为使冷却塔顺利坍塌,必须进行以下人工机械预拆除:用机械凿岩锤拆除冷却塔内部 152 根顶柱、四个提水井、铸铁篦子和导水槽;在爆破切口圈梁上方(直径 67.75 m),用油锤开凿 7 个减荷槽,中间减荷槽高 7.8 m,宽 1.8 m,对称向两侧相邻减荷槽之间高度减少 1.2 m。中间预留支撑墙 6 个,每个支撑墙的宽度是 16~17 m;这种爆破方案为“预开定向窗和预留支撑墙”。为减少炮眼数目和保证冷却塔倒塌的方向,将减荷槽内的人字支柱打掉中间一对,机械拆除减荷槽施工图如图 5,减荷槽示意图如图 6。

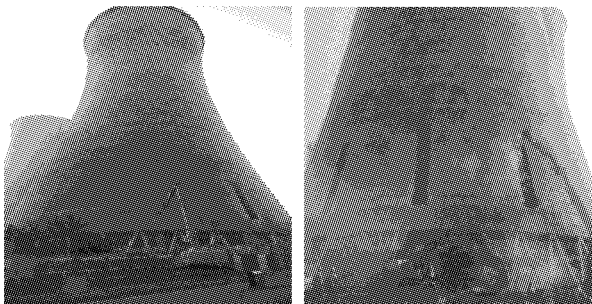


图 5 机械拆除减荷槽施工图

Fig. 5 Construction drawing of mechanical removal of load-relief groove

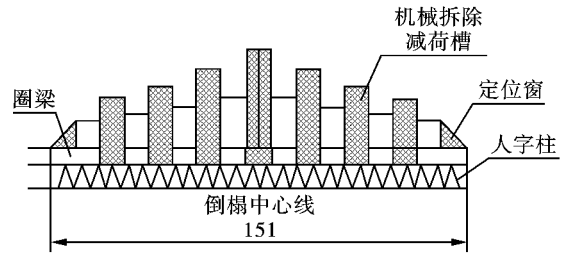


图 6 减荷槽示意图(单位:m)

Fig. 6 Schematic diagram of load-relief slot (unit:m)

2.3.3 爆破参数

(1) 支撑墙的炮眼布置

在环形圈梁的上方,用机械凿岩锤开凿 7 个减荷槽后,减荷槽之间出现了 6 个支撑墙,爆破专家根据多年经验,支撑墙可以不用布置炮孔,即可以满足缺口高度要求,开 7 个窗口后剩余 6 个支撑墙,每个支撑墙的长度是 16.8 m。

(2) 环形圈梁炮眼布置

环形圈梁不设置炮孔,取代的是用破岩锤将圈梁打断,这样不会破坏冷却塔稳定性。确保冷却塔圈梁有足够支撑力的前提下,可以更好地控制冷却塔塔壁的倒塌方向。去掉了用钻孔机在圈梁上钻炮孔的工序,也不需要装药,减少了炸药用量。

(3) 人字支柱的炮眼布置

需要打眼爆破的人字支柱是 27 对,人工预拆除一对后,还剩 26 对。炸掉人字柱范围如图 7 所示。它们的爆破参数是:炮眼间距 $a=0.3$ mm,炮眼深度 $L=0.27$ m,每个支柱的炮眼数目取 $N=10$ 个,26 对支柱炮眼 $26 \times 2 \times 10 = 520$ 个,每孔装药 0.04 kg,共装药 20.8 kg。爆破切口角度取 235° ,冷却塔爆破切口角度和人字柱炮眼布置如图 7 所示。

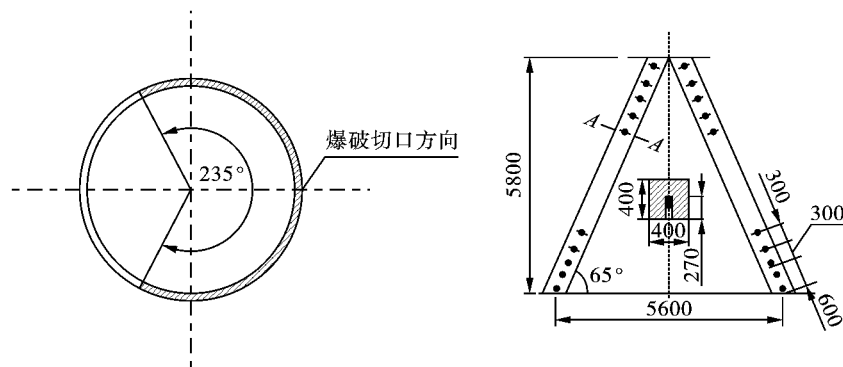


图 7 冷却塔人字柱爆破角度及人字柱炮眼布置图(单位:mm)

Fig. 7 Blasting angle of the cooling tower herringbone and the layout of the herringbone blasthole (unit:mm)

3 数值模拟结果与实际倒塌过程对比分析

3.1 不同数量减荷槽下的倒塌过程对比

这6个不同数量的减荷槽均采用前面数值模拟的材料类型、单元类型、各种参数均保持不变,变量只有减荷槽的数量,用数值模拟的方法研究不同数量减荷槽对倒塌效果影响的差异。这六个不同数量减荷槽的尺寸布置是减荷槽宽度都为1.8 m,中间最高处的减荷槽高度为7.8 m,从中间向两端依次减少1.2 m的方式布置减荷槽,减荷槽布置的角度范围都为 235° ,减荷槽之间的间距均匀布置,数量分别是5、6、7、8、9、10个。

3.1.1 不同减荷槽的倒塌过程分析

不同数量减荷槽的倒塌过程如图8~图13所示,在其他条件相同的情况下,由不同数量减荷槽的

倒塌过程可以分析出:5个减荷槽时,由于减荷槽数量少,地面对减荷槽剩余部分的支撑作用最大,导致倒塌的速度慢,冲击力小,触地后解体不彻底。6、7、8个减荷槽的倒塌速度逐渐增加,但是6个和7个减荷槽时随着冷却塔的倒塌,塔壁的扭曲撕裂导致塔顶的破坏效果最好,触地时破碎更彻底。8个减荷槽的虽然切口多,但没有比6、7个减荷槽破碎效果好,从倒塌形态上分析是冷却塔塔壁的裂缝出现的过早,裂缝过大的原因。扭曲撕裂现象并不明显,冷却塔后侧的塔壁会压到前侧的塔壁,触地时会起到缓冲的作用。9个、10个减荷槽触地时与地面的接触面积较大,压强也就越小,导致最终破碎的效果较差;加上倒塌过程中裂缝出现的过早造成上部的扭曲撕裂破坏效应减弱,导致冷却塔下部破碎效果较好,上部由于塔体叠加触碰导致破碎效果比6、7、8个减荷槽的要差。

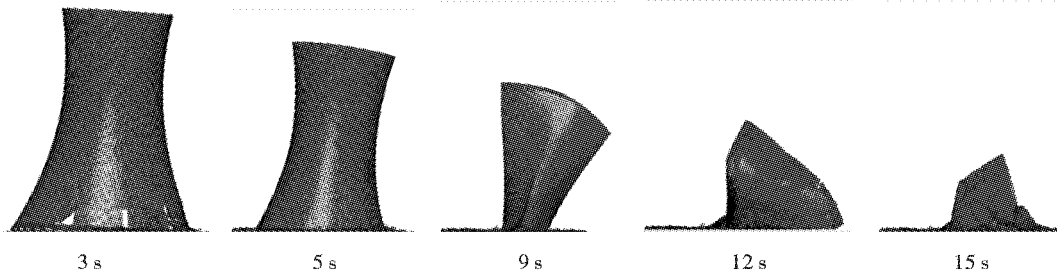


图8 5个减荷槽时倒塌过程图

Fig. 8 Collapse process diagram with 5 relief grooves

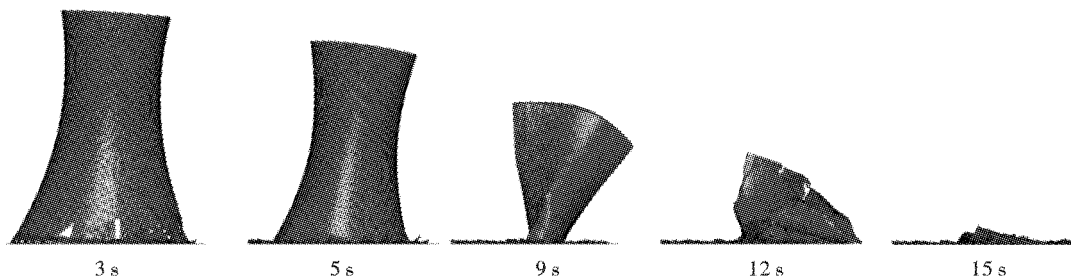


图9 6个减荷槽时倒塌过程图

Fig. 9 Collapse process diagram with 6 relief grooves

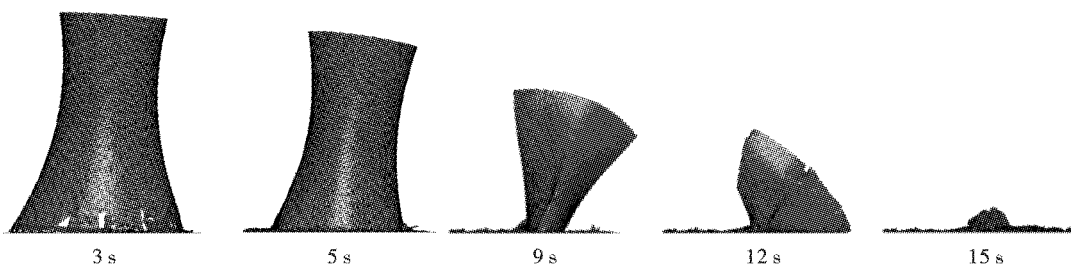


图10 7个减荷槽时倒塌过程图

Fig. 10 Collapse process diagram with 7 relief grooves

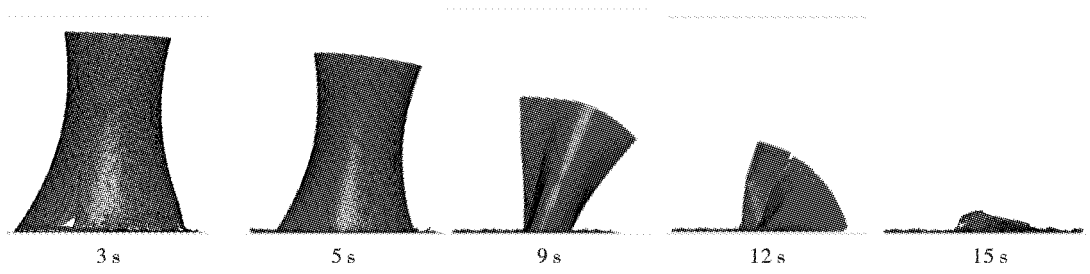


图 11 8 个减荷槽时倒塌过程图
Fig. 11 Collapse process diagram with 8 relief grooves

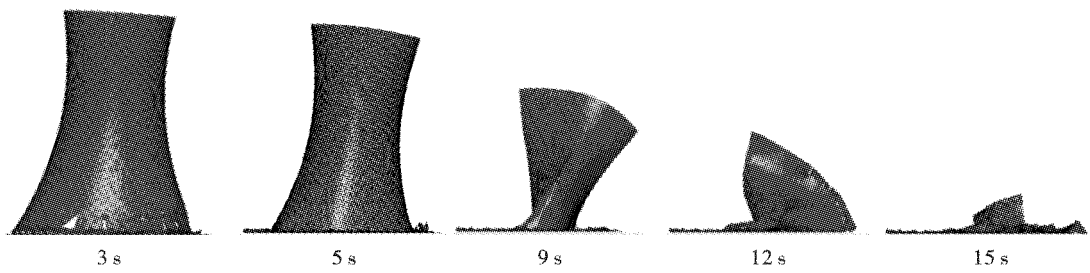


图 12 9 个减荷槽时倒塌过程图
Fig. 12 Collapse process diagram with 9 relief grooves

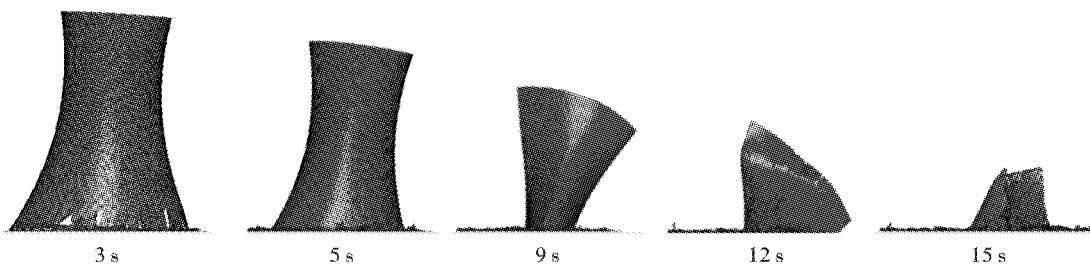


图 13 10 个减荷槽时倒塌过程图
Fig. 13 Collapse process diagram with 10 relief grooves

3.1.2 不同减荷槽爆堆形态及倒塌范围的对比

对比模拟结果,相同时刻下,每组的倒塌变形过程都和实际视频中的倒塌变形过程相同。其中仿真的倒塌结果和爆破真实过程中相同部位减荷槽的触地破碎、肋部裂缝的产生与发展、塔壁的扭转与撕裂

均相同。因此,所建立的数值模拟模型可以很好地仿真工程实际,可以作为分析冷却塔拆除过程时的参考。减荷槽的爆堆形态及倒塌范围如图 14 ~ 图 19 所示。

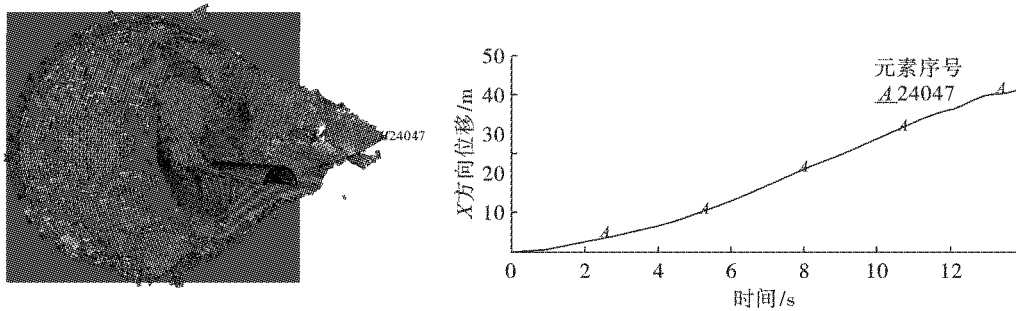


图 14 5 个减荷槽的爆堆形态及倒塌范围
Fig. 14 Burst shape and collapse range of 5 relief tanks

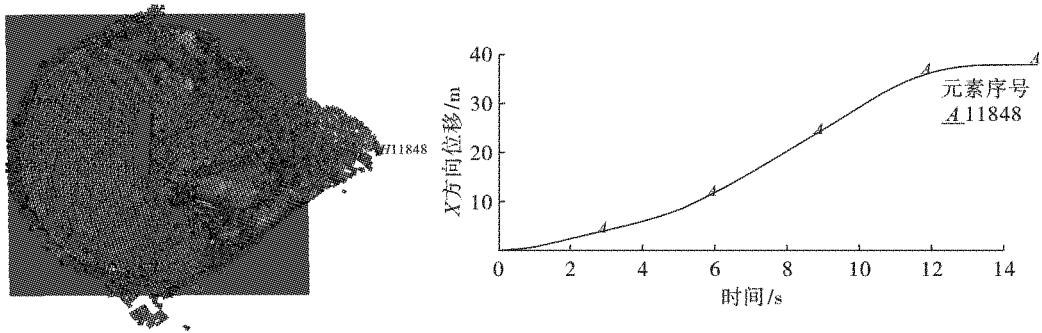


图 15 6个减荷槽的爆堆形态及倒塌范围

Fig. 15 Burst shape and collapse range of 6 relief tanks

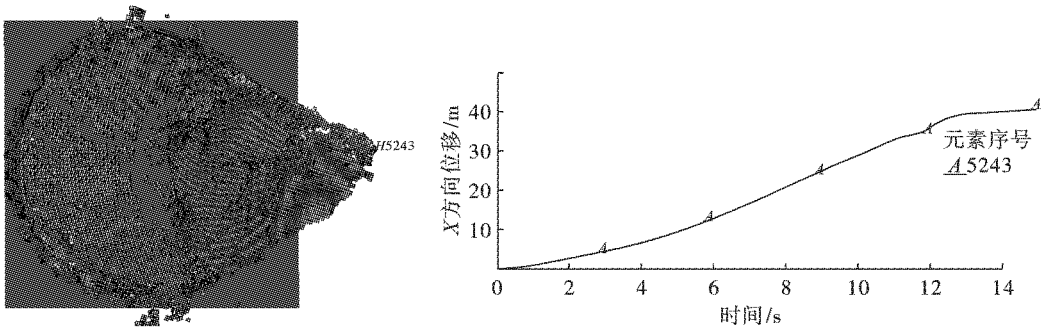


图 16 7个减荷槽的爆堆形态及倒塌范围

Fig. 16 Burst shape and collapse range of 7 relief tanks

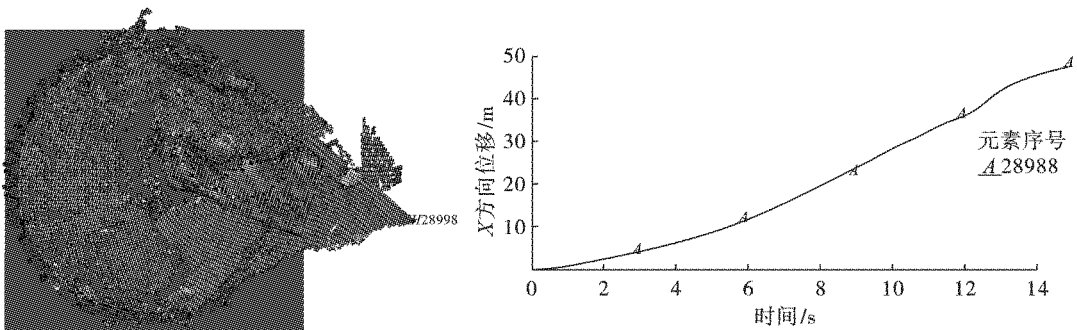


图 17 8个减荷槽的爆堆形态及倒塌范围

Fig. 17 Burst shape and collapse range of 8 relief tanks

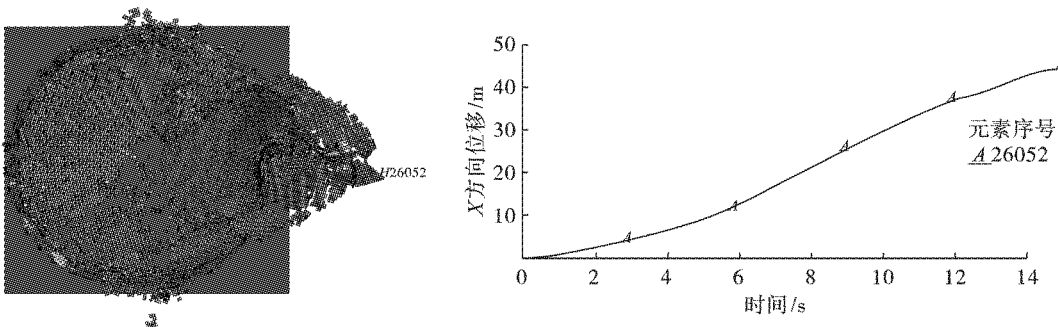


图 18 9个减荷槽的爆堆形态及倒塌范围

Fig. 18 Burst shape and collapse range of 9 relief tanks

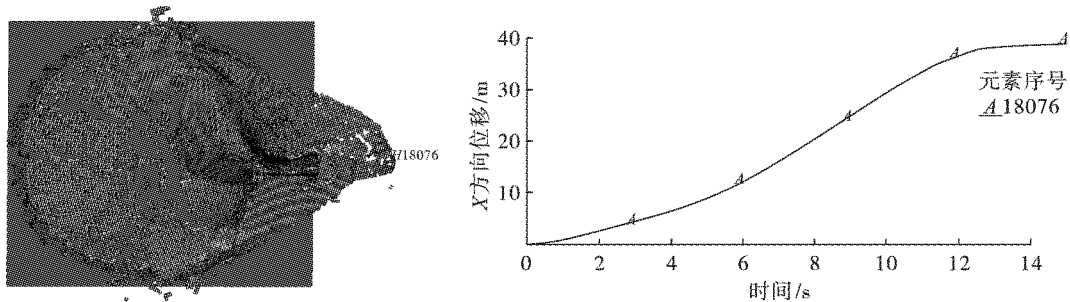


图 19 10 个减荷槽的爆堆形态及倒塌范围

Fig. 19 Burst shape and collapse range of 10 relief tanks

选取爆堆最远点对应的单元,生成其对应的 X 轴方向的倒塌距离。冷却塔倒塌的最远距离统计表,如表 2。

表 2 冷却塔倒塌的最远距离

Table 2 The longest distance that the cooling tower collapsed

减荷槽数量	5 个	6 个	7 个	8 个	9 个	10 个
倒塌最远距离/m	41	38	40.5	49	45	39

通过对冷却塔倒塌的爆堆形态和倒塌范围可以得出,倒塌的最远距离和减荷槽数量呈正态分布,在保证安全的前提下,分析得出 6 个和 7 个减荷槽时的冷却塔倒塌的破碎效果及爆堆的形态是最佳的。

5 个和 10 个减荷槽时虽然倒塌距离较短,但是会出现塔壁的破碎不彻底,爆堆形态太高的现象。9 个减荷槽的倒塌距离和爆堆形态与 6、7 个减荷槽相比效果更差。

3.1.3 不同数量减荷槽触地速度的对比

冷却塔爆破时的触地振动相比于炸药爆炸产生的振动,对周围建筑物的破坏更加严重。因此振动速度也是评价一个爆破工程是否成功的指标。冷却塔倒塌时的速度越快对地面的振动也会越大。所以利用冷却塔塔壁的触地速度来代替物体对地面的振动影响,倒塌速度越大则对地面的振动就越大。图 20 为不同数量的减荷槽下的塔壁的触地速度。

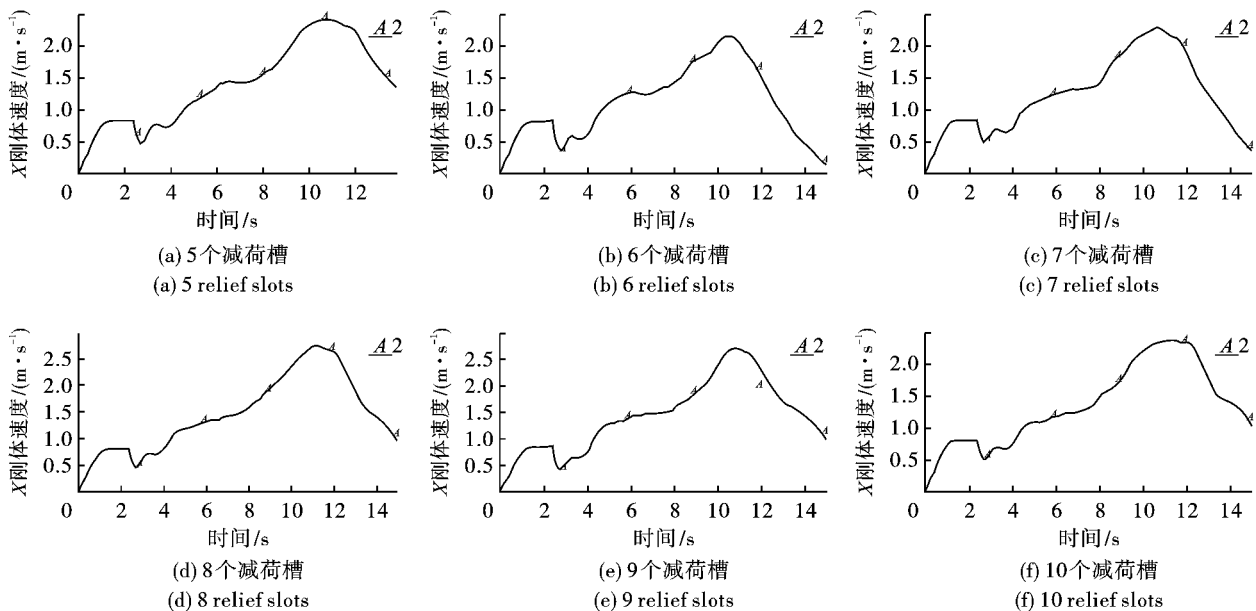


图 20 不同数量的减荷槽下的塔壁的触地速度图

Fig. 20 The ground contact velocity of the tower wall under different numbers of load-reducing grooves

不同数量减荷槽下的塔壁触地速度如图 20 所示,分析得出 5~10 个减荷槽对应的倒塌触地速度为:2.4 m/s、2.2 m/s、2.25 m/s、2.8 m/s、2.75 m/s、2.4 m/s,符合正态分布。6 个和 7 个减荷槽对应的触地速度相对较小,且大小相近;5 个、8 个、9 个、

10 个减荷槽的情况下倒塌速度相对较大。不同减荷槽对应的倒塌速度如表 3。

3.2 倒塌过程

截取相同时刻双曲线冷却塔爆破倒塌数值模拟的结果与工程实际爆破倒塌的视频截图进行分析,

过程模拟准确。倒塌过程如图 21 所示。

表 3 不同减荷槽对应的倒塌速度
Table 3 Collapse speed corresponding to different blasting incisions

减荷槽数量	5个	6个	7个	8个	9个	10个
倒塌速度/(m·s ⁻¹)	2.4	2.2	2.25	2.8	2.75	2.4

4 结论

以枣庄十里泉发电厂钢筋混凝土双曲线冷却塔的爆破拆除工程实例为背景,得出了与实际爆破效

果一致的数值模拟结果,得出结论如下:

(1)分析了数值模拟结果中不同数量减荷槽的倒塌结果,得出冷却塔倒塌的爆堆形态和倒塌范围。5~10个减荷槽对应的倒塌最远距离为40.5 m、38 m、41 m、49 m、45 m、39 m。冷却塔倒塌的最远距离与减荷槽数量呈正态分布,减荷槽数量为6、7个时,倒塌距离与爆堆形态达到最好的效果。5个和10个减荷槽的情况下倒塌破碎效果较差,存在大量的塔壁没有破坏,以倒塌范围小为评判标准得出6个和7个减荷槽时的冷却塔倒塌的破碎效果及爆堆的倒塌范围是最佳的。

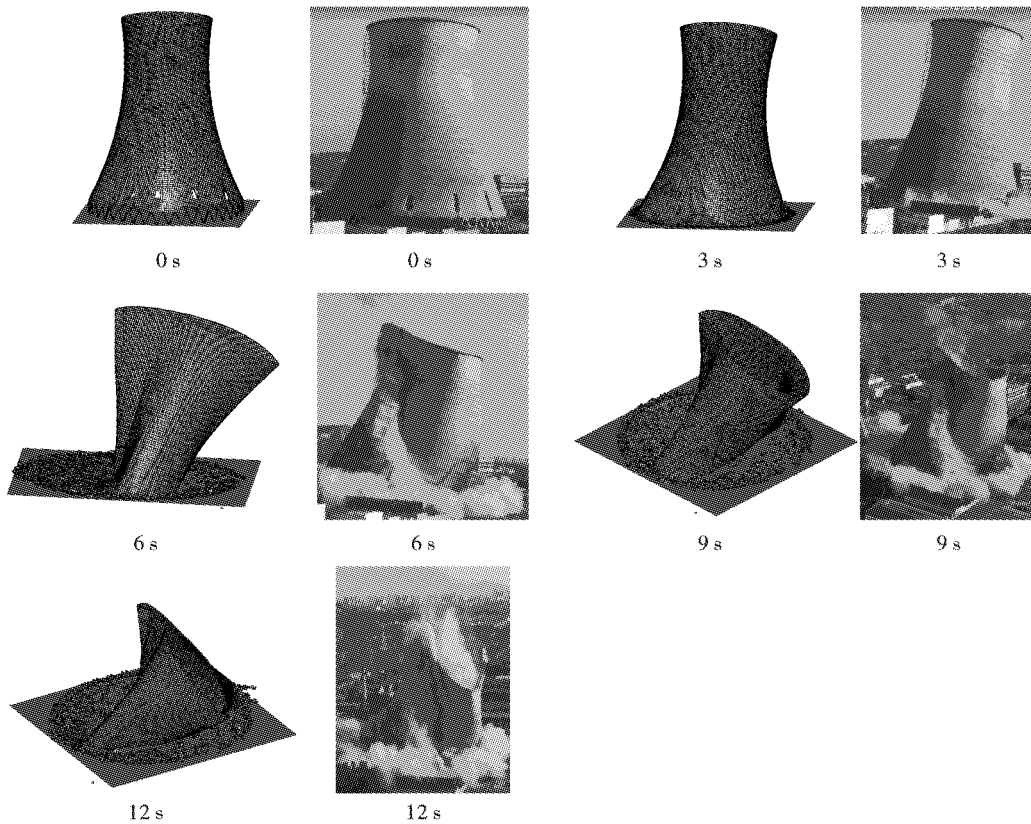


图 21 冷却塔倒塌过程

Fig. 21 The collapse of the cooling tower

(2)分析了数值模拟结果中不同数量减荷槽的倒塌结果,5~10个减荷槽对应的倒塌速度分别为2.4 m/s、2.2 m/s、2.25 m/s、2.8 m/s、2.75 m/s、2.4 m/s,冷却塔倒塌速度与减荷槽数量呈正态分布,6、7个减荷槽的情况下冷却塔倒塌速度最慢,且速度十分接近。8个、9个减荷槽时塔壁倒塌速度快,不利于周围建筑物的保护。综合对比分析,以触地速度小为评判标准得出最佳的减荷槽数量为6个或7个。

(3)经过综合对比分析得出最终的结论:通过各项评价爆破效果指标的对比,6个或7个减荷槽

对应的破碎效果较好,倒塌范围为38 m和41 m,触地速度为2.2 m/s和2.25 m/s。综合这三个主要的评价标准,在双曲线冷却塔拆除爆破过程中,采用破碎锤预先开设减荷槽,爆破圆周角在180°到270°,尤其在235°左右的情况下,最佳的减荷槽切口数量为6个或7个,与实际工程相吻合

参考文献 (References)

[1] 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.

- [1] GAO Wen-le, ZHU Mao-xun, LI Yuan-zhen, et al. Directional blasting demolition of hyperbolic cooling towers in power plants and numerical analysis of blasting effects [J]. *Blasting Materials*, 2020, 49(4): 52-57. (in Chinese)
- [2] 高文乐, 葛家才, 柳 姬, 等. 国内冷却塔拆除爆破设计综述[J]. *爆破*, 2012, 29(2): 67-71.
- [2] GAO Wen-le, GE Jia-cai, LIU Ji, et al. A summary of blasting design for dismantling cooling towers in China [J]. *Blasting*, 2012, 29(2): 67-71. (in Chinese)
- [3] 孙细刚, 张光雄, 王汉军, 等. 爆破拆除双曲线冷却塔倒塌过程动态仿真[J]. *工程爆破*, 2009, 15(1): 10-12, 84.
- [3] SUN Xi-gang, ZHANG Guang-xiong, WANG Han-jun, et al. Dynamic simulation of the collapse process of demolition hyperbolic cooling tower [J]. *Engineering Blasting*, 2009, 15(1): 10-12, 84. (in Chinese)
- [4] 姬云峰. 减荷槽[J]. *爆炸与冲击*, 1986(3): 257-261.
- [4] JI Yun-feng. Load-reducing slot [J]. *Explosion and Shock*, 1986(3): 257-261. (in Chinese)
- [5] 姬云峰. 拆除烟囱时的减荷槽[J]. *焦作矿业学院学报*, 1986(2): 40-46.
- [5] JI Yun-feng. Load-reducing groove when removing the chimney [J]. *Journal of Jiaozuo Mining Institute*, 1986(2): 40-46. (in Chinese)
- [6] 詹振铨, 赵明生, 池恩安, 等. 数值模拟在冷却塔爆破拆除中的应用[J]. *爆破*, 2012, 29(1): 73-76.
- [6] ZHAN Zhen-qiang, ZHAO Ming-sheng, CHI En-an, et al. The application of numerical simulation in the demolition of cooling towers [J]. *Blasting*, 2012, 29(1): 73-76. (in Chinese)
- [7] 赵 楚, 孙 伟. 42.5 m 高相邻两冷却塔定向爆破拆除[J]. *价值工程*, 2019, 38(3): 99-101.
- [7] ZHAO Chu, SUN Wei. Demolition of two adjacent cooling towers with a height of 42.5 m by directional blasting [J]. *Value Engineering*, 2019, 38(3): 99-101. (in Chinese)
- [8] 徐鹏飞, 唐英, 张英才, 等. 冷却塔高卸荷槽切口爆破拆除倒塌受力破坏过程研究[J]. *爆破*, 2019, 36(4): 96-102, 107.
- [8] XU Peng-fei, TANG Ying, ZHANG Ying-cai, et al. Study on the failure process of the collapse force of the cooling tower high unloading slot incision blasting [J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 96-102, 107. (in Chinese)
- [9] UTOGAWA N. Simulation of demolition of reinforced concrete buildings by controlled explosion [J]. *Microcomputers in Civil Engineering*, 1992: 151-153.
- [10] 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.
- [10] JIANG Chao, GUO Zi-ru. Numerical simulation study of blasting demolition of cooling tower [J]. *Blasting*, 2014, 31(1): 92-95. (in Chinese)
- [11] 张建华, 叶永喜, 罗余祥, 等. 小缺口爆破技术对冷却塔拆除的影响数值模拟研究[J]. *爆破*, 2019, 36(2): 85-91.
- [11] ZHANG Jian-hua, YE Yong-xi, LUO Yu-xiang, et al. Numerical simulation study on the influence of small gap blasting technology on cooling tower dismantling [J]. *Blasting*, 2019, 36(2): 85-91. (in Chinese)
- [12] 张建华, 湛 彪, 黄 刚, 等. 卸荷槽对冷却塔拆除爆破的数值模拟研究 [J/OL]. *爆破*: 1-7. [2020-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200805.1138.004.html>.
- [12] ZHANG Jian-hua, CHEN Biao, HUANG Gang, et al. Numerical simulation study of cooling tower demolition blasting by unloading trough [J/OL]. *Blasting*: 1-7. [2020-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200805.1138.004.html>. (in Chinese)
- [13] 叶家明, 戴春阳, 李洪伟, 等. 伞形水塔拆除爆破关键参数计算与数值模拟 [J/OL]. *爆破*: 1-12. [2020-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200803.1248.010.html>.
- [13] YE Jia-ming, DAI Chun-yang, LI Hong-wei, et al. Calculation and numerical simulation of key parameters for blasting demolition of umbrella-shaped water tower [J/OL]. *Blasting*: 1-12. [2020-09-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20200803.1248.010.html>. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] ZHANG Bao-gang, ZHAO Ming-sheng, YU Hong-bing, et al. Research on the influence of incision angle on blasting demolition of cooling tower [J]. *Blasting*, 2018, 35(1): 109-115. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] FEI Hong-lu, GAO Jian-jun, ZHANG Chao-yi, et al. Research on the disintegration law of the tower wall contacting the ground when the cooling tower is demolished by blasting [J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 86-95. (in Chinese)
- [16] 张龙飞, 张超逸, 费鸿禄, 等. 延期时间对冷却塔爆破倒塌效果影响的研究[J]. *爆破*, 2018, 35(3): 108-113, 184.
- [16] ZHANG Long-fei, ZHANG Chao-yi, FEI Hong-lu, et al. Study on the effect of delay time on the collapse effect of cooling tower blasting [J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 108-113, 184. (in Chinese)