

冷却塔高卸荷槽复式切口爆破控制振动机理研究

褚怀保¹, 侯爱军², 徐鹏飞¹, 张英才¹, 梁为民¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 洛阳理工学院 土木工程系, 河南 洛阳 471023)

摘要: 以能量理论、数值计算结果和现场振动测试结果为基础结合大量工程实践对冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术的控制振动机理进行了综合分析。高卸荷槽复式切口能有效调控塔体应力状态, 增大塔体倒塌过程中的解体程度和速度, 降低塔体塌落触地动能, 同时增大塔体触地冲击过程中促使冲击结构进一步解体的能量, 并降低碰撞后转化为波动的能量, 而且能改变塔体倒塌触地冲击形式和冲击过程, 分散塔体触地冲击能量, 延长塔体倒塌触地冲击时间, 减小塔体触地冲击强度。

关键词: 冷却塔; 控制爆破; 高卸荷槽复式切口; 控制振动机理

中图分类号: TU746

文献标志码: A

DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2014.09.036

Vibration control mechanism of composite cut blasting technology of high load relieving groove of a cooling tower

CHU Huai-bao¹, HOU Ai-jun^{1,2}, XU Peng-fei¹, ZHANG Ying-cai¹, LIANG Wei-min¹

(1. College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Department of Civil Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Here, the mechanism of vibration control for composite cut blasting technology of high load relieving groove of a cooling tower was analyzed comprehensively based on the energy theory, numerical results, the measured vibration results and engineering practice. The study results showed that firstly, this technology can adjust and control the tower body's stress state, increase the disintegration failure level and speed in the tower collapse process, then reduce the tower kinetic energy when it touches the ground; secondly, it can increase the disintegration failure energy of a shocked structure, and reduce the vibration wave energy; further more, it can change the impact forms and the impact process of a tower body, disperse the ground shock energy, extend the impact time of tower body touching the ground, and decrease the impact strength of tower body.

Key words: cooling tower; control blasting; composite cut of high load relieving groove; mechanism of vibration control

用控制爆破法拆除高大建(构)筑物时,地振动效应不可避免对周围环境产生影响,主要是因为建(构)筑物爆破切口范围内炮孔中炸药爆炸和建(构)筑物在倒塌过程中与地面冲击引起的。实践经验表明^[1-5],冷却塔等高大建(构)筑物爆破拆除过程中,其塌落触地冲击所引起的振动比爆破引起的振动大很多,且属于低频波,是对周围环境产生危害性振动影响的主要因素。因此,如何有效控制高大建(构)筑物倒塌触地振动效应已成为爆破工作者致力研究的热点。

冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术是在爆破缺口

范围内预开设多个以倒塌中心线为基准向两侧呈阶梯状分布的高卸荷槽,使之与定向窗组成复式爆破切口,如图1和图3所示。在大量工程实践的基础上总结确定了钢筋混凝土冷却塔高卸荷槽参数,卸荷槽高度 $h = 10 \sim 25 \delta$, δ 为冷却塔圈梁厚度;卸荷槽数量 $N = (N_0/4) - 2$, N_0 为爆破切口内人字支柱数量,工程中在稳定验算的基础上隔跨设置卸荷槽;卸荷槽宽度在稳定性验算的基础上以切槽设备而定,且切槽时只需破坏槽内的混凝土即可。

在塔体上预开始高卸荷槽首先可以降低炸药用量,有效控制炸药爆炸所引起的地表振动效应。同时,预开设高卸荷槽可以改善冷却塔解体程度和速度,调控塔体重力荷载分布和应力状态,最终控制冷却塔倒塌解体和触地冲击过程,有效控制冷却塔爆破拆除地

振动效应。本文利用能量理论、数值计算结果和现场振动测试结果对冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术的控制振动机理进行综合分析。

1 建(构)筑物爆破拆除塌落触地碰撞的波动能量

爆破拆除塌落体触地碰撞的能量关系,是研究触地振动的重要部分。在碰撞过程中,建(构)筑物塌落过程释放的位能要对结构做功,以形成塑性铰,和转化为使梁、柱、墙体等结构破坏、破碎、解体等的变形能,以及塌落触地的动能等。在形成触地振动的过程中,塌落触地的动能部分被土体吸收,吸收的能量以三种波的形式向四周传播^[6-7]。

将建(构)筑物假定为集中质量体 m , 则其爆破拆除塌落过程释放的总能量,即建(构)筑物具有的初始位能 E_0 。

$$E_0 = mgh \quad (1)$$

如果建(构)筑物塌落触地动能 E_1 的能量系数 η , 则 $E_1 = \eta E_0$, 即:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \eta mgh, \quad v = \sqrt{2\eta gh} \quad (2)$$

式中: E_1 为塌落触地的动能, E_0 为建构筑物失稳前的总势能, m 为建构筑物的质量, v 为触地的接触速度, g 为重力加速度系数, h 为失稳前建构筑物质心高度。 η 为转化为后两部分的能量系数。

建(构)筑物塌落触地碰撞过程时,塌落触地的动能 E_1 不能完全转化为波动能量,该能量将分为地面变形的能量 E_{1-1} 、土体对建构筑物产生反作用促使结构进一步解体的能量 E_{1-2} 和用来产生触地地震波的能量 E_{1-3} 三部分^[8]。触地碰撞过程中能量和动量守恒,设塔体触地碰撞土体能量转换为土体对建筑物产生反作用促使结构进一步解体能量和产生触地地震波能量的系数 β , 得:

$$\frac{1}{2}\beta mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2M_d v_d^2} \quad (3)$$

$$mv = mv_1 + M_d v_d \quad (4)$$

$$M_d = \rho_d A_d h_d \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得, $v_d = Kv$, K 是与 m 、 M_d 和 β 等因素有关的系数, $K = f(m, M_d, \beta)$, 且 K 是一无量纲数, 根据量纲分析相似率并假定 K 为指数数据变量关系, 由量纲和谐条件得 $K = \beta(m/M_d)^\lambda$ 。

则可得:

$$v_d = \beta \left(\frac{m}{M_d} \right)^\lambda v \quad (5)$$

$$E_{1-3} = 0.5M_d [\beta(m/M_d)^\lambda v]^2$$

式中: v_1 为地面土体对建(构)筑物产生反作用产生的

速度; v_d 为地面土体获得的速度; M_d 为被撞击地面土体的质量; ρ_d 为土体的密度; A_d 为碰撞面积, 为与地面接触到塔壁弧形面积; h_d 为土体的厚度, 通常取第一层土的深度; λ 为待定系数, 通过实验或现场测试数据回归得到。

2 冷却塔高卸荷槽复式切口爆破拆除倒塌数值计算

利用 DYNA 软件对高卸荷槽冷却塔爆破拆除倒塌过程进行数值计算, 考虑钢筋混凝土冷却塔结构与材料特征, 本构模型选用弹塑性损伤模型, 选用实体单元建立钢筋混凝土和地面的三维实体模型。对人字柱底座和地面施加约束, 定义面面接触, 动静摩擦因数为 0.6。在 K 文件中添加 *Mat_Add_Erosion 定义时间失效准则控制高卸荷槽和人字柱组成的复式爆破切口的形成, 数值计算时, 爆破缺口范围内塔体人字支柱隔跨开设一个高卸荷槽, 冷却塔高卸荷槽复式切口爆破塔体模型和应力云图如图 1 所示。

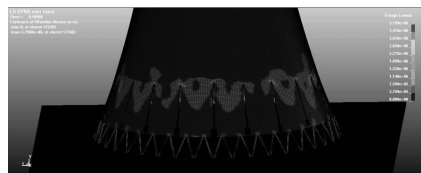


图1 预设高卸荷槽塔体应力云图
Fig. 1 The diagram of cooling tower stress with high load relieving groove

为了便于分析冷却塔倒塌触地冲击过程和冲击状态, 根据数值计算结果, 取数值计算 1.6 s (a)、2.2 s (b)、2.8 s (c) 和 4.9 s (d) 时的倒塌触地冲击图片, 如图 2 所示。

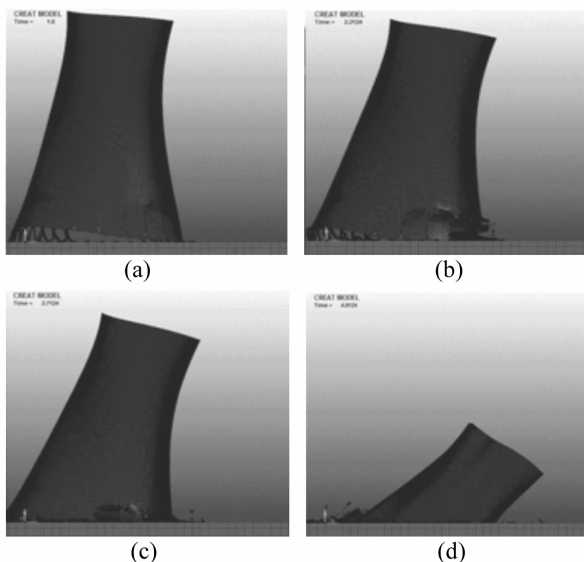


图2 冷却塔爆破倒塌触地过程

Fig. 2 Collapse and touchdown process of cooling tower

为了对比分析数值计算效果和精确程度,取大武口电厂冷却塔爆破拆除摄影图片如图3所示,时间分别为0.45 s、1.8 s、2.2 s、3.1 s和5.4 s,这里主要对比

冷却塔的倒塌过程,所以没有严格对照数值计算时间进行取图。

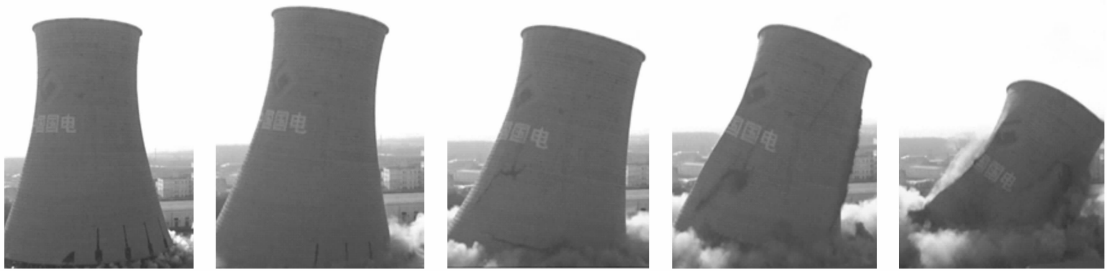


图3 冷却塔爆破拆除摄影照片

Fig. 3 Photographs of cooling tower blasting demolition

3 冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术控制振动机理分析

(1)冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术在塔体上预开设高卸荷槽可以调控塔体应力状态,增大塔体倒塌过程中的解体程度和解体速度,降低冷却塔塌落触地动能。

从图1可以看出,在冷却塔塔体上预开设高卸荷槽可以调控塔体重力荷载分布及塔体上的应力状态,在每个高卸荷槽的顶端均发生应力集中,两个高卸荷槽中间塔体上应力也有较大程度的增大,这都有利于加大冷却塔倒塌过程中塔体的解体程度和速度,进而大大降低冷却塔塔体倒塌触地冲击强度,有效控制倒塌触地振动效应。

从式(1)和(2)可以知,增大了塔体倒塌过程中的解体程度和解体速度,增大位能对结构的做功增,也就减少了转化为触地动能的能量,土体波动的能量也随即得到有效控制。

(2)冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术改变塔体倒塌触地冲击形式和冲击过程,延长塔体触地冲击时间,减小塔体触地冲击强度,有效控制塔体爆破倒塌触地振动效应。

从图1可以看出在塔体爆破切口范围内预开设高卸荷槽,将完整的塔壁变成了一个的塔体壁柱,宏观上弱化了塔体的整体强度和刚度,避免了强度和刚度均非常大的圈梁的直接接触地冲击,而塔体壁柱的强度较低,在触地冲击的同时自身即被破坏,降低了塔体与地面的冲击强度。

从图2和图3可以看出,预开设高卸荷槽后整个冷却塔的倒塌触地冲击过程可分为3段,即切口闭合时塔体壁柱触地冲击(图2(a))、切口处断开的塔体圈

梁触地冲击(图2(b))和塔体连续倒塌触地冲击(图2(c),(d))。使冷却塔倒塌触地过程由原来的切口闭合圈梁刚性触地冲击和塔体连续倒塌触地冲击变为塔体壁柱触地冲击、断开的圈梁触地冲击和塔体连续触地冲击的连续倒塌冲击过程,分散了塔体触地冲击能量,延长了塔体倒塌触地冲击时间,有效控制了塔体爆破倒塌触地振动效应。

(3)冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术增大了塔体触地冲击过程中促使冲击结构进一步解体的能量,并降低了碰撞后土体获得的转化为波动的能量。

从式(4)和(5)可以看出,增大塔体触地冲击地面的面积 A_d ,可以增大撞击土体的质量,而转化为波动的能量与撞击土体的质量成反比,预设高卸荷槽后避免了塔体倒塌中心线处圈梁直接点冲击触地状态,实现塔体壁柱触地,增大了塔体触地冲击面积,也即增大了冲击土体的质量,进而降低了冲击土体形成波动的能量。且预开设高卸荷槽降低了塔体的整体的整体刚度和强度,改变塔体刚性圈梁触地形式为塔体壁柱触地,实现了塔体边倒塌壁柱边破坏的连续倒塌过程,且在冲击受压状态下壁柱的破坏程度增强,也即是增大了促使结构进一步解体的能量 E_{1-2} ,也必然降低冲击土体形成波动的能量。

4 冷却塔高卸荷槽复式切口爆破拆除振动测试

高卸荷槽复式切口爆破技术在焦作电厂(图4(a))、宁夏大武口电厂(图4(b))和开封电厂(图4(c))等32座冷却塔爆破拆除中进行了成功应用。爆破后冷却塔的倒塌过程和触地状态在一定程度上得到科学控制,有效降低了冷却塔倒塌触地振动效应。

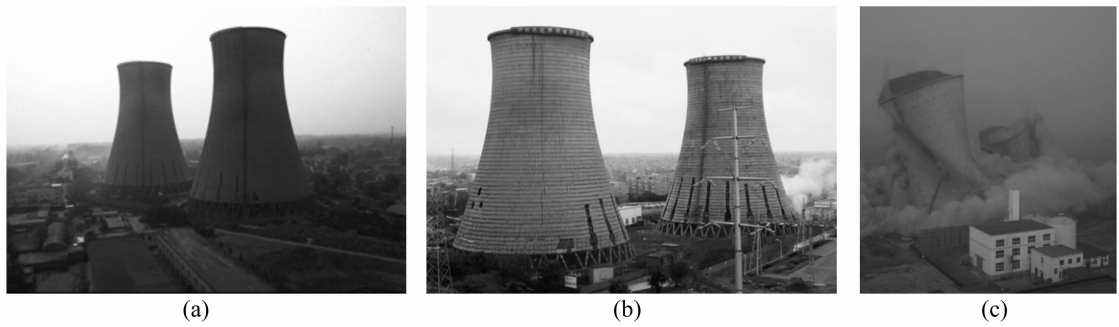


图4 高卸荷槽复式切口爆破技术应用

Fig. 4 Application of composite trapezoidal blasting cut blasting technology

为了验证数值计算结果的合理性与正确性,在多个冷却塔爆破拆除过程中对冷却塔爆破倒塌触地振动进行了现场测试。以2010年大武口电厂两座冷却塔高卸荷槽复式切口爆破拆除为例进行爆破振动测试分析,为了测试到有效明显的振动波形,将拾振器布置在冷却塔倒塌中心线上距离冷却塔底部边沿10 m的位置,振动测试结果如图5所示。采用IDTS-3850爆破振动记录仪测试,拾振器灵敏度为28~30 V/m/s,用IDTS 3850软件采集到的波形进行分析和处理。

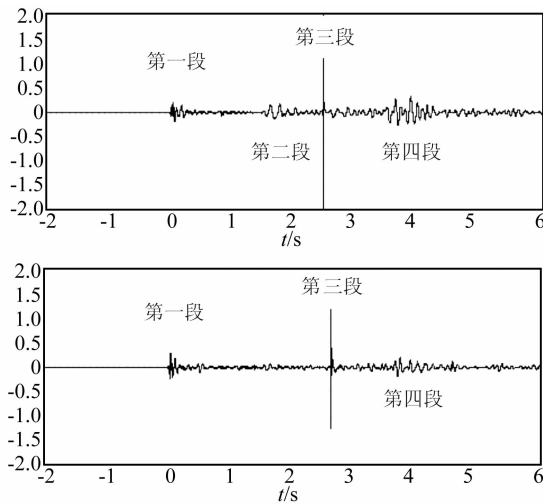


图5 实测振动波形

Fig. 5 The measured vibration waveform

从图5的实测振动波形图可以看出,冷却塔高卸荷槽复式切口爆破倒塌引起的地表振动波一般包含三段或四段波形。第一段波形峰值不大,峰值时间在0.0 s,且持续时间短,主频率为41.643 6 Hz,峰值振速为0.277 9 cm/s。该振动是炸药爆炸时部分能量沿冷却塔塔体和人字支柱传入基础而引起的地表振动;第二段波形峰值也较小,峰值时间在1.7 s,但持续时间较长,主频率为11.596 7 Hz,峰值振速为2.171 4 cm/s。该振动由冷却塔切口内塔体壁柱触地引起的地表振动;第三段波形峰值最大,峰值时间在2.6 s,主频率为7.812 5 Hz,峰值振速为3.832 6 cm/s,但是持续时间最短,几乎是瞬间衰减。该振动是预设高卸荷槽形成的

塔体壁柱破坏后圈梁触地冲击引起的地表振动;第四段波的峰值较小,峰值时间在4.2 s但是持续时间最长,主频率为5.615 2 Hz,峰值振速为1.442 9 cm/s。该段振动是失稳和部分解体后的塔体连续触地引起的地表振动。从各段振动频率来看,爆破振动频率最高,塔体倒塌触地振动均较低。

根据公式^[9] $V_t = K_t (R / (MgH/\sigma))^{1/3}$ 计算得到塔体倒塌触地振动的速度为6.4 cm/s,实测振动速度小于理论计算值,也进一步说明冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术的控制振动作用。同时,结合图2、图3和图5可以看出,冷却塔三种倒塌触地冲击状态所对应的时间与实测振动波形上各段波形峰值或触发时间来看,对应的时间点也是比较吻合的,这也进一步验证了数值分析和理论分析结果的合理性与正确性。

5 结论

(1) 冷却塔冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术可以直接减少塔体炮孔数量降低炸药用量,有效降低冷却塔爆破振动。

(2) 冷却塔高卸荷槽复式切口爆破技术能调控塔体应力状态,增大塔体倒塌过程中的解体程度和解体速度,降低冷却塔塌落触地动能,同时能增大塔体触地冲击过程中促使冲击结构进一步解体的能量,并降低碰撞后土体获得的转化为波动的能量,而且能改变塔体倒塌触地冲击形式和冲击过程,延长塔体触地冲击时间,减小塔体触地冲击强度,最终有效控制塔体爆破倒塌触地振动效应。

参考文献

- [1] 褚怀保,余永强,杨小林,等. 钢筋混凝土冷却塔爆破拆除控振措施研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010,29(1):85-87.
CHU Huai-bao, YU Yong-qiang, YANG Xiao-lin. Study on control measures of reinforced concrete cooling tower blasting vibration [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2010,29(1):85-87.
- [2] 张世平,阎晋文. 爆破拆除高大建筑物产生的震动危害与减震方法[J]. 太原理工大学学报,2006,37(6):685-687.
ZHANG Shi-ping, YAN Jin-wen. Harm of the seismic vibration

- in the high-building blasting demolition and method of damping vibration [J]. Journal of Taiyuan University of technology, 2006,37(6):685-687.
- [3] 钟明寿,龙源,谢全民,等. 龙海大厦拆除爆破塌落振动与爆破振动的对比分析[J]. 工程爆破,2009,15(4):58-61. ZHONG Ming-shou, LONG Yuan, XIE Quan-min, et al. Comparative analysis of collapse vibration and blasting vibration based on demolition blasting of longhai building [J]. Engineering Blasting,2009,15(4):58-61.
- [4] 蒋耀港,沈兆武,龚志刚. 构筑物爆破拆除振动规律的研究[J]. 振动与冲击,2012,31(5):36-41. JIANG Yao-gang, SHEN Zhao-wu, GONG Zhi-gang. Vibration law of structure blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock,2012,31(5):36-41.
- [5] 叶洲元,马建军. 爆破拆除高耸建筑物触地危害分析与控制[J]. 中国安全科学学报,2010,20(2):150-154. YE Zhou-yuan, MA Jian-jun. Harm analysis of collapse and touchdown of tower buildings in demolition blasting and its control measures [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(2):150-154.
- [6] 宗琦,杨吕俊. 岩石中爆炸冲击波能量分布规律初探[J]. 爆破,1999,6(2):1-6. ZONG Qi, YANG Lü-jun. Shock energy distribution of column charge in rock [J]. Blasting,1999,6(2):1-6.
- [7] 王四根,刘松玉,方磊. 强夯冲击作用的能量问题[J]. 岩土工程学报,2002,5(3):290-293. WANG Si-gen, LIU Song-yu, FANG Lei. Problems of energy of tamping impactation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,5(3):290-293.
- [8] 徐泽沛. 爆破拆除塌落过程及触地震动的分析研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2004.
- [9] 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. ZHOU Jia-han. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition [J]. Blasting Engineering,2009,15(1):1-4.