

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.020

## 不同预处理方法对钢筋混凝土水塔 爆破拆除效果的影响

夏曼曼, 郑德明, 戴春阳, 潘宝玉

(安徽天明爆破工程有限公司, 滁州 239000)

**摘要:** 为比较不同预处理方法对钢筋混凝土水塔爆破拆除效果的影响,对两座结构相似的水塔(1#水塔、2#水塔)进行定向爆破拆除。1#水塔爆破切口角度为 $198^\circ$ 、余留支撑体截面面积为 $0.68\text{ m}^2$ 、爆破切口高度为 $1.5\text{ m}$ 、定向窗夹角为 $45^\circ$ 、采用爆破法开凿对称门;2#水塔爆破切口角度为 $200^\circ$ 、余留支撑体截面面积为 $0.70\text{ m}^2$ 、爆破切口高度为 $1.2\text{ m}$ 、定向窗夹角为 $63.5^\circ$ 、采用机械法开凿对称门。两座水塔起爆后,1#水塔按预定方向顺利倒塌,2#水塔切口内混凝土全部剥离飞出,配筋外露,水塔未能倒塌。分析认为:爆破切口形成后,余留支撑体截面面积大,单位面积上所承受的压应力小,不利于钢筋混凝土水塔的顺利倒塌;定向窗夹角大小对钢筋混凝土水塔能否倒塌没有直接关系;爆破切口高度是影响钢筋混凝土水塔倒塌的关键因素,爆破施工时要考虑水塔中配筋的强度、刚度和稳定承载能力,选取合理的爆破切口高度。

**关键词:** 爆破拆除; 预处理; 钢筋混凝土水塔; 余留支撑体截面面积; 切口高度; 定向窗

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)02-0136-05

## Effect of Different Pretreatment Methods on Blasting Demolition of Reinforced Concrete Water-tower

XIA Man-man, ZHENG De-ming, DAI Chun-yang, PAN Bao-yu

(An Hui Tianming Blasting Engineering Co., Ltd., Chuzhou 239000, China)

**Abstract:** In order to compare the effect of different pretreatment methods on the blasting demolition effect of reinforced concrete water towers, two water towers with similar structures (1 # water tower and 2 # water tower) were demolished by directional blasting. The blasting cut angle of 1# water tower is  $198^\circ$ , the cross-sectional area of the remaining support body is  $0.68\text{ m}^2$ , the blasting cut height is  $1.5\text{ m}$ , the angle of the directional window is  $45^\circ$ , and the symmetrical door is excavated by blasting method. The blasting cut angle of 2# water tower is  $200^\circ$ , the cross-section area of the remaining support body is  $0.70\text{ m}^2$ , the blasting cut height is  $1.2\text{ m}$ , the angle of the directional window is  $63.5^\circ$ , and the symmetrical door is excavated by mechanical method. After the initiation of the two water towers, 1 # water tower collapsed smoothly in the predetermined direction, however, as to 2# water tower, the concrete in the cut was completely stripped and flew out, the reinforcement was exposed, and the water tower failed to collapse. The analysis shows that the remaining support body has a large cross-section area and a small compressive stress per unit area after the blasting cut is formed, which is not conducive to the smooth collapse of the reinforced concrete water tower. The angle of the directional window has no direct relationship with the collapse of the reinforced concrete water tower. The height of blasting cut is the key factor affecting the collapse of reinforced concrete water tower. In blasting construction, the strength, stiffness and stable bearing capacity of reinforcement in water tower should be considered, and the reasonable blasting cut height should be considered.

**Key words:** explosive demolition; pretreatment; reinforced concrete water-tower; the remaining support body; blasting cut height; directional window

在水塔、烟囱等高耸结构物爆破拆除设计和施工过程中,为了精确控制倒塌方向、保证建筑物顺利倒塌、有效减少爆破飞石、爆破振动、爆破冲击波等有害效应,获得更好的爆破效果,通常会对建筑物进行预处理。所谓“预处理”是指在建筑物爆破拆除施工中<sup>[1,2]</sup>,为了满足工程技术要求,在不破坏整体稳定性的情况下,对某些非承重部位实施预先拆除或削弱部分结构的施工方法,破坏其局部结构,经过预处理,建筑物的整体性受到一定程度的破坏,有利于充分利用其重心失稳而顺利倒塌。因此,控制爆破拆除时,对其某些部位做预处理,对于降低工程消耗和保证爆破安全都具有重要的意义。

随着时代的发展,预处理技术不断发展更新,根据结构类型、预处理的部位以及周边环境等条件影响,目前进行预处理的方式通常包括人工预处理、爆破预处理和机械预处理3类<sup>[3]</sup>。

以两座已拆除水塔为例,通过比较爆破预处理和机械预处理对于钢筋混凝土水塔爆破拆除产生的影响,以期同类工程提供一些施工经验。

## 1 工程环境

### 1.1 周边环境

1#水塔位于天长市经济开发区,四周环境较复杂,东侧6.5 m有水泵房;东北侧17 m有3间小平房和2层楼房;南侧2 m处有厕所,100 m处有厂房和办公楼;西侧3 m处有变电房和厂房,位于变电房1 m处有变压器;西南25~60 m处有厂房和办公楼;北侧距公路20 m。烟囱周围环境如图1所示。

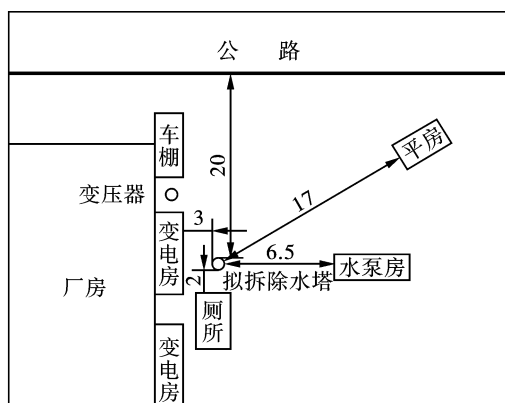


图1 1#水塔周围环境示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of the surrounding environment of the 1# water tower(unit:m)

2#水塔位于阜阳市颍州区,北面26 m为居民区,南侧46 m为民房,5 m处为公路,西南侧14 m为桥梁,东侧9 m为阜阳颍淮农商行新办公大楼工地围挡,周围环境示意图如图2所示。

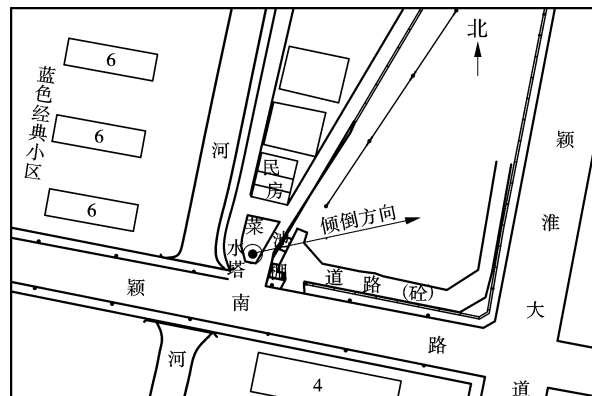


图2 2#水塔周边环境示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of the surrounding environment of the 2# water tower(unit:m)

### 1.2 水塔结构

1#水塔高24 m,为薄壁钢筋混凝土筒状结构,无破坏,无倾斜。水塔筒身外直径2.61 m,壁厚20 cm,钢筋单层布筋,周长8.2 m,筒体下部南侧有1个尺寸为180 cm×80 cm的小门,水塔顶部有倒锥形大圆盘水箱<sup>[4]</sup>。

2#水塔高36 m,塔身为钢筋混凝土筒式圆形结构,高度为30 m,顶部呈伞形,底部直径2.53 m,壁厚22 cm,在水塔底部北侧0.5 m标高处有一尺寸为190 cm×80 cm的检修门。

## 2 爆破设计

### 2.1 爆破总体方案

高耸建(构)筑物爆破拆除一般有定向倒塌式、定向折叠倒塌式、原地坍塌式,根据2座水塔结构及爆区周围环境,均采用定向倒塌式,1#水塔倒塌方向为东偏南约62°方向,2#水塔倒塌方向为东偏北方向。

### 2.2 爆破切口设计

#### (1) 切口形式及角度

爆破缺口的目的是为了创造失稳条件,因此缺口的形状的优劣将直接决定水塔定向倒塌是否准确<sup>[5]</sup>。一般说高耸构筑物定向爆破倒塌切口的形式有矩形、正梯形、倒梯形等不同形状<sup>[6,9]</sup>。1#水塔倾倒爆破的切口采用展开形状为组合梯形,2#水塔采用正梯形切口形状,采用正梯形爆破切口既能满足水塔倒塌方向的准确性又能减少药孔数量。

收稿日期:2021-01-28

作者简介:夏曼曼(1992-),女,助理工程师、硕士研究生,主要从事爆破设计施工,(E-mail)1003470289@qq.com。

通讯作者:郑德明(1964-),男,高级工程师、本科,主要从事爆破设计施工,(E-mail)zhengdeming@163.com。

通常情况下,爆破切口的长度是以水塔的重力引起的截面弯矩(MP)等于或稍大于预留支撑截面极限抗弯力矩(MR)为主要依据来确定的<sup>[7]</sup>。根据一般工程经验,切口的长度一般取断面圆周( $\pi d$ )的0.5~0.67,相对应的切口圆心角为180~241°。1#水塔爆破切口角度选取198°,2#水塔设计切口圆心角为209°,但根据现场施工情况,实际切口角度为200°。两座水塔的爆破切口图如图3(a)、(b)所示。

## (2)切口高度

切口的高度 $H$ 是水塔爆破拆除的重要参数<sup>[10-12]</sup>。对于钢筋混凝土的高耸建筑物来说,采用爆破形成拆除切口时应考虑切口形成后应使其在倾倒

至爆破切口闭合时,重心位置偏移到切口标高处筒壁范围以外。根据一般工程经验公式确定切口高度 $H$

$$H \geq (3 \sim 5)\delta$$

式中, $\delta$ 为切口处壁厚,1#水塔 $H$ 取值范围是0.6~1.0 m,2#水塔 $H$ 取值范围是0.66~1.1 m,为保证缺口内混凝土全部脱离,考虑到部分混凝土碎块无法完全脱离钢筋,一般缺口高度应适当增加,再加上要考虑炮孔间排距的完整布置,因此1#水塔最终确定爆破缺口高度为1.5 m,2#水塔爆破缺口高度为1.2 m。

## 2.3 爆破参数

爆破参数见表1。

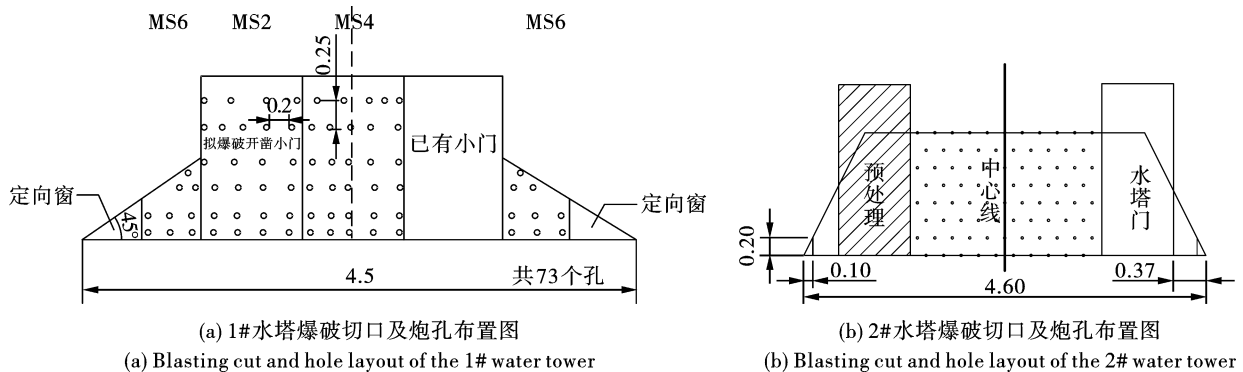


图3 水塔爆破切口示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of blasting cut of water tower(unit:m)

表1 1#、2#水塔拆除爆破参数

Table 1 Demolition blasting parameters of 1# and 2# water towers

名称	孔径 $D$ / mm	孔深 $L$ / cm	孔距 $a$ / cm	排距 $b$ / cm	炸药单耗 $q$ / ( $g \cdot m^{-3}$ )	实际单孔 装药量 $Q/g$
1#水塔	40	12	20	25	4500	50
2#水塔	40	15	20	20	5000	50

## 2.4 预处理方案

为保证水塔严格按照设计方向倒塌,1#水塔在小门正对方向筒壁上用爆破的方法炸出1个尺寸相同的小门,在爆破切口两侧分别人工开设1个长0.5 m、高0.5 m三角形的定向窗;2#水塔爆前采用机械预处理,预处理措施有以下两点:

①在检修门相对的另一侧用空心钻开凿同一尺寸大小的小门。

②在爆破切口两端对称开设定向窗,定向窗尺寸为:10 cm(宽)×20 cm(高)(直角三角形,见图4)。

## 3 爆破效果及分析

### 3.1 爆破效果

1#水塔起爆后,大约经过3 s之后开始向预定方向沿厕所边线倒塌,水塔钢筋砼储水筒重重落在

地上,未破碎,整个倒塌过程历时约5 s,周围建筑物均未损坏,达到了设计的预期目的。



图4 2#水塔定向窗预处理

Fig. 4 Pretreatment of directional window of the 2# water tower

2#起爆后,切口内混凝土全部剥离飞出,配筋外露,水塔未能倒塌。观察发现水塔爆破缺口中,钢筋

已经发生大的变形,失去了承载能力,而支撑部分的混凝土未发生较大形变,剩余支撑部分强度仍能满足要求,水塔未能倒塌。见图5。



图5 2#水塔第一次起爆后效果

Fig. 5 Effect of the first initiation of the 2#water tower

### 3.2 爆破结果分析

#### (1) 余留支撑体截面面积

切口形成后,余留支撑体截面面积计算<sup>[13]</sup>

$$A_c = (R_c^2 - r_c^2) \left( \pi - \frac{\alpha}{2} \right) \quad (1)$$

式中:  $r_c = r_1 - \frac{r_1 - r_2}{L}l$ ,  $R_c = R_1 - \frac{R_1 - R_2}{L}l$ ,  $r_1$ 、 $R_1$

为水塔底部内、外半径分别,  $r_2$ 、 $R_2$  为水塔顶部的内、外半径, 爆破切口所对圆心角弧度为  $\alpha$ , 水塔高度为  $L$ , 切口薄弱面(梯形切口的薄弱面为其下边缘, 倒梯形切口的薄弱面为其上边缘)距底部距离为  $l$ ,  $r_c$ 、 $R_c$  为切口薄弱面处的内、外半径。

通过(1)式计算出1#水塔余留支撑体面积为  $0.68 \text{ m}^2$ , 2#水塔余留支撑体面积为  $0.70 \text{ m}^2$ , 从计算结果比较可知, 2#水塔余留支撑体面积较大, 这也是导致其炸后不倒的主要因素之一。

#### (2) 定向窗夹角

定向窗作为高耸烟囱控制爆破拆除时筒体沿设计方向倾倒的一个必要条件, 定向窗夹角直接影响到后部支撑部位的应力分布状态以及切口闭合的进程, 因而对烟囱倒塌的平稳性和后坐问题都有很大影响, 理论研究表明: 定向窗夹角越大, 尖端应力集中影响范围越大, 剪切破坏区域也越大, 而且最大剪应力越高, 因而越容易发生倒后。1#水塔定向窗角度为  $45^\circ$ , 2#水塔定向窗角度  $63.5^\circ$ , 比较两者大小发现定向窗夹角大小并不是影响钢筋混凝土水塔倒塌的关键。

#### (3) 切口高度

对于钢筋混凝土结构水塔而言, 切口处被炸掉的是混凝土, 而竖向钢筋依然保留在结构中, 起着支撑上部的作用。如果爆破切口高度仅满足切口上下闭合时重心偏离出支撑面, 但满足不了使钢筋失稳

失去承载能力的高度, 钢筋混凝土水塔将会出现炸而不倒的情况。

对于爆破切口处裸露的钢筋, 当支撑力较大、满足强度要求时, 就要按刚度要求确定爆破切口高度。要保证钢筋混凝土高耸构筑物倒塌, 就要使切口裸露钢筋长细比大于规定的容许长细比  $[\lambda]$ , 即<sup>[10,14]</sup>

$$\lambda \geq [\lambda] \quad (2)$$

一般取  $[\lambda] = 150$

根据材料截面的几何特性的计算公式, 钢筋的长细比为

$$\lambda = \mu h / i \quad (3)$$

其中  $\mu$  为构件的计算长度系数, 对于两端固定的压杆, 取  $\mu = 0.5$ ;  $h$  为爆破切口的高度;  $i$  为钢筋截面的回转半径,  $i = D/4$  ( $D$  为钢筋直径)。

将(3)式代入(2)式中, 可得爆破切口的高度为

$$h \geq [\lambda] D / 4\mu = 75D \quad (4)$$

将相关数据带入(4)式中, 可得1#、2#水塔满足刚度要求的切口高度为  $1.5 \text{ m}$ , 而在实际施工中2#水塔切口高度为  $1.2 \text{ m}$ , 小于  $1.5 \text{ m}$ , 从2#水塔第一次爆破的效果来看, 钢筋全部裸露竖立, 起着支撑作用, 水塔没有倒塌, 其主要原因是切口高度不够, 使切口处钢筋的稳定承载能力大于水塔重量对钢筋施加的压应力。

(4) 2#水塔爆后不倒, 除以上分析外, 1#水塔采用爆破法开凿对称小门及组合三角形部分(不包含定向窗), 2#水塔爆前采用机械预处理在检修门相对的另一侧用空心钻开凿同一尺寸大小的小门, 采用爆破法进行预处理时, 炸药的爆炸作用对保留支撑部位的强度产生了弱化作用<sup>[15,16]</sup>。

### 3.3 2#水塔处理方案

2#水塔而后进行二次爆破, 在保证对称性的前提下, 在定向窗的顶部外覆炸药, 爆破后, 水塔发生倾倒, 达到预期效果。爆破后效果如图6所示。



图6 2#水塔二次处理后爆破效果

Fig. 6 Blasting effect of the 2# water tower after secondary treatment

## 4 结语

钢筋混凝土水塔爆破拆除效果受多种因素影

响,预处理对于水塔定向爆破拆除具有十分重要的意义,爆破前对水塔实施适当的预处理,能够有效地保证爆破安全和水塔顺利定向倒塌。当水塔爆破切口角度偏小时,采用爆破预处理更有利于保证水塔的顺利倒塌;爆破切口形成后余留支撑体截面面积大,不利于钢筋混凝土水塔的顺利倒塌;定向窗夹角大小对钢筋混凝土水塔能否倒塌没有直接关系;爆破切口高度是影响钢筋混凝土水塔倒塌的关键因素,爆破施工时要考虑水塔中配筋的强度、刚度和稳定承载能力,选取合理的爆破切口高度。

### 参考文献 (References)

- [1] 王希之,杨智旭,刘晓峰,等.南昌五湖大酒店爆破拆除预处理方法研究[J].爆破,2011,28(2):83-86.
- [1] WANG Xi-zhi, YANG Zhi-xu, LIU Xiao-feng, et al. Research on pretreatment in explosive demolition of Nanchang Five Lake Hotel [J]. Blasting, 2011, 28(2): 83-86. (in Chinese)
- [2] 刘 强,高振儒.烟囱定向爆破拆除的预处理方法[J].爆破,2001(3):47-49.
- [2] LIU Qiang, GAO Zhen-ru. Pretreatment method for directional explosive demolition of a chimney [J]. Blasting, 2001(3):47-49. (in Chinese)
- [3] 齐世福.军事爆破工程设计与运用[M].南京:解放军理工大学工程兵工程学院,2002.
- [4] 张 华,陈龙伟,郑德明,等.复杂环境下钢筋砼水塔精确控制定向爆破拆除[J].爆破,2010,27(2):68-70.
- [4] ZHANG Hua, CHEN Long-wei, ZHENG De-ming, et al. Directional explosive demolition of reinforced concrete water-tower under complicated surrounding [J]. Blasting, 2010, 27(2): 68-70. (in Chinese)
- [5] 刘昌邦,贾永胜,钟冬望,等.40 m高倒锥形钢筋混凝土水塔爆破拆除[J].工程爆破,2013,19(1-2):85-87.
- [5] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, ZHONG Dong-wang, et al. Blasting demolition of a 40m high reverse cone-shape water-tower of reinforced concrete structure [J]. Engineering Blasting, 2013, 19(1-2): 85-87. (in Chinese)
- [6] 罗 伟,薛 彦,李健康,等.35 m高钢筋混凝土水塔爆破拆除[J].煤矿爆破,2020,38(5):31-34.
- [6] LUO Wei, XUE Yan, LI Jian-kang, et al. Blasting demolition of 35 m high reinforced concrete water tower [J]. Coal Mine Blasting, 2020, 38(5): 31-34. (in Chinese)
- [7] 牛玉学,王 铁,孟凡金,等.伞状钢筋混凝土水塔爆破拆除技术[J].西部探矿工程,2019,31(6):174-177.
- [7] NIU Yu-xue, WANG Tie, MENG Fan-jin, et al. Blasting demolition technology of umbrella reinforced concrete water tower [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(6): 174-177. (in Chinese)
- [8] 张松峰,雷 振,高文蛟,等.伞形钢筋混凝土水塔爆破拆除[J].爆破,2018,35(4):90-93,135.
- [8] ZHANG Song-feng, GAO Zhen, GAO Wen-jiao, et al. Explosive demolition of umbrella reinforced concrete water tower [J]. Blasting, 2018, 35(4): 90-93, 135. (in Chinese)
- [9] 王 升,易理辉,莫志平.异型结构钢筋混凝土水塔爆破拆除[J].采矿技术,2018,18(5):172-174,188.
- [9] WANG Sheng, YI Li-hui, MO Zhi-ping. Blasting demolition of special shaped reinforced concrete water tower [J]. Mining Technology, 2018, 18(5): 172-174, 188. (in Chinese)
- [10] 傅菊根,姜建农,张宇本.高耸建筑物爆破拆除切口高度理论计算[J].工程爆破,2006,12(2):56-58.
- [10] FU Ju-gen, JIANG Jian-nong, ZHANG Yu-ben. Theoretical calculation of notched height about tower building demolished by blasting [J]. Engineering Blasting, 2006, 12(2): 56-58. (in Chinese)
- [11] 汪旭光.爆破设计与施工[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [12] 张松峰,雷 振,高文蛟,等.伞形钢筋混凝土水塔爆破拆除[J].爆破,2018,35(4):90-93,135.
- [12] ZHANG Song-feng, LEI Zhen, GAO Wen-jiao, et al. Explosive demolition of umbrella reinforced concrete water tower [J]. Blasting, 2018, 35(4): 90-93, 135. (in Chinese)
- [13] 王 健.高耸烟囱爆破拆除安全性的力学分析[D].唐山:河北理工大学,2005.
- [13] WANG Jian. Mechanics analysis on safety of demolition of tall chimneys by controlled blasting [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [14] 贾 虎,王新征.钢筋混凝土高耸构筑物爆破切口参数计算的探讨[J].工程爆破,2006(4):32-34,46.
- [14] JIA Hu, WANG Xin-zheng. Study on cutting-section parameters calculation of high tubular structure of reinforced concrete [J]. Engineering Blasting, 2006(4): 32-34, 46. (in Chinese)
- [15] 江多琨.岩石中炸药爆炸能量分布测试[D].淮南:安徽理工大学,2013.
- [15] JIANG Duo-kun. Study on energy distribution of rock fragment in explosive [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 曹 祺.岩石爆破中炸药爆炸能量分布的测试和研究[D].淮南:安徽理工大学,2008.
- [16] CAO Qi. Tests and research on explosive energy distribution in rock blasting [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)