

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.001

## 钢筋混凝土水塔垂直原地爆破拆除试验研究\*

黄小武<sup>1,2</sup>, 谢先启<sup>1,2,3a,3b</sup>, 贾永胜<sup>2,3a,3b</sup>, 刘昌邦<sup>2</sup>, 姚颖康<sup>3a,3b</sup>, 孙金山<sup>3a,3b</sup>, 伍岳<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065; 2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056;  
3. 江汉大学 a. 精细爆破国家重点实验室; b. 爆破工程湖北省重点实验室; 武汉 430056)

**摘要:** 为解决受限空间下高耸钢筋混凝土水塔爆破拆除难题, 研发了高耸构筑物垂直原地爆破拆除技术。采用高速摄影观测、振动监测手段和数值仿真方法, 对水塔垂直原地坍塌冲击破坏机理、坍塌运动过程和触地振动效应进行了全面分析。研究发现: 高耸水塔垂直原地爆破拆除的坍塌过程近似自由落体运动, 回归分析得到水塔向下塌落的加速度约为  $9.4 \text{ m/s}^2$ , 略小于重力加速度; 采用“分离式”有限元模型, 可以近似还原水塔的塌落运动过程, 并精确捕捉每段筒体的冲击碰撞时刻; 159号混凝土材料模型, 可以很好地模拟水塔筒体塌落冲击破坏过程; 水塔筒体冲击破坏过程复杂, 总体呈现多次冲击累积损伤破坏过程; 振动主振频带主要集中在  $5 \sim 60 \text{ Hz}$ , 振动信号的高频部分衰减迅速, 能量主要集中在低频部分, 并且振动信号的总能量随着距离的增加而显著减小。试验表明: 通过筒体分段依次垂直原地塌落触地, 并同步开展顶部水箱水压爆破, 不仅可以控制高耸水塔的塌落堆积范围, 而且可以减小触地振动效应并控制爆破粉尘危害。

**关键词:** 爆破拆除; 原地塌落; 高速摄影; 数值模拟; 触地振动

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)02-0001-08

## Experimental Study on Vertical In-situ Blasting Demolition of Reinforced Concrete Water Tower

HUANG Xiao-wu<sup>1,2</sup>, XIE Xian-qi<sup>1,2,3a,3b</sup>, JIA Yong-sheng<sup>2,3a,3b</sup>, LIU Chang-bang<sup>2</sup>,  
YAO Ying-kang<sup>3a,3b</sup>, SUN Jin-shan<sup>3a,3b</sup>, WU Yue<sup>2</sup>

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;  
2. Wuhan Explosion & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China;  
3. a. State Key Laboratory of Precision Blasting; b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of blasting demolition of tall reinforced concrete water towers in restricted space, a vertical in-situ blasting demolition technology was developed. The impact failure mechanism, collapse process and touchdown vibration of the water tower were analyzed comprehensively by means of high-speed photography, vibration monitoring and numerical simulation. It was found that the collapse process of the tower by vertical in-situ blasting demolition is similar to free fall motion with an acceleration of  $9.4 \text{ m/s}^2$  calculated by regression analysis, which was slightly smaller than the gravity acceleration. By using the “separated” finite element model, the collapse process of the water tower could be approximately simulated and the impact time of each section cylinder could be accurately captured. In general, cumulative damage by multiple impacts is the main characteristic of the complex failure process of the water tower, which can be simulated by the No. 159 concrete material model. The main frequen-

收稿日期: 2023-01-24

作者简介: 黄小武(1989-), 男, 工程师、博士研究生, 主要从事工程爆破研究与实践工作, (E-mail) 840022742@qq.com。

通讯作者: 谢先启(1960-), 男, 教授级高级工程师、中国工程院院士, 主要从事工程爆破理论与技术研究, (E-mail) xxqblast@163.com。

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目(创新群体 2020CFA043); 湖北省重点研发计划项目(2020BCA084)

cy band of the vibration is mainly concentrated in the range of 5 ~ 60 Hz. The high frequency part of the vibration signal attenuates rapidly, and the energy is mainly concentrated in the low frequency part. Moreover, the total energy of the vibration signal decreases significantly with the increase of distance. The test results show that the successive vertical collapse of the tower and the simultaneous blasting on the top water tank can control not only the collapse range of the tower, but also the touchdown vibration and blasting dusts.

**Key words:** blasting demolition; in-situ collapse; high-speed photography; numerical simulation; touchdown vibration

爆破拆除作为一种安全、高效的拆除技术,常用来拆除高大建筑物,以及烟囱、冷却塔和水塔等高耸构筑物,在城市建筑更新和工业升级中发挥着不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。与多数高耸构筑物爆破拆除的方法类似,水塔爆破拆除的倒塌方式主要有定向倒塌、折叠倒塌和原地坍塌3种类型。其中,定向倒塌方式只需要在水塔的底部破坏小范围的支撑部位,使倾覆力矩大于抗倒塌力矩,上部结构绕着塑性铰转动偏出结构外沿实现定向倒塌。而折叠倒塌和原地坍塌方式要破坏2个以上的支撑部位,因此,定向倒塌方式相比折叠倒塌和原地坍塌方式具有施工量少、经济成本低等优点,在众多工程中广泛应用,并取得了很好的经济效益和社会效益<sup>[4-6]</sup>。然而,水塔定向倒塌方式要求倒塌场地的长度不小于其高度的1.2倍<sup>[7]</sup>,对倒塌场地的开阔性提出了很高的要求。

为缩短水塔的倒塌距离,有关学者在底部切口的基础上提出了提高爆破切口标高(高位切口)的设计方案,例如,张松峰等在距地面1.6 m处设计爆破切口拆除了35 m高伞形钢筋混凝土水塔<sup>[8]</sup>,倒塌长度约34 m;谢先启等在距地面4.0 m处设计爆破切口拆除了38 m高倒锥形钢筋混凝土水塔<sup>[9]</sup>,倒塌长度约30 m;任志远等在四周倒塌空间受限的情况下<sup>[10]</sup>,在距底部15 m处设计爆破切口拆除了28.6 m高倒锥形水塔的顶部水箱,倒塌长度约12.5 m。为进一步缩短倒塌距离,有关学者探索了单向和双向折叠爆破方式。方桂富等在距地面5 m和15 m设计2个同向的爆破切口拆除了36 m高砖砌水塔<sup>[11]</sup>,倒塌长度约14.8 m;史秀志等在距离地面0.5 m、13.5 m和27.5 m设计3个同向的爆破切口拆除了41 m高砖混结构水塔<sup>[12]</sup>;谢兴博等在距地面1.0 m和5.8 m设计2个双向爆破切口拆除了35 m高钢筋混凝土水塔<sup>[13]</sup>,倒塌长度为25.5 m。

对比定向倒塌和折叠倒塌方式,原地倒塌方式可最大限度地降低倒塌长度,然而由于技术和施工难度大,烟囱、水塔类高耸构筑物原地倒塌爆破拆除的案例非常少见。李砚召等采用上部29.5 m定向

倒塌与下部6.5 m原地塌落相结合的爆破方案<sup>[14]</sup>,拆除了36 m高砖烟囱,倒塌长度约24 m;这为高耸类构筑物原地坍塌爆破拆除技术开启了有益的探索。

近年来,爆破拆除的环境越来越复杂,可供定向倒塌的场地越来越小。因此,研究受限空间中高耸构筑物爆破拆除技术,对提高爆破拆除技术的安全性,拓展爆破拆除技术的应用范围具有重要意义。以某钢筋混凝土水塔为代表性对象,研究了高耸构筑物垂直原地爆破拆除技术,分析了其设计施工要点及应用实施效果。

## 1 水塔垂直原地爆破拆除试验

待拆除水塔高38.1 m,其中,塔身高28.6 m,倒锥形水箱高9.5 m。水塔下部支筒为圆筒形,筒体内径为2.0 m,壁厚0.18 m,筒内设有5个设备检修平台,分别距离地面4.9 m、9.8 m、14.7 m、19.8 m和24.7 m。上部水箱为倒锥形结构,伞形水箱最大外径为10.64 m。水塔筒体及水箱配有单层钢筋网,主筋 $\phi 16 \text{ mm}@100 \text{ mm}$ ,箍筋 $\phi 8 \text{ mm}@100 \text{ mm}$ 。水塔筒身北侧有一高2.0 m,宽0.6 m的检修门,塔身东侧和西侧分布直径为66 cm的圆形观察窗。见图1。



图1 倒锥形钢筋混凝土水塔

Fig. 1 Inverted conical reinforced concrete water tower

根据水塔结构特点与周边环境情况,采用“筒

体垂直原地坍塌,水箱水压爆破破碎”的总体爆破拆除方案。为施工便利,爆破切口布设在水塔底部以及各层检修平台处,共计 6 个爆破切口。见图 2、表 1。

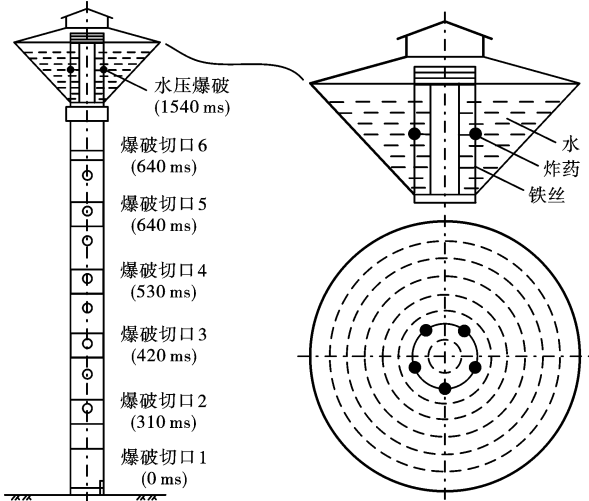


图 2 筒体及水箱爆破拆除示意图  
Fig. 2 Diagram of demolition blasting of the tower and water tank

表 1 爆破切口高度

Table 1 Heights of blasting cuts

爆破切口	1	2	3	4	5	6
切口高度/m	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5

水塔筒体 6 个爆破切口均采用钻孔爆破,孔距  $a = 25 \text{ cm}$ 、排距  $b = 25 \text{ cm}$ ,炸药单耗  $k = 3000 \text{ g/m}^3$ ,单孔装药量  $q = 40 \text{ g}$ ,总装药量  $20 \text{ kg}$ 。水箱中间水深处布置 5 个药包,单个药包重  $1000 \text{ g}$ ,总装药量  $5 \text{ kg}$ 。所有药包都采用 MS19 段导爆管雷管(名义延期时间  $1700 \pm 150 \text{ ms}$ )起爆,孔外通过毫秒导爆管雷管串联接力连接,筒体爆破切口和水箱水压爆破自下而上依次起爆,各切口起爆延期时间如图 2 所示。

## 2 高速摄影观测与分析

### 2.1 摄影观测方案

高速摄影观测点设置在水塔南侧  $80 \text{ m}$  处,设备采用美国 IDT 公司生产的 Y7-S2 型高速摄像机,画幅分辨率为  $1920 \times 1080$ ,考虑现场实际光线情况,设置采样率为  $5000 \text{ fps}$ ,即每帧采集间隔时间为  $0.2 \text{ ms}$ 。为明显踪水塔坍塌运动轨迹,在每层爆破切口外包裹红色防护布。

### 2.2 观测结果与分析

读取高速摄影捕捉的每帧照片,得到水塔筒体各

层爆破切口与水箱水压爆破的爆破时刻,如表 2 所示。见图 3、图 4。

表 2 水塔坍塌关键时刻表

Table 2 Key timestamps of water tower collapse

爆破部位	帧数	设计起爆时刻/ms	观测起爆时刻/ms	起爆误差/ms
切口 1	5810	0	0	0
切口 2	7340	310	306	-4
切口 3	7990	420	436	+16
切口 4	7720	530	382	-148
切口 5	9240	640	686	+46
切口 6	9360	640	710	+70
水箱爆破	12820	1430	1402	-28

注:观测起爆时刻为能观察到的最先起爆药包的起爆时刻。

自第 5810 帧开始,观察到爆破切口 1 有飞石夹杂粉尘冲出。之后,按照切口 1→切口 2→切口 4→切口 3→切口 5→切口 6→水压爆破的顺序依次起爆。由于药包起爆雷管的延时提前了  $148 \text{ ms}$ ,导致切口 4 比切口 3 提前  $54 \text{ ms}$  起爆。虽然起爆雷管的延期误差影响了爆破切口起爆的先后顺序,但对水塔整体坍塌运动过程影响不大。

第 12820 帧,观察到有水流从倒锥形水箱的顶部和底部溢出;此刻,水塔已经下落  $9.1 \text{ m}$ 。从观察的爆破效果来看,爆破粉尘主要产生在药包起爆瞬间。案例中,水压爆破的装药量偏小,没有充分破碎倒锥形水箱并产生大量爆破水雾;此外,水压爆破的起爆时间稍晚,没有来得及覆盖爆破粉尘。为增强水压爆破兼顾降尘的效果,建议水压爆破先起爆。

自爆破切口 1 起爆至倒锥形水箱触地,总历时约  $2.4 \text{ s}$ ;由于爆破粉尘影响,只能看清前  $2 \text{ s}$  的水塔运动过程。选取水塔顶点作为观测点,读取不同时刻的运动距离。经回归分析,可以发现水塔坍塌运动过程近似自由落体过程,由于钢筋网和渣块的阻尼作用,水塔爆破塌落加速度约为  $9.4 \text{ m/s}^2$ 。

## 3 有限元数值模拟

### 3.1 建立模型

计算机数值模拟技术,可以连续地、动态地、重复地再现建筑结构失稳、倾倒、触地、堆积的全过程。为精确地描述对象的几何形状,在 LS-DYNA 动力学有限元程序中建立 1:1 比例的钢筋混凝土水塔“分离式”模型<sup>[15]</sup>,采用具有显式积分的拉格朗日有限元网格,独立考虑混凝土和钢筋的力学特性。见图 5。

混凝土采用 SOLID164 实体单元,单元尺寸为  $0.1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ ,材料选用 159 号 \* MAT\_

CSCM\_CONCRETE 模型<sup>[16]</sup>。Continuous surface cap model (CSCM) 材料模型可以捕捉混凝土的非线性行为:在拉伸和压缩时表现出不同行为的非弹性响应,在压缩时表现出软化的塑性变形、在拉伸时表现出裂纹扩展的损伤以及应变率效应。纵筋和箍筋均

采用 BEAM161 梁单元,单元长度为 0.1 cm,每一根钢筋都是用 Hughes-Liu 梁单元并位于混凝土网格内的准确位置,在截面上用  $2 \times 2$  的高斯点积分;材料选用 3 号 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 塑形随动硬化模型<sup>[17]</sup>,当有效塑性应变达到极限应变时失效。

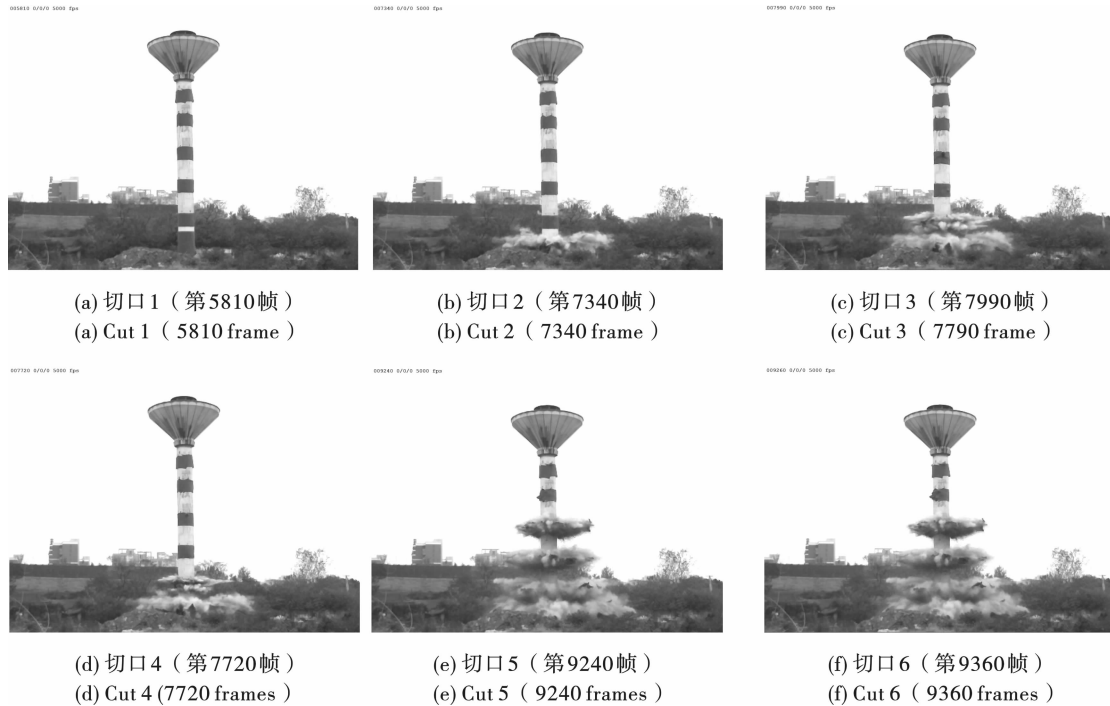


图 3 筒体爆破切口起爆瞬间

Fig. 3 The moments of the detonations of the blasting cuts



图 4 水箱水压爆破瞬间(第 12820 帧)

Fig. 4 Blasting of water tank (12820 frame)

混凝土和钢筋分别使用实体单元和梁单元,54900 个实体单元和 100188 个梁单元的有限元网格重合,在 LS-DYNA 中采用基于罚函数约束的 \* CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 选项来实现两者的变形协调。水塔筒体底部为全固定约束,地面为刚性板(\* MAT\_RIGID)。结构不同部分之间使用自动单面接触;钢筋与地面之间使用自动点面接触。将注水的质量等效到水箱结构混凝土的密

度,简化结构模型,并忽略水箱的水压爆破过程。水塔各个爆破切口通过 \* MAT\_ADD\_EROSION 控制筒体单元的失效来实现,为平衡初始应力状态,0.3 s 后开始删除筒体单元,失效时间参考高速摄影的观测结果。

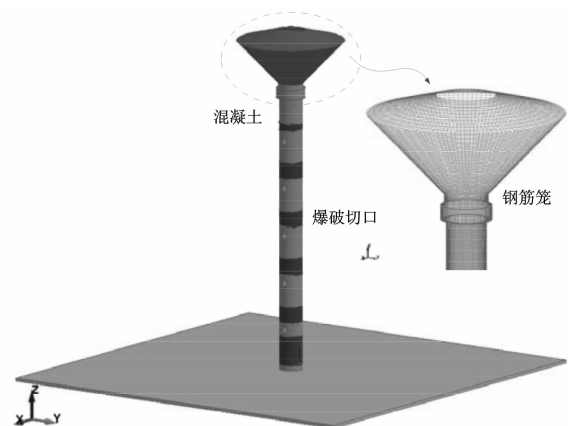


图 5 水塔有限元模型(混凝土和钢筋笼)

Fig. 5 Finite element model of water tower (concrete and steel cage)

### 3.2 仿真结果及分析

#### 3.2.1 塌落运动过程

在 LS-PrePost 中读取水塔失稳倒塌运动过程, 如图 6 所示。水塔在各个时刻的运动姿态与高速摄

影机的观测影像接近。水塔从切口形成、原地塌落到稳定堆积, 总历时约 3.0 s。各段碰撞冲击的时刻分别是 1.14 s、1.34 s、1.69 s、2.01 s、2.26 s 和 2.58 s。

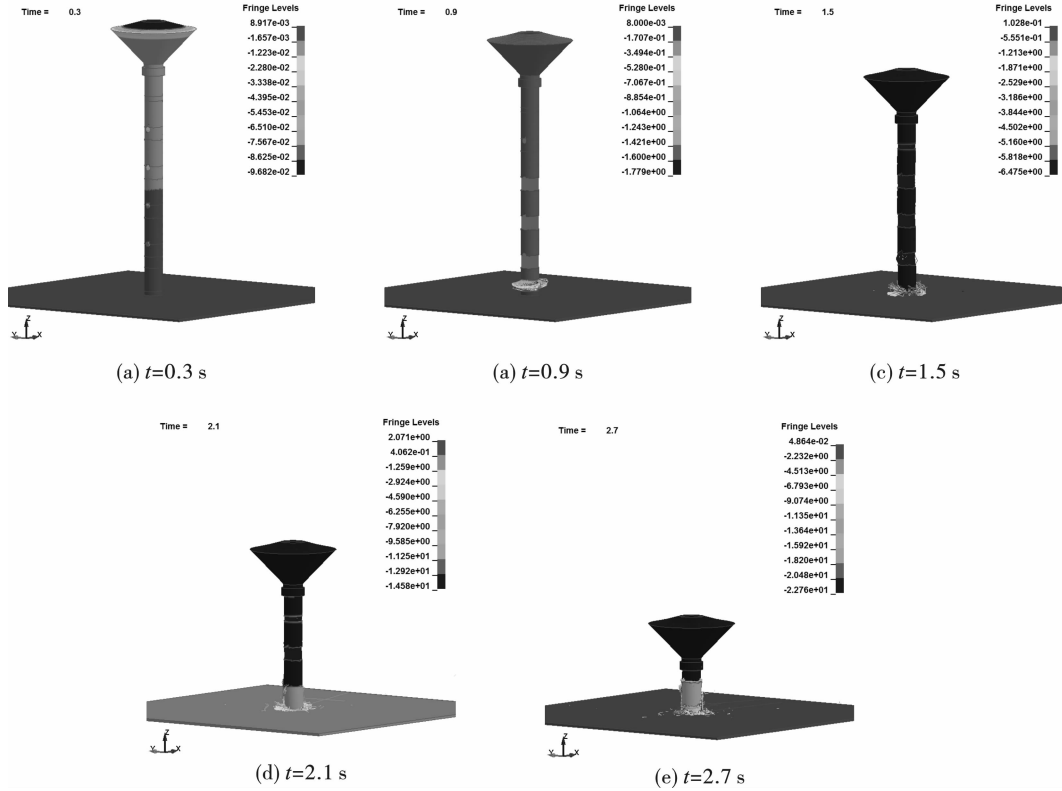


图 6 水塔失稳塌落运动过程

Fig. 6 Instability and collapse process of the water tower

读取水塔顶部 48185 号节点的塌落方向的位移时程曲线, 并与观测结果和自由落体运动对比, 如图 7 所示。在 0 ~ 1.2 s 内, 仿真结果与观测结果非常吻合; 1.2 ~ 2.0 s 内, 水塔垂直运动的加速度仿真计算结果拟合值为  $8.8 \text{ m/s}^2$ , 小于高速摄影观测结果的拟合值 ( $9.4 \text{ m/s}^2$ ), 且两者都小于重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。由此可见, 塌落堆积的混凝土渣块阻尼作用明显, 阻碍了水塔的垂直塌落运动。

#### 3.2.2 筒壁动力响应分析

选取支撑筒体底部 374 号实体单元作为代表性研究对象, 读取其竖向动态应变曲线, 如图 8(a) 所示。在曲线上标记出水塔各段冲击的时刻, 可以看出, 筒体底部单元受冲击加载瞬间 (0.05 s), 压应变陡增; 随后应变立即回弹 (0.05 s), 趋于一个小幅振荡的塑性应变。前 3 次冲击过程中, 由于向下冲击的冲量较小, 底部单元的动态应变最大能回弹至零点状态。前 3 次冲击后, 仿真计算的竖向最大压应变峰值为  $1535 \mu\epsilon$ 。经第 4 次、第 5 次和第 6 次冲击

后, 底部单元的塑性变形不断累积并趋于稳定, 最终塑性应变值为  $3765 \mu\epsilon$ 。

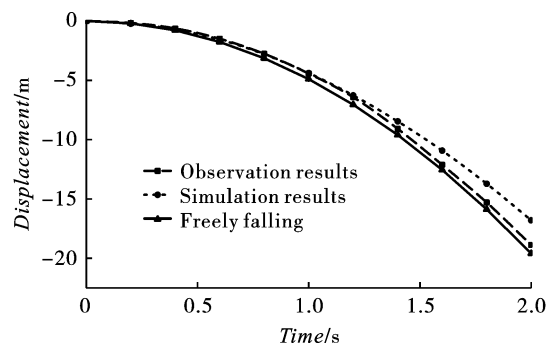


图 7 水塔塌落运动轨迹图

Fig. 7 Collapse trajectory of the water tower

为监测水塔底部筒壁受上段塌落冲击时的动态应力变化规律, 在水塔底部布置了 6 个应变测点, 略去爆炸荷载的作用, 得到筒壁的动态应变曲线如图 8(b) 所示。前 3 次冲击过程后, 筒壁竖向的最大压应变峰值实测结果的为  $1366 \mu\epsilon$ 。应变片在遭受前

3次冲击后断裂破坏,后续结果超峰失真。前3次的动态应变实测数据与仿真结果比较接近,且实测

的动态应变变化规律与仿真结果基本一致(图8)。因此可以认为数值仿真的结果比较可信。

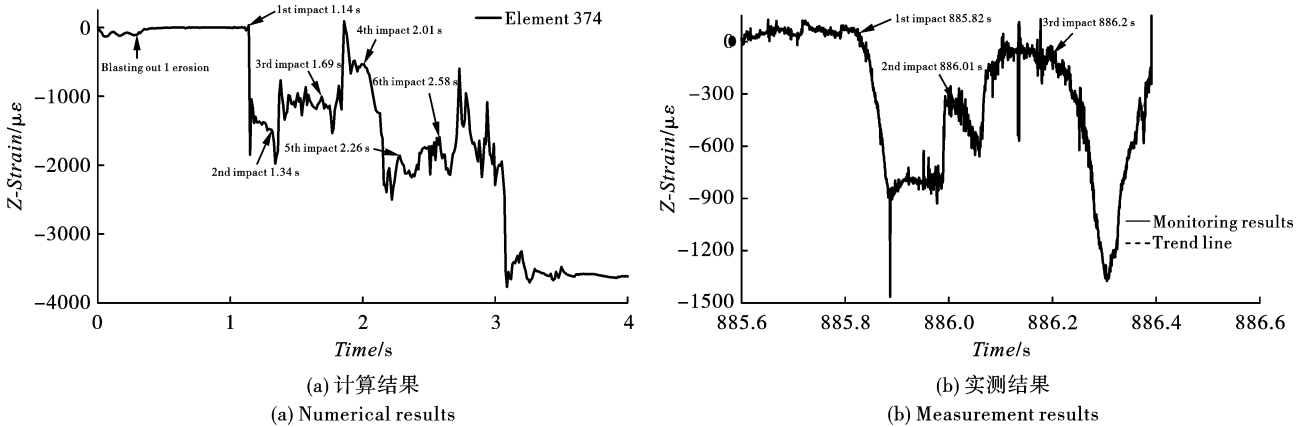


图8 底部筒体单元竖向动应变时程曲线

Fig. 8 Vertical dynamic strain-time curve of the bottom cylinder element

在多段连续塌落冲击作用下,水塔筒体底部筒体结构经历了压实、裂纹致裂、扩展和贯通的过程,总体呈现出累积损伤破坏的特征。

### 3.2.3 爆堆效果分析

对比水塔失稳倒塌仿真结果与实际爆堆效果,如图9所示。其中,筒体部分的仿真效果与实际比较接近;而水箱部分由于没有考虑水压爆炸荷载的作用,倒塌过程中持续受到筒体残渣的缓冲作用,导致触地后依然完整。在实际工程中,水箱部分采用了水压爆破,炸药爆炸的能量通过水体均匀作用于水箱壁,致使水箱解体非常充分。整个水塔的爆堆集中,高2.4 m、宽11.8 m,有效缩短了水塔的倒塌距离,减小了对周边环境的影响范围,并有利于后期残渣清运。

布置3个测点(5#、6#、7#),振动监测点具体布置如图10所示。其中,南侧的1#、2#、3#号测点采用的是成都中科测控有限公司生产的TC-4850型爆破测振仪,采样率为16 000 sps;其余4个测点采用的是加拿大InstanTel公司生产的InstanTel Micromate型测振仪,采样率为1024 sps。两款仪器在工程中应用广泛,其稳定性和精度均能满足测试要求。

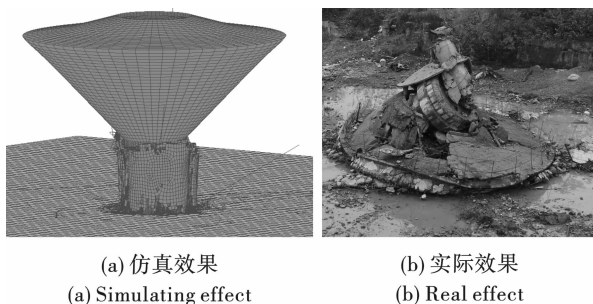


图9 水塔爆堆效果图

Fig. 9 Diagram of water tower muckpile

## 4 塌落触地振动监测与分析

为探索高耸水塔爆破拆除原地垂直塌落触地振动效应及其传播规律,在水塔周边总共设置了7个振动测点,南侧布置4个测点(1#、2#、3#、4#),西侧

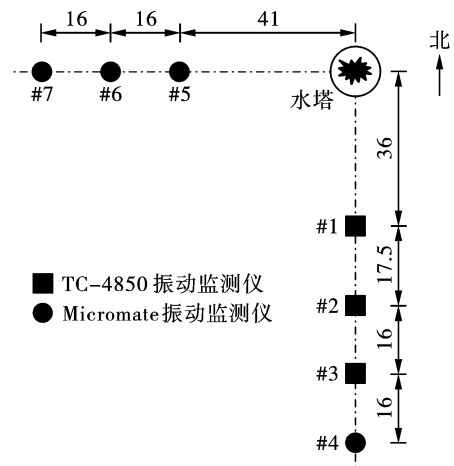


图10 振动测点布置图(单位:m)

Fig. 10 Layout of vibration measuring points(unit:m)

整理监测数据,得到各个测点 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向的质点振动速度峰值(PPV)和主频,如表3所示。

从表3数据可以看出, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向的质点振动速度在数值各不相同,单个分量的峰值也在1.05~1.26 cm/s之间,振动主频为4.6~15.5 Hz。水塔爆破及塌落触地引发的质点振动典型波形,如图11所示。可见,振动信号的高频部分衰减迅速,能量主要集中在低频部分。

表 3 质点振动速度及主频监测数据

Table 3 Monitoring data of vibration velocity and dominant frequency

测点	距离/m	X 方向		Y 方向		Z 方向	
		峰值/(cm · s <sup>-1</sup> )	主频/Hz	峰值/(cm · s <sup>-1</sup> )	主频/Hz	峰值/(cm · s <sup>-1</sup> )	主频/Hz
1#	36.0	1.26	8.6	1.20	10.0	1.05	12.8
2#	53.5	0.98	8.1	0.87	9.8	1.13	10.6
3#	69.5	0.61	9.5	0.72	10.7	0.26	11.0
4#	85.5	0.32	7.4	0.14	11.6	0.22	4.6
5#	41.0	0.54	15.5	0.51	13.1	0.92	12.2
6#	57.0	0.35	13.1	0.23	14.6	0.72	12.8
7#	73.0	0.28	12.5	0.57	17.1	0.51	11.6

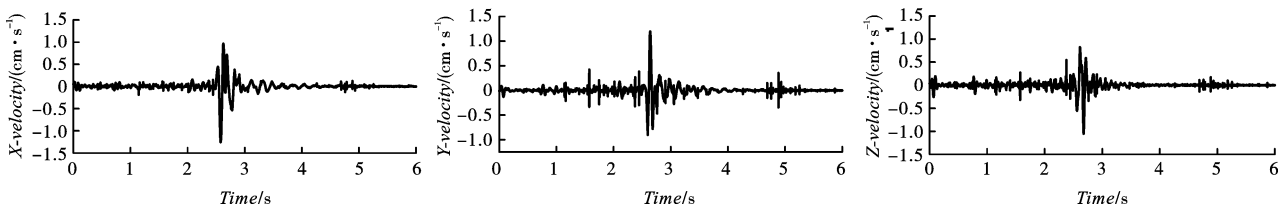


图 11 质点振动速度典型时程曲线

Fig. 11 Typical vibration waveforms

利用 MATLAB R2014a 软件进行编程, 对测得 分布, 如表 4 所示。  
的振动信号进行小波包分析, 得到各主振频带能量

表 4 各主振频带占总能量百分比分布表

Table 4 Percentage distribution table of each main vibration frequency band in total energy

测点	能量频带/Hz	百分比/%	能量频带/Hz	百分比/%	能量频带/Hz	百分比/%
1#	0 ~ 31.3	97.618	/	/	/	/
2#	0 ~ 62.5	60.237	78.1 ~ 125	24.771	187.5 ~ 234.3	5.983
3#	0 ~ 62.5	94.732	/	/	/	/
4#	0 ~ 8	84.006	8 ~ 20	12.047	/	/
5#	4 ~ 10	15.290	10 ~ 16	65.699	24 ~ 32	18.002
6#	0 ~ 8	8.485	8 ~ 16	82.414	24 ~ 32	8.542
7#	0 ~ 10	14.141	10 ~ 16	62.106	24 ~ 32	23.279

由此可见, 水塔爆破拆除的振动信号的能量在频域上分布比较广, 主振频带主要集中在 5 ~ 60 Hz, 而在这个范围内还可以细分成 0 ~ 10 Hz、10 ~ 16 Hz 和 24 ~ 32 Hz 几个分振频带。水塔爆破塌落地振动的频率与建筑物的自振频率比较接近, 容易造成结构共振, 对建筑物的危害较大。

统计各个测点信号的前 200 Hz 的总能量, 并绘制总能量随传爆距离的曲线图, 如图 12 所示。可见, 随着距离水塔塌落中心越来越远, 振动信号的总能量显著减小。

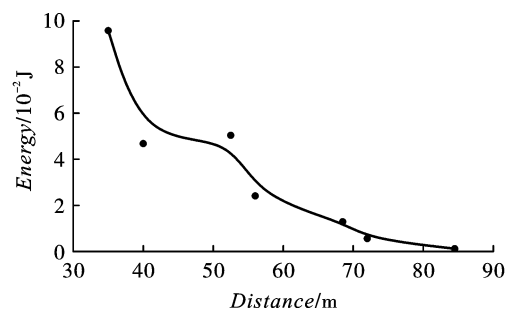


图 12 振动信号总能量衰减曲线

Fig. 12 Attenuation curve of the total energy of the vibration signal

## 5 结论

针对受限空间中爆破拆除高耸构筑物的难题,在传统定向爆破拆除技术的基础上,创新提出了高耸构筑物垂直原地坍塌爆破拆除技术。依托某 38m 高钢筋混凝土水塔爆破拆除工程,采用高速摄影机观测了水塔爆破拆除失稳倒塌的运动过程,采用动态应变仪测试了底部筒体的动力响应过程,并与数值仿真结果进行了对比分析。此外,还采用爆破测振仪监测了水塔周边区域的振动效应。全方位地研究了水塔类高耸构筑物垂直原地爆破拆除倒塌运动规律,筒体破坏特征和触地振动效应,可以得出如下结论:

(1)水塔垂直原地爆破拆除的坍塌运动过程近似自由落体运动,回归分析得到水塔向下塌落加速度约为  $9.4 \text{ m/s}^2$ ,略小于重力加速度;钢筋网和先触地混凝土渣块的阻尼作用,阻碍了水塔向下运动的速度。

(2)采用“分离式”有限元模型,可以近似还原水塔的塌落运动过程,并精确捕捉每段筒体的冲击碰撞时刻;159号混凝土材料模型,可以很好地模拟水塔筒体塌落冲击破坏过程。

(3)水塔筒体冲击破坏过程复杂,总体呈现多次冲击累积损伤破坏过程;每次冲击都呈现明显的应力反弹现象,前3次冲击过程后,筒壁竖向的最大压应变峰值为  $1366 \mu\epsilon$ 。

(4)水塔爆破拆除的振动信号的能量在频域上分布比较广,主振频带主要集中在  $5 \sim 60 \text{ Hz}$ ,振动信号的高频部分衰减迅速,能量主要集中在低频部分,并且振动信号的总能量随着距离的增加而显著减小。

### 参考文献 (References)

- [1] 谢先启,卢文波. 精细爆破[J]. 工程爆破,2008(3):1-7.
- [1] XIE Xian-qi, LU Wen-bo. 3P (Precise, Punctilious and Perfect) blasting[J]. Engineering Blasting,2008(3):1-7. (in Chinese)
- [2] L Yong, X Cui, L Hua. Demolition technique of high thin-wall hyperbolic reinforced concrete cool tower by directional controlled blasting[J]. Strategic Study of CAE, 2008,6(4):40-45.
- [3] 汪旭光,于亚伦. 21世纪的拆除爆破技术[J]. 工程爆破,2000(1):32-35.
- [3] WANG Xu-guang, YU Ya-lun. Demolition blasting technology faced with the 21 century[J]. Engineering Blasting,2000(1):32-35. (in Chinese)
- [4] 谢先启. 精细爆破发展现状及展望[J]. 中国工程科学,2014,16(11):14-19.
- [4] XIE Xian-qi. Precision blasting, current status and its prospective[J]. Strategic Study of CAE,2014,16(11):14-19. (in Chinese)
- [5] WANG Shu-ren, ZHANG Ji-yun, LI Jing-tao, et al. Analysis of vibration attenuation and energy consumption of blasting demolition chimney: A case study[J]. Tehnicki vjesnik -Technical Gazette,2020,27(3):826-834.
- [6] 孙金山,谢先启,贾永胜,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除的下坐及早期断裂预测[J]. 爆炸与冲击,2022,42(8):160-174.
- [6] SUN Jin-shan, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Prediction of sinking down and early breaking for blasted reinforced concrete chimney [J]. Explosion and Shock Waves,2022,42(8):160-174. (in Chinese)
- [7] 汪旭光. 爆破手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [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.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 谢先启,刘昌邦,贾永胜,等. 38 m 高倒锥形钢筋混凝土水塔控爆拆除[J]. 爆破,2009,26(2):61-63.
- [9] XIE Xian-qi, LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, et al. Controlled blasting demolition of 38 m high reverse cone shape RC water tower[J]. Blasting,2009,26(2):61-63. (in Chinese)
- [10] 任志远,程贵海,靳洋,等. 复杂环境下 150t 倒锥形水塔定向爆破拆除[J]. 爆破,2008,25(4):62-66.
- [10] REN Zhi-yuan, CHENG Gui-hai, JIN Yang, et al. Demolition of a 150 ton cone water tower under complicated circumstances by directional blasting [J]. Blasting, 2008,25(4):62-66. (in Chinese)
- [11] 方桂富,余兴春,方春. 36 m 高砖砌水塔定向折叠爆破拆除[J]. 爆破,2002(4):53-54.
- [11] FANG Gui-fu, YU Xing-chun, FANG Chun. Demolition of a 36 m-high brick water tower by directional folding blasting[J]. Blasting,2002(4):53-54. (in Chinese)
- [12] 史秀志,陈寿如,宋光明. 水塔折叠爆破拆除[J]. 工程爆破,2000(4):26-29.
- [12] SHI Xiu-zhi, CHEN Shou-ru, SONG Guang-ming. Demolition of a water tower by folding controlled blasting[J]. Engineering Blasting,2000(4):26-29. (in Chinese)

- 40(2):58-61.
- [10] ZHU Bi-yong, HE Yan, JIAO Wen-yu, et al. Numerical simulation research on empty hole effect in parallel cut blasting[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2):58-61. (in Chinese)
- [11] 文 涛, 谭 海. 岩石爆破中的空孔效应数值计算分析[J]. 爆破, 2011, 28(3):58-61.
- [11] WEN Tao, TAN hai. The empty hole effect numerical computation analysis during rock blasting[J]. Blasting, 2011, 28(3):58-61. (in Chinese)
- [12] SHOBEIR Arshadnejad, KAMRAN Goshtasbi, JAMSHID Aghazadeh. A model to determine hole spacing in the rock fracture process by non-explosive expansion material[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2011, 18(5):509-514.
- [13] SHOBEIR Arshadnejad. Design of hole pattern in static rock fracture process due to expansion pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 123(C):104100-104100.
- [14] 康 楠, 刘元雪, 余 鹏, 等. 地下工程非爆破开挖机械破碎法机理及应用[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(3):21-25.
- [14] KANG Nan, LIU Yuan-xue, YU Peng, et al. Mechanism of hammer impact method and its application in non-blasting excavation of underground projects. [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015(3):21-25 (in Chinese)
- [15] 陈秋宇, 李海波, 夏 祥, 等. 爆炸荷载下空孔效应的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11):2749-2755.
- [15] CHEN Qiu-yu, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Research and application of empty hole effect under blasting loading[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11):2749-2755. (in Chinese)
- [16] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中试样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11):3399-3403.
- [16] DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11):3399-3403. (in Chinese)
- [17] 包 含, 伍法权, 郝鹏程. 岩石 I 型断裂韧度估算及其影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3):604-612.
- [17] BAO Han, WU Fa-quan, HAO Peng-cheng. Estimation of mode I fracture toughness of rock and its impact factors analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3):604-612. (in Chinese)
- [18] 崔 松, 刘送永, 黄 举. 空孔作用下定向涨裂破岩试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5):1570-1580.
- [18] CUI Song, LIU Song-yong, HUANG Ju. Experimental research on directional fracturing and rock breaking under action of holes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(5):1570-1580. (in Chinese)
- [19] 李启月, 吴正宇, 黄武林. 直眼掏槽空孔效应的计算模型改进与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5):925-930.
- [19] LI Qi-yue, WU Zheng-yu, HAUNG Wu-lin. Improvement and analysis of calculation model for empty hole effect in parallel cut[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(5):925-930. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚

(上接第 8 页)

- [13] 谢兴博, 龙 源, 薛峰松, 等. 钢筋混凝土筒形水塔双向切口折叠爆破拆除[J]. 爆破器材, 2002(4):29-33.
- [13] XIE Xing-bo, LONG Yuan, XUE Feng-song, et al. Demolition blasting of reinforced concrete water tower[J]. Explosive Materials, 2002(4):29-33. (in Chinese)
- [14] 李砚召, 杨仁华, 刘国军, 等. 原地塌落与定向倒塌相结合爆破拆除砖烟囱实例[J]. 爆破, 2004(3):56-58.
- [14] LI Yan-zhao, YANG Ren-hua, LIU Guo-jun, et al. An engineering example of brick chimney demolition by the combination of former place collapse and directional blasting[J]. Blasting, 2004(3):56-58. (in Chinese)
- [15] 杨 军, 杨国梁, 张光雄. 建筑结构爆破拆除数值模拟[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [16] YVONNE D Murray. Theory and evaluation of concrete material model 159 [C] // 8th International LS-DYNA Users Conference: Material Technology, 2007:25-35.
- [17] J O Hallquist. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Livermore Software Technology Corporation, 2018.

英文编辑:陈东方