

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.06.009

# 内含解毒塔的不对称框架结构解毒房的定向爆破拆除\*

费鸿禄<sup>①</sup> 周健华<sup>①</sup> 王高山<sup>②</sup>

①辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

②中油管道建设工程有限公司(河北廊坊,065000)

[摘 要] 以沈阳铬渣无害化处理厂解毒房爆破拆除为工程实例,研究内含解毒塔的不对称框架结构的解毒房的定向拆除爆破。根据实际工程设计模拟方案,针对不同爆高和不同延期时间,采用 LS-DYNA 软件进行 4 种爆破方案的模拟,经对比分析,得出最佳的爆破方案。分析解毒塔下落过程可知,最后一排立柱起爆的时间要小于整体形成有效倾角的时间,同时也要小于解毒塔的落地时间,起爆时间与爆高是解毒房顺利倒塌的关键。理论计算解毒房倒塌转角随时间的变化,与模拟较为符合;实际倒塌转角随时间的变化与模拟过程更为接近,采用 LS-DYNA 软件可以较好地模拟爆破拆除过程。

[关键词] 爆高;延期;特殊结构;数值模拟;方案优化;定向爆破

[分类号] TU746.5

## 1 工程概况

结合沈阳市铬渣无害化处理厂解毒房的定向爆破拆除项目,采用 ANSYS/LS-DYNA 模拟不同爆高、不同延期时间时解毒房的倒塌过程<sup>[1]</sup>,依此来指导解毒房的拆除设计。解毒房内有相对独立的解毒塔。起爆后,解毒塔失去原有立柱的支撑,在重力的作用下开始下落。所以,必须在解毒塔落到地面之前使解毒房发生倾斜并形成有效倾角,最后一排立柱起爆后,以最后排立柱为轴形成定轴转动<sup>[2]</sup>,解毒房带着解毒塔一起倒向爆破方向。研究结果对类似的爆破拆除工程具有参考价值。

### 1.1 工程环境

沈阳市新城子区 30 万 t 堆存铬渣无害化处理厂由铬渣磨粉系统和铬渣解毒系统两部分组成。其中,铬渣磨粉系统主要包括 1 座磨粉房和 7 座混凝土仓;铬渣解毒系统主要由铬渣解毒房组成。因场地的需要,也为了及时消除安全隐患,决定将铬渣处理厂房及混凝土仓进行爆破拆除,其中施工难度最大的是解毒房。

铬渣解毒房东侧距厂区围墙 70 m;南侧距厂区围墙 160 m;北侧距闲置厂房 18 m;西侧紧临混凝土仓,80 m 处上方有 11 kV 的高压线通过,300 m 处有高铁轨道。爆区现场如图 1 所示。

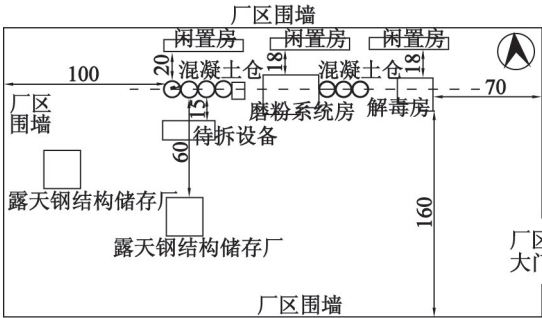
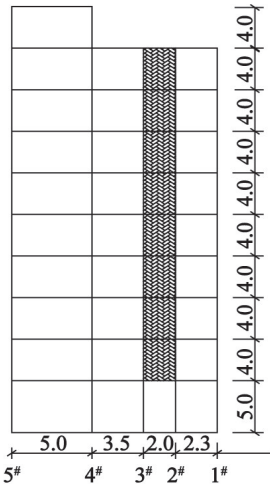
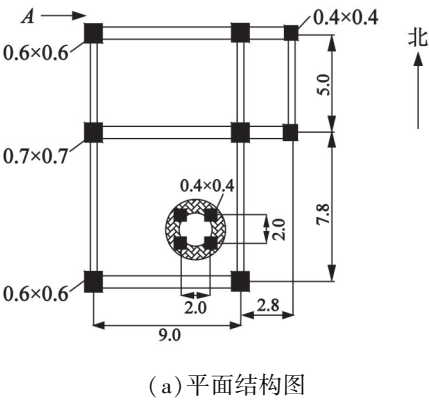


图 1 爆区现场示意图(单位:m)  
Fig. 1 Schematic diagram of blasting area(unit:m)

### 1.2 解毒房结构

铬渣解毒房为钢筋混凝土不对称框架结构,如图 2 所示。南北方向长 13.40 m;东西方向宽 12.35 m;柱号 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>为 9 层楼,高 37 m;柱号 4<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>为 10 层楼,高 41 m;第一层高 5 m,其余各层每层高 4 m。解毒房南北方向布置 3 排立柱、南侧东西方向布置 2 排立柱、北侧东西方向布置 3 排立柱。南侧和北侧承重立柱尺寸为 600 mm×600 mm,中间一排立柱尺寸为 700 mm×700 mm,东北侧立柱尺寸为 400 mm×400 mm,梁尺寸为 200 mm×600 mm。楼房内在东南侧有一个由 4 根 5 m 高的立柱支撑的外径为 3 m 的解毒塔(2~9 层),其外壁为 15 mm 厚的钢板,

\* 收稿日期:2016-01-26  
作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授,博士,博导,从事工程爆破和地下工程方面的科研与教学工作。E-mail:feihonglu@163.com  
通信作者:周健华(1990-),男,硕士研究生,从事工程爆破方面的研究。E-mail:635102956@qq.com



(a) 平面结构图

图2 解毒房结构示意图(单位:m)

Fig. 2 Structure of the detoxification house(unit:m)

内衬为 600 mm 的耐火砖,总质量 300 t,直达楼顶,立柱尺寸为 400 mm×400 mm,设有楼梯 1 个。

1.3 爆破方案

根据解毒房的周围环境条件和结构特点,正东方和正北方都有保留厂房,正西方向没有倒塌空间,并且在 300 m 范围内有一条高铁和 80 m 处上方有高压线通过。正南方场地开阔,土质松散,对触地波有良好的衰减作用,且满足倒塌距离。经过比较多种方案,最终采用正南向一次定向倾倒的爆破方案。

2 数值模拟

2.1 模拟方案的预定

根据解毒房的结构形式以及楼层特点,爆高分别选 9 m 和 13 m 两种,爆破切口为梯形切口(图 3),对于 1#、4#、5#柱子的切口高度分别为 9、5、2 m 和 13、9、2 m,解毒塔的 4 根 5 m 高立柱爆破时,爆高直接选取 5 m,不再另行设置。在雷管延期方面,选择毫秒延期和半秒延期 2 种形式。

考虑到被爆结构的特殊性,在确定爆破方向的基础上,针对不同爆高和不同雷管延期时间做了大

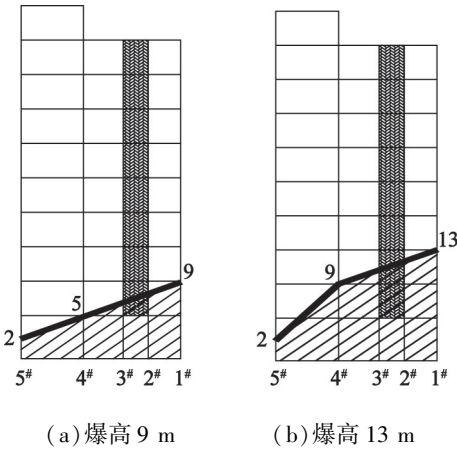
量的模拟试验,选出 4 组具有代表性的爆破方案进行对比分析。

方案 I :爆高为 9 m;采用 1 段、3 段、5 段半秒延期导爆管雷管,延期时间分别为 0、1.00、2.00 s;1#~2#柱子采用 1 段;3#~4#柱子采用 3 段;5#柱子采用 5 段。

方案 II :爆高为 9 m;采用 1 段、3 段、5 段毫秒延期导爆管雷管,延期时间分别为 0、0.05、0.11 s;1#~2#柱子采用 1 段;3#~4#柱子采用 3 段;5#柱子采用 5 段。

方案 III :爆高为 13 m;采用 1 段、3 段、5 段毫秒延期导爆管雷管,延期时间分别为 0、0.05、0.11 s;1#~2#柱子采用 1 段;3#~4#柱子采用 3 段;5#柱子采用 5 段。

方案 IV :爆高为 13 m;采用 1 段、7 段、11 段毫秒延期导爆管雷管,延期时间分别为 0、0.20、0.46 s;1#~2#柱子采用 1 段;3#~4#柱子采用 7 段;5#柱子采用 11 段。



(a) 爆高 9 m (b) 爆高 13 m

图3 解毒房爆破切口方案(单位:m)

Fig. 3 Blasting cut design of the detoxification house(unit:m)

2.2 有限元模型的建立

根据工程实际,按照 1 : 1 的比例建模,如图 4 所示。为了简化模型,不考虑墙体对结构的影响,主要由柱、梁、板以及地面构成整个模型。

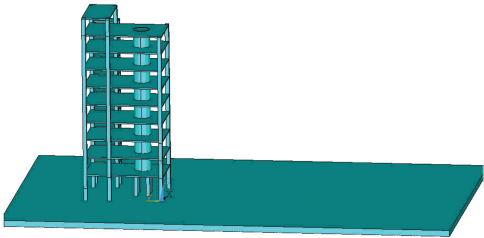


图4 解毒房有限元模型

Fig. 4 LS-DYNA model of the detoxification house

整个解毒房采用一个单元模型 Solid164<sup>[3]</sup>,地面采用刚性材料,具体的参数如表 1 所示。

表 1 模型材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料名称	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ Pa	泊松比
混凝土	3 000	$2.8 \times 10^{10}$	0.2
地面	3 000	$3.0 \times 10^{11}$	0.3

定向爆破拆除主要是破坏建筑物的承重立柱,以达到倒塌的效果。模拟中,采用在 ANSYS/LS-DYNA 中添加关键字 \* Mat\_Add\_Erosion 来控制立柱材料失效<sup>[4]</sup>;通过定义失效应变来控制建筑物各立柱发生断裂或破碎的界限,从而模拟立柱被爆破

破坏的倒塌过程;当爆破切口形成之后,建筑物发生倾斜至倒塌,并发生解体。

2.3 模拟结果的分析

图 5 为方案 I 数值模拟的解毒房倒塌过程。由图 5 可以看出,当前面 4 排立柱消失后,最大应力主要分布在最后一排立柱和最顶层楼板上,解毒房发生了倾斜;在最后一排立柱消失后,最大的应力分布主要是在解毒房的上部结构和前排立柱,此时,解毒房几乎不再发生倾斜,上部楼层在重力作用下下落、破坏,8 s 时,解毒房仍未完全倒塌。

图 6 为方案 II 模拟的解毒房倒塌过程。由图 6 可以看出,毫秒延期的爆破切口几乎是瞬间形成,解毒房在切口形成的瞬间发生了倾斜,切口形成后,楼

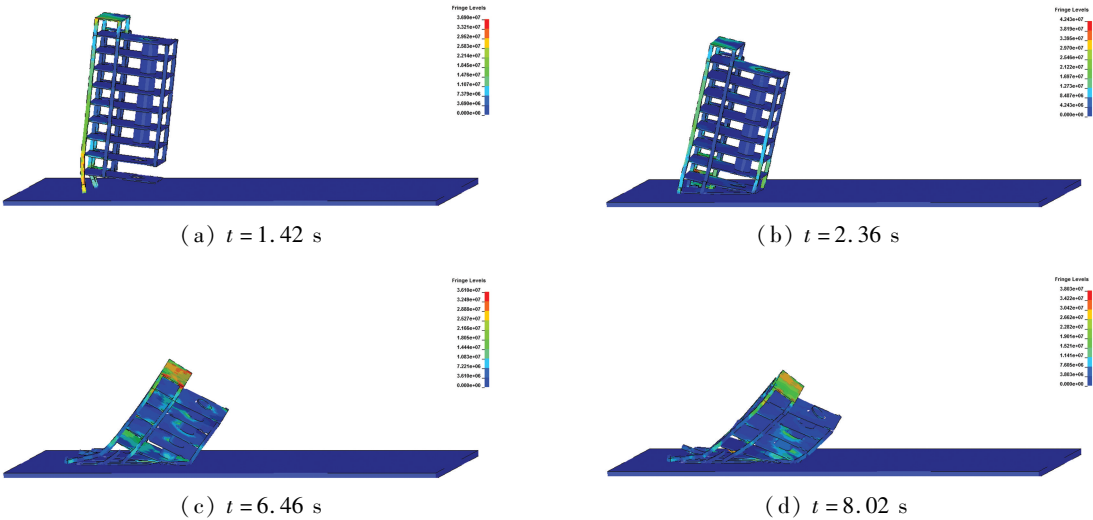


图 5 方案 I 数值模拟结果  
Fig. 5 Numerical simulation results of Scheme I

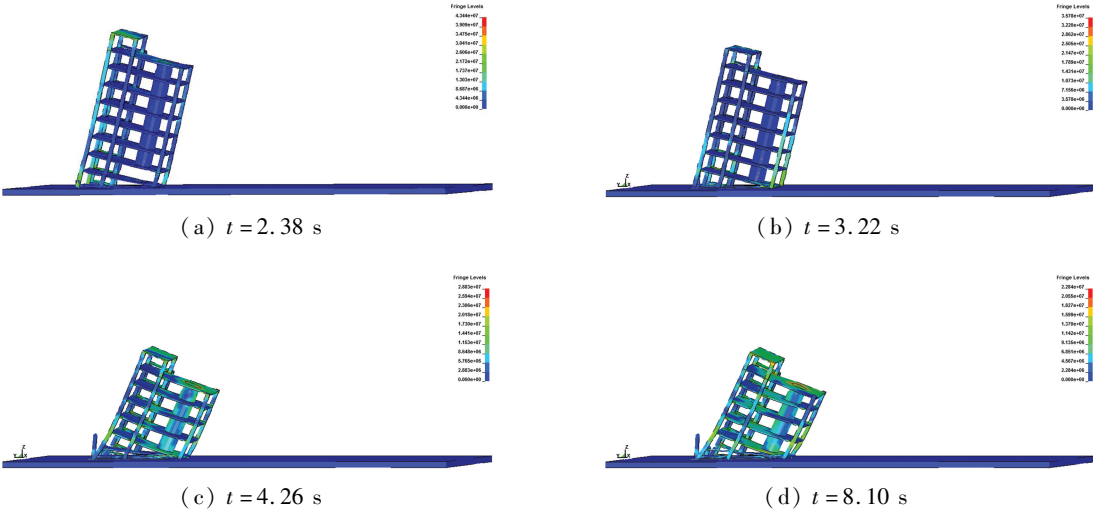


图 6 方案 II 数值模拟结果  
Fig. 6 Numerical simulation results of Scheme II

体不再继续倾斜,在重力作用下下落,与地面冲击破坏,但是楼体在 6 s 之后几乎不再下落,直到模拟结束,楼体依然屹立在原地未倒。

图 7 为方案Ⅲ模拟的解毒房倒塌过程。由图 7 可以看出,由于是毫秒延期,爆破切口几乎瞬间形成;此后解毒房几乎不发生倾斜,解毒房与楼板在重力的作用下迅速下落,堆积在一起;8.30 s 时,倒塌基本结束,形成爆堆。

图 8 为方案Ⅳ模拟的解毒房倒塌过程。同样是毫秒延期,此时爆破切口形成较快,但比方案Ⅲ稍有延时,最后一排立柱形成了铰链,解毒房带动解毒塔倾向倒塌方向;在切口完全形成之后,解毒房已形成有效倾角,上部楼体在重力作用下层层与地面冲击解体;7.80 s 时,倒塌基本结束,形成爆堆。

2.4 模拟方案的对比

由于方案Ⅱ爆高较小,并且是毫秒延期,没有足够的时间形成良好的倾角,导致解毒房最终未能倒塌,以至模拟失败。

从倾斜角度看,虽然方案Ⅰ爆高小于方案Ⅳ,但是方案Ⅰ是半秒延期,形成倾角时间较长,与方案Ⅳ同样形成了较好的倾角;方案Ⅲ虽然爆高足够,但是其延期时间过短,未能形成较好的倾角。

从后座情况看,方案Ⅰ由于是半秒延期,在前部分立柱消失后,其质量主要集中在最后排立柱上,并持续了半秒钟,在最后排立柱还没有消失之前,楼体将后排立柱压断,继而形成部分后座;方案Ⅲ延期时间较短,倾斜角度小,后排立柱下落触地后稍微出现了一点后座现象;方案Ⅳ与方案Ⅲ相比,切口形成略

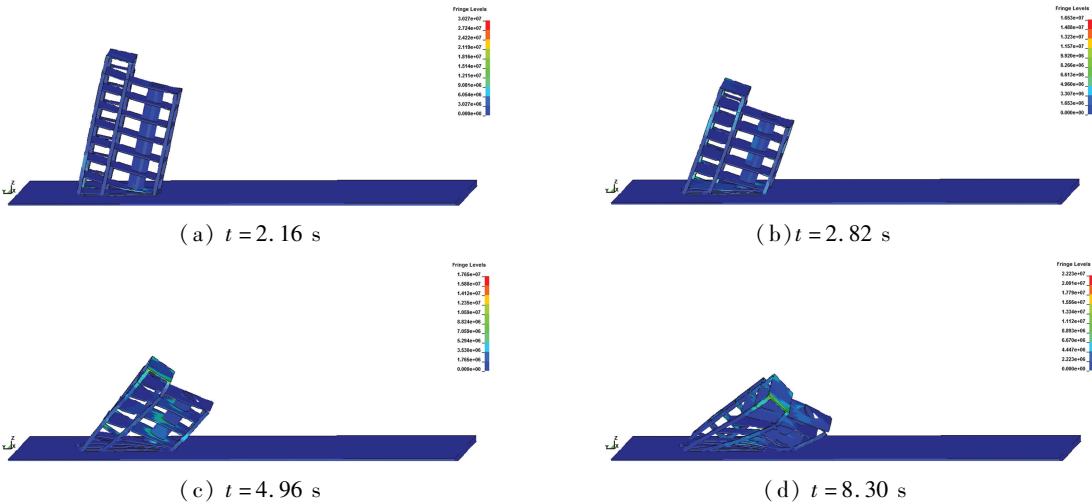


图 7 方案Ⅲ数值模拟结果  
Fig. 7 Numerical simulation results of Scheme III

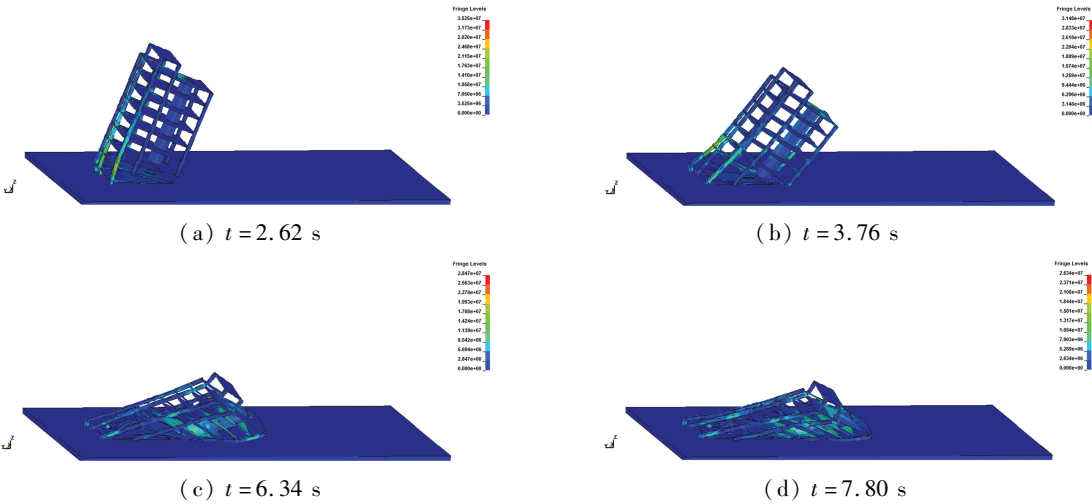


图 8 方案Ⅳ数值模拟结果  
Fig. 8 Numerical simulation results of Scheme IV



有延时,形成较好的倾角,几乎没有发生后座。

从爆堆大小看,方案 I、Ⅲ、Ⅳ的爆堆高度分别为 8.2、7.4、6.4 m,且方案 I 最后并没有完全解体;方案Ⅳ的爆堆和解体效果均优于方案Ⅲ。

综上所述,方案Ⅳ中设计的爆高和延时间隔参数最为合适。

3 爆破方案

3.1 爆破切口高度的设计

待拆解毒房为框架结构建筑,由于结构内有相对独立的解毒塔的存在,为定向拆除爆破增加了难度。普通框架结构的爆高范围计算公式<sup>[5]</sup>如下:

$$h \geq \frac{H_c - \sqrt{H_c^2 - 2l^2}}{2}.$$

(1)

式中: $h$  为切口高度,m; $H_c$  为建筑物重心高度,m; $l$  为切口起点到终点的水平距离,m。

由式(1)可知:建筑物倒塌的最小爆高  $h = 6.1$  m,爆破切口闭合后,建筑物会继续倒塌。但考虑此结构的特殊性,解毒塔的承重立柱为 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>柱子,爆破后解除约束的解毒塔在重力的作用下开始下落,必须在其落地之前使整个结构体也发生倾斜并失稳,使解毒房的倾斜带动解毒塔同时向设计方向倒塌。假设解毒塔下落为自由落体,则其下落时间为  $t_0 = \sqrt{2h_0/g} = 1.02$  s,  $h_0$  为解毒塔支撑立柱高度,单位 m。而实际中,由于楼板与解毒塔之间的摩擦以及解毒塔失稳也要有一定的时间,故实际时间长于 1.02 s。考虑到解毒房失稳倾倒时要形成较大的倾覆力矩<sup>[6]</sup>,结合模拟结果,故爆高取 13 m,由南向北主要承重立柱爆高依次为 13、9、2 m 的梯形缺口。

3.2 起爆顺序的设计

考虑结构的特殊性,结合数值模拟倒塌过程,采用毫秒分段延时爆破,由南向北共分 3 段:一层立柱分别为 1、7、11 段,时间分别为 0、0.20、0.46 s;二层立柱分别为 1、7 段;三层立柱采用 1 段。所有炮孔用雷管簇连后,再将导爆管、四通连接在同一网路上,一次起爆。

3.3 爆破参数的选取

- 1) 炮孔直径  $d$ 。 $d = 38$  mm。
- 2) 最小抵抗线  $W$ <sup>[7]</sup>。横截面为 600 mm × 600

mm 的立柱,最小抵抗线  $W$  取 300 mm;横截面为 700 mm × 700 mm 的立柱,最小抵抗线  $W$  取 350 mm;横截面为 600 mm × 200 mm 的横梁,最小抵抗线  $W$  取 100 mm。

3) 炮孔布置。对于解毒房两种截面尺寸的立柱,均沿立柱横向以梅花型排列布设双排孔。其中,600 mm × 600 mm 断面立柱,孔深为 450 mm,孔距取 300 mm,排距 100 mm;700 mm × 700 mm 断面立柱,孔深为 500 mm,孔距取 400 mm,排距 150 mm。

4) 单孔装药量<sup>[8]</sup>。

$$Q = qV.$$

(2)

式中:  $Q$  为单孔装药量,kg;  $q$  为单位体积耗药量,kg/m<sup>3</sup>;  $V$  为炮孔担负的爆破体体积,m<sup>3</sup>。

根据计算结果,在解毒房一层选取 2 根不同截面尺寸的立柱进行试爆,试爆采用 2<sup>#</sup>岩石乳化炸药,试爆效果见图 9,试爆参数见表 2。



(a) 700 mm × 700 mm 柱子 (b) 600 mm × 600 mm 柱子

图 9 立柱试爆效果图

Fig. 9 Tested blasting of the column

试爆现场(图 9)中,因立柱配筋复杂,箍筋密度较高,试爆采用的炸药单耗偏小,未能充分破坏立柱。因此,为了达到整柱完全失稳的爆破效果,需要增大炸药单耗,考虑到立柱根部受固定端约束导致夹持作用大,立柱下端炮孔单耗要适当提高。优化后的爆破参数见表 3。

3.4 爆破前的预处理

1) 以人工和机械的方式<sup>[9]</sup>将爆破缺口范围内的外墙、隔墙拆除,将解毒塔的最下面两层部分人工破坏掉。

表 2 试爆参数  
Tab. 2 Tested blasting parameters

部位	立柱截面/(mm × mm)	孔深 $L$ /mm	孔距 $a$ /mm	排距 $b$ /mm	炮孔个数	炸药单耗/(kg · m <sup>-3</sup> )	单孔药量/g
一层	700 × 700	500	400	150	2	1.0	200
一层	600 × 600	450	300	100	2	1.0	150

表 3 爆破参数

Tab.3 Blasting parameters

部位	立柱截面/(mm×mm)	孔深 L/mm	孔距 a/mm	排距 b/mm	炸药单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )	单孔药量/g
一层	600×600	400	300	100	1.2	300
	700×700	470	400	150	1.4	350
二层	600×600	400	300	100	1.2	300
	700×700	470	400	150	1.4	350
三层	600×600	400	300	100	1.2	300
	700×700	470	400	150	1.4	350

2)在倾倒方向的最后一排立柱和前一排梁两端用风镐破坏混凝土,露出钢筋,并用气焊割断钢筋,长度为 20 cm,进行弱化处理。

3)将解毒房附近的设备预先拆除,保证倾倒空地足够,并将内部设备进行拆除。

3.5 解毒房转角与时间关系的计算

解毒房是非对称的特殊框架结构,其倾倒过程可以简化为定轴转动<sup>[10]</sup>,切口形成后其重心高度

$$H_c = \frac{\sum m_i h_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2 + m_3 h_3}{m_1 + m_2 + m_3} = 18.84 \text{ m}; \tag{3}$$

$$e = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{m_1 + m_2 + m_3} = 6.88 \text{ m}; \tag{4}$$

$$a = \sqrt{e^2 + H_c^2} = 20.06 \text{ m}; \tag{5}$$

$$M = \sum m_i = m_1 + m_2 + m_3 = 4\,936\,350 \text{ kg}。 \tag{6}$$

式中: $H_c$  为重心高度,m; $e$  为偏心距,m; $a$  为转轴到冷却塔重心的距离,m; $M$  为转动部分总质量,kg。

将转动部分近似等效成同质量质量的圆柱薄壳,令其高度为 40 m,壁厚为 0.6 m。

$$M = \pi (R^2 - r^2) \rho; \tag{7}$$

$$R = r + 0.6。 \tag{8}$$

式中: $l$  为圆柱薄壳高度,m; $\rho$  为圆柱薄壳等效密度,kg/m<sup>3</sup>; $r$  为圆柱薄壳内径,m; $R$  为外径,m。解得: $r = 10.02 \text{ m}$ ;  $R = 10.62 \text{ m}$ 。

$$J_r = \frac{M}{12} (l^2 + 3r^2) = 782\,082\,878.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \tag{9}$$

$$J_R = \frac{M}{12} (l^2 + 3R^2) = 797\,365\,818.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \tag{10}$$

$$J = J_R - J_r = 15\,282\,939.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \tag{11}$$

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{e}{H_c}\right) = 20.06^\circ; \tag{12}$$

$$t = \sqrt{\frac{J}{2Mga}} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{1}{\sqrt{\cos\theta_0 - \cos\theta}} d\theta。 \tag{13}$$

式中: $J_r$  为内圆柱薄壳的转动惯量,kg·m<sup>2</sup>; $J_R$  为外圆柱薄壳的转动惯量,kg·m<sup>2</sup>; $J$  为整体的转动惯

量,kg·m<sup>2</sup>; $\theta_0$  为初始角度; $\theta$  为倾斜转角; $t$  为转角时间,s。

3.6 工程实际与模拟方案的对比

结合模拟与实际的倒塌过程,选取 4 个特殊角度与倾倒时刻进行对比,采用辛普森数值积分求得转角理论时间,如表 4 所示。

表 4 解毒房倾倒的转角时间

Tab.4 Collapse time and rotation angle of the detoxification house

计算方式	角度/(°)			
	24.2	30.6	37.0	43.4
理论计算/s	2.38	2.94	3.46	3.82
模拟结果/s	2.66	3.24	3.72	4.08
实际结果/s	2.82	3.48	4.02	4.46

从表 4 中可以看出,无论是在理论计算、模拟计算还是实际倒塌过程中,解毒房的转速均是逐渐加快的,理论倒塌的速度最快,其次是模拟结果,实际的倒塌相比之下最慢。这是因为,实际过程中,解毒房在倒塌过程中会有一些阻力,还有楼体本身之间的相互作用和触地后的减速等因素的影响;而理论计算则不考虑这些外部因素,因而最快;模拟计算是模型简化后近似的模拟倒塌过程,比理论接近于实际,但又不能完全吻合于实际。理论平均误差为 14.84%;模拟平均误差为 7.14%;由此可见,模拟楼体的定向爆破拆除的倒塌过程具有较高的近似性,对爆破施工具有较高的参考价值。

解毒房爆堆情况如图 10 所示,爆堆的大小主要通过解毒房解体后的长、宽、高 3 个因素来确定。解毒房爆堆的实际参数和方案Ⅳ模拟的爆堆尺寸与倒塌时间进行对比,如表 5 所示。

表5中,模拟结果的爆堆参数和实际结果基本吻合;其中,爆堆高度误差相对较大,为10.71%。这是因为,本次模拟采用 \*Mat\_Plastic\_Kinematic 塑性随动硬化模型来近似等效钢混材料模型<sup>[11]</sup>。但实际中,由于混凝土配筋不同,楼体各部位的强度



图 10 解毒房爆堆图

Fig. 10 Blasting muck pile of the detoxification house

表 5 爆堆尺寸及倒塌时间参数对比

Tab.5 Comparison of blasting heap parameters

项目	南北长/ m	东西宽/ m	爆堆高/ m	时间/ s
模拟结果	39.0	13.7	6.2	7.8
实际结果	42.0	15.0	5.6	7.6
误差/%	7.14	8.67	10.71	2.60

也不一样;而模拟中,统一采用模型中的材料来计算,导致了爆堆高度与实际数值相差 10.71%。其次,在实际倒塌中,墙体对解毒塔有一定的冲击作用,将解毒塔压变形甚至将其压坏;而模拟中,为了简化模型,没有设置墙体,导致解毒塔的破坏并不完全,致使爆堆高度有所增加。

综合上述结果,此次模拟与实际的误差均在工程允许范围内,可以证明此次采用 LS-DYNA 数值模拟软件进行的模拟具有较高的可信度。

4 结 论

以沈阳铬渣无害化处理厂内含解毒塔的解毒房爆破拆除为工程实例,通过 LS-DYNA 有限元软件,模拟不同爆高、不同延期时间下的解毒房倒塌过程,确定最优方案,并应用于工程中,得出主要结论:

1)爆破延期时间不同,立柱的失效顺序便有先后之分,楼体发生倾斜的时间便不同;爆高决定楼体倾斜的角度,爆高较小,楼体可能会发生倾而不倒;合理地设置爆高和延期时间对楼房定向爆破拆除至关重要。

2)解毒塔失去承重立柱发生自由下落,最后一排立柱起爆的时间要小于整体形成有效倾角的时间,同时也要小于解毒塔落地时间,这样可以保证解毒塔与解毒房同时倒塌。

3)将实际结果与方案Ⅳ的爆破模拟结果进行对比发现,模拟结果与实际倒塌过程基本相符,且爆堆参数以及倒塌时间的误差均在工程允许范围内。

参 考 文 献

[1] 杨国梁,杨军,姜琳琳. 框-筒结构建筑物的折叠爆破拆除[J]. 爆炸与冲击,2009,29(4):380-384.  
YANG G L, YANG J, JIANG L L. Numerical simulations on fold blasting demolition of frame-tube structures[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(4): 380-384.

[2] 尚军,谭雪刚,贺五一,等. 复杂环境条件下“八字形”楼房的爆破拆除[J]. 爆破,2011,28(3):62-65.  
SHANG J, TAN X G, HE W Y, et al. Complex environment “eight-shaped” demolition of buildings[J]. Blasting, 2011, 28(3): 62-65.

[3] 吴建宇,龙源,纪冲,等. 城市高层框架-筒体结构建筑物拆除数值模拟研究[J]. 爆破,2015,32(2):95-99.  
WU J Y, LONG Y, JI C, et al. Numerical simulation of explosive demolition of urban high-steered frame-tube structures[J]. Blasting, 2015, 32(2): 95-99.

[4] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA user’s manual Version 970[M]. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2003.

[5] 史家培. 建筑物爆破拆除理论与实践[M]. 北京:中国建筑业出版社,2009.

[6] 李兴华,龙源,钟明寿,等. 哈尔滨龙海大厦拆除爆破中的减振技术研究[J]. 爆破器材,2009,38(6):30-32.  
LI X H, LONG Y, ZHONG M S, et al. Study on technology of vibration reduction in demolition blasting of LongHai Mansion in Haerbin[J]. Explosive Materials, 2009, 38(6): 30-32.

[7] 费鸿禄,刘志东,戴明颖. 复杂环境下 10 层非对称框架结构楼房定向爆破拆除[J]. 爆破,2015,32(2):89-94.  
FEI H L, LIU Z D, DAI M Y. Directional explosive demolition of ten-storey dissymmetry building in complicated situation[J]. Blasting, 2015, 32(2): 89-94.

[8] 齐世福,刘好全,李宾利,等. 框剪结构高楼纵向倾倒拆除爆破研究[J]. 爆破器材,2014,43(3):41-47.  
QI S F, LIU H Q, LI B L, et al. Blasting study on the lengthwise collapse of a tall building with a frame shear wall structure[J]. Explosive Materials, 2014, 43(3): 41-47.

[9] 张厚科,徐建勇,汪浩,等. 复杂环境下非对称框架结构厂房的定向爆破[J]. 爆破,2009,26(1):75-77.  
ZHANG H K, XU J Y, WANG H, et al. Directional blasting demolition of dissymmetry building under complex environment[J]. Blasting, 2009, 26(1): 75-77.

[10] 李守巨,费鸿禄,张立国,等. 爆破拆除冷却塔倾倒过程的研究[J]. 爆炸与冲击,1995,15(3):282-288.  
LI S J, FEI H L, ZHANG L G, et al. Research on the falling process of cooling towers in destruction work[J].

[9] 刘永清,贺福明,陈亚宇. 爆破破碎度及块度分布的试验研究[J]. 煤炭工程,2005(4):58-60.  
LIU Y Q, HE F M, CHEN Y Y. Test and study on blasting crush rate and lump rate distribution[J]. Coal Engineering, 2005(4):58-60.

[10] 张云鹏,于亚伦. 台阶爆破岩石破碎块度分布的数学模型[J]. 河北冶金,1995(4):11-14.  
ZHANG Y P, YU Y L. Mathematical model of breaking-lumpiness distribution of benching dynamited rock[J]. Hebei Metallurgy,1995(4):11-14.

[11] 石文东,李柯,周征,等. 采用中部分段底部间隔装药方法降低大块率[J]. 矿业工程,2010,8(5):46-48.

SHI W D, LI K, ZHOU Z, et al. Section-wise charging at hole middle and spacing-wise charging at hole bottom to reduce high ratio of lumpy block caused by blasting [J]. Mining Engineering, 2010,8(5):46-48.

[12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 无声破碎剂:JC 506—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.  
National Department and Reform Commission. Soundless cracking agent: JC 506—2008 [S]. Beijing: China Standard Press,2008.

[13] 邬岩. 城市中心区大跨度深基坑石方控制爆破施工技术[J]. 河南科技,2013(11):19-21.

Controlled Blasting of Foundation Pit at Subway Station in Downtown Area

HU Kui

Beijing Anlian Guoke Safety Assessment Co. , Ltd. (Beijing, 101312)

[ABSTRACT] Blasting hazards and lumpiness control were studied essentially to ensure the successful blasting of the foundation pit at a city subway station. The optimized blasting design and the safe and effective protection deployment, which is economic and environment friendly, made it practically controlled within a permissible range in view of the safety and environment hazards during exploration operations such as blasting vibration, flying fragments, noxious fumes, extra-neous electricity, blasting noise, dust, and so on. The rock fragmentation effect was simulated by LS-DYNA to help the successful control of large lumpiness rate. The actual blasting outcome was in good agreement with the expectation, demonstrating a rather remarkable engineering benefit.

[KEYWORDS] controlled blasting; blasting hazards; lumpiness; LS-DYNA

(上接第 50 页)

Explosion and Shock Waves,1995,15(3):282-288.

[11] 言志信,刘培林,叶振辉. 框架剪力墙结构的定向爆破倒塌过程[J]. 爆炸与冲击,2011,31(6):647-652.

YAN Z X, LIU P L, YE Z H. Directional blasting collapse process of frame-shear wall structure[J]. Explosion and Shock Waves,2011,31(6):647-652.

Directional Blasting Demolition of a Detoxification House with Asymmetric Frame Structure Containing a Detoxification Tower

FEI Honglu<sup>①</sup>,ZHOU Jianhua<sup>①</sup>, WANG Gaoshan<sup>②</sup>

①Institute of Engineering Blasting, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)  
②China Petroleum Pipeline Construction Engineering Co. , Ltd. (Hebei Langfang, 065000)

[ABSTRACT] Blasting demolition project for a detoxification house in Shenyang Chromium Residue Harmless Treatment Plant was used as an example to study directional demolition blasting of a detoxification house with a symmetric frame structure. Simulation programs were designed according to the actual engineering. Software LS-DYNA was used to simulate four blasting schemes with different blasting heights and different delay times, and the optimum blasting scheme was obtained by comparison and analysis. Analysis of the where abouts process of the detoxification house shows that the initiation time of the last row column is less than the time of effective rake angle of overall, and also less than landing time of detoxification house. Initiation time or blasting height is the key to achieve successful collapse of the detoxification house. Theoretical calculation of collapse angle change of the detoxification house is in accordance with the simulation, and the variation of the actual collapse angle with time is much closer to the simulation process. Using LS-DYNA can better simulate blasting demolition.

[KEYWORDS] blasting height; delay time; special construction; numerical simulation; scheme optimization; directional blasting