

文章编号: 1001-1455(2012)01-0073-06

# 高耸筒形结构爆破拆除的数值模拟\*

谢春明<sup>1</sup>, 杨 军<sup>1</sup>, 薛 里<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 采用共节点分离式钢筋混凝土模型, 通过比较分析塔体缺口中间有切缝与无切缝设计 2 种方案, 对典型高耸筒形结构冷却塔爆破拆除过程进行了三维数值模拟。对混凝土和钢筋单元的受力过程进行分析, 共节点分离式模型可以体现混凝土和钢筋材料的力学性能差异; 采取切缝设计可减小结构倒塌过程中的下坐与后坐倾向, 促使塔体后部严重扭曲变形, 使塔身解体比较完全, 缩短整体倒塌时间, 减小爆堆范围。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破拆除; 共节点分离式模型; 筒形结构

**中图分类号:** O389

**国标学科代码:** 1303599

**文献标志码:** A

高耸筒形建筑物一般处于建筑群或人口稠密区, 周围环境极其复杂, 空间非常有限, 控制爆破拆除是拆除此类建筑物的主要手段<sup>[1]</sup>。双曲线冷却塔作为典型的高耸筒形建筑物, 具有形状特殊、结构复杂(如底部坐地面积大、重心低、结构稳定)等特点, 采用定向倒塌爆破拆除具有一定难度。学者们对爆破拆除建筑物进行了数值模拟, 孙细刚<sup>[2]</sup>采用有限元软件 ANSYS 对双曲线冷却塔爆破拆除倒塌过程进行了动态数值模拟, 刘将<sup>[3]</sup>对剪力墙筒体结构爆破拆除进行了力学分析和数值模拟, B. M. Luccioni 等<sup>[4]</sup>对爆炸荷载下钢筋混凝土建筑结构失效破坏进行了模拟研究。

本文中, 尝试采用共节点分离式钢筋混凝土模型<sup>[5-6]</sup>, 对典型的高耸筒形结构冷却塔爆破拆除进行数值模拟, 具体对比分析 2 种设计方案对结构破坏的影响。

## 1 数值计算方法

采用有限元软件 DYNA-3D 进行数值计算, 程序中使用中心差分时间积分法<sup>[7]</sup>。 $t$  时刻的加速度定义如下

$$\mathbf{a}_t = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{F}_t^{\text{ext}} - \mathbf{F}_t^{\text{int}}) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{F}_t^{\text{ext}}$  为施加的外部体矢量;  $\mathbf{F}_t^{\text{int}}$  为内部力矢量。定义  $\mathbf{F}^{\text{int}} = \sum (\int_{\Omega} \mathbf{B}^T \sigma_n d\Omega + \mathbf{F}^{\text{hg}}) + \mathbf{F}^{\text{contact}}$ ,  $\mathbf{F}^{\text{hg}}$  为沙漏阻力,  $\mathbf{F}^{\text{contact}}$  为接触力。

速度和位移为

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t, \quad \mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \Delta t_{t+\Delta t/2} \quad (2)$$

式中:  $\Delta t_{t+\Delta t/2} = 5(\Delta t_t + \Delta t_{t+\Delta t})$ 。

方程不形成总体刚度矩阵, 内部矢量包含所有非线性问题, 不需要进行收敛检查, 对处理接触碰撞、爆炸等大位移大变形问题具有优势。

## 2 模型及爆破方案

冷却塔实体图如图 1 所示, 塔高 123.2 m, 塔筒人字柱底部直径 90.7 m、顶部直径 54.1 m。塔基础为环形基础, 基础以上均匀分布约 44 对钢筋混凝土人字柱, 人字柱底面标高为 0, 人字柱顶端标高为 8.15 m, 此标高处通风筒直径 85.5 m, 壁厚 800 mm, 壁厚渐次缩小为 200 mm, 标高 20.5~115.8 m 壁

\* 收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2011-03-31

作者简介: 谢春明(1983—), 男, 博士研究生。

厚稳定为 200 mm, 标高 92.4 m 处塔筒直径最小, 为 50.6 m。

## 2.1 爆破方案

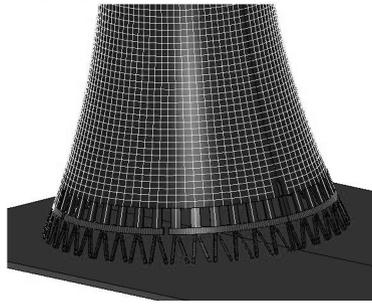
如图 2 所示, 模拟中考虑了 2 种设计方案。方案 1 见图 3, 在缺口中间上部至 20.0 m 位置爆破一条宽 50 cm 的缝。爆破缺口圆心角为  $240^\circ$ , 缺口范围内每隔 3.0 m 机械预拆除一个窗口, 窗口宽度 3.0 m。首先在 0.11 s 预拆除掉切缝部分, 其次在 0.27 s 爆破缺口范围内 29 块筒壁板块, 最后在 0.36 s 爆破塔底 27 对人字柱。人字柱选择爆破底部和顶部, 底部炸高 2.4 m, 顶部炸高 1.6 m。方案 2: 冷却塔缺口中间无切缝。首先在 0.11 s 起爆筒壁板块, 其次在 0.20 s 爆破底部人字柱。



图 1 冷却塔实体图

Fig. 1 Cooling tower physical map

(a) Method 1



(b) Method 2

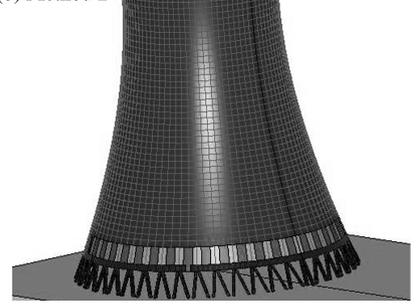


图 2 爆破拆除方案

Fig. 2 Blasting demolition methods

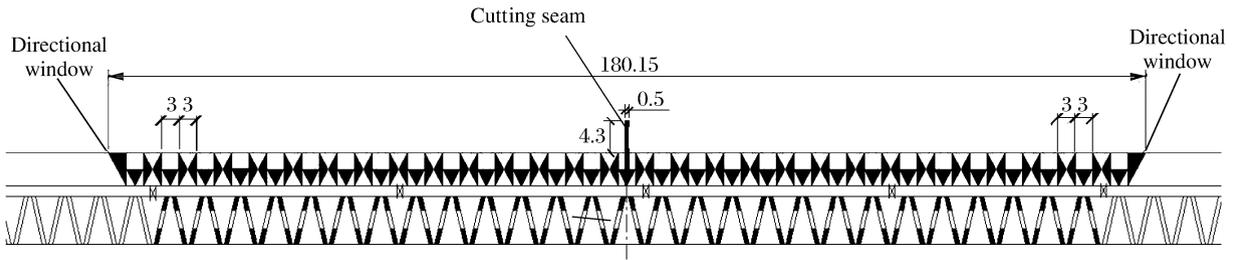


图 3 方案 1 示意图

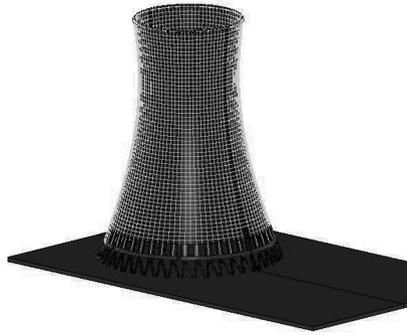
Fig. 3 Diagram of the method 1

## 2.2 有限元模型

模拟采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 在 ANSYS 环境下建立有限元模型, 运用大型显示动力分析软件 LS-DYNA 进行求解。考虑到结构的对称性, 沿塔体底面直径取一半结构建模并施加对称约束进行计算。

模拟采用共节点分离式模型, 充分体现钢筋在结构倒塌过程中的拉应力作用。所建整体模型大小与实际结构完全相同, 塔体模型及钢筋分布见图 4。

(a) Model



(b) Reinforcement arrangement

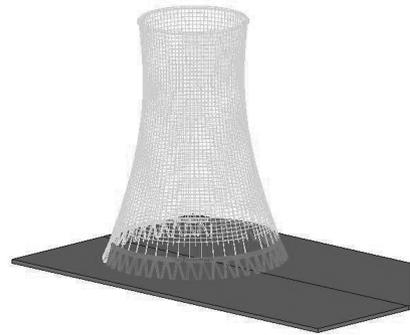


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

混凝土与钢筋均采用弹塑性材料, 混凝土采用 SOLID 164 单元, 钢筋采用 BEAM 161 单元。钢筋混凝土材料的破坏非常复杂, 涉及材料本构关系、各种失效准则等因素, 混凝土采用拉应力失效准则, 钢筋由应变控制材料失效, 失效应变为 0.05。钢筋和混凝土的物理力学参数见表 1,  $\sigma_t$  为抗拉强度,  $\sigma_c$  为

抗压强度。

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of materials

材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_t/\text{MPa}$	$\sigma_c/\text{MPa}$
钢筋	7 850	210	0.27	350	310
混凝土	3 200	31	0.21	10	30

### 3 数值模拟结果分析与比较

#### 3.1 倒塌过程模拟结果比较

方案 1 中筒壁板块爆破时间为 0.27 s, 方案 2 中为 0.11 s, 因此方案 2 模拟结果相对方案 1 顺延 0.16 s 进行比较。图 5(a) 为方案 1 的模拟结果, 整个倒塌模拟过程从开始切口形成到结构完全倒塌历时 9.3 s。当  $t=0.3\text{ s}$  时, 随着爆破切口的形成, 塔体在自重作用下重心开始偏移并开始旋转。当  $t\approx 2.7\text{ s}$  时, 冷却塔触地, 并以触地部位为支点进行偏转, 触地部位单元受压失效, 塔体后部严重扭曲变形。当  $t\approx 4.5\text{ s}$  时, 塔身受压变形有裂缝产生, 塔口呈椭圆形, 当  $t=9.3\text{ s}$  时, 结构完全倒塌。

图 5(b) 为方案 2 的模拟倒塌过程。当  $t=0.3\text{ s}$  时, 爆破切口形成。方案 2 整体倒塌时间为 9.6 s, 而方案 1 为 9.3 s。由此可见, 缺口中间进行切缝爆破设计有利于缩短整体倒塌时间。

(a) Method 1



(b) Method 2

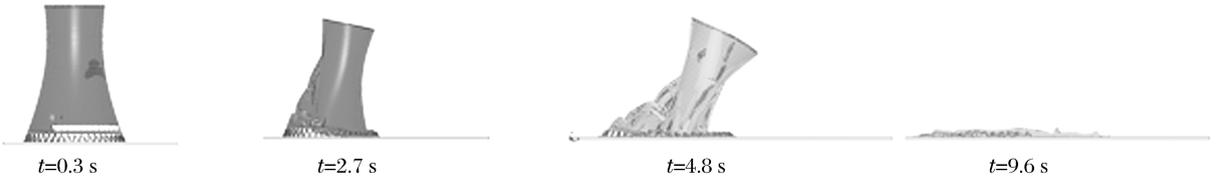


图 5 倒塌过程数值模拟结果

Fig. 5 Collapse process simulation results

#### 3.2 支撑柱混凝土、钢筋单元应力分析

图 6 中单元 100 064 所在的人字柱即为选取的支撑区承重柱。与整体式模型不同, 共节点分离式方法可以分别对钢筋和混凝土的受力状态进行研究。下面提取支撑柱顶部外侧混凝土单元应力和相应部位钢筋单元的轴向应力进行分析, 如图 7。方案 1 中, 当  $t=0.3\text{ s}$  时, 随着爆破切口的形成, 混凝土单元初始受压, 最大压应力 5.4 MPa。随着塔体的前倾, 支撑人字柱上部外侧受拉, 当  $t\approx 0.9\text{ s}$  时, 混凝土受拉屈服, 单元被删除; 与混凝土连接部位钢筋单元由于钢筋材料的抗拉能力远大于混凝土, 因此, 实际结构在倒塌过程中, 大部分钢筋单元并不会发生屈服, 当  $t=2.55\text{ s}$  时, 最大拉应力 43 MPa。共节点分离模型能够真实地反应混凝土和钢筋材料的

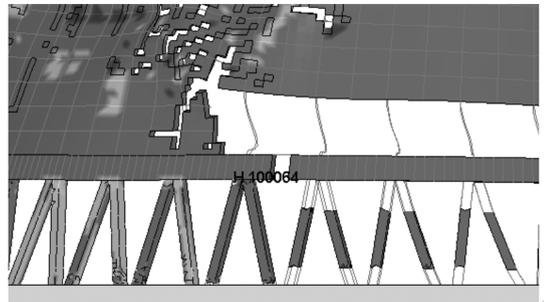


图 6 支撑柱混凝土单元

Fig. 6 Concrete element of sustaining pillar

力学性能差异,可以对结构进行更精确的分析。

方案 2 中,爆破切口形成后,混凝土初始受压,随着结构触地,受压转为受拉,当  $t=2.1$  s 时,拉应力达到屈服极限,单元被删除;与混凝土连接部位钢筋单元在塔体触地后由受拉转为受压,当  $t=2.4$  s 时,最大拉应力 120 MPa;当  $t=4.5$  s 时,最大压应力 650 MPa。

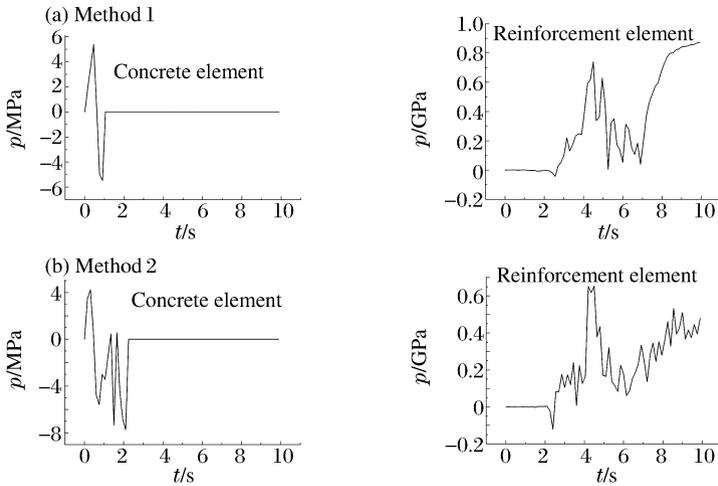


图 7 混凝土、钢筋单元应力历程曲线

Fig. 7 Stress-time curves of concrete and reinforcement elements

### 3.3 结构切缝部位破坏分析

图 8 为切缝部位破坏过程。方案 1 中,当  $t=0.11$  s 时,爆破形成切缝,切缝高 4.3 m、宽 0.5 m。当  $t=2.7$  s 时,塔体触地,切缝部位混凝土单元在重力作用下,立即达到其屈服强度极限,失效单元从结构中删除。当  $t=2.85$  s 时,切缝部位完全破坏。

方案 2 中,当  $t=2.7$  s 时,塔体触地,切口中间部位混凝土单元达到屈服强度极限从结构中删除。当  $t=3.0$  s 时,切口中间部位破坏完全,比方案 1 延时了 0.31 s,切缝的设计促进了塔体结构进一步前倾倒塌,使塔身解体比较完全。

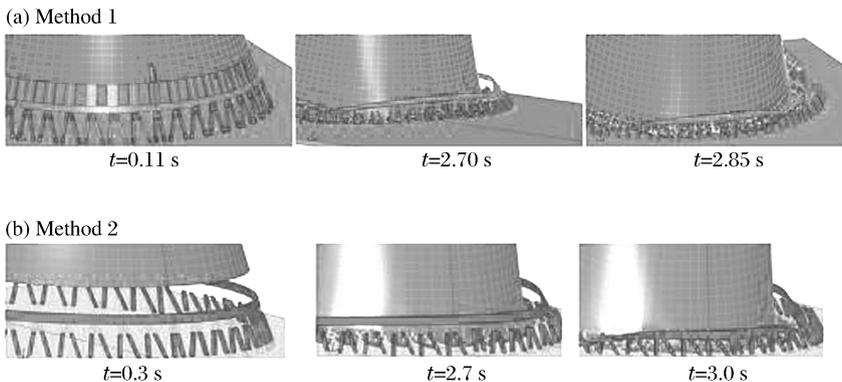


图 8 切缝部位破坏过程

Fig. 8 Failure process of slit positions

### 3.4 结构顶点水平方向位移分析

图 9 为结构顶点倒塌过程水平方向时间位移曲线。方案 1 中,当  $t=0.3$  s 时,爆破切口形成,塔体以切口为支点前倾倒塌,水平位移线性增加,直至 7.5 s 左右水平位移不再增加,最大值 61 m。位移曲线斜率在倒塌过程中保持稳定,一直保持正值,表明结构倒塌过程中未产生下坐和后坐。

方案 2 中,当  $t=0.11$  s 时,爆破切口形成,水平位移线性增加。当  $t=7.35$  s 时,曲线斜率为负,结

构顶点受顶部钢筋回扯,位移减小,水平位移最大值 69.1 m,最终值为 66.5 m。方案 2 中,顶点水平位移比方案 1 大 5.5 m,分析表明,切缝设计可减小爆堆范围,爆破范围的控制效果更好。

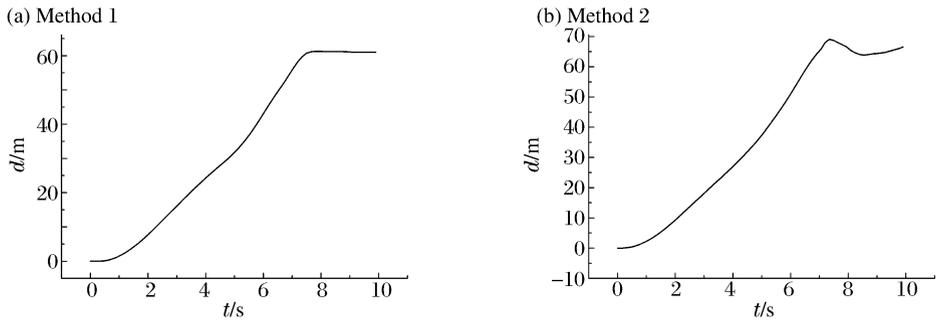


图 9 结构顶点水平方向位移曲线

Fig. 9 Horizontal displacement curves of the top of structure

### 3.5 结构堆散范围分析

起爆后塔体迅速向预定方向倾斜、下落,触地后,继续翻转倒塌,图 10 为冷却塔爆破拆除倒塌后的爆堆范围,其中图 10(c)为塔体实际倒塌状态。方案 1 中,爆堆范围长 126.1 m、宽 92.0 m,实际爆堆长 125.0 m、宽 100.0 m,实际爆堆模拟结果与实际结果较为一致。通过计算机数值模拟,可以预先估计结构的堆散范围,起到辅助工程设计的作用。

方案 2 中,爆堆范围长 130.1 m、宽 92.8 m。比较可知,切缝设计可减小结构堆散范围。

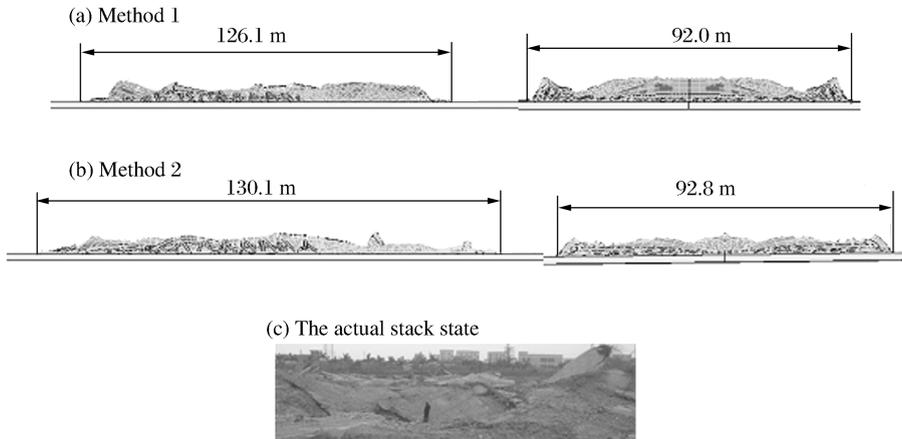


图 10 模拟结果及实际爆堆状态

Fig. 10 Stack state of the simulation and actual results

## 4 结论

(1) 采取切缝设计塔体后部严重扭曲变形,能确保倒塌,且破碎效果良好。缺口中间进行切缝爆破设计有利于整体倒塌时间的减小。

(2) 切缝的设计促进了塔体结构进一步前倾倒塌,减小了结构倒塌过程中的下坐与后坐倾向,使得塔身解体比较完全。

(3) 爆破拆除倒塌后的爆堆范围与实际工程较为接近,采用有切缝设计的爆堆长度与宽度比无切缝设计的小。

(4) 分析了支撑区混凝土和钢筋单元的受力过程,共节点分离式模型可以体现混凝土和钢筋材料的力学性能差异。数值模拟的结果与实际工程具有较好的相似性,通过对结构倒塌过程的模拟,可以在爆破前对倒塌过程、效果进行预测,从而指导爆破设计、施工和安全防护,数值模拟将成为研究结构爆破拆

除力学过程的重要手段并辅助指导结构爆破拆除设计。

### 参考文献:

- [1] 汪旭光,于亚伦. 21 世纪的拆除爆破技术[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 32-35.  
WANG Xu-guang, YU Ya-lun. Demolition blasting technology faced with the 21 century[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(1): 32-35.
- [2] 孙细刚. 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.  
SUN Xi-gang. Dynamic simulation of collapse of hyperbolic cooling tower under blasting demolition[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(1): 10-12; 84.
- [3] 刘将. 剪力墙筒体结构爆破拆除的力学分析和数值模拟[D]. 山东: 山东科技大学, 2009.
- [4] Luccioni B M, Ambrosini R D, Danesi R F. Analysis of building collapse under blast loads[J]. Engineering Structures, 2004, 26(1): 63-71.
- [5] 许沛. 钢筋混凝土结构爆破拆除过程有限元模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
- [6] 杨国梁. 钢筋混凝土建筑结构爆破拆除数值模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [7] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA User's Manual[Z]. Version 970. 2003: A1-A5.

## Numerical simulation of towering tubby structure blasting demolition \*

XIE Chun-ming<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, XUE Li<sup>2</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
2. *China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China*)

**Abstract:** The blasting demolition processes of a typical towering tubby structure cooling tower were numerically simulated by adopting the common node separate reinforced concrete model to compare the two demolition designs with cutting seam and without cutting seam in the middle of the tower gap, respectively. The common node separate model can reflect the differences between the mechanical properties of concrete and reinforcement through analysis on their loading process. The structure sitting down and back break tendency in the collapse process can decrease by adopting the cutting seam design, which can make the back of the tower seriously distort and induce the tower to more completely disintegrate, and it can also decrease the whole collapse time and the range of the muck pile.

**Key words:** mechanics of explosion; blasting demolition; common node separate model; tubby structure

\* Received 13 October 2010; Revised 31 March 2011

Corresponding author: XIE Chun-ming, xiechming@gmail.com