

研究简报

# 控制爆破拆除钢筋混凝土 筒式水塔的设计与受力计算

陶纪南 秦明武

本文叙述了在采用控爆方法拆除钢筋混凝土筒式高耸结构物时,先开一个窗口,再进行整体爆破的施工方案及受力分析。文中介绍的计算方法和推导的算式,对水塔、烟囱等筒式高耸薄壁钢筋混凝土结构具有一定的参考价值。

## 前言

1985年初,陕西省力学学会爆炸专业委员会承担了拆除某厂厂区钢筋混凝土筒式水塔控制爆破的设计与实施。在爆破过程中采用“开窗口、留板块、切钢筋和第二次炸板块”的方案,达到了预期效果。实践证明,这次控爆方案比常用的一次爆破方案有明显的优点。文中讨论了爆破参数的选择,还着重分析了开窗口后的稳定性和确保第二次爆破按预定方向倒塌的计算。

## 一、基本情况

### 1. 水塔结构

水塔为钢筋混凝土筒式结构,总高为35.44米,其中塔身高25米,水箱高10.44米,地表面以下基础深3.5米。塔身外径7米,壁厚15厘米,水箱内径8米。塔身竖筋为 $\phi 8$ 毫米,间隔250毫米;另外每隔1.34米有 $\phi 25$ 毫米加粗钢筋;箍筋为 $\phi 8$ 毫米,间距250毫米,门洞部分钢筋加密。水塔全部重量为4631.288千牛(不包括基础和下部护墙),其中塔身重1741.07千牛、水箱重417.76千牛,水箱隔板重784.53千牛、水箱护墙重1127.76千牛,以及护顶重560.168千牛。水塔结构示意图于图1。

### 2. 周围环境及倒塌方向选择

水塔西侧15米处有10千伏高压线,距地面高度6米;东侧17米处有使用多年的砖砌用圈梁加固的锅炉房;东北方向30米有一座高30米的砖砌烟囱;北侧10米处有一座砖砌临时平房,爆后需拆除;往北38米是砖木结构职工食堂;南侧场地宽阔,300米内没有建筑物,见图2。

根据以上环境,决定朝南定向倒塌。

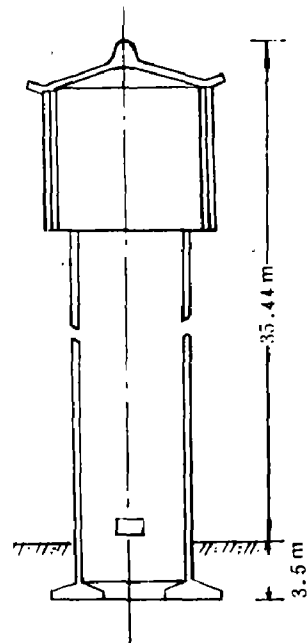


图1 水塔结构示意图

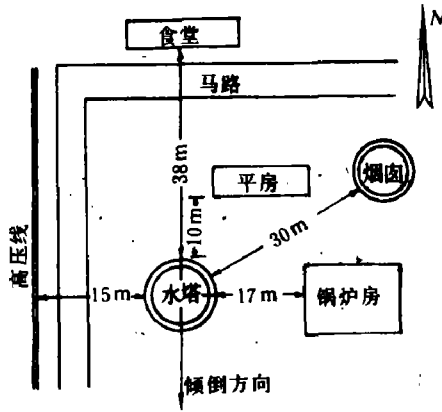


图2 水塔周围环境及倾倒方向

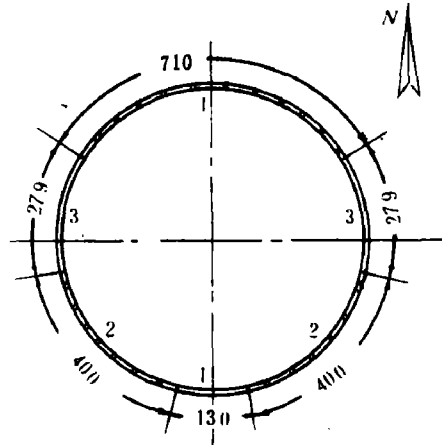


图3 窗口与板块位置

## 二、爆破方案选择及参数设计

### 1. 爆破方案

爆破采用“开窗口、留板块、切钢筋和第二次炸板块”的方案，具体做法是，在对称倾倒轴线先爆开三个窗口，见图3。其中南侧窗口4是在原有门洞的基础上扩大而成，东西两个窗口3是新爆开的。窗口高度按不影响倒塌计算取1.25米。窗口爆开后，混凝土脱离钢筋骨架，再将露出的钢筋切断，最后爆破留下的两个板块2。为了控制倒塌方向，板块1不爆。

我们认为，这种施爆方案在环境严格的条件下，具有以下优点：只要窗口、板块尺寸与位置选择合适，有利于倒塌方向的控制；比一次起爆用药量少，一次起爆要用2\*岩石硝铵炸药11.64公斤，而分两次起爆，最大一段的药量仅为6.15公斤，因此，比较安全；预先切断钢筋，减少倒塌方向的阻力，对控制倾倒方向有利；分期爆破可逐次积累经验，修改爆破设计参数，从而可取得较好的爆破效果。

### 2. 爆破参数设计

爆破采用2\*岩石硝铵炸药和毫秒非电导爆管起爆，眼深12厘米、眼距20~25厘米、排距25厘米、单孔装药量经试爆取35克。自地面0.5米起共布六排孔，炮眼总数324个，总装药量11.64公斤。由于分两次起爆，爆破预留的两个板块只用6.15公斤炸药。

## 三、开窗口后水塔整体的稳定性分析

钢筋混凝土水塔下部开窗口后，有可能发生纵向弯曲失稳。在进行稳定性分析时，应考虑风荷载的影响，根据规范规定，作用在建筑物表面上风荷载 $W$ 按下式计算

$$W = k \cdot k_z \cdot W_0 \quad (1)$$

式中  $W_0$ —基本风压，西安地区按0.245千帕计。  $k_z$ —风压高度变化系数，根据水塔总高  $l = 35.44$ 米，  $k_z$ 取1.41。  $k$ —风载体型系数，当  $W_0 d^2 \geq 2$ 时，  $k$ 取0.6。  $d$ 为水塔直径。

将上述数值代入(1)式后得  $W = 0.2073$ 千帕。由风载引起的弯矩

$$M = W \cdot d \cdot l^2 / 2 = 0.9113 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

综合风载引起的弯矩与水塔自重引起的轴向荷载, 显然, 水塔为偏心受压结构, 其中风荷载最不利方向为水塔最小回转半径方向, 故先计算水塔的回转半径  $r_0$

$$r_0 = \sqrt{\frac{J}{A}} \quad (2)$$

式中  $J$ —剩余板块的惯性矩;  $A$ —剩余板块的截面积。

下面分别对  $x-x$  和  $y-y$  轴计算回转半径  $r_{ox}$  和  $r_{oy}$  (见图4)。

(1) 计算  $r_{oy}$ : 对  $F_1, F_2$  板块分别计算,

板块  $F_1$ , 其面积为

$$A_1 = a_1 \cdot \bar{R} \cdot t \quad (3)$$

式中  $a_1$ — $F_1$  圆环所对圆心角为2.03弧度;  $\bar{R}$ —圆环平均半径为342.5厘米;  $t$ —圆环厚度为15厘米。

故  $A_1 = 2.03 \times 342.5 \times 15 = 10429.1 \text{ 厘米}^2$ 。

$F_1$  板块对  $y-y$  轴的惯性矩为

$$J_{y1} = \frac{1}{8} (R^4 - r^4) (a_1 - \sin a_1) \quad (4)$$

式中  $R$ —圆环外半径为350厘米;  $r$ —圆环内半径为335厘米; 因此  $J_{y1} = 0.3418 \times 10^9 \text{ 厘米}^4$

板块  $F_2$ ,  $a_2$  为其所对圆心角等于1.14286弧度, 故  $A_2 = a_2 \cdot \bar{R} \cdot t = 5871.4 \text{ 厘米}^2$  为计算  $J_{y2}$ , 先计算出  $F_2$  对  $OG$  对称轴的惯性矩

$$J_{OG} = \frac{1}{8} (R^4 - r^4) (a_2 - \sin a_2) = 7.026 \times 10^7 \text{ 厘米}^4$$

再求对  $OG$  垂直轴  $OS$  的惯性矩

$$J_{OS} = \frac{a_2}{4} (R^4 - r^4) = 0.6891 \times 10^9 \text{ 厘米}^4 \quad (5)$$

则

$$J_{y2} = \frac{J_{OS} + J_{OG}}{2} - \frac{J_{OS} - J_{OG}}{2} \cos 2\theta = 0.3634 \times 10^9 \text{ 厘米}^4$$

式中  $\theta = 43.38^\circ$

综合以上计算结果有

$$A = A_1 + 2A_2 = 22171.9 \text{ 厘米}^2, \quad J_y = J_{y1} + 2J_{y2} = 1.0686 \times 10^9 \text{ 厘米}^4,$$

故

$$r_{oy} = \left( \frac{J_y}{A} \right)^{1/2} = 219.5 \text{ 厘米}$$

(2) 计算  $r_{ox}$ : 同理对  $F_1, F_2$  板块分别计算可得

$$J_{x1} = \frac{a_1}{4} (R^4 - r^4) = 1.2231 \times 10^9 \text{ 厘米}^4$$

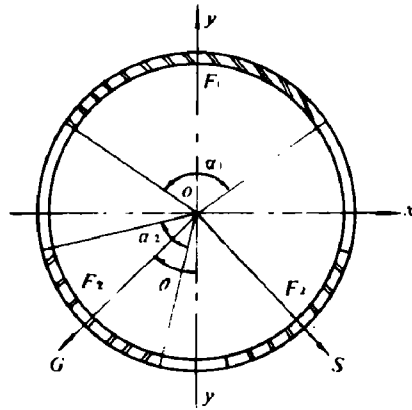


图4 回转半径计算

$$J_{x_2} = \frac{J_{os} + J_{oc}}{2} + \frac{J_{os} - J_{oc}}{2} \cos 2\theta = 0.3982 \times 10^9 \text{厘米}^4 \quad (7)$$

$$J_x = J_{x_1} + 2J_{x_2} = 2.0196 \times 10^9 \text{厘米}^4$$

故 
$$r_{ox} = \left(\frac{J_x}{A}\right)^{1/2} = 301.8 \text{厘米}$$

比较  $r_{ox}$  与  $r_{oy}$  看出, 最小回转半径为  $r_{oy}$ 。因此, 风荷载最不利方向为东西向, 并与西安地区的主风向一致。综合以上结果得图 5 所示计算简图。图中  $e_o = M/N \approx 19.7$  厘米,  $N$  为水塔自重。

为简化计算, 设  $y-y$  轴以右截面的钢筋集中在板块的形心位置, 设  $x-x$  轴上、下截面的荷载近似按面积分配, 故上半截面的荷载为

$$N_{\pm} = \frac{A_1}{A} N = 0.47 N = 2178 \text{千牛}$$

同理下半截面的荷载  $N_F = 2454$  千牛。

上半和下半截面分别对  $A_g$  取矩,

$$\text{则 } kN_{\pm}e_{\pm} = A'g_{\pm}R_gZ_{\pm} + \frac{A_1}{2} \cdot R_w \cdot Z_{\pm}$$

$$kN_F e_F = A'g_F R_g Z_F + A_2 \cdot R_w \cdot Z_F$$

两式相加得

$$k(N_{\pm}e_{\pm} + N_F e_F) = R_g(A'g_{\pm}Z_{\pm} + A'g_F Z_F) + R_w \left(\frac{A_1}{2}Z_{\pm} + A_2 Z_F\right) \quad (7)$$

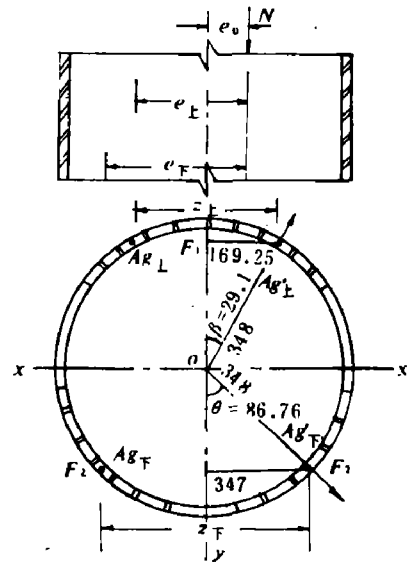


图 5 偏心受压结构计算简图

式中  $k$ —安全系数, 取 1.55;  $R_g$ —钢筋抗拉强度, 取 235.36 兆帕;  $R_w$ —混凝土弯曲强度, 200 号混凝土取 13.73 吉帕, 开窗口后按 70% 折减。  $A'g_{\pm}$ —上半截面钢筋截面积为 15.9 厘米,  $A'g_F$ —下半截面钢筋截面积为 21.15 厘米,

$$e_{\pm} = e_o + \frac{Z_{\pm}}{2} = e_o + 169.25 \text{厘米}; \quad e_F = e_o + \frac{Z_F}{2} = e_o + 347 \text{厘米}; \quad e_o \text{ 没有考虑纵向弯曲的影响, 若考虑纵向弯曲, 则需乘以偏心距增大系数 } \eta, \text{ 即}$$

$$e_o = \eta e_o \quad (8)$$

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{17k N^2}{\pi^2 E_s J} l_o^2} \quad (9)$$

式中  $E_s$ —混凝土弹性模量,取  $2.256 \times 10^4$  兆帕,  $J$ —截面惯性矩,根据前面计算知  $J_s = 1.0686 \times 10^9$  厘米<sup>4</sup>;  $l_0$ —计算长度,对一端嵌固一端自由的水塔取  $l_0 = 2l = 7088$  厘米;  $l$ —水塔高度;  $k$ —安全系数。

在上述计算中没有考虑混凝土受压后塑性变形引起弹性模量  $E_s$  的降低;当偏心距增大时,受拉区边缘混凝土会出现横向裂纹;以及预开窗口后,板块边缘附近已受到一定程度破坏,使截面惯性矩减小和材料强度降低。综合考虑上述因素,偏心受压结构的  $E_s J$  应作进一步折减,现以  $\alpha_0 E_s J$  取代(9)式中的  $E_s J$ , 则

$$\eta = \frac{1}{1 - [(kN/\pi^2 \alpha_0 E_s J) \cdot l_0^2]} \quad (10)$$

式中  $\alpha_0$ —折减系数,查有关表格得 0.243。将各数值代入后得  $\eta = 1.06$ , 则  $e'_0 = 1.06 \times 20 = 21$  厘米。

将各值代入(7)式得

$$k(N_{\perp} e_{\perp} + N_{\parallel} e_{\parallel}) = 1.6308 \times 10^7 \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

$$Rg(A'_{g\perp} Z_{\perp} + A'_{g\parallel} Z_{\parallel}) + R_w(\frac{A_1}{2} Z_{\perp} + A_2 Z_{\parallel}) = 4.758 \times 10^7 \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

可以看出(7)式右端远大于左端,说明开窗口后,水塔是稳定的。

#### 四、第二次爆破后水塔定向倾覆计算

第二次爆破两个  $F_2$  板块,必须确保水塔按预定方向倒塌。为此,应进行倾覆计算。 $F_2$  板块破坏后,  $F_1$  板块在强大的自重倾覆力作用下产生非对称弯曲,使受拉区钢筋首先达到流限而毁坏,下面分两步计算。

##### 1. 倾覆力矩计算

(1) 倾覆力  $p$  倾覆力可近似取水塔全部重量 4631.288 千牛减去炸掉的板块重量 87.08 千牛,故倾覆力为 4544.2 千牛。

(2) 形心主轴 倾覆是绕  $F_1$  板块形心主轴  $O_1-O_1$  发生的,  $F_1$  板块有两个形心主轴,其一为该截面的对称轴  $O_2-O_2$ ; 另一个为过截面形心  $G$  并与  $O_2-O_2$  垂直。如取  $O_2-O_2$  为  $y$  坐标,过  $O$  点并与  $O_2-O_2$  垂直的为  $x$  坐标(参见图 6),则截面形心的  $y$  坐标可按下式计算

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{\int y dA}{\int dA} = \overline{OG} \\ &= \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \cdot \frac{\sin(a_1/2)}{a_1/2} \quad (11) \end{aligned}$$

其中  $a_1 = S/R = 2.03$  弧度,将各值代入后得

$$\overline{OG} = 286.8 \text{ 厘米}$$

(3) 倾覆力矩  $M_M = p \times \overline{OG} = 1.3033 \times 10^7$  牛·米

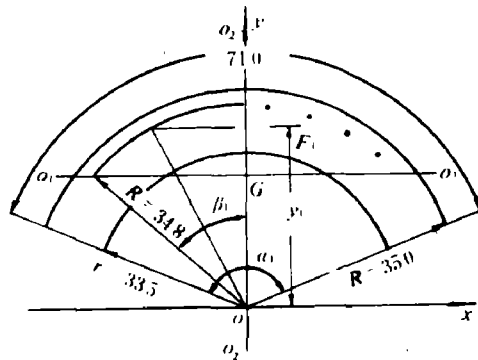


图 6  $F_1$  板块形心主轴及抗倾覆计算

## 2. 截面抗倾覆力矩

精确计算受拉区钢筋达到流限时, 截面的极限抗倾覆力矩是较麻烦的, 因此分作两块, 近似将钢筋截面集中在这两块的对称轴上, 这样的计算结果是偏安全的。

设  $x$ 、 $y$  坐标通过形心主轴, 将截面  $F_1$  分为两部分后, 它们之间的几何关系参看图 6。

$$\beta_1 = \cos^{-1} \frac{OG}{R'} = 34.5^\circ, \quad y_1 = R' \cos \frac{\beta_1}{2} = 332.3 \text{ 厘米}$$

式中  $R'$ —钢筋至塔心距离 (保护层厚按 1.5 厘米计算)。

受拉区钢筋总面积  $F_o$  为:

$$F_o = \frac{2 S_1}{L_1} f_1 + \frac{2 S_1}{L_2} f_2 = 11.89 \text{ 厘米}^2 \quad (12)$$

式中  $2 S_1$ —受拉区布筋的弧长。  $L_1$ 、 $L_2$  和  $f_1$ 、 $f_2$ —分别为  $\phi 8$  毫米与  $\phi 25$  毫米的间距和截面积。受拉区钢筋达到流限时极限抗倾覆力矩为

$$M_{ik} = F_o y_1 R_{flow} = 1.3174 \times 10^6 \text{ 牛} \cdot \text{米}$$

式中  $R_{flow}$ —钢筋流限值, 三号钢取 333.43 吉帕。

比较  $M_{ik}$  和  $M_{in}$  的计算值, 可见  $M_{ik} > M_{in}$ , 这表明二次爆破后, 水塔能按预定方向倒塌。

## 五、几点认识

这次爆破方案的选择与参数的确定是正确的, 爆破是成功的, 爆后水塔完全按预定方向倒塌, 没有偏差。周围建筑物、结构物、高压线等均未受到任何破坏和影响。最下一排炮眼离地面 0.5 米布置, 原计划水塔主体倒塌后对该段补爆, 但水塔倒塌时已将其全部压坏, 不需要再施爆。保留板块  $F_1$  在强大的倾覆力矩作用下, 混凝土全部疏松破坏, 全部钢筋也都被整齐拉断。通过这次爆破实践, 得出以下几点主要认识。

1. 对于高耸钢筋混凝土筒式结构, 实施定向倒塌爆破时, 在环境严格的条件下, 采用开窗口留板块的两次爆破方案, 技术上是可行的, 而且对准确地控制倒塌方向, 减少飞石和地震效应等危害也是有利的。

2. 开窗口和留板块的位置及尺寸要从确保二次爆破前的稳定及其爆后有利于控制倒塌方向进行设计与校核。这次  $F_1$  板块留的位置与大小基本上是正确的, 但南部窗口的尺寸还应适当加大, 两个  $F_2$  板块的位置宜适当上移, 使绕  $y-y$  轴的回转半径 ( $r_{oy}$ ) 大于或等于绕  $x-x$  轴的回转半径 ( $r_{ox}$ ), 以确保东西两侧的安全。另外, 预留板块  $F_1$  的尺寸还可再小些。

3. 稳定性校核和倾覆力矩的计算是高层结构定向倒塌爆破的基本计算, 从爆破的实施情况看, 本文所推导的计算公式有参考意义。

4. 通过试爆和最后实施, 说明我们的爆破设计基本上是符合实际的。

## THE DESIGN AND CALCULATION OF CONTROLLED DEMOLITION OF A TUBULAR WATER TOWER WITH REINFORCED CONCRETE

Tao Jinan Qin Mingwu

### Abstract

This paper presents the design and calculations of controlled demolition of a tubular high-rise structure of reinforced concrete. The method is to open some windows on the wall and then to demolish it totally. The calculating method and its formulars may be useful for demolition of the tubular high-rise thin wall structures of reinforced concrete, for example, the water tower, chimney etc.

## 动态光测法研究冲击作用下 的应力分布问题

郭靖华 王祥林 孙晓明

本文介绍了微闪光系统,以及在动光弹、动态云纹和白光散斑等光学测量中的应用,得出冲击载荷作用下带孔长方板的应力分布。

### 一、前言

在防护工程、工程爆破、地震工程以及断裂力学各领域中,当结构承受冲击作用时,结构各点的应力变化是时间的函数,一般在 $\mu\text{s}$ 到 $\text{ns}$ 量级,利用动态光测法把这样高速变化的信息记录下来,进行分析研究。随着科学技术的发展,现代光学技术与实验力学结合推动了光测力学的发展。从早期的Frocht狭缝法,发展到闪频法,多火花法以及近代的多脉冲激光光弹法等。各种方法的共同特点是通过高速摄影技术把应力波变化过程记录下来,提供分析研究。

为了探索抗震、抗爆破结构的试验途径,我们研制了微闪光系统,并在动光弹、动云纹及白光散斑等光学测量中进行了应用,得出冲击载荷作用下带孔长方板的应力分布。该系统设备简单,使用方便,重复性好。

• 本文内容提要在全国第四届实验应力分析会议宣读过。  
1986年8月28日收到原稿,1987年1月3日收到修改稿。