

# 爆破拆除冷却塔倾倒过程的研究

李守巨 费鸿禄 张立国 魏宏轩<sup>a)</sup>

(大连理工大学 大连 116023)

(<sup>a)</sup>阜新矿业学院 辽宁阜新 123000)

**摘要** 从理论上研究了冷却塔在倾倒过程中,转角 $\theta$ 与时间 $t$ 之间的关系。对于支撑部分保存完整的冷却塔,计算结果与实测结果基本吻合,相对误差小于10%。实际倒塌长度与理论倒塌长度之比为0.98,实际倒塌中心线与理论倒塌中心线左右偏差3.18°,倒塌初始时刻冷却塔未下坐,当 $t > 0.6$  s之后,冷却塔开始下坐,下坐高度与倾倒时间成正比。最后,还分析了冷却塔在倾倒过程中的前冲和后坐问题。

**关键词** 爆破拆除 倾倒过程 倒塌长度 前冲 下坐

**中图分类号** TB41

## 1 引言

在爆破拆除冷却塔时,冷却塔在倾倒过程中,随着支撑部位受拉区域的混凝土和部分钢筋被拉断及受压区域混凝土被压碎,逐渐在保留部分与倾倒部分接触面形成铰支,在倾倒力矩作用下,绕中性轴定轴转动。由于冷却塔壁厚只有0.25 m,直径达40 m,塔壁为双曲线型,因此塔壁具有一定的坡度,冷却塔爆破切口以上部分的重量达到21 MN,属于大型薄壁结构。在冷却塔倾倒初始时刻,如果保留部分支撑力不足,将会把支撑部分压垮,引起倒塌方向和范围的变化,而酿成灾难。冷却塔倒塌触地后,会引起地表面的冲击振动,而冷却塔触地时的冲击速度决定着冲击载荷的大小。只有准确计算触地时的冲击速度,才能计算爆破周围各关键机电设备的振动速度是否超过临界值。因此,研究冷却塔的倾倒过程是十分必要的,它有助于将冷却塔倾倒时的定性描述发展为较系统的定量描述。

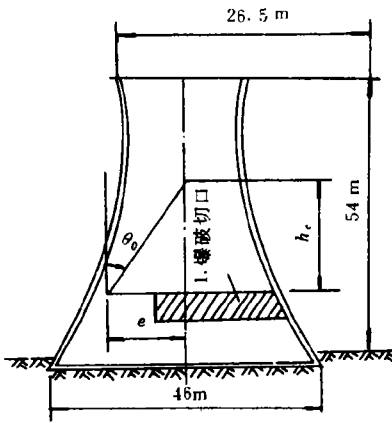
## 2 工程概况

阜新发电厂需要拆除的1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>冷却塔(见图1),塔高54 m,底部最大直径46 m,最大壁厚300 mm,最小壁厚200 mm,含筋率高,长细比小,重心低,属于钢筋混凝土薄壳抗震结构。冷却塔北部毗邻主发电车间,距离母线桥22 m,西侧距主变电所25 m,东侧距离运行冷却塔19 m,南侧紧挨保温材料厂(见图2)。厂方提出要求如下:

- (1) 周围厂房和设备的地震烈度小于4度;
- (2) 爆炸冲击波不能损坏周围建筑物;
- (3) 飞石控制在10 m范围内;

1994年2月1日收到原稿,6月15日收到修改稿。

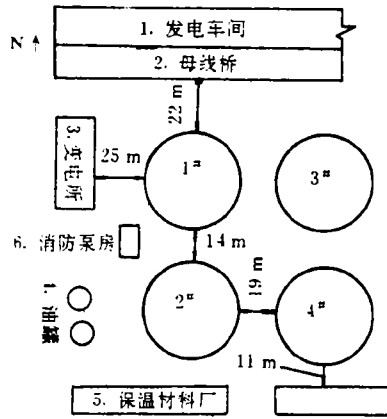
本文的作者还有何庆志、崔玉璞、刘杰英、潘天林。



1. Blasting cut

图 1 冷却塔垂直立面图

Fig. 1 Vertical figure of cooling tower



1. Generating electricity workshop;  
2. Bus bridge; 3. Substation; 4. Oil tank;  
5. Thermal insulation material works;  
6. fire protection pump room

图 2 冷却塔周围环境平面图

Fig. 2 Plane figure around cooling tower

(4) 爆破拆除工程不能影响发电厂正常发电和供电。

### 3 爆破拆除冷却塔倾倒过程的研究

#### 3.1 爆破切口以上冷却塔的质量 m

设计爆破切口上线距地面高度为 8.5 m, 因此定向倾倒的塔高为 45.5 m。将冷却塔爆破切口以上部分分为 6 段(如图 3), 每段近似为一圆台壳, 其体积为

$$V_i = \frac{\pi h_i}{3} [R_i^2 + r_i^2 - (R_i - t_i)^2 - (r_i - t_i)^2 + R_i r_i - (R_i - t_i)(r_i - t_i)] = \pi d_i h_i t_i \quad (1)$$

式中:  $h_i$  为各分段圆台的高度;  $R_i, r_i$  为圆台壳的上口和下口半径;  $t_i$  为圆台壳壁厚;  $d_i$  为圆台壳的等效直径,  $d_i = R_i + r_i - t_i$ 。

经计算得:  $V_1 = 162.5 \text{ m}^3$ ;  $V_2 = 106.4 \text{ m}^3$ ;  $V_3 = 102.6 \text{ m}^3$ ;  $V_4 = 165.9 \text{ m}^3$ ;  $V_5 = 130.9 \text{ m}^3$ ;  $V_6 = 189.0 \text{ m}^3$ 。转动部分的总体积  $V$  和质量  $m$  如下:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 = 857.3 \text{ m}^3 \quad (2)$$

$$m = \rho V = 2500 \times 857.3 = 2.14 \text{ Mkg} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为钢筋混凝土密度;  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ 。

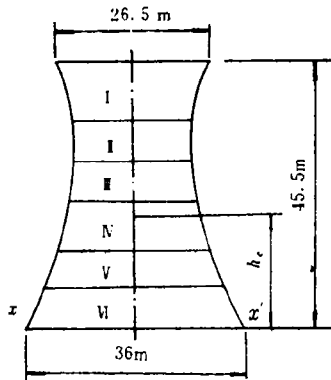


图 3 计算质量和重心的示意图

Fig. 3 Figure of calculating mass and centre of gravity

### 3.2 冷却塔转动部分重心 $h_c$ 的计算

由理论力学可知,冷却塔重心高度  $h_c$  距爆破切口上沿,即  $x-x'$  水平的距离

$$h_c = \Sigma(g_i x_i) / \Sigma g_i = 19.8 \text{ m} \quad (4)$$

式中: $g_i$  为第  $i$  段的重量, $g_i = \rho g V_i$ ;  $g$  为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;  $x_i$  为第  $i$  段重心距  $x-x'$  水平的距离, $x_1 = 41 \text{ m}$ ,  $x_2 = 31 \text{ m}$ ,  $x_3 = 24.3 \text{ m}$ ,  $x_4 = 16.6 \text{ m}$ ,  $x_5 = 9.1 \text{ m}$ ,  $x_6 = 3 \text{ m}$ 。

### 3.3 转动惯量 $J$ 的计算

将转动部分近似成为一园柱薄壳(如图 4),高  $l = 45.5 \text{ m}$ ,按图 3 等效外半径  $R_d = 14 \text{ m}$ ,等效内半径  $r_d = R_d - t = 13.8 \text{ m}$ 。 $t$  为平均壁厚  $t = 0.2 \text{ m}$ 。

$$J_1 = \frac{\pi R_d^2 l \rho}{12} (l^2 + 3R_d^2) \quad (5)$$

$$J_2 = \frac{\pi r_d^2 l \rho}{12} (l^2 + 3r_d^2) \quad (6)$$

$$J_3 = J_2 - J_1 \quad (7)$$

式中: $J_3$  为柱壳绕  $z$  轴的转动惯量, $J_3 = 534 \text{ Mkgm}^2$ 。

根据移轴公式

$$J_4 = J_3 + m(l/2)^2 = 1640 \text{ Mkgm}^2 \quad (8)$$

式中: $J_4$  为柱壳绕  $y$  轴的转动惯量。

$$J = J_4 + me^2 = 2074 \text{ Mkgm}^2 \quad (9)$$

式中: $J$  为冷却塔转动部分对保留部分中性轴的转动惯量; $e$  为偏心距, $e = 14.3 \text{ m}$ 。

### 3.4 偏心距 $e$ 的计算

冷却塔爆破切口处的周长为  $115 \text{ m}$ ,外半径  $R = 18.3 \text{ m}$ ,壁厚  $t = 0.25 \text{ m}$ ,内半径  $r = 18.05 \text{ m}$ ,爆破切口长  $72 \text{ m}$ ,保留部分弧长  $43 \text{ m}$ ,切口园心角  $\alpha_0 = 2 \times 3.14 \times 72 / 115 = 3.93 \text{ rad}$ ,保留部分园心角  $\beta_0 = 2 \times 3.14 \times 43 / 115 = 2.35 \text{ rad}$ 。由材料力学给出计算截面形心位置的公式如下

$$e = \int_A y dA / A = 14.3 \text{ m} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \int_A y dA &= 2 \int_{R-t}^R \int_0^{\beta_0/2} r^2 \cos\theta d\theta dr \\ &= 2 \{ [R^3 - (R-t)^3] \sin(\beta_0/2) \} / 3 \\ &= 153.6 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$A = 2 \int_{R-t}^R \int_0^{\beta_0/2} r d\theta dr = [R^2 - (R-t)^2] (\beta_0/2) = 10.74 \text{ m}^2$$

其中: $A$  为图 5 中阴影部分的面积。

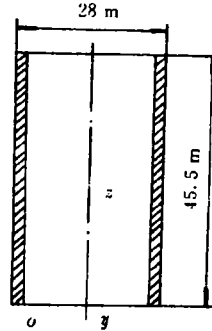
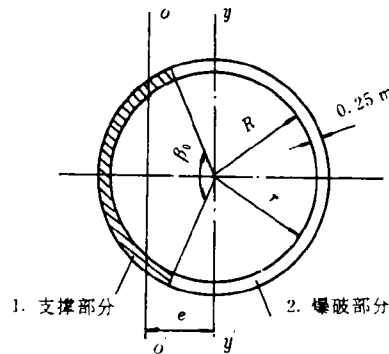


图 4 计算转动惯量  $J$  简图  
Fig. 4 Schematic of calculating momentum of inertia



1. Strutting part; 2. Blasting part  
图 5 计算偏心距  $e$  的简图  
Fig. 5 Schematic of calculation eccentric distance

### 3.5 冷却塔倾倒转角 $\theta$ 与时间 $t$ 之间的关系的研究

在重力  $mg$  的作用下,冷却塔将绕中性轴  $o$  转动,转动角加速度大小与重力  $mg$  对转轴力矩的大小成正比,与冷却塔对转轴的转动惯量成反比<sup>[1]</sup>

$$\varepsilon = M/J \tag{11}$$

式中: $\varepsilon$  为角加速度; $M$  为转动力矩, $M = mgasin\theta$ ;  $a$  为转轴到冷却塔重心的距离, $a = \sqrt{h^2 + e^2} = 21.7m$ ;  $\theta$  为转轴至重心连线与铅垂线之间的夹角。由动量守恒定理

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = mga(\cos\theta_0 - \cos\theta) \tag{12}$$

式中: $\theta_0$  为初始转角, $\theta_0 = arctg(e/h_c) = 35.8^\circ$ ;  $\omega$  为转动角速度

$$\omega = \sqrt{2mga(\cos\theta_0 - \cos\theta)/J};$$

$$\varepsilon = d\omega/dt = mgasin\theta/J$$

又因为, $\omega = d\theta/dt, dt = d\theta/\omega$ , 得到转角  $\theta$  与时间  $t$  之间的关系

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

上式定积分可用辛普生数值积分方法求解<sup>[2,3]</sup>, 计算结果见表 1。

表 1 1号冷却塔倾倒时间  $t$  与转角  $\theta$  的关系

Table 1 Relation between falling time and turning angle of 1 #

转角/(°)	时 间/s		绝对误差/ s	相对误差 %
	理论值	实测值		
35.8	0.000	0.000	0	0
38.3	0.603	0.666	0.063	9.4
41.6	1.016	1.000	0.016	1.6
46.6	1.297	1.333	0.036	2.7
49.1	1.627	1.666	0.039	2.3
58.1	2.107	2.333	0.226	9.6
70.5	2.598	2.666	0.069	2.6
79.1	2.874	3.000	0.125	4.1
93.1	3.280	3.333	0.054	1.5

## 4 爆破效果

### 4.1 倒塌范围

设计允许最大倒塌长度 65 m, 按绕中性轴定轴转动, 计算的理论倒塌长度如下:

$$l_t = acos15^\circ + 30.5cos4^\circ - e = 39.7 m$$

式中: $l_t$  为冷却塔触地时, 前边圈梁距冷却塔中心的距离。

冷却塔上口直径 26.5 m, 倒塌后 4 个冷却塔爆堆前沿宽度如下: 1# 是 33 m, 2# 是 27 m, 3# 是 36 m, 4# 是 28.5 m。

表2 冷却塔理论倒塌长度与实际倒塌长度的对比

Table 2 Comparison of the theoretical falling length with that of the practical

塔号	1#	2#	3#	4#	平均值
实际倒塌长度/m	38.6	33.0	41.0	43.0	38.9
实际倒塌长度/ 理论倒塌长度	0.97	0.83	1.03	1.08	0.98
相对误差 %	2.8	16.8	3.1	7.6	7.5

#### 4.2 倒塌方向

1# 冷却塔倒塌后,爆堆前沿左侧距中心 13 m,右侧距中心 20 m,偏差角: $\alpha_1 = \arctg(3.5/38.6) = 5.18^\circ$

2# 冷却塔左侧 16.5 m,右侧 10.5 m,偏差角: $\alpha_2 = \arctg(2/33) = 5.19^\circ$

3# 冷却塔左侧 19 m,右侧 17 m,偏差角: $\alpha_3 = \arctg(1/41) = 1.39^\circ$

4# 冷却塔左侧 15 m,右侧 17 m,偏差角: $\alpha_4 = \arctg(0.75/43) = 0.99^\circ$

1#~4# 冷却塔,实际倒塌中心线与理论倒塌中心线平均偏差角为  $3.18^\circ$ ,设计允许的左右最大偏差角为  $10^\circ$ 。

#### 4.3 下坐问题

冷却塔在倾倒过程中的下坐问题来自以下两个方面:其一,是下部 3.5 m 高的柱子强度不够,在偏心力矩作用下,柱子与环形基础或与冷却塔圈梁相联处被破坏,变成可以转动的铰链,如 3# 和 4# 冷却塔;其二,是在爆破切口水平处,在偏心力矩作用下,未爆破部分,即保留部分的受拉和受压区相当一部分混凝土被破碎,同时冷却塔具有一定坡度,使得支撑部分的强度承担不了垂直方向的载荷而被剪切破坏,导致冷却塔下坐。

表 3、4、5 表示各冷却塔下坐高度与转角和时间的关系。

表3 1号冷却塔下坐高度与转角和时间的关系

Table 3 Relation among sinking downward distance, turning angle and time of 1#

转角/ $^\circ$	时间/s	下坐值/m
35.8	0	0
38.3	0.666	0
41.6	1.000	2.28
46.6	1.333	5.24
49.1	1.666	9.27
58.1	2.333	11.48
70.5	2.666	13.13

表4 3号冷却塔下坐高度与转角和时间的关系

Table 4 Relation among sinking downward distance, turning angle and time of 3#

转角/ $^\circ$	时间/s	下坐值/m
35.8	0	0
38.3	0.333	0
45.8	0.666	4.18
52.8	1.000	7.50
58.8	1.333	9.74
76.3	1.666	13.11

#### 4.4 前冲和后坐问题

根据达朗贝尔原理,冷却塔在倾倒过程中,质心处共受三个力的作用,即重力、法向惯性力  $G_n$  和切向惯性力  $G_t$ ,  $G_n$  和  $G_t$  可按式计算:

$$G_n = ma_n \quad (14)$$

表5 4号冷却塔下坐高度与转角和时间的关系

Table 5 Relation among sinking downward distance, turning angle and time of 4#

转角/°	时间/s	下坐值/m
35.8	0	0
38.8	0.333	0
51.3	0.666	0
53.3	1.000	9.36
68.3	1.333	11.32

$$G_t = ma_t \tag{15}$$

式中:  $a_n$  为法向加速度

$$a_n = a\omega^2 = 2mga^2(\cos\theta_0 - \cos\theta) \tag{16}$$

$a_t$  为切向加速度

$$a_t = ae^2 = mga^2\sin\theta/J \tag{17}$$

根据力学平衡方程,可求出冷却塔在倾倒过程中,水平剪力(后坐力或前冲力)随转角的变化方程

$$F_h = m^2a^2gF(\theta)/(2J) \tag{18}$$

式中:  $F_h$  为水平剪力

$$F(\theta) = 3\sin 2\theta - 4\sin\theta\cos\theta_0 \tag{19}$$

作用在支撑部分上的垂直压力并不等于重力  $mg$ , 而为

$$F_v = mg - m^2a^2gG(\theta)/J \tag{20}$$

式中:  $F_v$  为垂直压力

$$G(\theta) = 1 + 2\cos\theta\cos\theta_0 - 3\cos^2\theta \tag{21}$$

表6 水平反力,垂直压力和摩擦阻力与转角的关系

Table 6 Relation among horizontal resisting force, vertical pressure fractional force and turning angle

转角/°	$F_h$ /MN	$F_v$ /MN	$F_t$ /MN
35.8	4.7	18	10.8
45	3.4	15.2	9.12
55	0.66	11.8	7.08
65	-3.37	9.8	5.88
75	-8.35	9.2	5.52
85	-13.7	10.2	6.12
95	-18.95	13.1	7.86

计算结果表明,在开始时刻,即  $\theta = 35.8^\circ$  时,水平剪力为 4.7 MN, 而支撑部分的水平抗力  $G_h$ :

$$G_h = [\tau]A_s = 1600000 \times 9.06 = 14.4 \text{ MN} \tag{22}$$

式中:  $[\tau]$  为混凝土的抗剪强度,  $[\tau] = 1.6 \text{ MPa}$ ;  $A_s$  为水平剪切面积,  $A_s = 9.06 \text{ m}^2$ 。

因此,在开始时刻冷却塔不会后坐 ( $F_h < G_h$ ), 这与实际爆破效果相一致。

在开始时刻的垂直载荷  $F_v = 18 \text{ MN}$ , 而垂直支撑力

$$G_v = [\sigma]A_s = 90 \text{ MN} \tag{23}$$

式中:  $[\sigma]$ ——混凝土的抗压强度,  $[\sigma] = 10 \text{ MPa}$ 。

因此,在开始时刻,冷却塔不会下坐 ( $F_v < G_v$ ), 这与实际观测结果相一致。

从表6中可以看出,当转角大于  $65^\circ$  之后,作用在支撑部分上的水平力变为拉力,当转角大于  $75^\circ$  之后,摩擦阻力  $F_t$  小于水平力  $F_h$ , 这将会产生一定的前冲。

## 5 结 论

(1) 倾到时间与转角关系的计算结果与实测结果的对比表明,冷却塔在倾到过程中,在偏心力矩作用下,可以认为绕中性轴作定轴转动,相对误差小于 10%。

(2) 实际倒塌中心线与理论倒塌中心线左右平均偏差 3.18°,实际倒塌长度与理论倒塌长度之比为 0.98。

(3) 在倾到初始时刻,支撑部分的垂直抗力大于垂直载荷,冷却塔未下坐;只是经过 0.6 s 之后,转到一定角度,支撑面破坏到一定程度,才开始下坐,下坐高度与时间成正比。

(4) 在倾到前段过程中,即转角小于 65°时,支撑部分的水平强度大于水平剪切载荷,因此未产生后坐现象。

(5) 当转角大于 65°之后,作用在支撑部分的水平载荷变为拉力,当转角大于 75°时,摩擦阻力小于水平拉力,会产生一定量的前冲。

(6) 由于冷却塔已使用 50 余年,并且经过多次复喷修复,使得结构强度不对称,而导致在倾到过程中下坐不均匀,使得倒塌方向最大偏差达到 5°,并且个别冷却塔出现扭转现象,这是非常值得注意的问题。

### 参 考 文 献

- 1 南京工学院. 理论力学(下册). 北京:人民教育出版社,1979.76
- 2 丘玉圃. FORTRAN 程序设计. 北京:科学出版社,1981.211
- 3 李庆扬. 数值分析. 武汉:华中工学院出版社,1982.129

## RESEARCH ON THE FALLING PROCESS OF COOLING TOWERS IN DESTRUCTION WORK

(Li Shouju, Fei Honglu, Zhang Liguó, Wei Hongxuan

(Dalian university of Science and Technology, Dalian, 116023)

**ABSTRACT** The falling processes of cooling towers in destruction work are introduced in this paper. The relation between the turning angle of the cooling tower and the falling time is calculated theoretically. The calculated results are in good accord with that of the practical, the relative error is less than 10%. For example, the relative error of the falling length is 2%, the practical falling center line deviates from the theoretical about 3.18°. The cooling tower did not sink downward. Until after 0.6s of falling taken place. Lastly, the problems of push forward and sinking downward are discussed as well.

**KEY WORDS** blasting demolition; falling process; collapsing length; push forward; sinking downward