DOI:10.11918/202211010

冷却塔定向拆除时剩余支柱的轴力计算方法

查晓雄,汪凯超,陈德劲

(哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院,广东 深圳 518055)

摘 要:为了使冷却塔的定向拆除更加安全可控,对冷却塔保留柱轴向力的计算方法展开研究。根据力的相似关系给出支柱轴向力与其 Z 向力之间的关系式,基于平截面假定推导保留柱 Z 向力的计算公式;利用有限元研究环梁和支柱的弹性模量、支柱高度、保留柱数量以及相邻柱柱顶所对应的圆心角5种参数对保留柱 Z 向力的影响;根据有限元的结果对保留柱 Z 向力的计算公式进行修正,并研究修正后公式的适用性。结果表明:爆破后的冷却塔在所有保留柱上并不满足平截面假定;在实际工程范围内,上述5种参数不影响保留柱 Z 向力的分布规律为 Z 向力沿着 y 轴方向上的分布形态始终"两端受压,中间受拉",且保留柱中的最大压力始终出现在第 n 排保留柱上,最大拉力始终出现在第 $(n-4)$ 排保留柱上;当爆破圆心角为200°~240°时,修正后计算值的相对误差在21%以内,且该公式在不同冷却塔上具有良好的适用性。保留柱轴向力的计算公式从力学角度为冷却塔的拆除提供了理论支撑,增加了拆除工作的安全性。

关键词:自然通风冷却塔;钢筋混凝土结构;建筑拆除;爆破拆除;轴力

中图分类号:TU33 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2024)02-0010-08

Axial force calculation method of retained columns in directional demolition of cooling tower

ZHA Xiaoxiong, WANG Kaichao, CHEN Dejing

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: To make the directional demolition of the cooling tower safer and more controllable, the axial force calculation method of the retained columns of the cooling tower is proposed. Firstly, in the light of the similarity relationship of the force, the relationship between the axial and Z-direction force of the column was investigated. Based on the plane section assumption, the calculation formula of the Z-direction force of the retained columns was deduced. Then, the effects of 5 parameters, specifically the elastic modulus of the ring beam and the column, the height of the column, the number of retained columns and the central angle corresponding to the top of the adjacent column on the Z-direction force of the retained column were explored by FEM. The calculation formula of the Z-direction force of the retained column was modified according to the results of FEM, and the applicability of the modified formula was studied. The results show that the blasted cooling towers do not satisfy the assumption of plane section on all retained columns. In practical engineering, the above 5 parameters do not affect the distribution characteristics of the Z-direction force of the retained columns: the distribution of the Z-direction force along the y-axis direction is always 'compression at both ends and tension in the middle', the maximum compression in the retained columns always appears on the n row, with the maximum tension always on the $(n-4)$ row. When the blasting center angle is in 200°-240°, the relative error of the modified formula is within 21%, and the modified formula exhibits good applicability in different cooling towers. The calculation formulas of axial force of retained column provide theoretical supports for the demolition of cooling tower from the perspective of mechanics, improving the safety of directional demolition of cooling tower.

Keywords: natural draft cooling tower; reinforced concrete structure; building demolition; blasting demolition; axial force

为淘汰电力行业的落后产能,国家须关闭污染物排放量大、煤电转换率低的小型火电机组[1]。冷却塔是火电机组的必要配套设施,其拆除是一项危险且复杂的工作。因此,冷却塔的拆除常采用爆破

收稿日期:2022-11-02;**录用日期**:2022-11-21;**网络首发日期**:2023-03-14
网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230313.1006.004.html
基金项目:国家自然科学基金(52178129);深圳市科技计划项目(GJHZ20200731095601006)
作者简介:查晓雄(1968—),男,博士,教授,博士生导师
通信作者:查晓雄,zhahero@126.com

设计简单、倒塌方向易控制的定向拆除。目前，关于冷却塔定向拆除的研究主要集中在国内，国外在这方面的研究较少。主要采用有限元研究各种爆破参数对倒塌形态的影响[2-4]，而对冷却塔定向拆除的力学机制研究较少。在研究冷却塔定向拆除的力学机制时，一般将爆破后的冷却塔简化成图 1 所示。对于保留筒壁的验算，上官子昌等[5]和汪高龙等[6]基于保留筒壁的抗弯承载力给出了冷却塔的倾倒验算公式，戴俊[7]基于筒壁的材料强度给出了冷却塔的倾倒验算公式。对于保留柱的验算，顾祥林等[8]基于保留柱的抗弯承载力给出了冷却塔的倾倒验算公式。

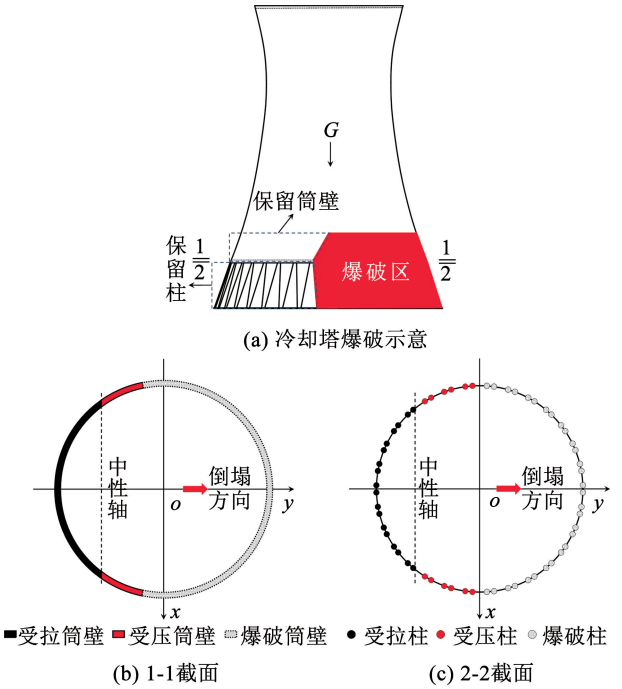


图 1　冷却塔爆破后计算简图

Fig. 1　Calculation diagram of cooling tower after blasting

然而在实际工程中，冷却塔的拆除设计仍然依靠爆破工程师的工程经验，其主要原因是现有的理论是基于整个截面上的平截面假定推导而来，而实际上爆破后的冷却塔在整个截面上并不满足平截面假定。此外，大多数现有的理论只适用于保留筒壁，适用于保留柱的理论较少，而在工程案例中很多冷却塔的倒塌是由保留柱的失效所引起[9-11]。

从力学角度出发，针对保留柱提出一种可指导冷却塔定向拆除的理论公式。首先根据力的相似关系给出支柱 Z 向力与其轴向力的换算关系，然后基于所有保留柱上的平截面假定推导了保留柱 Z 向力的计算公式，随后根据模拟结果假设爆破后的冷却塔仅在部分保留柱上满足平截面假定对公式进行修正，并使用不同冷却塔检验了修正后公式的适用性。研究结果可从力学角度为冷却塔的定向拆除提供理论支撑，使冷却塔的拆除设计更加科学合理，拆除工作更加安全可控。

1　理论推导

爆破后冷却塔的计算简图如图 2(a)所示，选取支柱柱顶所在的截面作为验算截面，验算截面上各保留柱的编号如图 2(b)所示。

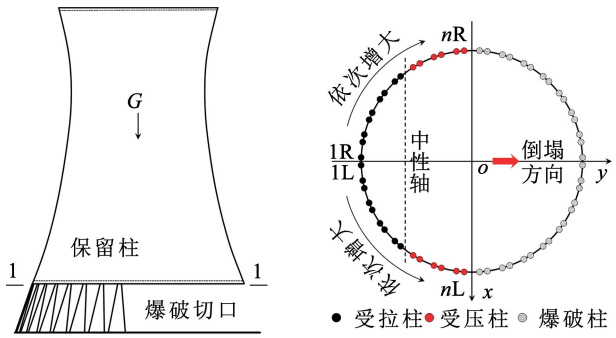


图 2　计算模型及保留柱编号

Fig. 2　Calculation model and retained columns number

1.1　冷却塔倾倒验算公式

基于支柱材料的抗压强度提出只爆破支柱破坏模型的倾倒验算准则，即当第 n 排保留柱的压应力达到支柱材料的抗压强度时，爆破后的冷却塔即可沿着预定的方向发生倒塌，倾倒验算公式为

$$\sigma_n \geqslant k\sigma_c^z \tag{1}$$

式中：σ_n 为第 n 排保留柱(nR 和 nL)所受的压应力值，$\sigma_n = F_{Nn}/A$。其中，F_{Nn} 为第 n 排保留柱的轴向压力，A 为支柱横截面面积。σ_c^z 为支柱材料的静态抗压强度，k 为动态荷载作用下建筑材料强度的放大系数。

1.2　保留柱轴向力计算公式

根据有限元结果，在计算时可将第 n 排保留柱简化为一个两端铰支且作用有弯矩和轴力大小相等、方向相反的压弯构件。在该简化计算模型中，由于保留柱的轴力大小不受端部弯矩的影响，在求解保留柱 Z 向力和轴向力的换算关系式时，可将第 n 排保留柱视为两端铰接的二力杆。

由于保留柱 Z 向力和轴向力之间的关系与支柱的位置和朝向无关，以图 3 所示的支柱为例，给出保留柱 Z 向力与其轴向力之间的换算关系式。

根据空间几何关系可得支柱 AB 的空间向量

$$\boldsymbol{AB} = \left(R\cos\frac{a-b}{2} - R_0, R\sin\frac{a-b}{2}, h\right)$$

式中：R_0 和 R 分别为支柱柱底和柱顶处的半径；h 为支柱的高度；a、b 分别为相邻柱柱顶所对应的圆心角(如图 4 所示)，且 $a > b$。

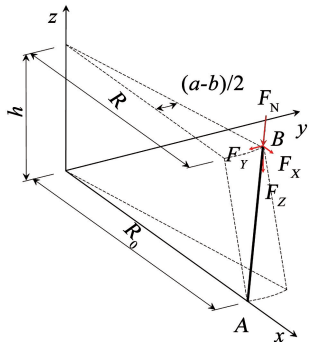
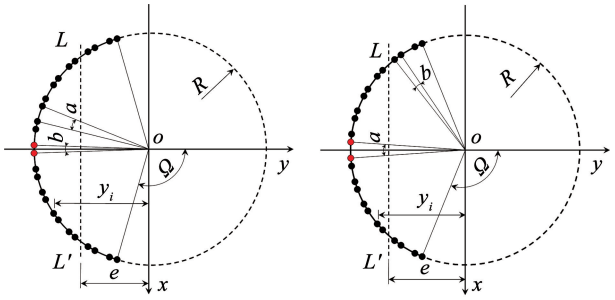


图 3　单根支柱几何关系示意

Fig. 3　Geometric relationship diagram of single column



(a) n为奇数　　(b) n为偶数

R 为柱顶处冷却塔的半径，a、b 分别为两种相邻柱柱顶所对应的圆心角($a>b$)，y_i为第 i 排保留柱到 x 轴的距离，e 为保留柱中性轴 LL'到 x 轴的距离，Ω 为爆破圆心角的 1/2。

图 4　验算截面示意

Fig. 4　Diagram of calculation section

由力的相似关系可得第 n 排保留柱轴向力

$$F_{Nn}=\frac{\sqrt{\left(R\cos\frac{a-b}{2}-R_0\right)^2+\left(R\sin\frac{a-b}{2}\right)^2+h^2}}{h}\cdot F_{Zn} \tag{2}$$

式中 F_{Zn}为第 n 排保留柱 Z 向力。

1.3　保留柱 Z 向力计算公式

假设只爆破支柱破坏模型满足以下假定：1)爆破后 y 轴两侧保留柱的受力及变形完全对称；2)各保留柱在 Z 方向上的变形与其 y 轴坐标之间满足线性关系，即爆破后的冷却塔在所有保留柱上满足平截面假定；3)保留柱上部结构的重心通过环梁的圆心；4)支柱为均质线弹性材料。

为计算不同 n 值下 F_{Zn}的大小，按照 n 值的奇偶性，分别推导了 n 为奇数时和 n 为偶数时 F_{Zn}的计算公式。

1.3.1　n 为奇数

当 n 为奇数时，验算截面上各保留柱的分布如图 4(a)所示。由几何关系可得，第 i 排保留柱到 x 轴的距离 y_i如式(3)所示，其中 $i=1,2,3,\cdots,n$。

$$y_i=\begin{cases}R\cos\left[\frac{i-1}{2}(a+b)+\frac{b}{2}\right], i\text{ 为奇数}\\ R\cos\left[\frac{i}{2}(a+b)-\frac{b}{2}\right], i\text{ 为偶数}\end{cases} \tag{3}$$

第 i 排保留柱到中性轴 LL'的距离 d_i为

$$d_i=y_i-e \tag{4}$$

由各保留柱 Z 向力的分布满足平截面假定可得各保留柱 Z 向力与其 Z 向位移的关系为

$$\frac{F_{Z1}}{d_1}=\frac{F_{Z2}}{d_2}=\cdots=\frac{F_{Zn}}{d_n} \tag{5}$$

根据验算截面在 LL'上的力矩平衡和验算截面在 Z 方向上力的平衡可得

$$\begin{aligned}\sum M_{LL'}&=2(F_{Z1}d_1+F_{Z2}d_2+\cdots+F_{Zn}d_n)=Ge\\ 2\sum F_{Zi}&=-G\end{aligned} \tag{6}$$

将式(4)和(5)代入式(6)可得保留柱中性轴 LL'到 x 轴距离 e 的计算公式，如式(7)所示，各保留柱 Z 向力 F_{Zi}的计算公式如式(8)所示。

$$e=\frac{\sum_{i=1}^{n}y_i^2}{\sum_{i=1}^{n}y_i} \tag{7}$$

$$F_{Zi}=Ge\frac{d_i}{2\sum_{i=1}^{n}d_i^2} \tag{8}$$

1.3.2　n 为偶数

当 n 为偶数时，各保留柱 Z 向力计算公式的推导方法与 n 为奇数时完全相同，且保留柱中性轴 LL'到 x 轴的距离 e 仍按式(7)计算，各保留柱 Z 向力 F_{Zi}仍按式(8)计算。不同之处在于：第 i 排保留柱到 x 轴距离的计算公式发生改变，当 n 为偶数时验算截面上各保留柱的分布如图 4(b)所示。

由几何关系可得，当 n 为偶数时，第 i 排保留柱到 x 轴的距离 y_i 为

$$y_i=\begin{cases}R\cos\left[\frac{i-1}{2}(a+b)+\frac{a}{2}\right], i\text{ 为奇数}\\ R\cos\left[\frac{i}{2}(a+b)-\frac{a}{2}\right], i\text{ 为偶数}\end{cases} \tag{9}$$

2　有限元分析

为探究环梁和支柱的弹性模量、支柱高度、保留柱数量以及相邻柱柱顶所对应的圆心角等参数对保留柱 Z 向力的影响，根据文献[12－13]建立一座 64.5 m 高的钢筋混凝土冷却塔模型，采用 ANSYS Workbench 中的 Static 模块对冷却塔进行分析。

该冷却塔由人字柱、环梁以及筒壁共同组成，其中筒壁与环梁由 36 对人字柱支撑，人字柱的截面为内径 0.4 m 的正八边形，环梁高 1.9 m，冷却塔的具体尺寸如表 1 所示。

表 1　64.5 m 高冷却塔尺寸参数

Tab. 1　Size parameters of 64.5 m cooling tower

高度/m	半径/m	厚度/mm
0	24.000	—
4.5	22.441	500
14.5	19.446	185
24.5	16.915	131
34.5	15.086	122
44.5	14.230	120
46.5	14.193	120
54.5	14.521	120
64.5	16.627	200

2.1　建模方法

重点关注冷却塔支柱的受力情况，在建立有限元模型时，将钢筋混凝土等效为一种均质线弹性材料。等效后钢筋混凝土的密度根据钢筋与混凝土的质量等效确定，其弹性模量根据刚度等效确定（以受压为主的构件可根据抗压刚度等效确定，以受弯为主的构件可根据抗弯刚度等效确定）。等效后的钢筋混凝土采用 SOLID186 单元，冷却塔各部位材料信息如表 2 所示。

表 2　64.5 m 高冷却塔各部位材料参数[13]

Tab. 2　Material parameters of 64.5 m cooling tower[13]

部位	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
筒壁	2 500	21.8	0.2
环梁	3 000	21.8	0.2
支柱	3 000	50.0	0.2

冷却塔模型仅考虑重力作用，支柱-环梁以及环梁-筒壁之间采用 Bonded 接触进行连接，各层筒壁之间采用共节点进行连接，支柱底部采用固定约束。

2.2　有效性验证

建立一座 60.0 m 高钢筋混凝土冷却塔的有限元模型，通过对比其前四阶频率的模拟值与实测值来验证建模方法的有效性。该冷却塔的几何信息和材料信息详见文献[14]，有限元分析时取该钢筋混凝土冷却塔的弹性模量为 25.6 GPa，密度为 2 500 kg/m^3，泊松比为 0.2。由表 3 可知，冷却塔前四阶频率的模拟值与实测值的相对误差均在 5% 以内，由此可证明建模方法的有效性。

表 3　60.0 m 高冷却塔前四阶频率

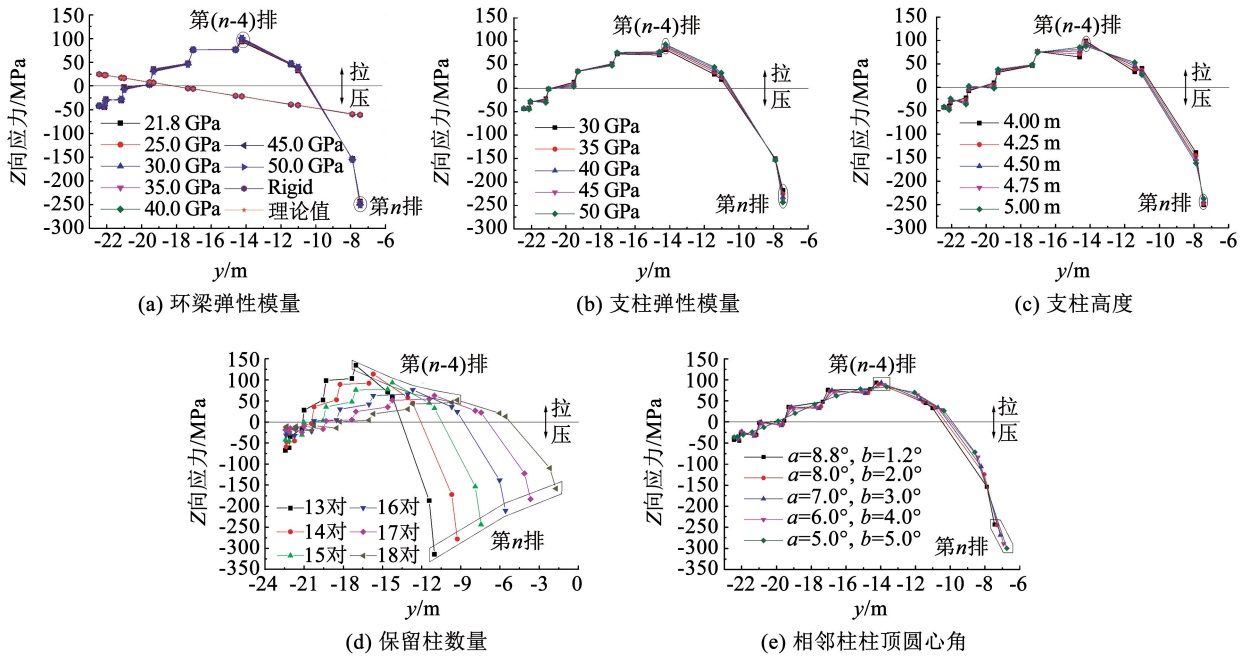
Tab. 3　First four-order frequency of 60.0 m cooling tower

频率	频率实测值/Hz	频率模拟值/Hz	相对误差/%
f_1	2.466 1	2.351 2	−4.66
f_2	2.463 2	2.351 8	−4.52
f_3	2.439 6	2.444 5	0.20
f_4	2.552 4	2.444 5	−4.23

注：实测值源于文献[14]。

2.3　参数分析

参数分析时维持其他参数不变，仅改变单个参数的取值。根据规范[15-16]对环梁和支柱配筋率及混凝土强度的要求，分别取环梁的弹性模量为 21.8 ~ 50.0 GPa、支柱的弹性模量为 30 ~ 50 GPa 进行参数分析。根据规范[15]对冷却塔进风口面积与支柱柱顶处冷却塔的面积之比的要求，取支柱的高度为 4.0 ~ 5.0 m 进行参数分析。根据工程常用爆破圆心角的取值（190° ~ 240°），取保留柱的数量为 13 ~ 18 对进行参数分析。根据 64.5 m 高冷却塔的几何特征，取相邻柱柱顶圆心角 b 为 1.2° ~ 5.0° 进行参数分析。5 种参数的分析结果如图 5 所示。



(a) 环梁弹性模量　(b) 支柱弹性模量　(c) 支柱高度

(d) 保留柱数量　(e) 相邻柱柱顶圆心角

图 5　各参数对保留柱 Z 向应力的影响

Fig. 5　Effects of various parameters on Z-direction stress of retained columns

由图 5(a)可知,当环梁的弹性模量无穷大时,各保留柱的 Z 向应力值与理论计算值基本相同,而弹性模量为 21.8 ~ 50.0 GPa 时,理论计算值与模拟值存在较大差异,但不同环梁弹性模量下各保留柱 Z 向应力的分布曲线基本重合;由图 5(b)和(c)可知,不同支柱弹性模量下和不同支柱高度下,各保留柱 Z 向应力的大小及分布总体上相差不大,仅在个别保留柱上存在差异。其中,随着支柱弹性模量的增加和支柱高度的减小,第 15 排保留柱的 Z 向应力值呈小幅度递增,但支柱弹性模量从 30 GPa 增到 50 GPa,第 15 排保留柱 Z 向应力的增幅不超过 12%,支柱高度从 5.00 m 减小到 4.00 m,第 15 排保留柱 Z 向应力的增幅不超过 6%;由图 5(d)和(e)可知,保留柱数量和相邻柱柱顶圆心角对各保留柱 Z 向应力值的影响较大,且随着保留柱数量的减小和柱顶圆心角 a 的减小,第 15 排保留柱的 Z 向应力值呈递增趋势,但保留柱数量和相邻柱柱顶圆心角并不影响各保留柱 Z 向应力的分布规律。

通过分析可知,基于平截面假定得到的理论计算值与实际值存在较大偏差,其主要原因为爆破后的冷却塔在所有保留柱上并不满足平截面假定;在实际工程范围内,环梁和支柱的弹性模量以及支柱高度对各保留柱 Z 向应力值的影响较小,保留柱数量与相邻柱柱顶圆心角对保留柱 Z 向应力值的影响较大;在实际工程范围内,各保留柱的 Z 向力沿着 y 轴方向上的分布呈现“两端受压,中间受拉”的分布形态,且各保留柱 Z 向力的分布始终呈现以下规律:保留柱中的最大压力始终出现在第 n 排保留柱上,最大拉力始终出现在第$(n-4)$排保留柱上。

3 理论修正及其计算精度

由于爆破后的冷却塔在所有保留柱上不满足平截面假定,且冷却塔的支柱是一个空间三维构件,保留柱 Z 向力的大小除了与柱顶 Z 向位移有关外,还与其 X 和 Y 方向上的位移有关。因此,要想准确计算出保留柱 Z 向力的大小需知道柱顶在 X、Y、Z 3 个方向上的位移,而这是一个复杂且困难的过程。为了给出一个计算过程便捷的第 n 排保留柱轴向力的计算公式,根据参数分析的结果对 1.3 节公式进行了修正。

3.1 计算公式的修正

根据“保留柱中的最大压力始终出现在第 n 排保留柱上,最大拉力始终出现在第$(n-4)$排保留柱上”这一特征,提出一种“有效保留柱修正法”,即无论保留柱数量为多少,均取靠近爆破切口的前 5 排柱作为有效保留柱(如图 6 所示)。

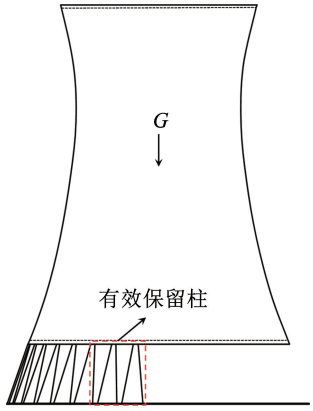


图 6 有效保留柱示意

Fig. 6 Diagram of effective retained column

在有效保留柱修正法中,假定爆破后的倾倒力矩全部由有效保留柱承担,且爆破后的冷却塔在有效保留柱范围内满足平截面假定。

假设在倾倒力矩的作用下,有效保留柱的中心轴到 x 轴的距离为 e',则各有效保留柱柱顶到中性轴的距离 d'_i 为

$$d'_i = y_i - e' \tag{10}$$

由 Z 向力的分布满足平截面假定可得

$$\frac{F'_{Zn}}{d'_n} = \frac{F'_{Z(n-1)}}{d'_{n-1}} = \frac{F'_{Z(n-2)}}{d'_{n-2}} = \frac{F'_{Z(n-3)}}{d'_{n-3}} = \frac{F'_{Z(n-4)}}{d'_{n-4}} \tag{11}$$

由验算截面上力的平衡关系可得

$$\begin{aligned} \sum M &= 2\sum_{i=n-4}^{n} F'_{Zi} d'_i = Ge \\ \sum F &= 2\sum_{i=n-4}^{n} F'_{Zi} = -G \end{aligned} \tag{12}$$

将式(10)和(11)代入式(12)可得,有效保留柱的中心轴到 x 轴的距离 e' 为

$$e'_{1,2} = \frac{\left(5e + 2\sum_{i=n-4}^{n} y_i\right)}{10} \pm \frac{\sqrt{\left(5e + 2\sum_{i=n-4}^{n} y_i\right)^2 - 20\left(e\sum_{i=n-4}^{n} y_i + \sum_{i=n-4}^{n} y_i^2\right)}}{10} \tag{13}$$

修正后各有效保留柱 Z 向力 F'_{Zi} 为

$$F'_{Zi} = Ge\frac{d'_i}{2\sum_{i=n-4}^{n} d_i'^2} \tag{14}$$

则修正后第 n 排保留柱轴向力 F'_{Nn} 为

$$F'_{Nn} = \frac{\sqrt{\left(R\cos\frac{a-b}{2} - R_0\right)^2 + \left(R\sin\frac{a-b}{2}\right)^2 + h^2}}{h} \cdot F'_{Zn} \tag{15}$$

3.2 修正后的计算精度

为了检验修正后公式的计算精度,分别将不同

保留柱数量和不同相邻柱柱顶圆心角下第 n 排保留柱轴向应力的计算值与有限元模拟值进行对比。

3.2.1　计算过程

以 13 对保留柱为例，给出第 n 排保留柱轴向应力的计算过程。已知保留柱上部冷却塔自重(G)为 29 376 kN，冷却塔在柱底和柱顶处半径(R_0 和 R)分别为 24.0、22.441 m，支柱高度(h)和横截面面积(A)分别为 4.5 m 和 0.113 137 m^2，两种相邻柱柱顶所对应的圆心角(a 和 b)分别为 8.8°和 1.2°。

由式(3)得各保留柱柱顶 y 轴的坐标，由此可得

$$\sum_{i=1}^{13} y_i = 233.345\ \text{m},\ \sum_{i=1}^{13} y_i^2 = 4\ 383.955\ \text{m}^2$$

$$\sum_{i=9}^{13} y_i = 68.327\ \text{m},\ \sum_{i=9}^{13} y_i^2 = 958.346\ \text{m}^2$$

由式(7)可得修正前中性轴到 x 轴的距离

$$e = 4\ 383.955 \div 233.345 = 18.787\ \text{m}$$

由式(8)可得修正前第 13 排保留柱 Z 向力

$$F_{Z13} = \frac{29\ 376\ 651 \times 18.787 \times (-7.771)}{2 \times 204.632} = -10\ 479\ 320\ \text{N}$$

由式(1)和(2)可得修正前第 13 排保留柱轴向应力

$$\sigma_{13} = \frac{\sqrt{(22.441\cos 3.8° - 24)^2 + (22.441\sin 3.8°)^2 + 4.5^2}}{4.5 \times 0.113\ 137} \times (-10\ 479\ 320) = -103.014\ \text{MPa}$$

由式(13)可得修正后中心轴到 x 轴的距离

$$e' = \frac{230.591 - \sqrt{230.591^2 - 20 \times 2\ 242.03}}{10} = 13.931\ \text{m}$$

由式(10)可得各有效保留柱到修正后中性轴的距离，再由式(14)可得修正后第 13 排保留柱 Z 向力

$$F'_{Z13} = \frac{29\ 376\ 651 \times 18.787 \times (-2.915)}{2 \times 24.993} = -32\ 184\ 732\ \text{N}$$

由式(1)和(15)可得修正后第 13 排保留柱轴向应力

$$\sigma'_{13} = -103.014 \times 32\ 185 \div 10\ 479 = -316.391\ \text{MPa}$$

3.2.2　计算值与模拟值的对比

不同保留柱数量与不同相邻柱柱顶圆心角下，修正前后第 n 排保留柱轴向应力的计算值和有限元模拟值如表 4 和 5 所示。可以看出，无论是不同保留柱数量下，还是不同相邻柱柱顶圆心角下，修正后的计算精度相比修正前均得到有效提升，且修正后的计算值与模拟值的相对误差较小；当爆破圆心角为 190°～240°时，修正后第 n 排保留柱轴向应力计算值的相对误差在 23% 以内；不同相邻柱柱顶圆心角下，修正后第 n 排保留柱轴向应力计算值的相对误差在 10% 以内。

表 4　不同保留柱数量下第 *n* 排保留柱的轴向应力

Tab. 4　The axial stress of the nth retained column under different number retained columns

保留柱数量/对	爆破圆心角/(°)	修正前计算值/MPa	修正后计算值/MPa	模拟值/MPa	修正前相对误差/%	修正后相对误差/%
13	239	-103.02	-316.39	-387.29	-73.40	-18.31
14	229	-82.75	-291.37	-342.37	-75.83	-14.90
15	219	-67.33	-271.81	-299.89	-77.55	-9.37
16	209	-55.41	-256.78	-259.72	-78.67	-1.13
17	199	-46.05	-245.75	-225.67	-79.59	8.90
18	189	-38.61	-238.42	-194.93	-80.19	22.31

表 5　不同相邻柱柱顶圆心角下第 *n* 排保留柱的轴向应力

Tab. 5　The axial stress of the nth retained column under different central angles of the top of adjacent column

相邻柱柱顶圆心角/(°)	爆破圆心角/(°)	修正前计算值/MPa	修正后计算值/MPa	模拟值/MPa	修正前相对误差/%	修正后相对误差/%
$a=8.8, b=1.2$	219	-67.33	-271.80	-299.89	-77.55	-9.37
$a=8, b=2$	218	-66.95	-281.80	-290.75	-76.98	-3.08
$a=7, b=3$	217	-66.74	-293.76	-308.27	-78.35	-4.70
$a=6, b=4$	216	-66.90	-305.11	-325.21	-79.43	-6.18
$a=5, b=5$	215	-67.44	-315.82	-334.26	-79.83	-5.52

4　修正后公式的适用性

为了检验修正后计算公式在不同冷却塔中的适用性，分别建立一座 177 m 高和一座 191 m 高的钢筋混凝土冷却塔模型，对比不同保留柱数量下第 n 排保留柱轴向应力的计算值和模拟值。

两座钢筋混凝土冷却塔的筒壁均由 48 对人字柱支撑,且人字柱截面均为直径 1.3 m 的圆。其中,177 m 高冷却塔相邻柱柱顶所对应的圆心角 a、b 分别为 6.3°、1.2°,筒身重力为 455 535 kN。191 m 高冷却塔相邻柱柱顶所对应的圆心角 a、b 分别为 6.1°、1.4°,筒身重力为 452 002 kN。两座冷却塔的尺寸与材料信息详见文献[17 – 18],材料参数如表 6所示。

表 6 177、191 m 高冷却塔各部分材料参数

Tab. 6 Material parameters of 177 and 191 m cooling tower

塔高/m	部位	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
177	筒身	2 550	33.5	0.2
	支柱	3 000	39.5	0.2
191	筒身	2 650	32.5	0.2
	支柱	2 650	33.5	0.2

经计算与模拟可得,不同保留柱数量下 177、191 m 高钢筋混凝土冷却塔的第 n 排保留柱的轴向应力分别如表 7 和 8 所示。可以看出,当爆破圆心角为 190° ~ 240°时,177 m 高冷却塔修正后的理论计算值和有限元模拟值的相对误差在 23% 以内,191 m 高冷却塔修正后的理论计算值和有限元模拟值的相对误差在 33% 以内。

由表 4、5、7、8 可以看出,无论是 64.5 m 高的冷却塔还是 177、191 m 高的冷却塔,修正后第 n 排保留柱轴向力的计算精度均得到大幅提升,且当爆破圆心角为 200° ~ 240°时,修正后的计算值和有限元模拟值的相对误差均在 21% 以内;当爆破圆心角为 210° ~ 220°时,修正后的计算公式在 3 座冷却塔中均取得良好的计算精度,其相对误差均在 12% 以内。由此可以说明修正后的计算公式具有较好的适用性。

表 7 177 m 高冷却塔第 *n* 排保留柱轴向应力

Tab. 7 The axial stress of the *n*th retained column of 177 m cooling tower

保留柱数量/对	爆破圆心角/(°)	修正前/MPa	修正后/MPa	模拟值/MPa	修正前误差/%	修正后误差/%
17	239	-111.60	-539.59	-700.75	-84.07	-23.00
18	231	-94.02	-508.54	-638.03	-85.26	-20.29
19	224	-79.85	-482.60	-576.79	-86.16	-16.33
20	216	-68.31	-461.09	-520.82	-86.88	-11.47
21	209	-58.82	-443.56	-469.38	-87.47	-5.50
22	201	-50.94	-429.69	-421.32	-87.91	1.99
23	194	-44.36	-418.82	-377.77	-88.26	10.87

表 8 191 m 高冷却塔第 *n* 排保留柱轴向应力

Tab. 8 The axial stress of the *n*th retained column of 191 m cooling tower

保留柱数量/对	爆破圆心角/(°)	修正前/MPa	修正后/MPa	模拟值/MPa	修正前误差/%	修正后误差/%
16	246	-129.38	-566.20	-643.21	-79.89	-11.97
17	239	-107.98	-529.70	-589.65	-81.69	-10.17
18	231	-90.94	-499.13	-535.95	-83.03	-6.87
19	224	-77.21	-473.56	-484.24	-84.06	-2.21
20	216	-66.03	-452.36	-434.88	-84.82	4.02
21	209	-56.84	-435.06	-389.81	-85.42	11.61
22	201	-49.22	-421.37	-348.29	-85.87	20.98
23	194	-42.85	-411.09	-310.90	-86.22	32.22

5 结 论

1)基于所有保留柱上平截面假定得到的各保留柱 Z 向力的计算值与其实际值相差较大,其主要原因为爆破后的冷却塔在所有保留柱上并不满足平截面假定。

2)在实际工程范围内,环梁弹性模量、支柱弹性模量、支柱高度、保留柱数量以及相邻柱柱顶所对应的圆心角 5 种参数并不影响保留柱 Z 向应力的分布特征,各保留柱 Z 向力沿 y 轴方向的分布呈现“两端受压,中间受拉”的形态,且保留柱中的最大压力始终出现在第 n 排保留柱上,最大拉力始终出现在第(n -4)排保留柱上。

3)在实际工程范围内,修正后的第 n 排保留柱

轴向力的计算公式具有较好的计算精度，且该公式可适用于不同高度的冷却塔，具有良好的适用性。修正后的计算公式与基于支柱材料强度的倾倒验算公式从力学角度为冷却塔的定向拆除提供了理论支撑，可增加冷却塔拆除工作的安全性。

参考文献

[1]佚名. 上大压小 节能减排[J]. 上海企业，2007(4)：5

[2]付天杰，赵超群，梁儒，等. 竖向切缝在高大冷却塔拆除爆破中的作用[J]. 工程爆破，2011，17(4)：58
FU Tianjie，ZHAO Chaoqun，LIANG Ru，et al. Application of vertical cut in demolition blasting of tall cooling tower[J]. Engineering Blasting，2011，17(4)：58

[3]张建华，谌彪，黄刚，等. 卸荷槽对冷却塔拆除爆破的数值模拟研究[J]. 爆破，2020，37(3)：122
ZHANG Jianhua，CHEN Biao，HUANG Gang，et al. Numerical simulation study on the influence of unloading tank for cooling tower blasting demolition[J]. Blasting，2020，37(3)：122. DOI：10.3963/j. issn. 1001－487X. 2020. 03. 021

[4]张宝岗，赵明生，余红兵，等. 切口角度对冷却塔爆破拆除影响研究[J]. 爆破，2018，35(1)：109
ZHANG Baogang，ZHAO Mingsheng，YU Hongbing，et al. Study on influence of cut angle on explosive demolition of cooling tower[J]. Blasting，2018，35(1)：109. DOI：10.3963/j. issn. 1001－487X. 2018. 01. 018

[5]上官子昌，李守巨，刘书贤，等. 定向爆破拆除冷却塔倾倒条件的研究[C]//第四届全国岩石动力学学术会议. 武汉：湖北科学技术出版社，1994：120

[6]汪高龙，王潇，李跟，等. 复杂环境 90 m 高双曲线冷却塔拆除爆破[J]. 工程爆破，2021，27(1)：62
WANG Gaolong，WANG Xiao，LI Gen，et al. Demolition blasting of 90 m high hyperbola cooling tower in complicated environment[J]. Engineering Blasting，2021，27(1)：62. DOI：10.19931/j. EB. 20200204

[7]戴俊. 筒形建筑物爆破拆除缺口参数的力学分析[J]. 爆破器材，1995，24(5)：16
DAI Jun. Mechanical analyses on cutting-section parameters for demolishing a tube-shaped construction by blasting[J]. Explosive Materials，1995，24(5)：16

[8]GU Xianglin，YU Qianqian，LI Yi，et al. Collapse process analysis of reinforced concrete super-large cooling towers induced by failure of columns[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities，2017，31(5)：04017037. DOI：10.1061/(ASCE)CF.1943－5509.0001023

[9]李洪伟，颜事龙，郭进，等. 爆破拆除切口形状对冷却塔爆破效果影响及数值模拟[J]. 爆破，2013，30(4)：92
LI Hongwei，YAN Shilong，GUO Jin，et al. Numerical simulation of effect of cut parameters on explosive demolition of cooling towers[J]. Blasting，2013，30(4)：92. DOI：10.3963/j. issn. 1001－487X. 2013. 04. 020

[10]谢先启，姚颖康，贾永胜，等. 冷却塔爆破拆除失稳机制与变形破坏特征研究[J]. 爆破，2017，34(2)：40
XIE Xianqi，YAO Yingkang，JIA Yongsheng，et al. Study on instability mechanism and deformation characteristics of hyperbolic cooling tower explosive demolition[J]. Blasting，2017，34(2)：40. DOI：10.3963/j. issn. 1001－487X. 2017. 02. 007

[11]张继春，曾庆福，严军，等. 成都华能电厂 106.6 m 钢筋砼冷却塔控制爆破拆除[J]. 爆破，2010，27(1)：58
ZHANG Jichun，ZENG Qingfu，YAN Jun，et al. Controlled explosive demolition of 106.6 m reinforced concrete cooling tower in Chengdu Huaneng plant[J]. Blasting，2010，27(1)：58. DOI：10.3963/j. issn. 1001－487X. 2010. 01. 015

[12]卢子冬，张世平，张昌锁. 永济市热电厂三座特殊结构冷却塔爆破拆除[J]. 爆破，2014，31(3)：114
LU Zidong，ZHANG Shiping，ZHANG Changsuo. Explosive demolition of three cooling towers with special construction in Yongji[J]. Blasting，2014，31(3)：114. DOI：10.3963/j. issn. 1001－487X. 2014. 03. 022

[13]卢子冬. 烟囱、冷却塔、框架结构楼房爆破拆除数值模拟研究[D]. 太原：太原理工大学，2015
LU Zidong. Numerical simulation study of chimney，cooling tower and frame structure′s demolition blasting[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2015

[14]王朋国. 钢筋混凝土双曲冷却塔结构抗震性能分析及加固方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2017
WANG Pengguo. Seismic performance and strengthening method of reinforced concrete hyperbolic cooling tower[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2017

[15]中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工业循环水冷却设计规范：GB/T 50102—2014[S]. 北京：中国计划出版社，2014

[16]中华人民共和国住房和城乡建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范：GB 50010—2014[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010

[17]张宗方. 大型自然通风冷却塔失效分析与优化设计[D]. 大连：大连理工大学，2011
ZHANG Zongfang. Failure analysis and optimization design of large-scale natural draft cooling tower[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2011

[18]杨亚. 大型冷却塔结构不同建模方式对比研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2017
YANG Ya. Comparative study on different modeling methods of large cooling tower[D]. Chongqing：Chongqing Jiaotong University，2017

（编辑　刘　彤）