

# Shell Structure Analysis of A Hyperbolic Natural Ventilation Cooling Tower in A Power Plant

Jie Zhang

China CEC Engineering Corporation, Changsha, Hunan, 410001, China

## Abstract

In this paper, the midas three-dimensional model is established on the hyperbolic natural ventilation cooling tower shell (including hyperbolic shell, herringbone, ring, plate bearing platform, etc.) of a power plant in Tianjin, and a reasonable structural calculation and analysis is carried out. The calculation results show that multiple control indexes of the project structure meet the requirements of the code and the structure design is reasonable. The engineering design can be used as a reference for similar structural design.

## Keywords

hyperbolic cooling tower shell; structural analysis; three-dimensional model

## 某电厂双曲线自然通风冷却塔壳体结构分析

张杰

中国轻工业长沙工程有限公司, 中国·湖南长沙 410001

## 摘要

论文通过对天津某电厂双曲线自然通风冷却塔外壳(含双曲线壳体、人字柱、环、板承台等)建立 midas 三维模型,进行了合理的结构计算分析。计算结果表明,该工程结构的多项控制指标均满足规范要求,结构设计合理。该工程设计可供同类结构设计参考。

## 关键词

双曲线冷却塔外壳; 结构分析; 三维模型

## 1 工程概况

中国天津某造纸基地自备电厂, 中期规模 300MW, 配备两座淋水面积为 4500m<sup>2</sup> 的逆流式双曲线型自然通风冷却塔。

本冷却塔顶高 106.6m, 进风口标高 6.700m。筒体采用基本等厚混凝土壳体, 下部设置 40 对圆截面人字柱支撑壳体。基础为预应力管桩基础, 周圈为环基承台。人字柱下端通过截面刚度较大的支墩与环基承台连接。桩与环基承台连接按抗拔桩设计。冷却塔外壳整体外形如图 1 所示。



图 1 双曲线自然通风冷却塔外壳立面图

工程抗震设防烈度为 8 度, 设计基本加速度峰值为 0.2g, 所属设计地震分组为第一组。50 年一遇基本风压为 0.55kPa, 地面粗糙度为 B 类。

本工程冷却塔外壳采用有限元软件 MIDAS GEN 进行结构分析, 选择合适的截面及配筋, 使其满足承载能力极限状态及正常使用极限状态各项指标的要求<sup>[1]</sup>。

## 2 地基与基础设计

工程所在地地貌类型属冲积平原, 地基土主要为粉质粘土, 地基承载力偏低。考虑到高耸结构对地基变形要求高, 且此构筑物对不均匀沉降较为敏感。结合当地施工及采购条件, 本工程考虑采用预应力管桩基础。承台采用周圈整体环板承台。环板承台中面直径 80.72m, 截面 4.4m x 1.6m, midas 模型中以板单元模拟环板承台。

以桩所在位置节点弹性支承模拟预应力管桩的作用。依

据《动力机器基础设计规范》GB50040-96,第3.3节,计算出桩的水平及竖向弹性支承刚度分别为:

$$SD_x = SD_y = 12.4 \text{ kN/mm}$$

$$SD_z = 329.5 \text{ kN/mm}$$

单塔环基下设377根 $\phi 400$ 预应力管桩,计算输出最不利工况下单桩所受最大竖向力标准值为2.9kN(拔力),639.6kN(压力),水平力标准值为69.4kN。满足单桩竖向及水平承载力要求。由此可见,桩以水平承载力控制。

以节点弹性支承的边界条件模拟预应力管桩的作用,能较为真实反映桩对上部结构的作用<sup>[2]</sup>。

### 3 上部结构设计

#### 3.1 支墩及人字柱

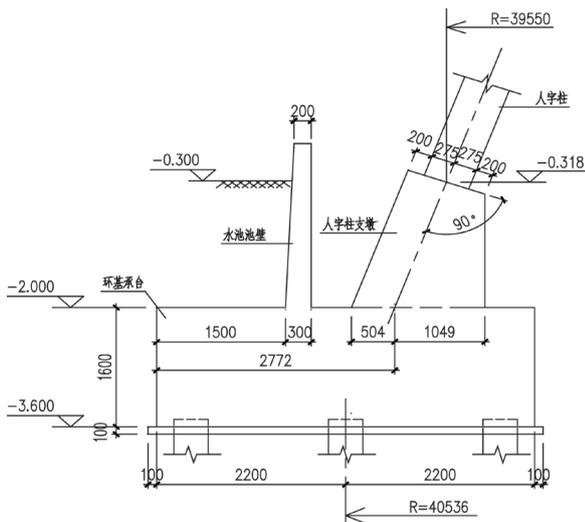


图2 人字柱、支墩与环基承台断面示意

图2为支墩及人字柱。支墩采用椭圆锥台,截面刚度较人字柱大很多。在midas整体模型中,以刚性连接将人字柱的下端和环基承台相应节点连接,以此模拟支墩。对于支墩自身的计算:读出人字柱下端弯矩、剪力、轴力,再另行验算。本工程通过验算,支墩为构造配筋即可。

采用放大的单独柱墩,即两个人字柱底部相交处以柱墩连接环板基础,有以下两点优势。

(1) 柱墩刚度较大,且从上往下呈扩散趋势,在与环板基础连接处截面最大。这样能将上部壳体由人字柱传来的较大内力扩散至环板,避免了环板局部应力集中。

(2) 单独柱墩,而不采用环形整体厚壁,避免了环形整体厚壁产生的较大的环向温度应力,使结构趋于经济合理。

人字柱采用 $\phi 550$ 圆柱截面,周圈共40对,预制柱。

冷却塔人字柱通常有圆形截面和方形截面。通常认为人字柱的圆形截面,风阻系数较小,传力更为合理,但圆形柱定位对施工要求较高。本工程由专业的冷却塔施工队伍施工,施工器械及精度能达到设计要求,故优先选用圆柱截面。

在midas模型中,定义人字柱为梁单元。通过计算分析可知,人字柱受力为轴向拉力控制。最大的轴向压力及弯矩、剪力都不起控制作用<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 双曲线旋转面壳体

通风筒采用基本等厚混凝土壳体,最小厚度0.17m,最大厚度0.60m。塔顶壳体中面半径23.975m;喉部标高81.805m,喉部壳体中面半径22.680m;进风口标高6.700m,进风口壳体中面半径37.240m。

冷却塔外壳是很薄的壳体结构,其稳定性是冷却塔设计时必须关注的重点。依据《工业循环水冷却设计规范》(GB/T50102-2003),2.6.14条,双曲线冷却塔塔筒的弹性稳定验算按以下要求进行。

##### (1) 整体弹性稳定验算

$$q_{cr} = C E (h / r_0)^{2.3}$$

$$K_B = q_{cr} / q \geq 5$$

式中  $K_B$ ——弹性稳定安全系数;

$q_{cr}$ ——塔筒屈曲临界压力值, kPa;

$q$ ——塔顶设计风压值, kPa;

$C$ ——经验系数。其值为0.052;

$E$ ——混凝土弹性模量, kPa;

$r_0$ ——塔筒喉部半径, m;

$h$ ——塔筒喉部处壁厚, m。

将此塔各项参数代入上式,  $K_B$  值为18.1, 大于5, 符合整体稳定要求。

##### (2) 局部弹性稳定验算:

$$0.8 K_B (\sigma_1 / \sigma_{cr1} + \sigma_2 / \sigma_{cr2}) + 0.2 (K_B)^2 [(\sigma_1 / \sigma_{cr1})^2 + (\sigma_2 / \sigma_{cr2})^2] = 1$$

应满足  $K_B \geq 5$ 。

式中  $K_B$ ——弹性稳定安全系数;

$\sigma_1, \sigma_2$ ——由  $P+W+W_{sog}$  组合产生的环向、子午向压力,

其中  $W_{sog}$  为内吸力引起的压力, kPa;

$\sigma_{cr1}, \sigma_{cr2}$ ——环向, 子午向的临界压力, kPa;

由midas程序计算壳体各点子午向及环向压应力, 代入

上式,可得到任一点的弹性安全系数  $K_B$ 。规范要求各点的  $K_B$  不小于 5,本工程经计算知最小值为 7.186。

由此可知,以上筒壁的外形及壁厚是安全可行的。同时,局部安全系数最

小值出现在最小壁厚 0.170m 的最下面一节,设计时考虑适当加强。并且保证开洞避开此节。

由于本工程地处抗震设防烈度为 8 度区,冷却塔壳体设计时考虑不与淋水构架发生搭接关系。避免地震作用下淋水构架对壳体的撞击破坏作用。同时也使得外壳受力更简单直接,避免复杂应力的出现。

### 3.3 风荷载和地震荷载对冷却塔结构作用比较

本工程所在地,基本风压 0.55kPa,抗震设防烈度为 8 度。冷却塔结构对风荷载敏感,而地震烈度 8 度也不可小觑。通过对 midas 模型输入两种荷载,比较两种荷载对结构的作用<sup>[4]</sup>。

本工程模型中风荷载输入按《工业循环水冷却设计规范》(GB/T50102-2003)之 2.6.3 条:

$$\omega(Z, \theta) = \beta \cdot C_p(\theta) \cdot \mu_z \cdot \omega_0$$

式中  $\omega(Z, \theta)$ ——作用在塔表面上的等效设计风荷载, kPa;

$\omega_0$ ——基本风压, kPa;

$C_p(\theta)$ ——平均风压分布系数;

$\beta$ ——风振系数;

$\mu_z$ ——风压高度变化系数。

由上述公式可计算出每个高度风压沿塔筒表面分布的情况,如图 3 所示。

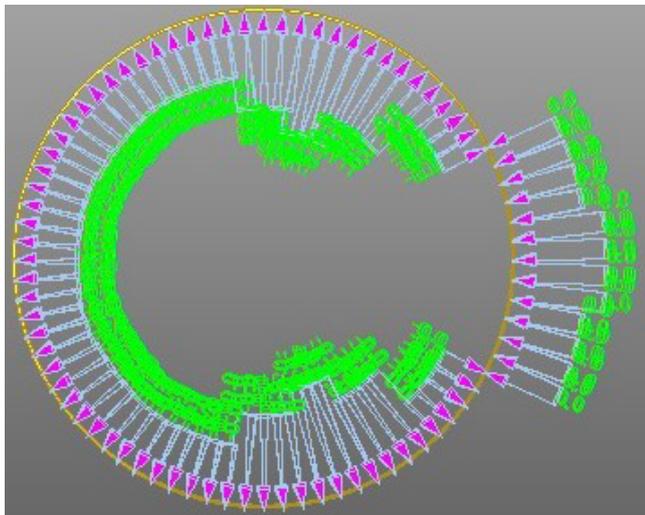


图 3 壳体水平截面风压分布示意(右风)

由图 3 知,最大风压出现在与风向成 70 度角位置,且为负压。通过 midas 对模型的计算分析,可知在风荷载作用下:

桩顶最大竖向力 250.0 kN;最大水平力 59.5 kN;总水平力 3546.5 kN

壳体上部最大水平位移 53.4mm。

按振型分解反应谱法计算水平地震作用,用于计算的地震参数如下:

分组 =1, 烈度 =8(0.20g), 场地 =III, 多遇地震,  $T_g=0.45s$ , 阻尼 =0.05

由 midas 模型分析结果如下:

桩顶最大竖向力 96.9 kN;最大水平力 53.5 kN;总水平力 21577.0 kN

壳体上部最大水平位移 10.9 mm。

以上结果,地震作用下结构总水平力明显大于风荷载作用。对于桩顶竖向力,风荷载作用则大于地震荷载作用。同时,由壳体位移值结合 midas 模型变形模态知,风荷载作用下壳体以相对变形为主,而地震作用下壳体以整体平动为主。

因此,也不能整体判断荷载组合时考虑以何种荷载为主。也就是说,整体而言,风荷载和地震荷载不存在哪种荷载可以忽略<sup>[5]</sup>。

### 4 结语

Midas 模型中以节点弹性支承的边界条件模拟预应力管桩的作用,能较为真实反映桩对上部结构的作用。同时也使模型较为简洁,提高计算效率。本工程自然通风冷却塔外壳,基础以水平力控制为主。人字柱以拉力控制。自然通风冷却塔外壳,风荷载与地震荷载不能整体判断以何种荷载为主。对于双曲线壳体,风荷载作用下以相对变形为主,而地震作用下以整体平动为主。

### 参考文献

- [1] GB50009-2012. 建筑结构荷载规范 [S]. 中国建筑工业出版社.
- [2] NDGJ5-88 火力发电厂水工设计技术规定 [S]. 水利电力出版社.
- [3] GB/T50102-2003. 工业循环水冷却设计规范 [S]. 中国计划出版社.
- [4] GB50040-96. 动力机器基础设计规范 [S]. 中华人民共和国机械工业部.
- [5] 王大钧, 武际可. 冷却塔应力分析和稳定性研究 [D]. 北京: 北京大学, 2001.