

大型冷却塔风洞试验研究与结构分析

董锐, 赵林, 葛耀君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 200092 上海)

摘要: 为研究大型冷却塔群在风荷载作用下的受力,以印度某大型冷却塔(塔群)为工程背景,介绍了大型冷却塔(塔群)风洞试验研究和风荷载作用下的结构分析,主要包括:冷却塔单塔雷诺数效应模拟;冷却塔(塔群)1:500 刚体模型高频天平测力风洞试验;冷却塔(塔群)1:200 刚体模型测压风洞试验;冷却塔桩基、人字柱、塔筒内力分析;塔筒整体、局部和施工阶段稳定性分析.通过上述风洞试验和结构分析得到了一些有益结论,为类似工程设计提供借鉴.

关键词: 大型冷却塔;风洞试验;雷诺数效应;风荷载;结构分析

中图分类号: TU317+.1; TU33+2; TU271.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)06-0136-08

Wind tunnel experimental studies and structural analysis of large cooling towers

DONG Rui, ZHAO Lin, GE Yao-jun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China)

Abstract: In order to research the wind effects on large cooling towers, one project under construction in India is taken as an example to illustrate the wind tunnel tests and structural analysis of the large cooling towers systematically. The wind tunnel tests mainly include simulation of Reynolds number effect for single cooling tower model, force balance wind tunnel tests of rigid models by 1:500, and external pressure wind tunnel tests of rigid models by 1:200. The structural analysis mainly includes finite element analysis on piles, diagonal columns, and shells of the cooling tower, global and local stability analysis, and stability analysis during construction period. Some useful conclusions are given which can be references in the design of other similar cooling towers.

Key words: large cooling towers; wind tunnel test; Reynolds number effect; wind loading; structural analysis

冷却塔作为一种典型的高耸空间薄壁结构,振型复杂,风荷载作用明显,大型冷却塔在强风作用下的结构安全是工程界历来关注的重点^[1-2].1965年英国渡桥电厂8座冷却塔中的3座在8级大风下风毁的事故,加速了人们对风荷载下冷却塔受力性能的研究.当风吹过孤立的冷却塔时,由于结构与风之间的相互作用,会产生复杂的空气作用力,主要表现为冷却塔结构表面风压分布

的随机性和局部脉动风动力放大作用.在实际工程中,冷却塔往往以塔群的形式出现,塔群之间的相互干扰加剧了这种复杂性^[3].由于塔与塔之间的干扰效应,使得群塔时结构表面压力分布与单塔时存在很大不同,并且呈现出脉动风在局部区域的动力放大效应显著增大的特征,同时,毗邻高大建、构筑物的影响使得这种风致干扰作用更加复杂.所以,如何正确处理风荷载,在大型冷却塔结构设计中至关重要.

本文以印度某在建大型冷却塔群为工程背景^[4],对大型冷却塔群现有风洞试验研究的基本内容和风荷载作用下结构分析的主要过程进行了比较详细的介绍.

收稿日期: 2011-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金(50978203,90715039,51021140005);科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE08-C-02).

作者简介: 董锐(1982—),男,博士研究生;

葛耀君(1958—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 董锐,09dr@tongji.edu.cn.

1 大型冷却塔测力和测压风洞试验

该冷却塔为双曲圆截面自然通风冷却塔,为三塔组合,且三座塔的尺寸相同. 冷却塔塔高 155 m,淋水面积约 9 600 m²,喉部标高 119 m. 塔筒为混凝土分段等厚,通过 46 对人字柱与环基相连,结构采用桩基础. 冷却塔群周边建、构筑物布置复杂,主要有:汽机房、煤仓间、除氧间、锅炉房、除尘器和烟囱. 风洞试验中规定风由西向东吹时为零度,角度间隔 22.5°,以顺时针方向为正,共计 16 个吹风角度. 冷却塔群风洞试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室完成,其中,高频天平测力试验在 TJ-2 大气边界层风洞中进行;刚性模型测压试验在 TJ-3 大气边界层风洞中进行. 考虑风洞试验段尺寸和冷却塔规模,测力和测压试验分别采用 1:500 和 1:200 的比例制作冷却塔刚性模型及周边建、构筑物补偿模型. 冷却塔群及周边建、构筑物布置见图 1^[4-5].

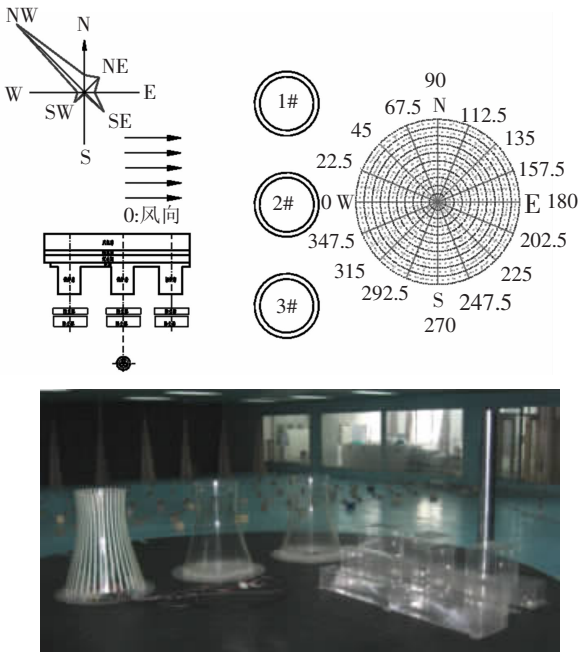


图1 冷却塔群及周边建筑布置图

1.1 雷诺数效应模拟

冷却塔为圆截面双曲线形,属于典型的流线型结构,受雷诺数影响显著. 冷却塔测力和测压风洞试验采用了较大的几何缩尺比,使得模型与原型之间的雷诺数相差 2~3 个数量级,必须采用合理的方法对其雷诺数效应进行模拟. 本文通过在冷却塔表面沿子午向粘帖粗糙纸带、丝线和调整试验风速的手段分别实现了 1:500 测力模型和 1:200 测压模型在均匀流场和 B 类流场中的雷诺数效应模拟^[6-7]. 首先,在模型喉部附近沿圆周均

匀选取 36 个测压点,分别测量不同情况下模型表面的压力分布,进而得到压力均值分布曲线. 然后将测得的模型表面压力均值分布曲线与标准曲线进行比较,即可得到最优模拟结果. 其中标准曲线选用规范^[8-9]曲线,该曲线基于西安热工所和北京大学在上世纪 80 年代对广东茂名和河北马头两座冷却塔原型风压实测与北京大学模型风洞试验结果^[10],比较过程着重于最大压力系数、最小压力系数及对应角度、压力系数等于零的角度、尾流压力系数和尾流分离角度等的取值和分布^[11].

4 种情况下的雷诺数模拟结果见表 1 和图 2.

表1 冷却塔模型雷诺数效应模拟结果

类 型	雷诺数效应模拟结果
1:500 测力模型 - 均匀流场	冷却塔表面沿圆周均匀布置宽 5 mm、厚 0.1 mm (计 36 条) 竖向通长粗糙纸带, 12 m/s 风速下, 雷诺数效应模拟效果最好 (图 2(a)).
1:500 测力模型 - B 类流场	冷却塔表面沿圆周间隔布置单层宽 5 mm、厚 0.1 mm (计 18 条) 竖向通长粗糙纸带和 0.5 mm × 0.5 mm 丝线 (计 18 条), 8 m/s 风速下, 雷诺数模拟效果最好 (图 2(b)).
1:200 测压模型 - 均匀流场	冷却塔表面沿圆周均匀分布四层宽 12 mm、厚 0.1 mm (计 36 条) 竖向通长粗糙纸带, 10 m/s 风速下, 雷诺数模拟效果最好 (图 2(c)).
1:200 测压模型 - B 类流场	冷却塔表面沿圆周间隔粘贴三、四层 (宽 12 mm、厚 0.1 mm) 粗糙纸带, 10 m/s 风速下, 雷诺数模拟效果最好 (图 2(d)).

1.2 冷却塔高频天平测力风洞试验

首先,定义高频天平测力试验中用到的两个参数:整体阻力系数和多塔比例系数.

风洞试验中整体阻力系数定义为

$$C_{DF} = \frac{F}{\sum P_i \times A_i}.$$

(1)

式中: C_{DF} 为测力试验中结构的整体阻力系数; F 为高频天平测得的某工况下的整体阻力; P_i 为高度 i 处的风压,按照指数率风剖面进行计算; A_i 为冷却塔在 i 高度处向风轴方向投影所得的面积.

风洞试验中多塔比例系数定义为

$$K_D = \frac{C_{Dm}}{C_{Ds}}.$$

(2)

式中: K_D 为多塔比例系数, C_{Dm} 为多塔组合在给定流场下被测试塔的整体阻力系数极值, C_{Ds} 为相应流场下单塔的整体阻力系数极值.

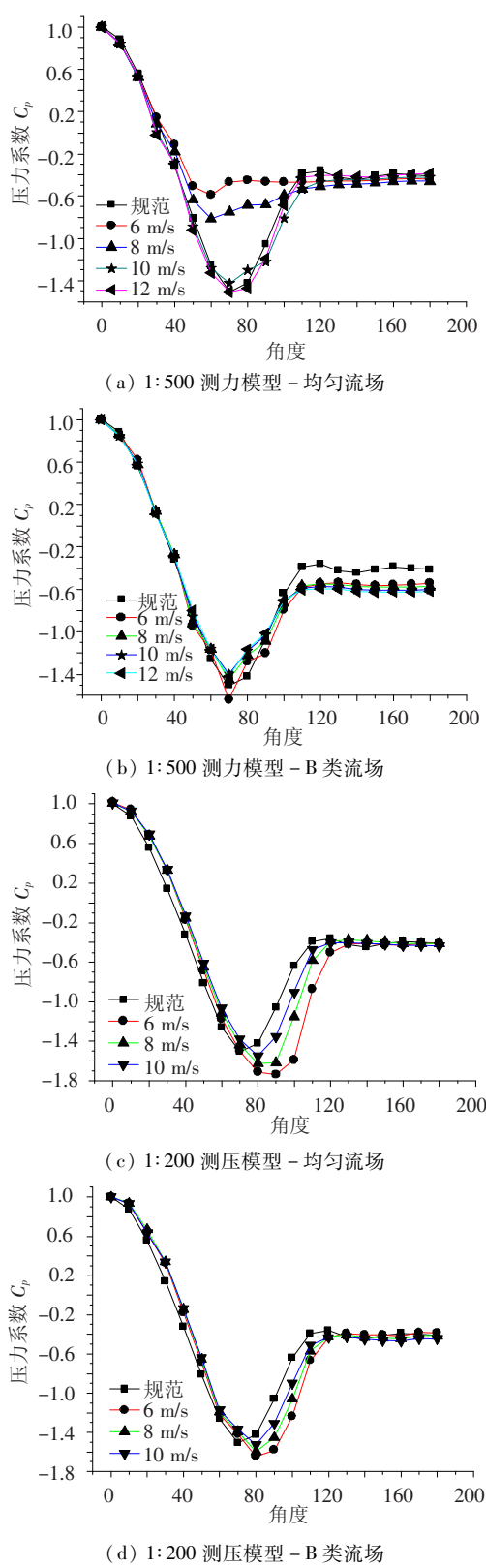


图 2 雷诺数效应最好时冷却塔模型表面压力分布

冷却塔群测力风洞试验进行了 8 种工况共计 98 个吹风角度的试验. 测力试验中信号采样频率为 200 Hz, 每次采样时间为 20.48 s, 每次采样样本总长度为 4 096 数据.

在单塔测力风洞试验中, 考虑到单个冷却塔的对称性, 仅进行了 0° 风偏角下的试验. 在均匀

流场中, 阻力系数均值为 0.448, 极值为 0.664; 在 B 类流场中, 阻力系数均值为 0.284, 极值为 0.510.

冷却塔群与周边建筑组合在均匀流场和 B 类流场下分别对 1#、2# 和 3# 塔的 16 个风偏角进行了高频天平测力试验, 最不利工况如表 2 所示. 此处以 B 类流场为例给出测力试验结果(图 3).

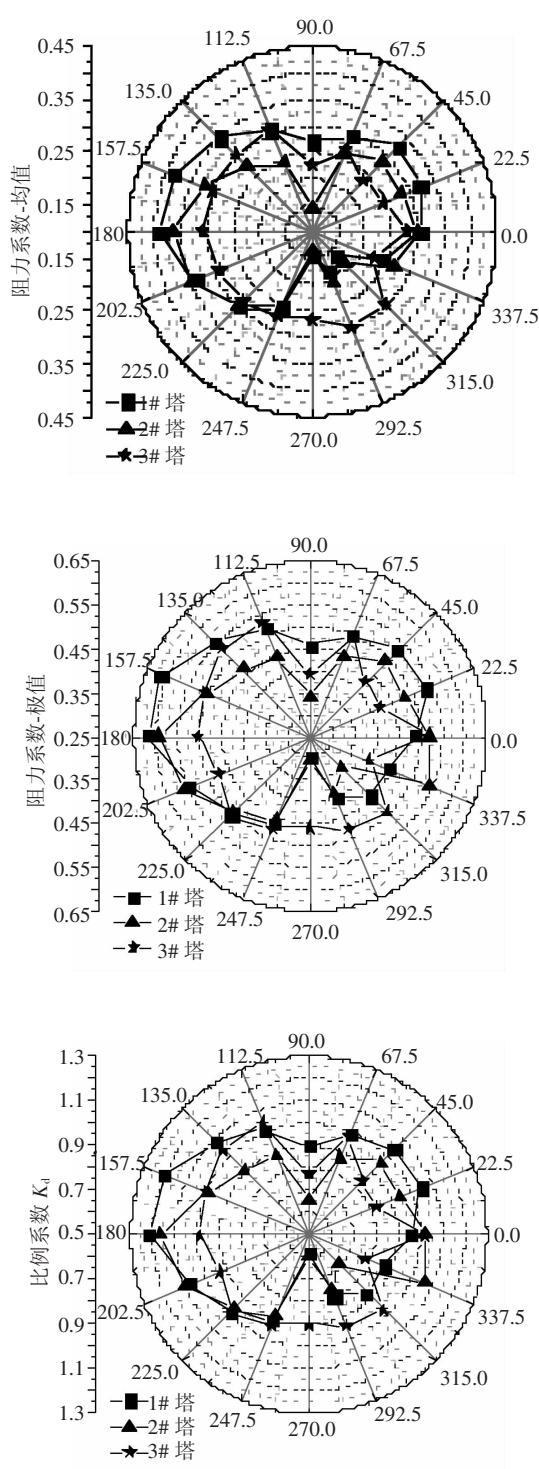


图 3 测力试验 B 类流场下冷却塔多塔比例系数与阻力系数特征值分布

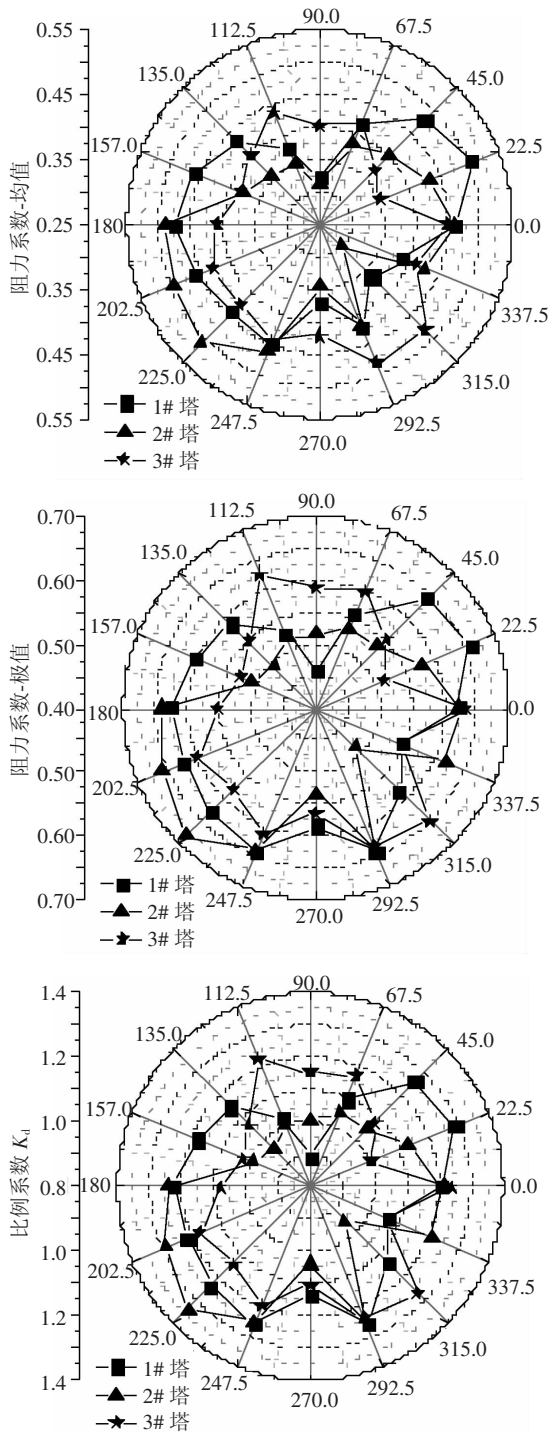


图 5 测压试验 B 类流场下冷却塔多塔比例系数与阻力系数特征值分布

2 风荷载作用下冷却塔有限元分析

采用 ANSYS 10.0 建立冷却塔结构有限元模型,见图 6。冷却塔结构前 12 阶频率分别为 0.915 95 Hz(1,2 阶),0.959 05 Hz(3,4 阶),0.974 70 Hz(5,6 阶),1.233 5 Hz(7,8 阶),1.262 6 Hz(9,10 阶)和 1.367 1(11,12 阶) Hz,表明大型冷却塔为密频结构。结构建模及动力分析见文献[4-5]。



图 6 冷却塔结构有限元模型

冷却塔结构计算参数按照以下标准取值:

1)地貌类型为 B 类;基本风压 0.714 kN/m^2 ;基本风速 33.8 m/s (换算成中国规范);

2)混凝土的泊松比取 0.2;混凝土的弹性模量:塔筒采用 C40, $3.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$;人字柱采用 C45, $3.35 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$;环基采用 C35, $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$;剪变模量取 0.4 倍的弹性模量;混凝土的线膨胀系数为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$;钢筋混凝土的密度为 25 kN/m^3 ;

3)计算主要考虑以下荷载:自重 G ;风荷载 W ;温度荷载 T ,其中 T_{summer} 为夏季温度荷载, T_{winter} 为冬季温度荷载。按照风洞试验结果,多塔比例系数偏安全地取 1.336;风振系数取为 1.9;

4)温度荷载按照规范^[8]规定取用。取冷却塔成塔温度 15°C ,对于冬季温度荷载,塔外取 30 年一遇极端温度 17°C ,塔内按附录 A 环梁无挡水设施中的单元系统取用。对于夏季温度荷载,塔内取 25°C ,筒壁温差为

$$\Delta t_{b(\theta)} = \frac{\Delta t_{b0}}{2}(1 + \cos \theta) \quad (5)$$

式中: θ 为计算点与最大壁温差处的夹角($^\circ$); $\Delta t_{b(\theta)}$ 为筒壁温差($^\circ\text{C}$); Δt_{b0} 为 $\theta = 0^\circ$ 处的壁温差,取 15°C 。

2.1 风荷载作用下冷却塔桩基有限元分析

经过对多种布桩方案的比较,冷却塔桩基础最终采用 $12 \times 46 = 552$ 根 $\Phi 800 \text{ mm}$ 钻孔灌注桩布桩方案。群桩基础的基桩水平承载力特征值应考虑环基、桩群、土相互作用产生的群桩效应,根据《建筑桩基技术规范》^[12] 第 5.7.3 条的规定群桩效应综合系数为

$$\eta_h = \eta_i \eta_r + \eta_l + \eta_b \quad (6)$$

式中: η_h 为群桩效应综合系数; η_i 为桩的相互影响效应系数; η_r 为桩顶约束效应系数; η_l 为承台侧向土水平抗力效应系数; η_b 为承台底摩阻效应系数(在该工程中不考虑承台底摩阻效应,即 $\eta_b = 0$)。

由桩的水平变形系数

$$\alpha h = \sqrt[5]{\frac{mb_0}{EI}} h = \sqrt[5]{\frac{13.6 \times 10^6 \times 1.53}{4.5394 \times 10^8}} \times 30 = 0.5398 \times 30 = 16.1945 \geq 4.0.$$

查《建筑桩基技术规范》^[12]表5.7.3-1得 $\eta_r=2.05$.

桩的相互影响效应系数为

$$\eta_i = \frac{\left(\frac{S_a}{d}\right)^{0.015n_2+0.045}}{0.15n_1+0.10n_2+1.9} = \frac{\left(\frac{2.4837}{0.8}\right)^{0.015\times3+0.045}}{0.15\times4+0.10\times3+1.9} = 0.6257.$$

承台侧向土水平抗力效应系数为

$$\eta_l = \frac{m\chi_{0a}B'_ch_c^2}{2n_1n_2R_{ha}} = \frac{13.6\times6\times9.8\times2^2}{2\times4\times3\times100} = 1.3328,$$

所以,群桩效应综合系数为

$$\eta_h = \eta_i\eta_r + \eta_l = 0.6257\times2.05 + 1.3328 = 2.616.$$

各工况下冷却塔桩基最不利内力和最大桩顶位移见表4.

表4 桩基最不利内力和桩顶最大位移

序号	荷载组合	内力/ 10^4N			位移/mm	
		剪力	轴向拉力	轴向压力	水平	竖向
1	$1.1G+W/1.9+0.6T_{\text{summer}}$	22.14	无	-159.68	3.124	-2.754
2	$1.1G+W/1.9+0.6T_{\text{winter}}$	22.10	无	-162.40	3.093	-2.802
3	$G+1.2W$	38.06	69.51	-216.92	5.386	3.741
4	$1.2G+1.4W$	44.67	77.99	-256.18	6.321	4.418

由试桩试验得Φ800 mm 钻孔灌注桩水平承载力特征值为100 kN,竖向承载力特征值为2 900 kN,考虑群桩效应时,水平承载力特征值是上述桩顶自由状态的2.616倍.由表5可知,桩的竖向承载力和水平承载力均满足要求.

2.2 风荷载作用下冷却塔人字柱有限元分析

人字柱连接塔筒和环基,起着承上启下的作用,是冷却塔结构的重要组成部分.水平荷载作用下人字柱的受力以弯矩和轴向拉力为主,人字柱的内力随水平荷载分项系数的改变发生明显变化.风荷载做为一种水平荷载,通常情况下是冷却塔人字柱结构设计中的控制性荷载,所以强风作用下人字柱的受力通常由轴向拉力控制.

在实际工程中,为方便施工和设备运输往往需要临时拆除一对人字柱,存在最优拆除位置.在不同位置分别拆除一对人字柱时,其它人字柱在相同荷载组合下的最不利受力存在明显差别.分析表明临时拆除一对人字柱时,应结合工程场地风速风向资料和冷却塔群风洞试验,综合考虑运输和施工的便利性,优先选在多塔比例系数即风致干扰因子,较小风向的背风侧.限于篇幅本文未给出计算过程,详见文献[5].

2.3 风荷载作用下冷却塔塔筒有限元分析

本文仅给出 $G+1.4W+0.6T_{\text{Summer}}$ 荷载组合下不同高度处的塔筒内力最值计算结果(其他情况与之相似)见图7.通过分析发现,风荷载作用下冷却塔塔筒环向轴力、环向弯矩和子午向弯矩的最值从20~30 m高度的位置开始趋于相对稳定,且绝对值较小;风荷载作用下冷却塔子午向轴力在塔筒内力中起控制性作用.

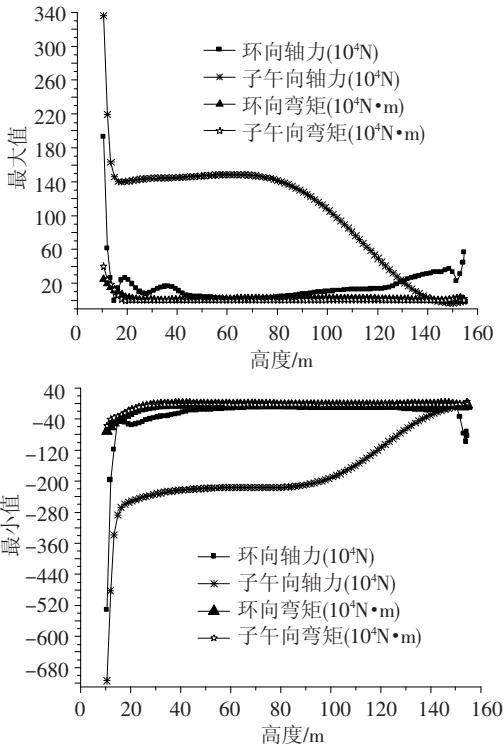


图7 $G+1.4W+0.6T_{\text{summer}}$ 作用下不同高度处的塔筒内力最值

3 冷却塔塔筒稳定性分析

3.1 冷却塔施工阶段稳定性分析

在冷却塔施工阶段稳定性分析时,综合考虑了混凝土龄期变化及施工荷载的影响.根据业主提供的资料,冷却塔采用翻模法施工,冷却塔施工荷载取值标准如下:

1)模板、走道板、脚手架、吊篮、栏杆、三角支架及支撑系统对其下的壳体沿环向形成的均布荷载约3.6 kN/m;

2)新浇筑的混凝土对其下壳体沿环向形成的均布荷载为:(25×模板高度(1.504 m)×该节模板的平均厚度(m))kN/m;

3)翻模板时施工人员对其下的壳体沿环向形成的均布荷载约 0.75 kN/m;

4)浇注时运送混凝土在外侧走道板上沿环向形成的面荷载约 3.0 kN/m²(走道板宽度约 1 m)内侧走道板荷载 2 kN/m²;则作用在壳体沿环向形成的均布荷载为(2 kN/m² + 3.0 kN/m²) × 1 m = 5 kN/m;

5)钢筋堆放于走道板上产生集中荷载,钢筋产生的最大集中荷载为 18 kN;

6)施工用的电焊机及配电盘荷载为集中荷载,作用于走道板上,总重约 3.6 kN.

以上 6 项中第 4)项和第 3)项不同时考虑,按照最不利情况第 4)项考虑.

冷却塔塔筒采用 C40 混凝土,当考虑混凝土龄期变化时,根据模式规范 CEB – FIP MC90 不同龄期混凝土的弹性模量按如下标准选取^[14]

$$E_c(t) = E_c \sqrt{\beta_t} . \tag{7}$$

式中: $E_c(t)$ 为龄期为 t 天时塔筒 C40 混凝土的弹性模量(kPa); $E_c = 3.25 \times 10^7$ kPa 为壳体混凝土龄期为 28 d 时的弹性模量; β_t 为系数, $\beta_t = e^{s(1-\sqrt{28/t})}$; s 取决于水泥种类,普通水泥和快硬水泥取 0.25; t 为混凝土的龄期(d).

表 5 在 $G + \lambda(S_c + W)$ 作用下不同施工高程结构的临界荷载及屈曲模态

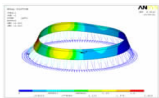
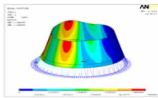
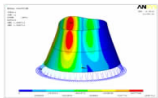
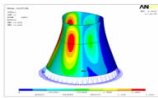
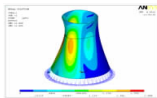
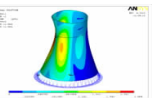
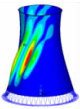
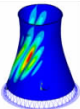
模板阶数	10 阶	30 阶	50 阶	70 阶	90 阶	98 阶
λ	151.868	12.237	10.717	15.120	16.524	16.576
屈曲模态						

表 6 冷却塔屈曲系数及屈曲模态

内吸力	屈曲系数	屈曲模态
计入内吸力	18.391	
不计内吸力	24.430	

3.3 冷却塔局部稳定性分析

冷却塔为典型的薄壁结构,在强风作用下易发生失稳破坏,其稳定性在结构设计中至关重要,自然通风双曲圆截面冷却塔的局部稳定按下式验算^[8-9]

龄期为 t 天的混凝土,其泊松比和温度线膨胀系数取值与 28 d 龄期的混凝土相同;剪变模量取 0.4 倍的弹性模量.根据业主和设计院提供的资料,冷却塔施工稳定性计算中混凝土龄期小于 28 d 的按照实际情况考虑.当考虑混凝土龄期变化时,在自重 G 、施工荷载 S_c 和风荷载 W (考虑内吸力)共同作用下($G + \lambda(S_c + W)$)塔筒在不同高度时的屈曲系数和屈曲模态见表 5.表 5 表明,施工阶段的最不稳定期发生在大约第 50 阶模板施工时.

3.2 冷却塔整体稳定性分析

冷却塔整体临界风压可由下式估计^[8-9]

$$q_{cr} = CE_c \left(\frac{h}{r_0} \right)^{2.3} . \tag{8}$$

式中: q_{cr} 为塔筒屈曲临界压力值(kPa); E_c 为壳体混凝土弹性模量, 3.25×10^7 kPa; C 为经验系数取 0.052; h 为塔筒喉部处壁厚(m), 0.275 m; r_0 为壳体喉部半径(m), 34.357 m; ω 为塔顶设计风压值(kPa), 3.260 4 kPa.

由 q_{cr} 可得整体稳定系数为

$$K_B = q_{cr} / \omega , \tag{9}$$

得到塔筒的整体稳定系数为 7.803.

自重和静风作用下,即屈曲荷载组合为 $G + \lambda W$,冷却塔屈曲系数和屈曲模态见表 6.表 6 表明,计入内吸力使得结构的屈曲系数明显下降,所以在冷却塔的整体稳定性分析中有必要计入内吸力的影响.

$$0.8K_B \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \right) + 0.2K_B \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \right)^2 \right] = 1 . \tag{10}$$

式中: $\sigma_{cr1} = \frac{0.985E}{\sqrt[4]{(1-v^2)^3}} \left(\frac{h}{r_0} \right)^{\frac{4}{3}} K_1$ 为环向临界压力;

$\sigma_{cr2} = \frac{0.612E}{\sqrt[4]{(1-v^2)^3}} \left(\frac{h}{r_0} \right)^{\frac{4}{3}} K_2$ 为子午向临界压力;

σ_1 、 σ_2 为由 $G + W + W_{\text{song}}$ 组合产生的环向、子午向压应力,其中 W_{song} 为内吸力引起压力; h 、 r_0 分别为塔筒喉部壁厚与半径; E 、 v 分别为壳体混凝土的弹性模量和泊松比; K_1 、 K_2 根据塔筒几何参数,可插值得到,本例 $K_1 = 0.145\ 655\ 726\ 4$, $K_2 = 1.266\ 500\ 762$; K_B 为局部稳定性安全因子.

利用有限元程序计算得到壳体各点环向、子午

向内力可以转化为环向和子午向的压应力然后应用式(10)对冷却塔任一点计算其局部稳定性安全因子 K_B ,规范要求各点的安全因子 $K_B > 5$ 。

在冷却塔塔筒局部稳定性计算中,风荷载外压的多塔比例系数取 $K_d = 1.336$,风振系数取规范值 $\beta = 1.9$;内压系数按照以往试验^[13]偏安全的取为 $0.5\beta = 0.5 \times 1.5$ 。冷却塔最小局部稳定系数随高度的变化见图8。可以发现,塔筒的最小稳定系数发生在第54阶模板(即87.486 m高度处),为5.012。作为比较,此处给出了内压系数取 $0.5\beta = 0.5 \times 1.9$ 时,塔筒不同高度处的最小局部稳定系数。图8表明,考虑内压使得塔筒的最小局部稳定系数变小,且内压取值越大,最小局部稳定系数越小。

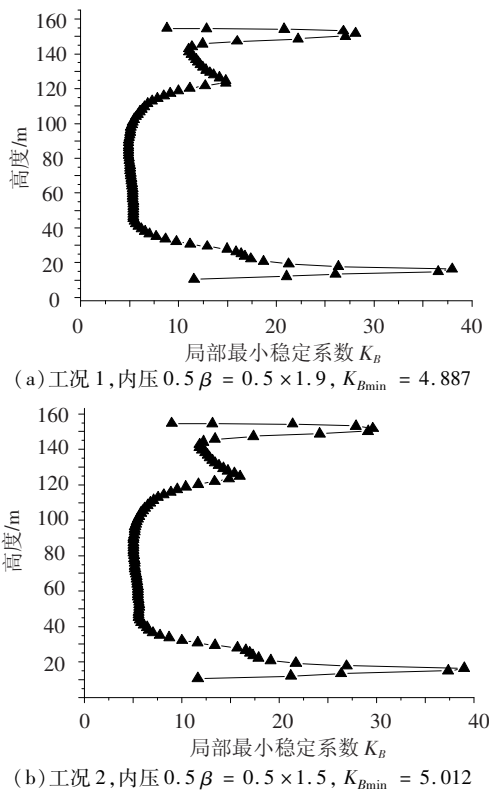


图8 冷却塔塔筒不同高度处的最小局部稳定系数

4 结 论

1) 自然通风冷却塔属于典型的圆截面结构,雷诺数效应显著,在风洞试验中必须对其雷诺数效应进行严格模拟。

2) 风洞试验表明,冷却塔群塔风致干扰效应显著,在结构设计中必须加以考虑。本文中冷却塔群的最大风致干扰效应因子(即多塔比例系数)为1.336。

3) 当采用桩基础时,在结构设计中应该考虑环基、桩群、土相互作用产生的群桩效应,以免不必要的浪费。

4) 通常情况下,在冷却塔结构施工过程中存在临时拆去一对人字柱的情况。建议临时拆除时,结

合工程场地风速风向资料和冷却塔群风洞试验,综合考虑运输和施工的便利性,优先选在多塔比例系数即风致干扰因子,较小风向的背风侧^[5]。

5) 冷却塔在施工过程中的稳定性验算,应该综合考虑施工荷载作用和混凝土龄期变化对结构的影响。

6) 冷却塔整体和局部稳定性验算需要合理考虑内压的作用,不考虑内压,将使结果偏于危险;考虑过大将造成不必要的浪费。

参考文献:

- [1] NIEMANN H J, KÖPPER H D. Influence of adjacent building on wind effects on cooling towers [J]. Engineering Structures, 1998, 20(20): 874–880.
- [2] VILADKAR M N, KARISDDAPPA C R, BHARGAVA P. Static soil-structure interaction response of hyperbolic cooling towers to symmetrical wind loads [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 1236–1251.
- [3] 赵林, 葛耀君, 许林汕, 等. 超大型冷却塔风致干扰效应试验研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(1): 149–159.
- [4] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 印度 TALWANDI 3 × 660 MW 超临界燃煤电站项目冷却塔抗风抗震性能研究(研究报告) [R]. 上海: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 2010.
- [5] 董锐, 赵林, 葛耀君. 大型冷却塔人字柱临时最优拆除位置分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(3): 56–61.
- [6] 赵林, 宋锦忠, 高玲, 等. 冷却塔群塔刚体测压试验研究 [J]. 实验流体力学, 2007, 21(2): 56–62.
- [7] 刘天成, 赵林, 丁志斌. 圆形截面冷却塔不同表面粗糙度时绕流特性的试验研究 [J]. 工业建筑, 2006, 36(增刊): 301–304.
- [8] 中华人民共和国建设部. GB/T 50102—2003 工业循环水冷却设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5339—2006 火力发电厂水工设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [10] 武际可. 大型冷却塔结构分析的回顾与展望 [J]. 力学与实践, 1996, 18(6): 1–5.
- [11] 李培华, 周良茂. 全尺寸双曲线自然通风冷却塔平均风压分布 [C] // 第4届全国结构风效应学术会议论文集. 广东: 广东省建筑科研所, 1989: 222–229.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [13] 李鹏飞, 赵林, 葛耀君, 等. 超大型冷却塔风荷载特性风洞试验研究 [J]. 工程力学, 2008, 25(6): 60–66.
- [14] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土结构原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (编辑 赵丽莹)