

电厂超大型排烟冷却塔风洞试验与稳定性分析

柯世堂, 赵林, 张军锋, 葛耀君

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 200092 上海, keshitang@163.com)

摘要: 为了研究电厂超大型排烟冷却塔结构的稳定性能, 进行群塔刚体测压和气弹测振模型风洞试验, 获得计算风致稳定性所需的表面压力极值分布模式、多塔比例系数和风振系数等参数, 采用有限元数值模拟方法和自行编制的前、后处理程序验算了排烟冷却塔的局部、整体稳定性能和极限承载力. 计算结果表明: 烟道周边壳体局部稳定性安全因子低于规范最小值, 必须采取加固措施; 加固后冷却塔整体最不利失稳临界风速大于设计检验风速, 且考虑内吸力影响会使其有 30% 左右的下降幅度; 施工状态承载力验算表明, 随着施工高度的上升, 临界风速逐渐降低, 当施工模板层数达到 100 时, 其临界风速为 119.41 m/s, 远大于当地 50 a 一遇年最大风速 (24 m/s).

关键词: 排烟冷却塔; 风洞试验; 局部稳定性; 整体稳定性; 极限承载力; 加固方案

中图分类号: TU279.7

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)02-0114-05

Wind tunnel test and stability performance analysis of super large cooling towers with gas flue in power plant

KE Shi-tang, ZHAO Lin, ZHANG Jun-feng, GE Yao-jun

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University,
200092 Shanghai, China, keshitang@163.com)

Abstract: In order to research the stability performance of cooling tower with gas flue in Xuzhou power plant, the rigid model and aero-elastic model of some super large cooling tower in Tongji TJ-3 wind tunnel are carried out, the parameters taken to calculate the wind-induced stability performance are gained in the test, with the numerical simulation and the post processor the local and whole stability are analysed. It is found that the local stability safety factor is lower than the norm value, so the reinforcement scheme must be adopted; the whole stability critical wind speed is higher than the designed wind velocity, the critical wind speed would reduce 30% when considering the internal suction; the critical wind speed is gradually small with the increase of the moulding board, the value is 119.41 m/s when the moulding board is 100, which is much higher than the maximum wind speed.

Key words: cooling tower with gas flue; wind tunnel test; local stability; global stability; ultimate bearing capacity; reinforcement scheme

大型冷却塔属于薄壁高耸结构, 模态耦合性强, 三维空间特性决定其对风荷载作用极为敏感, 其表面风压分布和塔间气流干扰十分复杂^[1-4].

在极值风荷载作用下, 由于群塔间的“夹道效应”, 群塔表面压力分布曲线与单塔有较大的差别, 尤其是脉动压力增加很大^[5], 而冷却塔表面压力分布直接影响到塔筒和基础的内力计算结果和配筋以及地基处理方案. 冷却塔在风荷载作用下, 由于风的脉动特性使得冷却塔壳体产生随机振动, 如不采取有效的工程措施, 这种振动可能会造成倒塌等严重的工程事故. 以往试验研究结

收稿日期: 2009-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (90715039);
科技部重大科技项目 (2008ZX06004-001).

作者简介: 柯世堂 (1982-), 男, 博士研究生;
葛耀君 (1958-), 男, 教授, 博士生导师.

果^[6-7]表明,冷却塔群塔之间的相互作用使得风荷载与孤立单塔的风荷载有较大的差别,毗邻的高大建筑物(构筑物)对冷却塔的影响在某些条件下也是不可忽视的,而现行技术规范^[8-9]中的规定难以满足设计要求.如何正确选用风荷载,对冷却塔结构的安全设计至关重要.

随着国民经济的发展,处于环保考虑开孔排烟冷却塔慢慢已成为未来电力部门的发展方向,但相关的研究明显不足^[10].在施工期需经历混凝土强度及弹性模量逐步增长的过程.在此期间风筒的强度及局部稳定是否满足安全要求,与施工进度有何关系,整个施工和运营状态冷却塔的极限承载力及稳定性能又有何特点,随着冷却塔规模的加大,对这些问题的研究变得越来越重要.本文即针对开孔产生的稳定性和极限承载力问题,以国内最高、最大排烟冷却塔刚体测压和气弹测振模型风洞试验为背景,探讨大型排烟冷却塔结构在周边建筑和群塔干扰下的最不利风压分布、多塔比例系数和风振系数,采用有限元软件与自行编制的前后处理程序研究了冷却塔的局部稳定性,并针对开孔产生的影响采取了有效的加固方案,随后计算了冷却塔在风载、自重作用下的整体线性稳定性和施工状态极限承载力.

1 风洞试验

1.1 试验介绍

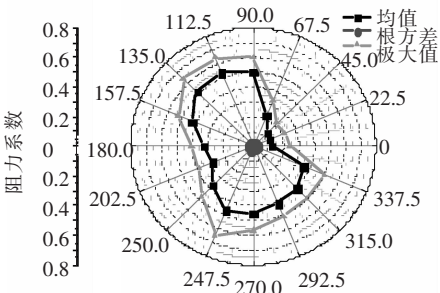
排烟冷却塔刚体测压和气弹测振模型风洞试验均在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-3 大气边界层风洞中进行.关于模型的加工、试验的具体方案和过程,在文献^[5-6, 11-12]中都有详细的说明,这里仅给出试验的主要结果.

1.2 刚体测压试验结果

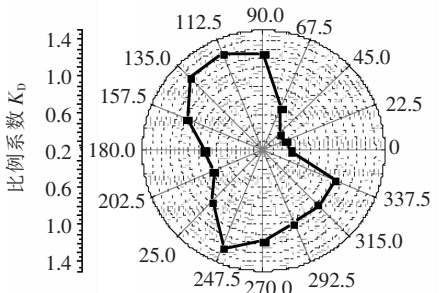
采用电子压力扫描阀测量刚性冷却塔通风筒

表面平均及脉动压力分布,在风偏角 360°范围内以 22.5°增量逐一测量.按冷却塔设计规划位置要求,在模拟自然风场和均匀流场中进行一期和二期冷却塔 18 种不同组合时通风筒表面平均压力和脉动压力分析研究.试验中考虑通风筒表面粗糙度、雷诺数效应及周边建筑物的影响.

表 1 给出了多塔组合最不利来流工况下整体阻力系数均值、极值和多塔比例系数数值.双开孔下多塔比例系数极值出现在 I 期双塔 + II 期双塔组合之 4#塔(详见图 1).可以看出最大阻力系数均值 0.536 出现在 247.5°来流角度处,与单塔等效荷载系数最大比值 $K_D = 1.333$ 出现在 247.5°来流角度,单开孔最大等效比例系数 K_m 为 1.302,双开孔最大等效比例系数 K_m 为 1.327,这些数据作为数值分析的参数输入.



(a)阻力系数特征参数随来流角度变化值



(b)多塔比例系数随来流角度变化值

图 1 冷却塔双开孔阻力系数与比例系数

表 1 冷却塔测压试验多塔组合最不利来流工况

工况编号	工况说明	C_D	$C_{D,max}$	K_D	来流角度/(°)
1	I 期双塔之 2#塔(单开孔)	0.432	0.536	1.105	202.5
2	(I 期双塔 + II 期 3#塔)之 1#塔(单开孔)	0.449	0.584	1.204	180
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	(I 期双塔 + II 期双塔)之 3#塔(单开孔)	0.500	0.620	1.277	112.5
8	(I 期双塔 + II 期双塔)之 4#塔(单开孔)	0.519	0.635	1.308	90
9	I 期双塔之 2#塔(双开孔)	0.422	0.572	1.179	202.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	(I 期双塔 + II 期双塔)之 3#塔(双开孔)	0.499	0.617	1.271	112.5
16	(I 期双塔 + II 期双塔)之 4#塔(双开孔)	0.536	0.647	1.333	247.5

1.3 气弹测振试验结果

将测振试验结果与对应来流角度测压所得的多塔比例系数进行组合分析,B类流场规范规定风振系数取值为1.90,单塔最大多塔比例系数值为1.308,将测振所得工况结果与规范值进行比较详见表2.可以看出最大组合值为(Ⅰ期双塔+Ⅱ期双塔)112.5度来流之3#塔B类流场,其值为2.426,小于按规范值和最大多塔比例系数组合结果.表3给出了工况3下的测点位移响应特

表 2 测压、测振结果组合对比分析

工况	冷却塔布置	来流角度/(°)	K_D	β	$K_D \times \beta$	$K_{D, \max} \times \beta_B$
1	Ⅰ期双塔之2#塔	135	1.105	1.97	2.177	2.474
2	(Ⅰ期双塔+Ⅱ期3塔)之2#塔	90	1.036	2.08	2.155	2.474
3	(Ⅰ期双塔+Ⅱ期双塔)之3#塔	112.5	1.277	1.90	2.426	2.474
4	(Ⅰ期双塔+Ⅱ期双塔)之3#塔	157.5	1.088	2.02	2.198	2.474
5	(Ⅰ期双塔+Ⅱ期双塔)之4#塔	90	1.308	1.81	2.367	2.474

表 3 (Ⅰ期双塔+Ⅱ期3#塔)中2#塔最不利工况控制测点响应特征值(试验风速6 m/s)

断面编号	测点编号	位移均值/cm	位移根方差/cm	位移极值/cm	风振系数
6	1	13.694	3.098	26.086	1.90
5	1	21.612	5.816	44.876	2.08
5	3	14.838	3.694	29.615	2.00
5	7	12.378	3.466	26.243	2.12
4	1	10.668	3.443	24.440	2.29

2 稳定性分析

2.1 局部稳定性分析

由于冷却塔是一种很薄的壳体结构,其稳定性是设计必须考虑的因素,按文献[8],冷却塔的局部稳定性按下式验算:

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

$$\sigma_{cr1}=\frac{0.985E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}}\left(\frac{h}{r_0}\right)^{\frac{4}{3}}K_1;$$
$$\sigma_{cr2}=\frac{0.612E}{\sqrt[4]{(1-\nu^2)^3}}\left(\frac{h}{r_0}\right)^{\frac{4}{3}}K_2. \tag{2}$$

式中:σ_{cr1}为环向临界压力;σ_{cr2}为子午向临界压力;σ₁、σ₂分别为不同荷载工况组合下的环向和子午向压应力;h、r₀分别为塔筒喉部壁厚与半径;E、ν分别为壳体混凝土的弹性模量和泊松比;K₁、K₂根据塔筒几何参数,可插值得到,该工程取K₁=0.150 25,K₂=1.279 69;K_B为局部稳定性安全因子,规范要求K_B需大于5.0.

在自重和风载的共同作用下,对于常规冷却塔进行分析得出最小的局部稳定性安全因子

征值,比较可知主要的风振位移全部出现在冷却塔的上半部分,又以冷却塔喉部附近测点风振位移响应起控制作用.沿冷却塔圆周向多个测点中,迎风向测点风振位移最大,分离点附近(与来流135°夹角)测点风振位移次之.多个控制测点平均位移响应均值为14.64 cm,位移根方差均值为3.90 cm,极值位移均值为30.25 cm,平均风振系数为2.08.各试验工况均未出现涡振及局部静风稳定性问题.

K_B=7.96,发生在塔筒的喉部区域,而对于开孔边缘的局部稳定性分析,不同的来流风载工况组合下的值是不同的,从图2中可以发现60°来流时为最不利吹风工况角,此时局部稳定性安全因子K_B=4.27,低于规范规定的最小值5.0.所以必须采取加固方案.

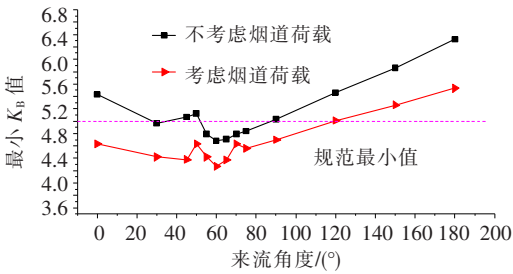


图 2 不同来流风载组合工况下的孔洞周边 K_{B,min} 值

采取的加固方案为对边长约24 m×24 m的正方形区域行进加厚(见图3),加固区域是由孔洞边缘应力变化的影响范围确定,壳体厚度从原来的0.28 m增加到0.50 m;加固后在最不利来流工况下的孔洞周边的最小局部稳定性安全因子K_B值为35.21,满足规范要求.施工与运营状态的稳定性分析都是基于这种加固方案上的.

2.2 施工状态承载力验算

冷却塔在施工过程中由于其混凝土强度随时

间逐步增长,新浇筑的混凝土强度较弱,因此施工过程中风载及施工荷载作用下的冷却塔极限承载力需要进行研究,以控制施工进度.表4为不同施工高程在自重作用下的临界荷载;图4为不同施工高程在自重作用下的屈曲模态;表5为不同施工高程在自重及按风洞试验风载作用下的临界风载(考虑内吸力);图5为不同施工高程在自重及按风洞试验风载作用下的屈曲模态(考虑内吸力);屈曲荷载组合为 $G + \lambda W$.可以看出,随着施工高度的上升,临界风速逐渐降低,当施工模板层数达到100时,其临界风速为119.41 m/s,远大于当地50 a一遇年最大风速(24 m/s).

2.3 整体稳定性分析

根据工业循环水冷却设计规范,冷却塔整体临界风压可由下式估计:

$$q_{cr} = CE_c \left(\frac{h}{r_0} \right)^{2.3} \tag{3}$$

由式(3)计算得到临界风速为139.48 m/s.

图6给出了自重和静风(包括按规范风压和按风洞试验风压及有无内吸力的情况)作用下冷却塔屈曲模态,屈曲荷载组合 $G + \lambda W, \lambda(G + W)$,其相应工况下24 m高度临界风压及风速见表6.

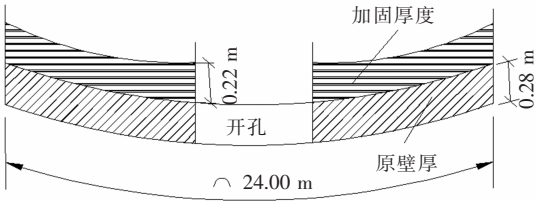


图3 开孔加固方案

表4 不同施工高程在自重作用下的临界荷载

施工模板数	屈曲系数
10	55.849
30	23.780
50	16.819
70	14.440
90	12.606
100	11.294

表5 不同施工高程在自重及按风洞试验风载作用下的临界风载

施工模板数	屈曲系数	临界风速/(m·s ⁻¹)
10	55.849	406.12
30	23.78	142.85
50	16.819	121.53
70	14.44	131.42
90	12.606	128.93
100	11.294	119.41

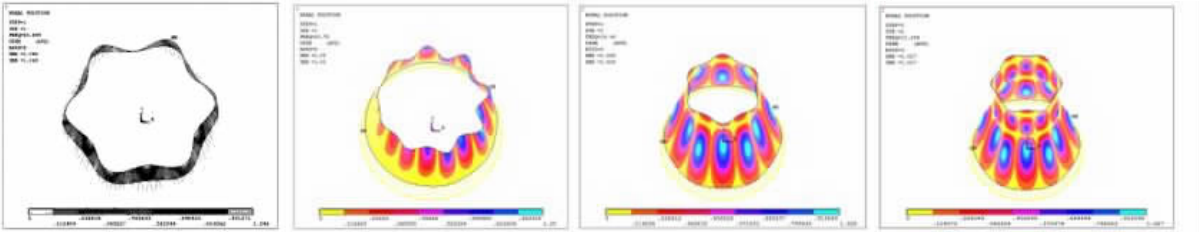


图4 不同施工高程在自重作用下的屈曲模态

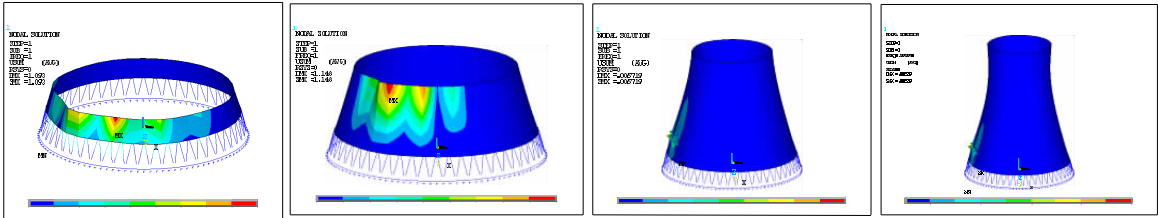


图5 不同施工高程在自重及按风洞试验风载作用下的屈曲模态(考虑内吸力)

表6 各工况冷却塔屈曲系数及临界风速

工况编号	荷载组合	风压类型	内吸力	屈曲系数	临界风速/(m·s ⁻¹)
1	$G + \lambda W$	按规范风压	无内吸力	28.64	128.426
2	$G + \lambda W$	按规范风压	有内吸力	19.01	104.652
3	$G + \lambda W$	按风洞试验风压	无内吸力	40.66	153.043
4	$G + \lambda W$	按风洞试验风压	有内吸力	25.67	121.608
5	$\lambda(G + W)$	按规范风压	无内吸力	12.36	84.381
6	$\lambda(G + W)$	按规范风压	有内吸力	8.28	69.074
7	$\lambda(G + W)$	按风洞试验风压	无内吸力	14.84	92.467
8	$\lambda(G + W)$	按风洞试验风压	有内吸力	11.96	82.991

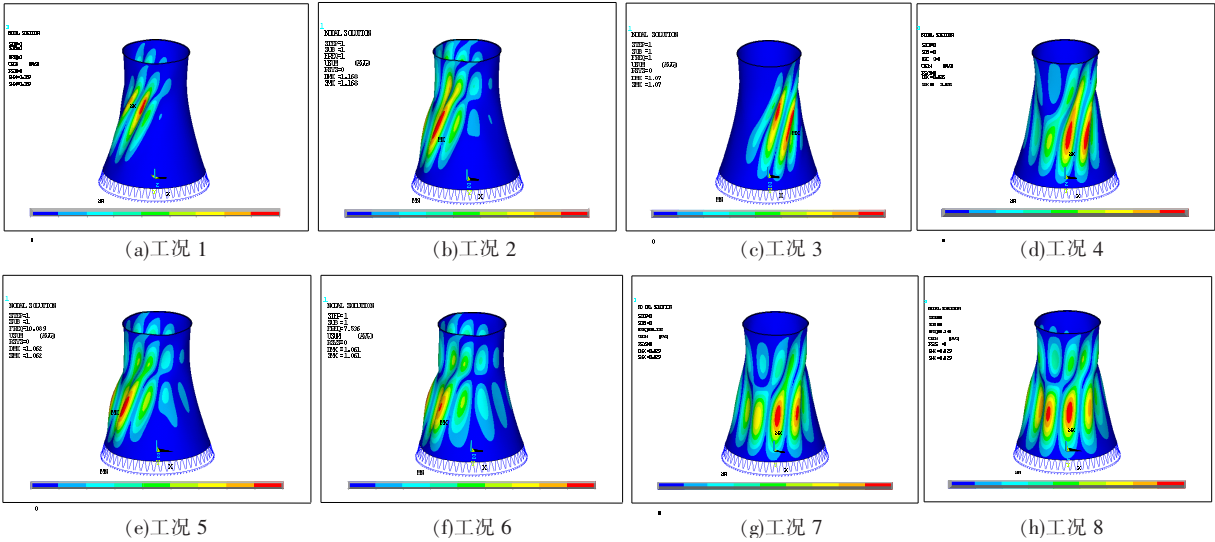


图 6 各工况下冷却塔整体屈曲模式

由表 6 可知,由于有内吸力的存在,冷却塔的临界风速均有 30% 左右的下降,与前面计算的冷却塔整体极限承载能力计算情况相差不大。

3 结 论

- 1) 通过冷却塔群的刚体测压和气弹测振模型风洞试验及数值分析表明,冷却塔群最不利组合工况出现在(Ⅰ期双塔+Ⅱ期双塔)组合之 3# 塔的 112.5° 来流角度,对应的多塔比例系数为 1.277,风振系数为 1.90。
- 2) 局部稳定性分析表明,60° 来流下冷却塔局部稳定性安全因子达到最小值 4.27,不满足工业循环水冷却设计规范的要求,有必要采取有效的加固措施。
- 3) 施工状态承载力验算表明,随着施工高度的上升,临界风速逐渐降低,当施工模板层数达到 100 时,其临界风速为 119.41 m/s,远大于当地 50 a—遇年最大风速(24 m/s)；
- 4) 整体稳定性分析表明,最不利失稳临界风速为按规范风压加载时整体屈曲失稳风速 69.074 m/s,大于设计检验风速 ($\gamma G \times 24.4 \text{ m/s} \leq 49.0 \text{ m/s}$),当考虑内吸力的影响使得失稳临界风速有 30% 左右的下降幅度。通过对孔口附近局部加厚处理,可消除孔口附近的局部失稳,并提高冷却塔整体稳定性。通过研究排烟冷却塔局部稳定性,提出相应的加固方案,对施工状态极限承载力和整体稳定性的分析结果具有一定的参考价值,指出相应的规范在这些方面有待商榷和补充规定,需要进一步展开相关研究。

参考文献:

of Structural Division, 1980, 106(ST3):623-641.

[2] 李鹏飞,赵林,葛耀君. 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):60-67.

[3] 张彬乾,李建英,阎文成. 超大型双曲冷却塔双塔干扰的风荷载特性研究[J]. 流体力学试验与测量, 2003,17 (特刊):93-97.

[4] 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 (396):301-304.

[5] 赵林,葛耀君,许林汕,等. 等效静风荷载下超大型冷却塔受力性能分析[J]. 工程力学, 2008, 25(7):79-86.

[6] 柯世堂,赵林,葛耀君. 大型双曲冷却塔气弹模型风洞试验和响应特性[J]. 建筑结构学报,2010, 31 (2):61-68.

[7] 赵林,宋锦忠,高玲等. 冷却塔群塔刚体测压试验研究[J]. 试验流体力学与测量, 2007,21(2):56-62.

[8] GB/T 50102—2003. 工业循环水冷却设计规范[S]. 北京:中华人民共和国建设部,2003.

[9] 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] 王铭,黄志龙. 烟塔合一自然通风冷却塔的有限元分析[J]. 力学与实践,2006,26(68):2-4.

[11] KE Shitang, GE Yaojun, ZHAO Lin. Evaluation of strength and local buckling for cooling tower with gas flue[C]//Proceedings of the International Symposium on Computational Structural Engineering. Shanghai: Springer,2009:545-551.

[12] 柯世堂,赵林,葛耀君. 超大型冷却塔结构风振与地震作用影响比较[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(10):1635-1641.

(编辑 魏希柱)

[1] ARMITT J. Wind loading on cooling towers[J]. Journal