

文章编号:1673-2049(2009)02-0052-05

超大型排烟冷却塔风压分布及双孔道位置优化

柯世堂¹, 赵林¹, 葛耀君¹, 高玲², 赵煌³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 华东电力设计院, 上海 200063;
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了研究烟塔合一技术中开孔孔洞的形状和相对位置对塔的稳定性和压力分布的影响,以采用这一技术的中国最高、最大的某电厂超大型烟塔合一冷却塔为研究对象,通过风洞试验对比了该塔筒表面开孔的排烟冷却塔和常规无孔冷却塔在开孔处的风压分布和塔筒整体阻力系数,得到了排烟冷却塔在烟道开孔周围塔筒表面的局部风压分布特征;通过改变两孔道间的夹角来考虑两孔道间的相对位置对冷却塔整体受力的影响;对比了开孔冷却塔与未开孔冷却塔的受力性能。结果表明:两孔道相对位置的变化对冷却塔整体阻力系数影响很大;开孔后冷却塔整体阻力系数均大于未开孔时的阻力系数。

关键词:排烟冷却塔;风压分布;风洞试验;阻力系数;压力系数

中图分类号:TU991.42 **文献标志码:**A

Wind Pressure Distribution and Double Holes Position Optimization for Super Large-scale Cooling Towers with Flue Gas

KE Shi-tang¹, ZHAO Lin¹, GE Yao-jun¹, GAO Ling², ZHAO Yu³

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. East China Electric Power Design Institute, Shanghai 200063, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to research the influence of the form of hole and holes' relative position on stability and pressure distribution of natural draft cooling tower (NDCT) with flue gas injection, taking China's highest and biggest super large-scale cooling tower with flue gas injection which used this technology as study object, the wind pressure distribution and whole drag coefficient were compared around open hole flue about cooling tower with flue gas and without flue gas in wind-tunnel test, then the characteristics of local wind pressure distribution around the flue gas of cooling tower were gained. Finally, the whole strength's influence caused by changing angle of two holes' relative position was considered, and the strength performance of a lone cooling tower without the hole was compared with. The results show that the changing of two holes' relative position has great influence on whole drag coefficient; the whole drag coefficient of cooling tower with open hole is bigger than that of cooling tower without open hole.

Key words: cooling tower with flue gas; wind pressure distribution; wind-tunnel test; drag coefficient; pressure coefficient

0 引言

烟塔合一技术即取消火电厂中的烟囱,将锅炉除尘脱硫后排出的烟气,经自然通风冷却塔排放到大气中。从 20 世纪 70 年代开始,此项技术首先在德国使用,现已被多座大型火电厂采用^[1]。近年来,烟塔合一技术在中国电力工程设计中引起了广泛的关注。采用烟塔合一技术的主要优点:一是有利于提高环境质量;二是满足城市构筑物限高以及合理供热半径的要求。采用烟塔合一技术时,需在冷却塔壳体上开设孔洞,开孔会引起壳体稳定性降低,孔的周边要进行结构补强,补强的措施一般包括:增加塔壁厚度、增设封闭肋梁、加强肋梁强度、洞口周边结构加固。其目的是减小开口处塔的临界自然频率、塔壳稳定的弯曲安全性、塔在各种荷载作用下的变形特性的影响。但是,即使经过结构补强,塔壳开口的不对称性和初始的非对称地基条件还是会导致塔壳弯曲,为此需要在风洞试验中分析和对比冷却塔开孔前后、不同的开孔方位、开孔位置和开孔形状条件下,冷却塔整体阻力系数及孔洞周围表面风压分布,评价其对冷却塔体安全性的影响和需要采取的加强措施。

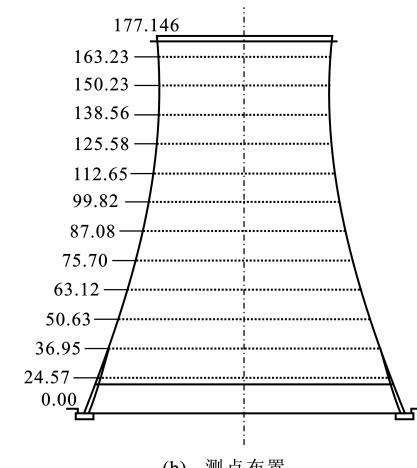
大型冷却塔作为一种空间薄壁高耸结构,风荷载作用下的安全性历来受到工程界的高度重视^[2-4]。近几年来,中国针对冷却塔抗风问题已展开了较为广泛的研究^[5-9],风洞试验为其中的有效手段之一,其主要采用刚体模型表面同步测压和基底高频天平测力的试验方法,北京大学的武际可和魏庆鼎较早地对冷却塔的风致振动试验进行了相关研究,同济大学课题组针对传统气弹模型设计的不足提出了基于等效梁格法的冷却塔气弹模型设计方法,而后对超大型冷却塔的风荷载特性和风致干扰效应在风洞试验中进行了比较全面的研究,浙江大学的孙炳楠采用计算流体力学(CFD)方法对冷却塔进行了单塔和双塔情况下的风荷载模拟。这些已有研究大多是针对未开孔常规冷却塔的,而随着国民经济的发展,出于环保考虑,开孔排烟冷却塔已逐渐成为电力部门未来的研究方向,但相关的研究贮备明显不足,鉴于这种现状,针对开孔产生的问题,以某超大型排烟冷却塔风洞试验为背景,对比排烟冷却塔和常规冷却塔在烟道周围塔筒表面的风压分布,找出排烟冷却塔的风压分布特征并优化烟道开孔位置。

1 试验概况

排烟冷却塔测压试验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。该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,试验段尺寸为 15 m 宽、2 m 高、14 m 长。按 1 : 200 缩尺比制作冷却塔通风筒测压模型及其周边补偿模型,模型采用有机玻璃板制成,其具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,并且不出现明显的振动现象(图 1)。在冷却塔刚体测压模型上沿环向与子午向布置 36×12 个外表面压力测点,每个断面的测点布置及来流风向角见图 2,逆时针转动定义为风向角正方向,开孔断面半径 $R=56.62$ mm。信号采样频率为 312.5 Hz,采样时间为 19.2 s,测点采样样本总量为 6 000 个数据;在 360°偏角范围内以 22.5°为增量逐一测量。



(a) 测压模型



(b) 测点布置

图 1 冷却塔测压模型及测点布置(单位:m)

Fig. 1 Pressure-measured Model and Measuring Point Arrangement for Cooling Towers (Unit:m)

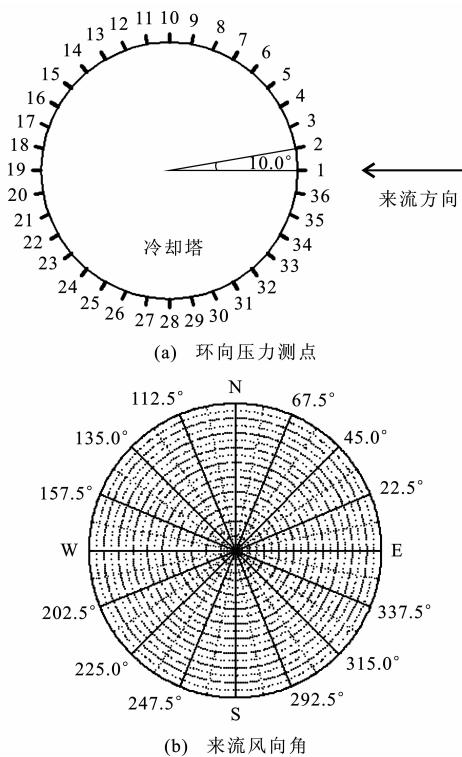


图 2 冷却塔环向测点编号及来流风向角

Fig. 2 Numbers of Measuring Points and Wind Angles for Cooling Tower

冷却塔表面测点 i 处的压力系数 C_{pi} 为

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_{+\infty}}{P_0 - P_{+\infty}} \quad (1)$$

式中: P_i 为作用在测点 i 处的压力; P_0 、 $P_{+\infty}$ 分别为试验时参考高度处的总压和静压。风压符号规定为: 表面压力相对冷却塔塔壁向内为正, 向外为负。

由冷却塔外表面测点得到的顺风向整体阻力系数积分式定义为

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi} A_i \cos \theta_i}{A_T} \quad (2)$$

式中: C_D 为结构顺风向整体阻力系数, 方向与来流方向一致时定义为正; A_i 为第 i 测点压力覆盖面积; θ_i 为第 i 测点压力与风轴方向夹角; A_T 为整体结构向风轴方向的投影面积。

2 未开孔冷却塔的受力分析

考虑到独塔冷却塔的对称性, 仅采用了 1 个角度的吹风试验工况。计算得到的阻力系数均值为 0.372, 阻力系数均方差为 0.027, 阻力系数极大值为 0.485。独塔冷却塔表面气动力荷载以阻力为主, 定义阻力系数极大值 0.485 为紊流场独塔等效荷载系数, 用以与单开孔和双开孔测压结果进行

对比。

从图 1(b)可以看出, 开孔的位置在测压点布置的第 2 层上下。为了考虑开孔位置对塔筒表面压力分布的影响, 图 3 中给出了未开孔冷却塔塔底 3 层断面平均压力系数的分布以做对比。

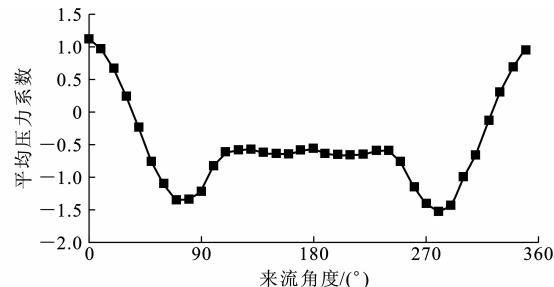


图 3 未开孔冷却塔塔底断面平均压力系数

Fig. 3 Average Pressure Coefficient of Bottom Section for Cooling Tower Without Open Hole

3 单开孔冷却塔试验结果及分析

对于常规不开孔冷却塔单塔的表面测压试验, 由于结构本身存在对称性, 在不同来流角度下压力分布和顺风向整体阻力系数分布相同, 图 4 中给出了不同来流角度下排烟冷却塔和常规冷却塔的整体阻力系数的特征值。从图 4 可以明显地看出: 对于常规冷却塔, 其阻力系数为 0.485; 对于排烟冷却塔, 在 45° 左右时阻力系数达到最大值 0.542, 为常规冷却塔的整体阻力系数略低。分析其原因: 在迎风面时, 由于烟道的干扰效应加强, 使得冷却塔整体受到的阻力增大, 特别是在 45° 左右负压较大的区域影响更明显, 当烟道处于背风面风压比较稳定的区域时, 对整体阻力系数的影响极小, 与常规冷却塔的数值相差甚小。

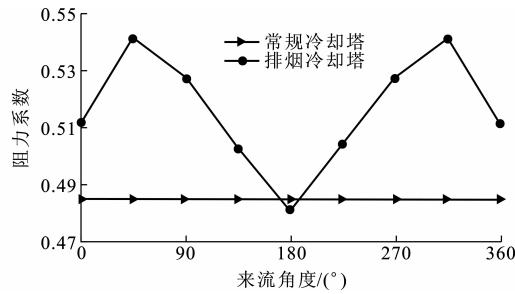


图 4 常规冷却塔和排烟冷却塔的阻力系数

Fig. 4 Drag Coefficients of Common Cooling Towers and Cooling Tower with Flue Gas

为了研究排烟冷却塔的烟道对周围的风压分布产生的影响, 图 5 中给出了塔底 3 层断面压力系数

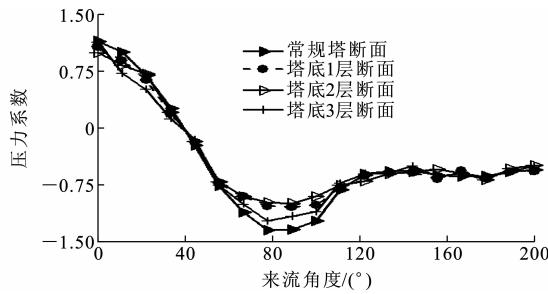


图 5 常规冷却塔和排烟冷却塔的断面压力系数

Fig. 5 Section Pressure Coefficients of Common Cooling Towers and Cooling Tower with Flue Gas

分布和常规冷却塔的分布对比。从图 5 可以看出，在负压最大区域，排烟冷却塔的压力系数峰值由常规冷却塔的 -1.37 减小到 -0.98，而在背风面风压比较稳定的区域所受影响就很小。从式(2)可知，整体阻力系数是通过对塔筒表面各个测点的压力系数积分得到的，而排烟冷却塔的最大负压区域的幅值减小就必然引起塔筒整体所受阻力增大。这一现象也更好地验证了上述关于整体阻力系数的结论。

4 双开孔冷却塔的受力分析

4.1 整体阻力系数的对比

调整两孔道间的相对位置，分别从夹角 20° 到 80° 每隔 10° 为 1 个工况，从偏角 360° 方向以 45° 增量逐一测量。图 6 中给出了两孔道相对位置改变时的冷却塔整体阻力系数的特征值。从图 6 可以明显地看出，两孔道间相对位置的变化对冷却塔整体阻力系数的影响很大，并且变化的幅值也比较大，对于不同的开孔工况，其达到最大阻力系数的来流角度是不同的。

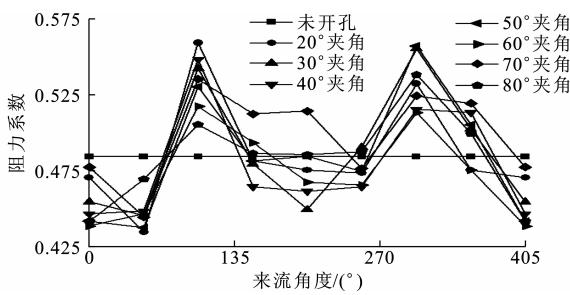


图 6 不同开孔工况下的冷却塔整体阻力系数

Fig. 6 Whole Drag Coefficients for Cooling Tower Under Different Open Hole Conditions

为了更清楚地反映两孔道间的相对位置对整体阻力系数的影响，图 7 中给出了不同开孔工况下冷却塔的整体极值阻力系数和未开孔冷却塔的整体极值阻力系数。从图 7 可以看出：当采取烟塔合一技

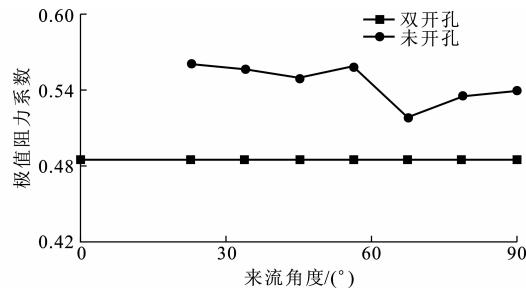


图 7 不同开孔工况下的冷却塔整体极值阻力系数

Fig. 7 Whole Extreme Drag Coefficients for Cooling Tower Under Different Open Hole Conditions

术在塔筒上开孔后，整个塔筒所受的阻力会明显增大；随着孔道间的相对位置改变，其对冷却塔整体受力波动也比较大，其中最大可以达到未开孔时的 1.15 倍，最小为 1.06 倍，相差还是比较大的，可见冷却塔在开孔时对于孔道相对位置的优化是必要的。对于该工程，其两孔道间的相对位置在 60° 时冷却塔整体所受阻力最小。

4.2 塔筒压力系数分布的对比

由于烟塔合一冷却塔在塔筒开孔架设烟道，对其表面的风压分布会产生一定的影响，而且随着孔道间相对位置的改变，其影响也会随着变化。通过风洞测压试验可以分析孔道相对位置的改变对其产生的影响。图 8 中给出了不同开孔工况下塔底 3 层断面的平均风压系数分布的对比。

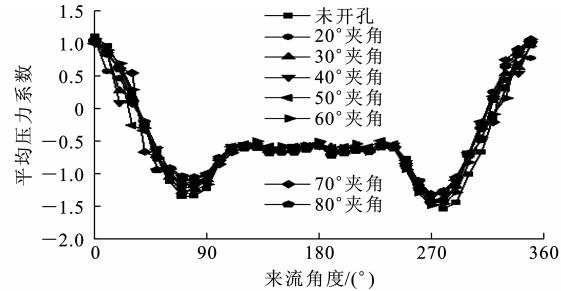


图 8 不同开孔工况下的冷却塔塔底断面平均压力系数

Fig. 8 Average Pressure Coefficients of Bottom Section for Cooling Tower Under Different Open Hole Conditions

从图 8 可以看出，当采用烟塔合一技术对冷却塔进行开孔后，在表面负压最大区域其峰值变小，而在背风面风压比较稳定的区域所受影响就很小；而且当两孔道间的相对位置在 60° 时其最大负压区的数值变化最小。分析其原因：从式(2)可知，整体阻力系数是通过对塔筒表面各个测点的压力系数积分得到的，而开孔后最大负压区域的幅值减小就必然引起塔筒整体所受阻力增大，而当两孔道间的相对位置在 60° 时其最大负压区域幅值变化最小，使得

此时塔筒整体所受阻力最小。

5 结语

(1) 排烟冷却塔的风压分布在负压最大区域其峰值由常规冷却塔的 -1.37 减小到 -0.98, 而在背风面风压比较稳定的区域所受影响很小。

(2) 两孔道间相对位置的变化对冷却塔整体阻力系数的影响很大, 而且对于不同的开孔工况, 其达到最大阻力系数的吹风来流角度是不同的。

(3) 开孔后冷却塔整体阻力系数均大于未开孔时的整体阻力系数, 最大可以达到未开孔时的 1.15 倍, 最小的为 1.06 倍, 且两孔道间的相对位置在 60° 时冷却塔整体所受阻力最小。

(4) 开孔后压力系数在表面负压最大区域其峰值均变小, 而在背风面风压比较稳定的区域所受影响很小; 并且当两孔道间的相对位置在 60° 时其最大负压区域幅值减小的最少, 由阻力系数的定义可知此时所受阻力最小。

(5) 排烟冷却塔和常规冷却塔在很多方面存在着不同的特点, 而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:

References:

- [1] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of Adjacent Buildings on Wind Effects on Cooling Towers[J]. Engineering Structures, 1998, 20(10): 874-880.
- [2] VILADKAR M N, KARISIDDAPPA C R, BHARGAVA P, et al. Static Soil-structure Interaction Response of Hyperbolic Cooling Towers to Symmetrical Wind Loads[J]. Engineering Structures, 2006, 28(9): 1236-1251.
- [3] 阎文成, 张彬乾, 李建英. 超大型双曲冷却塔风荷载特性风洞试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(增): 85-89.
- YAN Wen-cheng, ZHANG Bin-qian, LI Jian-ying. Investigation on Characteristics of Wind Load for Super Large Hyperbolic Cooling Tower in Wind Tunnel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(S): 85-89.
- [4] 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]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(增): 93-97.
- ZHANG Bin-qian, LI Jian-ying, YAN Wen-cheng. Investigation on Interrelation of Wind Load for Double Super Large Hyperbolic Cooling Tower[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(S): 93-97.
- [5] 赵林, 葛耀君, 曹丰产. 双曲薄壳冷却塔气弹模型的等效梁格方法和实验研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(1): 31-37.
- ZHAO Lin, GE Yao-jun, CAO Feng-chan. Equivalent Beam-net Design Theory of Aero-elastic Model About Hyperbolic Thin-shell Cooling Towers and Its Experimental Investigation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(1): 31-37.
- [6] 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1): 301-304.
- LIU Tian-cheng, ZHAO Lin, DING Zhi-bin. Test Research of Flow Feature for Hyperbolic Circular Section Cooling Tower with Different Superfacial Roughness [J]. Industrial Construction, 2006, 36(S1): 301-304.
- [7] 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): 60-67.
- LI Peng-fei, ZHAO Lin, GE Yao-jun, et al. Wind Tunnel Investigation on Wind Load Characteristics for Super Large Cooling Towers[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 60-67.
- [8] 赵林, 李鹏飞, 葛耀君. 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.
- ZHAO Lin, LI Peng-fei, GE Yao-jun. Numerical Investigation on Performance of Super Large Cooling Towers Under Equivalent Static Wind Load[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 79-86.
- [9] 刘若斐, 沈国辉, 孙炳楠. 大型冷却塔风荷载的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2006, 23(增1): 177-183.
- LIU Ruo-fei, SHEN Guo-hui, SUN Bing-nan. Numerical Simulation Study of Wind Load on Large Hyperbolic Cooling Tower[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S1): 177-183.