

文章编号:0253-4339(2019)02-0100-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.02.100

大型自然通风冷却塔热力性能研究

武健¹ 解岳¹ 胡三季²

(1 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西安 710055; 2 西安热工研究院有限公司 西安 710032)

摘要 为探求大型自然通风冷却塔热力性能及优化方向,本文对某 1 000 MW 燃煤机组配用的淋水面积为 12 000 m² 的大型自然通风冷却塔热力性能进行实验研究,利用气水比和冷却数拟合该塔的热力性能方程式并得到测试塔冷却数的修正系数,给出该塔内实测风温的分布,用不同阻力系数公式计算出塔水温。结果表明:填料等高布置的模拟冷却塔与填料不等高布置的工业塔的修正系数为 1.047~1.081;填料不等高布置的工业塔塔内风温均方根误差为 0.56~0.67 °C,其值小于填料等高布置的相应冷却塔,故填料的不等高布置能强化冷却塔的冷却性能;进塔水量大时,可采用阻力经验系数公式快速计算出塔水温,为大型自然通风冷却塔的设计与改造提供参考。

关键词 热力性能;现场测试;自然通风冷却塔;风温分布;出塔水温

中图分类号:TM621; TQ051.5

文献标识码:A

Study on Thermal Performance of Large Natural Draft Cooling Tower

Wu Jian¹ Xie Yue¹ Hu Sanji²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an, 710032, China)

Abstract To explore the thermal performance and optimization direction of a large natural draft cooling tower, the thermal performance of a large natural draft cooling tower with a watering area of 12 000 m² was tested for a 1 000 MW coal-fired unit. The gas-water ratio and cooling number were used to fit the results, and thermal performance equation and correction coefficient of the cooling test tower were obtained. The distribution of the measured wind temperature in the tower was given. The water temperature of the tower was calculated using different resistance coefficient formulas. The results showed that the correction coefficient of industrial towers with equal heights of packing and those with unequal packings was 1.047-1.081. The root mean square error of the air temperature in the industrial towers with unequal heights of packings was 0.56-0.67 °C, which was less than the corresponding cooling tower with equal heights of packing. Thus, the cooling performance of the cooling tower could be enhanced by the unequal arrangement of the packing. The water temperature of the tower could be quickly calculated by using the empirical formula of resistance under the condition that the amount of water entering the tower was large, which provides a reference for the design and modification of large natural draft cooling towers.

Keywords thermal performance; field test; natural draft cooling tower; air temperature distribution; outlet water temperature

自然通风冷却塔是火力发电厂中重要的冷端设备,其冷却性能的优劣影响燃煤机组的经济性^[1-3]。火电厂汽轮机的末端排气在凝结成水的过程中会产生大量的热,自然通风冷却塔可以通过接触传热、蒸发传热将这部分热量排到大气中^[1]。随着火力发电厂机组功率的不断增大,需要更大淋水面积的自然通风冷却塔,因此对大型自然通风冷却塔的热力性能进行测试研究十分必要。

相关学者对冷却塔的热力性能进行了大量研究,N. Williamson 等^[4]建立二维模型分析了自然通风冷却塔的性能;R. Al-Waked 等^[5-6]利用三维数值模型

研究了冷却塔塔内的传热传质情况,分析了不同工况对冷却塔热力性能的影响。赵元宾等^[7-8]利用计算机对冷却塔内气水参数的分布及换热规律进行数值计算,分析冷却塔的冷却效果。胡三季等^[9]在实验室内对冷却塔的塔心部件的热力及阻力性能进行了实验研究。但由于实验室的模拟塔与实际电厂中的工业冷却塔在配水方式、塔内参数等条件不同,当实验结果应用于工业塔时,需要对工业塔进行进一步实验验证,此类研究目前较少。

本文对某电厂一座淋水面积为 12 000 m² 的大型自然通风冷却塔的热力性能进行实验研究,得出该

工业塔的热力性能方程式,得到模拟实验塔的修正系数,给出该塔的风温分布,分析了采用通风阻力经验系数公式计算出塔水温的优势,可为大型自然通风冷却塔的设计与改造提供参考。

1 冷却塔的设计条件

本实验对某大型工业逆流式自然通风冷却塔(以下简称工业塔)的热力性能进行测试。该电厂新建 1 000 MW 机组配用一座 12 000 m² 逆流式自然通风冷却塔,塔高 167.16 m,淋水面积 12 000 m²,顶部直径 80.64 m,喉部直径 76.79 m,进风高度 11.50 m,进风口直径 125.059 m,填料底层直径 124.548 m。淋水填料采用“双斜波”形,材质为改性 PVC,填料在塔内采用不等高布置,高度按 1、1.25、1.5 m 由塔中心向外阶梯型布置。该塔的设计参数为:湿球温度 26.6 °C,干球温度 29.8 °C,相对湿度 77%,大气压强 100.17 kPa,冷却水量 103 680 m³/h,进塔水温 42.68 °C,出塔水温 32.7 °C。

2 测试参数介绍

2.1 测试项目

实验测试项目有:环境干、湿球温度(与进塔干、湿球温度合用),大气风速风向、大气压力、进塔水温度、出塔水温度、进塔水体积流量、出塔空气温度。

2.2 实验测点的安装及测试方法

距该塔 20 m 处设置两个气象观测点,测点高度为 7 m。大气干、湿球温度采用电动通风干湿表测量,仪表测试范围为 0~80 °C,分辨率为 0.01 °C,精度为 A 级;大气压力采用 DYM3 型空盒式大气压力表测量,仪表放在通风遮阳处,仪表测试范围为 80~106.4 kPa,分辨率为 0.1 kPa;环境风速采用 EY-11B 型便携式数字风速表监测;进塔水温通过在中央竖井内放置 3 支 Pt100 型铂电阻温度探头测量;出塔水温通过在回水槽内放置 6 支 Pt100 型铂电阻温度探头测量;进塔水体积流量通过在进水母管上用 FLC-2012 型超声波流量计测量,测量精度为±1.5%;塔内风温通过在塔内的 4 条主水槽上部设置 24 个测点,用 Pt100 型铂电阻温度探头测量,仪表测试范围为 0~80 °C,分辨率为 0.01 °C,精度为 A 级。塔内风速通过在塔内的 4 条主水槽上部设置 72 个测点,用 MSF-1 型电子微风表测量。上述所有 Pt100 型铂电阻温度计均接至分散式集中控制系统,由计算机连续采样。

2.3 测试工况

实验包括:两台循环水泵并联运行全塔配水机组

满负荷运行,三台循环泵并联运行全塔配水机组满负荷运行。

3 实验结果与分析

3.1 工业塔实测热力性能

3.1.1 工业塔的冷却能力

通过冷却水量对比法计算出该工业塔的冷却能力。根据《工业冷却塔测试规程》规定,当塔的实测冷却能力值达到 95% 以上时,应视为达到设计要求;当达到 105% 以上时,应视为超过设计要求^[10]。对三泵并联全塔配水的 59 组工况进行冷却能力计算,其中 47 组数据达到设计要求,12 组数据超出设计要求,该塔的平均冷却能力为 101.1%。因此,该塔达到了设计要求。

3.1.2 实验塔的热力性能方程式

实验塔为钢结构,实验段截面为 1.0 m×1.0 m,全塔高 13.3 m。塔内采用压力配水,配水装置由 5 根 DN50 钢管组成,每根管底部开一排直径为 7 mm 的孔,配水管下面由 5 条扁铁组成溅水板。配水装置上部装有除水器。实验塔尾部冷却高度为 4.8 m。塔体两面进风,进风口设在集水池上部。用该塔对双斜波淋水填料进行热力性能测试,全塔平均淋水填料高度为 1.25 m,对测试数据采用最小二乘法拟合,得到热力性能方程式:

$$N = 2.15\lambda^{0.65} \quad (1)$$

式中: N 为冷却数; λ 为气水比。

3.1.3 工业塔的热力性能方程式

该工业塔采用双斜波淋水填料,填料在塔内采用不等高布置,高度按 1、1.25、1.5 m 由塔中心向外阶梯型布置,现场对冷却塔进行测试得到数据,依据测试数据计算出 1 机 2 泵、1 机 3 泵全塔配水各工况点的气水比和冷却数,利用最小二乘法对各测试工况点计算的气水比和冷却数数据进行拟合,得到热力性能方程式:

$$N = 2.26\lambda^{0.61} \quad (2)$$

文献[11]中指出模拟实验塔冷却数应用于实际工业塔时,需要考虑冷却塔中气流的不均匀性,通过模拟实验塔得到的冷却数需要乘一个不均匀系数 K_v ,对于自然通风逆流式冷却塔 $K_v = 0.9$ 。胡三季等^[12]对实验塔和实际工业塔的不均匀系数进行了研究,得出在自然通风冷却塔热力性能计算采用模拟实验塔的冷却数结果时,若该塔为压力配水时,冷却数取模拟实验塔冷却数的 95%~98%;若该塔为多点竖井的槽式配水,冷却数取模拟实验塔冷却数的 90%~95%;若该塔为中央竖井的槽式配水,冷却数取模拟

实验塔冷却数的 85%~90%。因此,如果实际工业塔塔内淋水填料为等高布置时,冷却数为模拟实验塔冷却数的 85%~90%。但本测试的工业塔塔内填料采用不等高布置方式,填料类型与 3.1.2 中模拟实验塔相同。在常用气水比工况条件下^[13],分别采用该工业塔的热力性能方程式和模拟实验塔的热力性能方程式计算冷却数,并得到修正系数,如表 1 所示。

表 1 工业塔的修正系数

Tab.1 Correction coefficient of industrial tower

气水比	实验塔冷却数	工业塔冷却数	修正系数
0.5	1.370	1.481	1.081
0.6	1.543	1.655	1.073
0.7	1.705	1.818	1.066
0.8	1.860	1.972	1.060
0.9	2.008	2.119	1.055
1.0	2.150	2.260	1.051
1.1	2.287	2.395	1.047

由表 1 可知,在常用气水比下,通过该工业塔的热力性能方程计算的冷却数大于通过实验塔的热力性能方程计算的冷却数,修正系数为 1.047~1.081。由此可见,当工业塔塔内填料采用不等高布置,模拟实验塔塔内填料采用等高布置时,修正系数为 1.047~1.081;当工业塔和模拟实验塔塔内填料均采用等高布置时,修正系数为 0.85~0.90。说明填料的等高布置,提高了冷却塔的冷却数;随着气水比的增大,修正系数变小,说明冷却塔气水比的增加,工业塔和实验塔的冷却数逐渐靠近;为通过模拟实验塔(填料等高布置)的冷却数推算工业冷却塔(填料不等高布置)的冷却数提供参考。

3.2 工业塔塔内实测风温分布

塔内风温越均匀,冷却效果越好^[14-15]。表 2 所

表 2 二泵并联工况运行时,塔内实测风温均方根误差

Tab.2 The RMS error of air temperature in the cooling tower under the condition of two pumps in parallel operating conditions

测道	测点实测风温 $\theta_i/^\circ\text{C}$						均方根误差
	1	2	3	4	5	6	
A 半径	35.58	34.02	34.16	33.63	34.21	34.49	0.61
B 半径	35.04	34.56	33.54	34.80	33.63	34.51	0.56
C 半径	35.49	33.63	33.65	34.23	34.14	34.95	0.67
D 半径	35.29	34.25	33.95	34.77	33.24	34.58	0.65

示为该工业塔二泵并联运行全塔配水时,塔内实测风温均方根误差。均方根误差计算式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

式中: θ_i 为测试工况的塔内气温测试值, $^\circ\text{C}$; $\bar{\theta}$ 为测试工况的塔内气温平均值, $^\circ\text{C}$; n 为测量次数。

表 2 中测点的布置按等面环方法由塔壁(测点 1)至塔心(测点 6)通过等面环的方法布置,塔门处的测道为 A 半径,顺时针走向,依次为 B 半径、C 半径、D 半径,测点布局示意图如图 1 所示。

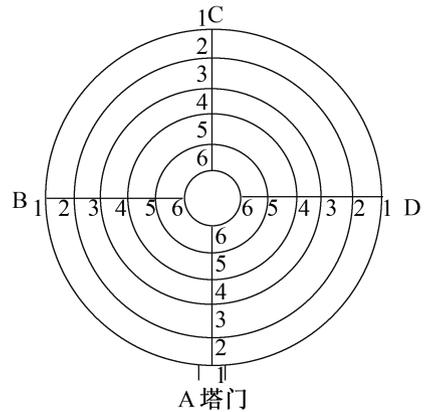


图 1 测点布局示意图

Fig.1 Measuring points layout

该塔的填料采用不等高布置,高度按 1、1.25、1.5 m 由塔中心向外阶梯形布置,由表 2 可知,二泵并联时,塔内风温均方根误差为 0.56~0.67 $^\circ\text{C}$ 。而文献[16]研究的冷却塔塔内填料采用等高布置,高度为 1.25 m,二泵并联时,塔内实测风温均方根误差为 0.73~1.78 $^\circ\text{C}$ 。由此可知,当塔内淋水填料不等高布置时,塔内风温的均方根误差小于塔内淋水填料等高布置的均方根误差,因此填料的不等高布置能使塔内风温相对更均匀。塔内风温越均匀,证明塔内气水之间的热传递越好,冷却塔的冷却效果越好。因此,塔的不等高布置能强化冷却塔的冷却

效果。

3.3 不同阻力公式计算出塔水温

基于工业塔的实测数据,采用工业塔热力性能方程式,冷却塔分别以二泵并联(小流量)、三泵并联(大流量)的工况运行时,通过阻力经验系数公式和《GB/T 50102—2006》推荐的阻力系数公式分别计算出塔水温的差值如图 2 所示。

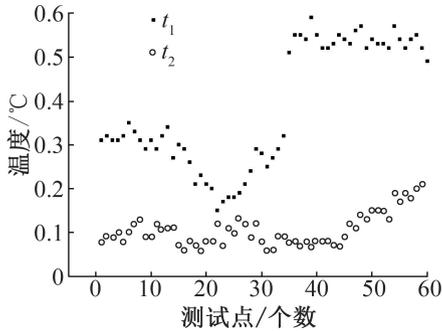


图 2 两阻力系数公式计算的出塔水温差值

Fig.2 The difference of outflow water temperature between the two resistance coefficient formula

由图 2 可知,当冷却塔在二泵并联(小流量)工况下运行时,两种阻力计算公式计算出塔水温的差值 t_1 的区间为 0.15~0.59 °C;当冷却塔在三泵并联(大流量)工况下运行时,两种阻力计算公式计算出塔水温的差值 t_2 的区间为 0.06~0.21 °C,其中 t_2 小于 t_1 的最小值 0.15 °C 的测试点有 53 个,占总测试点的 89.8%。此外,当冷却塔在三泵并联(大流量)工况下运行时, t_2 的值较小,说明两种阻力公式计算的出塔水温比较接近。因此为了计算简便,当冷却塔进塔水体积流量较大时,可选用通风阻力经验公式来计算出塔水温。

4 结论

1) 利用工业塔现场测试计算得到的热力性能方程式和实验室模拟塔的热力性能方程式分别在常用气水比范围内计算冷却数,求得工业塔(填料不等高布置)的冷却数与模拟实验塔(填料等高布置)的冷却数的修正系数为 1.047~1.081。填料不等高布置的冷却塔冷却数高于填料等高布置的冷却塔,且在没有模拟冷却塔(填料不等高布置)的冷却数时,可通过模拟冷却塔(填料等高布置)的冷却数推算实际工业塔(填料不等高布置)的冷却数。

2) 冷却塔塔内风温均方根误差越小风温分布越均匀。本实验得到该工业塔(填料不等高布置)的塔内风温均方根误差为 0.56~0.67 °C,小于填料等高

布置的冷却塔^[16]。因此,填料不等高布置的冷却塔塔内风温相比于填料等高布置的冷却塔塔内风温更均匀,即冷却效果更好。

3) 当冷却塔进塔水体积流量较大时,通过冷却塔通风阻力经验系数公式计算各工况点的出塔水温和通过《GB/T 50102—2003》冷却塔通风阻力推荐公式计算各实验点的出塔水温非常接近,可采用冷却塔通风阻力经验系数公式计算各工况点的出塔水温以提高计算效率。

参考文献

- [1] 齐复东,贾树本,马义伟. 电站凝汽设备和冷却系统[M]. 北京:水利电力出版社,1990. (QI Fudong, JIA Shuben, MA Yiwei. Power plant condensing equipment and cooling system[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.)
- [2] 李秀云,严俊杰,林万超. 火电厂冷端系统评价指标及诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 94-99. (LI Xiuyun, YAN Junjie, LIN Wanchao. Study on thermo-economics diagnosis method and index evaluation system for the cold-end system in steam power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9):94-99.)
- [3] 李秀云,闻浩祖. 冷却塔的节能潜力分析[J]. 中国电力, 1997(10):34-36. (LI Xiuyun, WEN Haozu. To analyze energy-saving potential of cooling tower[J]. Electric Power, 1997(10):34-36.)
- [4] WILLIAMSON N, BEHNIA M, ARMFIELD S W. Thermal optimization of a natural draft wet cooling tower[J]. International Journal of Energy Research, 2010, 32(14): 1349-1361.
- [5] AL-WAKED R, BEHNIA M. The performance of natural draft dry cooling towers under crosswind: CFD study[J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(2): 147-161.
- [6] AL-WAKED R, BEHNIA M. CFD simulation of wet cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(4):382-395.
- [7] 赵元宾,杨志,高明,等. 填料非均匀布置对大型冷却塔冷却性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(20):96-103. (ZHAO Yuanbin, YANG Zhi, GAO Ming, et al. Impact of fill non-uniform layout on cooling performance of large-scale cooling tower[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(20):96-103.)
- [8] 周兰欣,蒋波,叶云飞. 湿式冷却塔热力性能数值分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 53-58. (ZHOU Lanxin, JIANG Bo, YE Yunfei. Numerical study of thermal performance on wet cooling tower[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36

(1):53-58.)

[9] 胡三季, 陈玉玲, 刘廷祥, 等. 不同高度淋水填料的热力及阻力性能试验[J]. 工业用水与废水, 2005, 36(1):76-78. (HU Sanji, CHEN Yuling, LIU Yanxiang, et al. Test of thermal and resistance performance of water drenching fillers with different height[J]. Industrial Water & Wastewater, 2005, 36(1):76-78.)

[10] 工业冷却塔测试规程:DL/T 1027—2006[S]. 北京:中国电力出版社, 2007. (Acceptance test specification of industrial cooling tower: DL/T 1027—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.)

[11] 赵顺安. 冷却塔工艺原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015. (ZHAO Shun'an. The principle of cooling towers[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)

[12] 胡三季, 陈玉玲. 工业冷却塔与模拟试验塔试验系数的相关关系[J]. 热力发电, 2005, 34(12):72-73. (HU Sanji, CHEN Yuling. The correlation between industrial cooling tower and experimental coefficient of simulation test tower[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(12):72-73.)

[13] 胡连江, 孙慧, 蔡广. 冷却塔设计的计算机运算程序[J]. 中国给水排水, 2000, 16(12):39-42. (HU Lianjiang, SUN Hui, CAI Guang. Computer calculation program for design of cooling tower[J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(12):39-42.)

[14] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 十字隔墙湿式冷却塔冷却特性的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29

(8):6-13. (ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, WANG Kai, et al. Numerical analysis of the cooling performance of wet cooling tower with cross wall[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8):6-13.)

[15] 赵元宾, 孙奉仲, 王凯, 等. 侧风对湿式冷却塔空气动力场影响的数值分析[J]. 核动力工程, 2008, 29(6):35-40. (ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, Wang Kai, et al. Numerical analysis of crosswind effect on wet cooling tower aerodynamic field[J]. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(6):35-40.)

[16] 贾明晓, 胡三季, 樊志军, 等. 1 000 MW 机组大型海水冷却塔热力性能试验研究[J]. 中国电力, 2016, 49(10):28-32. (JIA Mingxiao, HU Sanji, FAN Zhijun, HAN Li. Experimental research on thermal performance of large seawater cooling tower used in 1 000 MW power unit[J]. Electric Power, 2016, 49(10):28-32.)

通信作者简介

解岳,男,副教授,西安建筑科技大学环境与市政工程学院,13572539940,E-mail:xieyue@xauat.edu.cn。研究方向:火力发电厂冷却塔热力性能实验及节能研究。

About the corresponding author

Xie Yue, male, associate professor, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, +86 13572539940, E-mail:xieyue@xauat.edu.cn. Research fields: study on thermal performance test and energy saving of cooling towers in thermal power plants.

(上接第 94 页)

[48] 刘其伟, 姜益强, 董建锴, 等. 矩形相变蓄热器蓄热特性研究[J]. 暖通空调, 2013, 43(11):92-94. (LIU Qiwei, JIANG Yiqiang, DONG Jiankai, et al. Energy storage performance of a rectangle phase change material heat exchanger[J]. HV & AC, 2013, 43(11):92-94.)

[49] 胡文举, 姜益强, 姚杨, 等. 基于除霜的相变蓄热器对空气源热泵性能的影响[J]. 天津大学学报, 2009, 42(10):908-912. (HU Wenju, JIANG Yiqiang, YAO Yang, et al. Effect of PCM based heat exchanger for defrosting on performance of air source heat pump[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(10):908-912.)

[50] 胡文举, 姜益强, 姚杨, 等. 温湿度对空气源热泵相变蓄能除霜系统特性影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6):65-69. (HU Wenju, JIANG Yiqiang, YAO Yang,

et al. Effects of air temperature and humidity on system defrosting characteristics of a PCM based air source heat pump[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(6):65-69.)

通信作者简介

沈九兵,男,博士,江苏科技大学能源与动力学院,18796014922,E-mail:jackcoolman@126.com。研究方向:热泵、余热回收及机械蒸汽再压缩。

About the corresponding author

Shen Jiubing, male, doctor, School of Energy and Power, Jiangsu University of Science and Technology, +86 18796014922, E-mail:jackcoolman@126.com. Research fields: heat pump, waste heat recovery and the mechanical vapor recompression.