

气侧均流装置对冷却三角单元流动传热特性影响的实验研究

郭滔¹, 于海洋¹, 冯海波², 袁汉川², 田兵¹, 杨玉杰³, 赵元宾^{4*}, 赵倩⁴

(1. 国能浙能宁东发电有限公司, 宁夏回族自治区 银川市 750408; 2. 国能沪电(上海)工程技术有限公司, 上海市 普陀区 200062; 3. 济南蓝辰能源技术有限公司, 山东省 济南市 250101; 4. 山东大学能源与动力工程学院, 山东省 济南市 250061)

Experimental Study on the Influence of Air Side Equalizing Device on the Flow Heat Transfer Characteristics of Cooling Delta Unit

GUO Tao¹, YU Haiyang¹, FENG Haibo², YUAN Hanchuan², TIAN Bing¹, YANG Yujie³, ZHAO Yuanbin^{4*}, ZHAO Qian⁴

(1. Guodian Zheneng Ningdong Power Generation Co., Ltd., Yinchuan 750408, Ningxia Hui Autonomous Region, China;
2. CHN Energy Shanghai Engineering & Technology Co., Ltd., Putuo District, Shanghai 200062, China;
3. Jinan Lanchen Energy Technology Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong Province, China;
4. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

摘要: 对于间接空冷系统冷端基本传热元件-冷却三角单元, 通过在其加装及相邻未加装气侧均流装置冷却三角单元内的两侧冷却柱沿散热管束横向布置风速、风温、壁温测点, 进一步在左右两侧出水柱布置壁温测点, 对比分析两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风速、风温、壁温及出水壁温的变化规律, 研究气侧均流装置对冷却三角单元流动传热特性及出水壁温分布的影响机制。研究结果表明: 加装气侧均流装置后冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风温、壁温分布更加均匀, 两侧出水柱壁温均值更低, 且降低了两侧出水柱壁温差, 气侧均流装置优化了两侧冷却柱的换热均匀性。

关键词: 煤电机组; 间接空冷系统; 冷却三角单元; 气侧均流装置; 流动传热; 水温分布

ABSTRACT: For the cooling delta unit, the basic heat transfer element of the cold end of the indirect air-cooling system, the wind speed, air temperature, and wall temperature

measuring points were arranged laterally along the heat transfer bundle in the cooling columns on both sides of cooling delta with or without air equalizing apparatus. The wall temperature measuring points were further arranged on the left and right side of water outlet cooling columns. The changes of lateral windward wind speed, wind temperature, wall temperature and outlet water temperature of the cooling columns on both sides along the heat transfer bundles were compared and analyzed. And the influence mechanisms of the air equalizing apparatus on the flow and heat transfer characteristics of the cooling delta unit and the outlet water temperature were studied. The results show that, with the air equalizing apparatus, the distribution of lateral windward wind speed and wall temperature of the two sides cooling columns are more uniform along the heat transfer bundle.

KEY WORDS: coal-fired power unit; indirect air-cooling system; cooling delta; air side equalizing device; flow heat transfer; water temperature distribution

基金项目: 国家自然科学基金项目(51606112); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程(2022TSGC1026); 国家能源集团宁夏电力有限公司科技创新项目(NXDL-2022-28)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51606112); Science and Technology Innovation Capability Improvement Project of Medium-Sized Enterprises in Shandong Province (2022TSGC1026); Sci-Tech Innovation Project of China Energy Ningxia Power Electric Co., Ltd. (NXDL-2022-28).

0 引言

发改运行(2021)1519号文件《全国煤电机组改造升级实施方案》^[1]强调进一步推进煤电机组节能降耗具有重要意义^[2-4]。间接空冷机组以其节

水优势广泛用于我国中西部缺水地区^[5]，但受空冷塔、冷却三角单元、散热管束结构材质等限制^[6]，间接空冷机组冷端存在本源性难题^[7]，与湿冷机组冷端相比，空冷机组传热系数小、冷却效率低、发电煤耗高，且更易受环境自然风的不利影响^[8]。

随着国内大量间接空冷机组的建设、投运，间接空冷系统传热强化^[9]及系统提效研究越来越受到重视，主要措施有塔内外大尺度流场重构传热强化提效、进风口预冷提效以及针对冷却三角单元的传热强化提效等。在间接空冷塔外侧或内侧加装挡风墙，以降低环境自然风的不利影响，是一种典型的冷却塔类设备的传热强化提效措施。1998年，赵振国等^[10]通过实验室实验验证了塔外挡风墙、塔内十字墙及背风侧聚风室对间接空冷塔冷效的改善。按照倾斜进风所引起冷却三角单元的进风偏离及塔外主流空气沿周向有无流动分离，Ma等^[11]分别对塔外挡风墙的安装角度、安装方式及旋转角度^[12]等进行了优化，以减小塔外挡风墙所诱导空气分流和旋涡对附近冷却三角单元产生的不利影响。Chen等^[13]进一步验证了塔外挡风墙对间接空冷塔冷却性能的改善相对优于塔内挡风墙。Wang等^[14]通过引入流动损失因子研究聚风室对各扇段流场的作用，并对聚风室进行了优化。

冷却三角单元流动传热特性直接影响其出水温度分布^[15]。针对间接空冷传热强化提效的典型研究包括挡风^[16]、导流^[17-18]等塔内外流场优化措施，但多数针对整塔流场重构，而非冷却三角单元进行流场优化。但进风在冷却三角单元内两侧冷却柱散热管束中分配不均的现象普遍存在^[19]，而流动不均又会对其整体性能产生不利影响^[20]。研究气侧均流装置对冷却三角单元两侧管束流动传热的分布特征、机制等，可为多变运行条件、复杂建筑环境中间接空冷冷却三角单元尺度流场重构的进一步优化提供理论支撑。

作为间接空冷的核心传热单元，冷却三角单元及其两侧冷却柱的流动传热特性研究逐渐受到重视。Wang等^[21]研究指出，冷却三角单元顶角的大小对其流动传热特性影响较大。以顶角为 60° 、边长为10 m的直接空冷冷凝三角单元为例，Kong等^[22]

数值研究表明，三角通道内增设整流装置对直接空冷系统冷效的作用微乎其微，而间接空冷塔冷却三角单元顶角一般为 $45^\circ\sim 46^\circ$ ，且其冷却柱边长仅为2.6 m左右。Ma等^[23]数值研究表明，大的冷却三角单元顶角可减小其进风偏离，有助于增大间接空冷塔的进风量。这表明间接空冷冷却三角单元的进风偏离度及其空气流场与大顶角大空间的直接空冷冷凝三角存在一定区别，因此有必要针对性研究间接空冷冷却三角单元流道气侧均流的调控机制^[24]。

针对冷却三角单元内进风偏离所引起两侧冷却柱间空气流量分配不均、三角通道横向旋涡附加流动阻力等问题，上述研究仅停留在间冷塔系统大尺度流场优化层次。本文针对间接空冷塔加装及相邻未加装气侧均流的冷却三角单元，实验分析加装气侧均流装置后，冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风速、风温、壁温偏差及两侧出水柱壁温偏差，揭示气侧均流装置对冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风速、风温、壁温调控特征及出水壁温分布机理，可有效推进冷却三角单元尺度及间冷系统的传热强化提效。

1 实验对象及测点布置

1.1 实验的空冷塔及冷却扇段概况

某电厂自然通风间接空冷系统塔高210 m，零米直径164 m，循环水量105 643 m³/h，总进风量为51 602 m³/s，总散热面积260万m²，共包含12个冷却扇段和196个冷却三角。自然通风间接空冷塔各冷却扇段相对位置如图1所示。

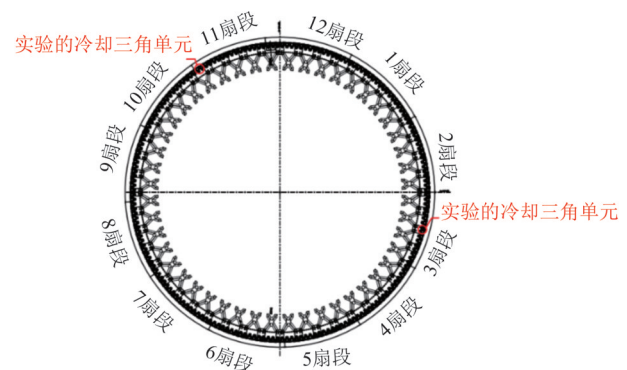


图1 间冷塔各冷却扇段相对位置

Fig. 1 Relative position of each cooling sectors for a dry cooling tower

本自然通风间接空冷系统中共计8个冷却扇段、128个冷却三角单元已加装气侧均流装置,本次实验以第3冷却扇段内第8和第9号相邻冷却三角单元、第11冷却扇段内第1和第2号相邻冷却三角单元为实验对象,监测其风速、风温、壁温等典型特征参数。第3冷却扇段第8号冷却三角单元、第11冷却扇段第2号冷却三角单元均已加装气侧均流装置。第3冷却扇段第8、9号冷却三角单元相对位置如图2所示,其中第9号冷却三角单元位于图示第8号冷却三角单元的上侧,加装气侧均流装置后的冷却三角单元的横截面结构如图3(a)所示。以第3冷却扇段第9号冷却三角单元、第11冷却扇段第1号冷却三角单元作为对比,则未加装气侧均流装置,其横截面结构如图3(b)所示。

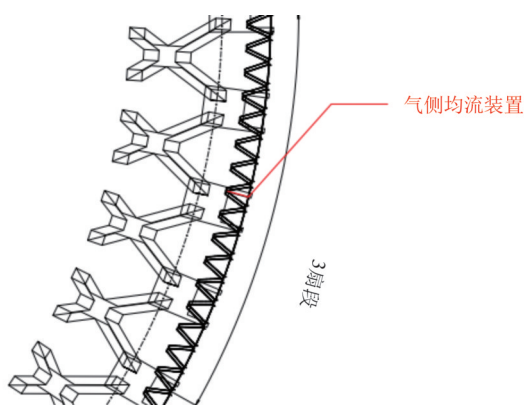


图2 第3冷却扇段中第8和第9号冷却三角单元位置

Fig. 2 Position of 8 and 9 cooling delta units in the third cooling sector

1.2 实验方法及测点布置

1.2.1 实验方法

以第3冷却扇段加装气侧均流装置的第8号冷却三角单元和相邻未加装气侧均流装置的第9号冷却三角单元为实验对象,分别测量其两侧冷却柱沿散热管束横向典型高度的迎风面风速、迎风面风温和迎风面壁温。实验测点全部安装于冷却柱迎风面上,对于单根冷却柱而言,冷却柱迎风面是指外界空气流入散热器管束的垂直立面,散热管束横向即为迎风面上的水平方向。以第11冷却扇段加装气侧均流装置的2号冷却三角单元和相邻未加装气侧均流装置的1号冷却三角单元为实验对象,分别测量两侧出水柱壁温。

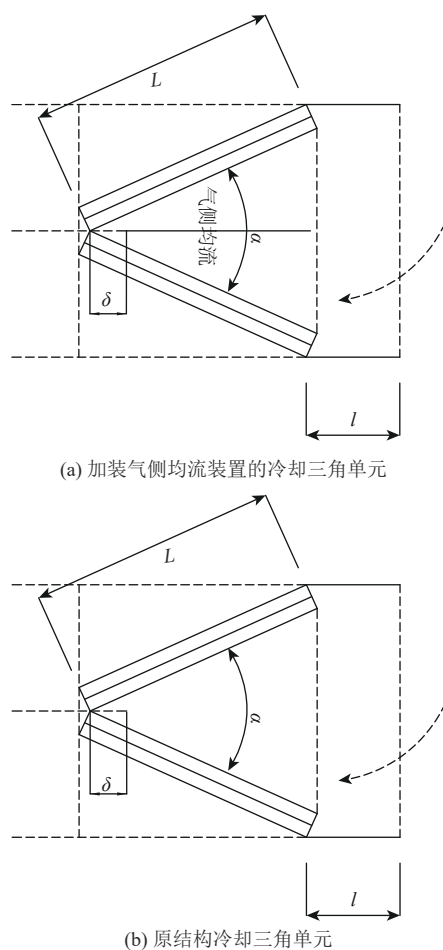


图3 加装气侧均流装置和原结构冷却三角单元

Fig. 3 Air side equalizing device and the original structure cooling delta unit

1.2.2 实验测点布置

基于加装及未加装气侧均流装置的第3冷却扇段8、9号冷却三角单元,为避免下密封板对冷却三角单元通道内空气流场的影响,在8、9号冷却三角单元下密封板上端5 m高度位置,沿单根冷却柱散热管束横向五等分点处,间隔布置2组风速风温测点(V1、V2)及3组壁温测点(T1、T2、T3),同一组风速、风温测点安装于同一位置,测点布置方式及编号如图4所示,L、R分别代表左侧、右侧冷却柱,编号顺序由冷却三角外侧开始命名为1,向内逐渐递增。每组风速、风温、壁温测点各包括1个管道式风速仪、1个贴片式PT100铂电阻和1个探针式PT100铂电阻,其中PT100铂电阻需结合进水壁温进行调零和调幅,通过无线网方式实时上传迎风面风速、迎风面风温和迎风面壁温数据至上位机(间隔5 s)。

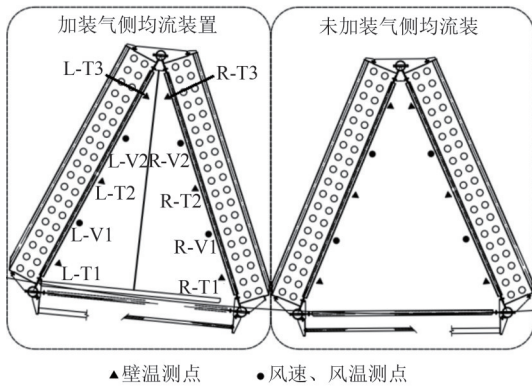


图4 8、9号冷却三角单元的测点安装位置

Fig. 4 Measurement point installation position of the 8 and 9 cooling delta unit

基于未加装气侧均流装置的11冷却扇段1、2号冷却三角单元，分别在距离1、2号冷却三角单元进风口50 m处安装风向、风速、温度传感器，实时测量及上传1、2号冷却三角单元的环境风向、风速及风温；分别在1、2号冷却三角单元两侧出水柱的镀锌钢管和膨胀节外侧各安装1个PT100铂电阻，共安装8个PT100铂电阻，实时测量及上传1、2号冷却三角单元的两侧出水柱壁温，图5为出水柱壁温测点安装位置示意图，测量参数及所用仪表信息见表1。



图5 出水柱壁温测点安装位置

Fig. 5 Installation location of the wall water column temperature measurement point

1.2.3 实验方案

在测试时间段每间隔8 s记录一次风速、风温、壁温，研究第3、第11冷却扇段对应冷却三

表1 实验测量参数及仪表

Tab. 1 Experimental measurement parameters and instruments

测量参数	仪表	测量范围	测量精度
环境风向	WD4510风向传感器	0~360°	±1°
环境风速	WD4510风速传感器	0~10 m/s	±0.02 m/s
环境风温	温度传感器	-40~+80 °C	±0.05 °C
迎风风速	管道式风速仪	0~20 m/s	±0.02 m/s
迎风风温	PT100探针式温度传感器	-50~200 °C	±0.1 °C
迎风壁温	PT100贴片贴片温度传感器	-50~200 °C	±0.1 °C

角单元中气侧均流装置对各冷却三角单元各冷却柱迎风侧风速、风温、壁温的影响规律，由此分析研究气侧均流装置对冷却三角单元空间冷却柱尺度气侧流动传热特性的影响机制，并揭示气侧均流装置对冷却三角单元出水壁温的调控作用。

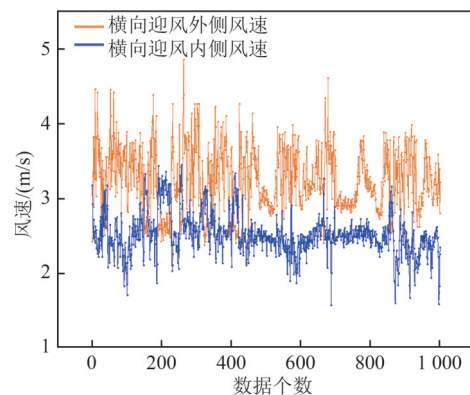
2 试验结果及分析

2.1 8、9冷却三角单元迎风风速、风温、壁温分布研究

2.1.1 两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风速

基于已加装气侧均流装置的第3冷却扇段8号冷却三角单元和未加装气侧均流装置的9号冷却三角单元，以某一时间段(2022年3月5日14:00—16:13)实测参数分析第3冷却扇段8、9号冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风速的变化规律。图6、7分别为为8号、9号冷却三角单元左侧、右侧冷却柱迎风风速分布，其中横坐标的数据个数为随时间增加的测点数据数量。

结合表2所示散热器管束迎风风速横向分布数据可以看出：8、9号冷却三角单元左侧冷却柱



(a) 左侧冷却柱

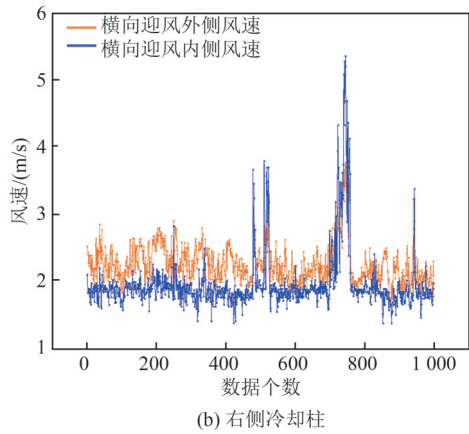


图6 8号冷却三角单元冷却柱迎风风速分布
Fig. 6 Windward wind velocity distribution of the 8 cooling delta unit cooling column

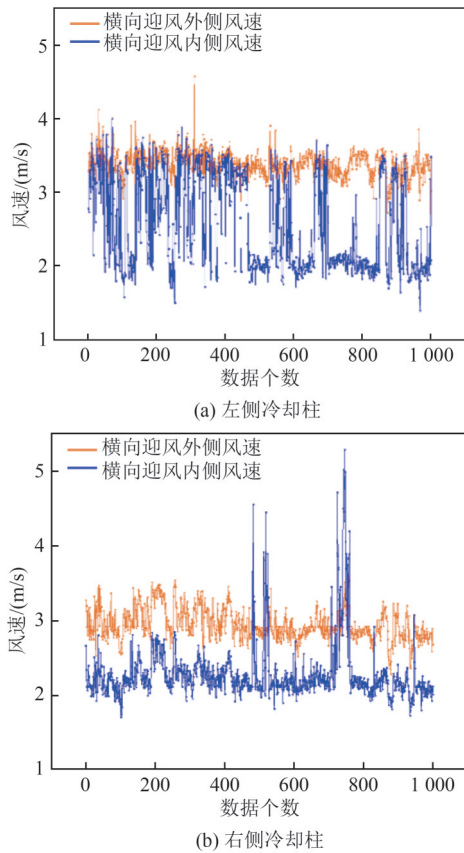


图7 9号冷却三角单元冷却柱迎风风速分布
Fig. 7 Windward wind velocity distribution of the 9 cooling delta unit cooling column

沿散热管束横向迎风外侧风速都大于迎风内侧风速，因为环境风向偏向右侧冷却柱，偏离左侧冷却柱；右侧冷却柱迎风外侧风速普遍大于迎风内侧风速，但对于部分时间点，迎风内侧风速大于迎风外侧风速，因为部分时间点环境风速增大，

进风风向偏向迎风内侧测点，环境进风在外侧风向测点处形成横向涡流。

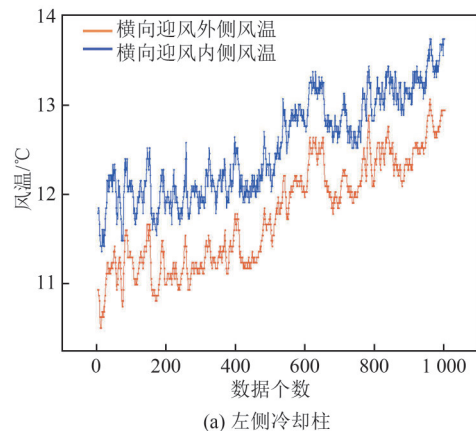
表2 3扇段散热器管束横向迎风风速变化

Tab. 2 Range of wind velocity in sector 3 m/s

冷却三角	测点迎风风速			
	L-V1	L-V2	R-V1	R-V2
8号	2.31~4.86	1.57~3.45	1.65~3.77	1.37~5.36
9号	1.39~4.00	3.02~4.01	1.71~5.29	1.57~3.45

2.1.2 两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风温

基于已加装气侧均流装置的第3冷却扇段8号冷却三角单元和未加装气侧均流装置的9号冷却三角单元，以2022年3月5日14:00—16:13时间段获取的数据分析8、9号冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风风温的变化规律。图8为8号冷却三角单元左侧、右侧冷却柱迎风风温分布图，图9为9号冷却三角单元左侧、右侧冷却柱迎风风温分布图。结合表3散热器管束横向迎风风温数据可得：整体上看，同一冷却三角单元内两侧冷却柱沿散热管束横向迎风内外侧风温变化趋势相同，迎风外侧风温低于迎风内侧风温，越接近冷却三角单元两侧冷却柱交接处，迎风风温越高。对比来看，加装气侧均流装置的8号冷却三角单元左右两侧冷却柱横向迎风内侧风温的差值(即L-V1与R-V1之差)仅为0.24~0.31℃，而未加气侧均流装置的9号冷却三角单元左右两侧冷却柱横向迎风内侧风温的差值达到了1.71~1.77℃；对比V2测点处8、9号冷却三角单元左右冷却柱迎风风温，8号冷却三角为0.54~0.91℃，9号冷却三角为0.91~1.04℃。因此可以得出结论，气侧均流装置可显著平衡同一冷却三角单元左右冷却柱沿散



(a) 左侧冷却柱

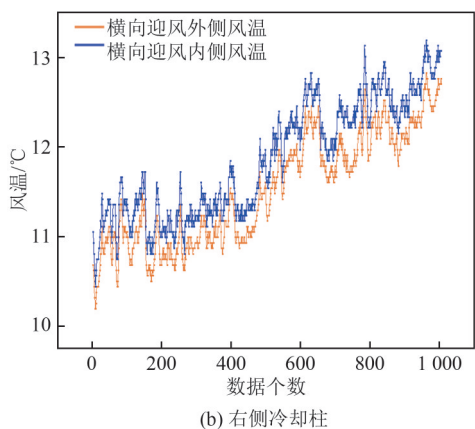


图8 8号冷却三角单元冷却柱迎风风温分布

Fig. 8 Windward wind temperature distribution of the 8 cooling delta unit cooling column

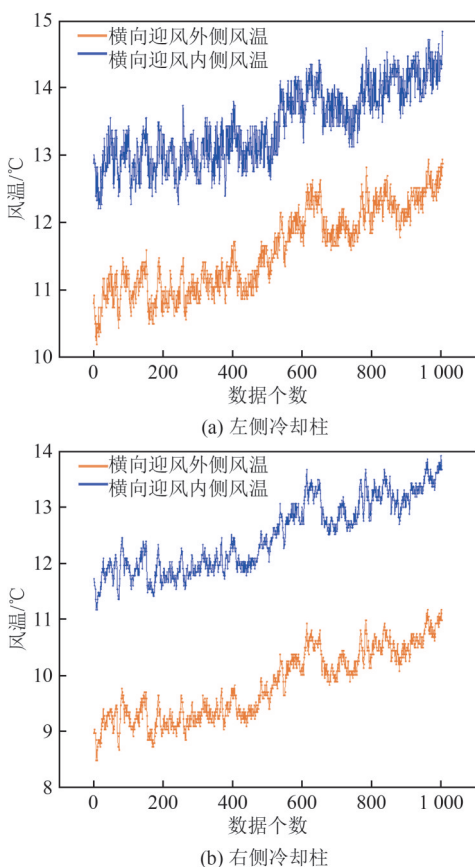


图9 9号冷却三角单元冷却柱迎风风温分布

Fig. 9 Windward wind temperature distribution of the 9 cooling delta unit cooling column

表3 3扇段散热器管束横向迎风风温变化范围

Tab. 3 The range of wind temperature in sector 3 °C

冷却三角	测点迎风风温			
	L-V1	L-V2	R-V1	R-V2
8号	10.51~13.07	11.36~13.74	10.20~12.83	10.45~13.20
9号	10.20~12.95	12.22~14.84	8.49~11.18	11.18~13.93

热管束横向迎风风温分布。

2.1.3 两侧冷却柱沿散热管束横向迎风壁温

基于已加装气侧均流装置的第3冷却扇段8号冷却三角单元和未加装气侧均流装置9号冷却三角单元，以2022年3月5日14:00—16:13时间段分析第3冷却扇段8、9号冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风壁温的变化规律，结果如表4所示。图10为8号冷却三角单元左侧、右侧冷却柱迎风壁温分布图，图11为9号冷却三角单元左侧、右

表4 3扇段散热器管束横向迎风壁温变化范围

Tab. 4 Range of windward wall temperature in sector 3

位置	测点编号	8号冷却三角	9号冷却三角
左侧冷却柱迎风壁温/°C	L-T1	18.64~21.33	19.49~25.29
	L-T2	18.52~20.96	17.72~20.78
	L-T3	16.44~19.19	17.60~20.47
右侧冷却柱迎风壁温/°C	R-T1	19.43~22.30	19.80~22.55
	R-T2	18.82~21.45	18.52~20.96
	R-T3	17.85~20.59	16.44~19.19

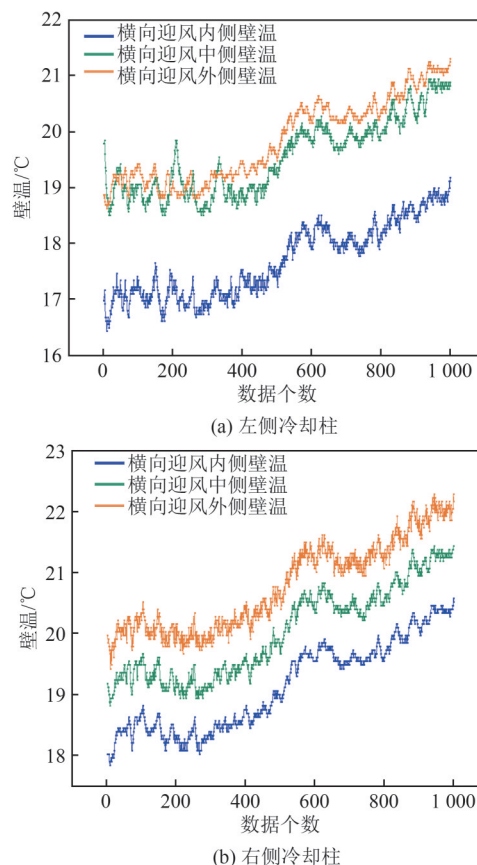


图10 8号冷却三角单元冷却柱迎风壁温分布

Fig. 10 Windward wall temperature distribution of the 8 cooling delta unit cooling column

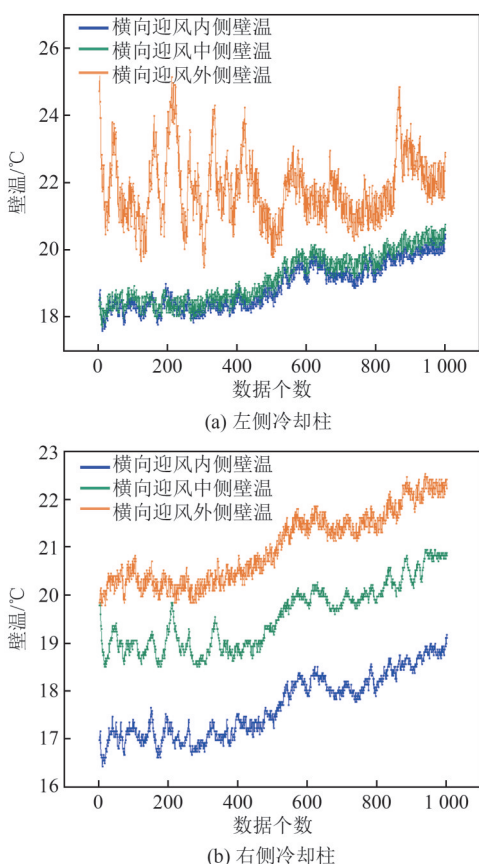


图11 9号冷却三角单元冷却柱迎风壁温分布

Fig. 11 Windward wall temperature distribution of the 9 cooling delta unit cooling column

侧冷却柱迎风壁温分布图。可以发现：同一冷却三角单元两侧冷却柱沿散热管束横向迎风外侧壁温>迎风中部壁温>迎风内侧壁温，越接近冷却三角单元两侧冷却柱的交接处，循环水-空气的换热效果越好。对比8、9冷却三角单元左侧冷却柱三处壁温的波动差值，加装气侧均流装置的8号冷却三角壁温波动差值为4.89℃，而9号冷却三角单元为7.69℃；同理，对于8、9冷却三角单元右侧冷却

柱3处壁温的波动差值，8号冷却三角为4.45℃，9号冷却三角为6.11℃。由此可以看出，气侧均流装置可显著消除单根冷却柱的壁温偏差，平衡两侧冷却柱沿散热管束横向循环水-空气换热稳定性。

2.2 出水柱壁温分布研究

基于第11冷却扇段已加装气侧均流装置的2号冷却三角单元和相邻未加装气侧均流装置的1号冷却三角单元，其出水壁温均值定义为1h内冷却三角气侧通道两侧出水柱上4个壁温测点处所测得的全部数据的平均值；单侧出水柱壁温均值定义为1h内单侧出水柱上2个壁温测点所测得的全部数据数的平均值；环境风向、风速、风温均值定义为1h内测得的冷却三角单元周围环境风向、风速、风温测点的全部数据的平均值。根据2022年1月23日13:00—21:00的现场实测数据(见表5、6)，此段时间内第11扇段1、2号冷却三角单元的百叶窗开度都为30%，1、2号冷却三角单元出水壁温均值及同时刻环境风向均值、风速均值、风温均值随时间变化趋势分别如图12—14所示，由此分析1、2号冷却三角单元出水壁温均值随时间的变化规律。

结合环境风向和风速均值可得13:00—21:00时间段为小环境风速工况，同时间段内1、2号冷却三角单元出水壁温均差最小值为2.70℃，均差最大值为6.61℃，证明小环境风速工况下气侧均流装置大幅强化了2号冷却三角单元的换热性能。随着环境空气温度均值增加，1、2号冷却三角单元出水壁温均差减小，反之两者均差增大；实测时间段，环境温度低时百叶窗开度小，这表明气侧均流装置对冷却三角单元的换热性能强化幅度与百叶窗开度密切相关。

表5 第11扇段1、2号冷却三角出水柱壁温与环境条件

Tab. 5 Outlet wall temperature of 1 and 2 cooling delta in sector 11 and the data of the environment

时间	1号出水柱壁温/℃	2号出水柱壁温/℃	环境风速/(m/s)	环境温度/℃	环境风向/(°)
13:00	25.23	22.51	2.72	-1.82	199.48
14:00	25.23	22.28	2.95	-1.18	210.15
15:00	24.85	22.86	2.93	-1.20	181.97
16:00	25.07	22.36	2.70	-1.37	168.46
17:00	25.53	22.39	3.14	-1.64	143.36
18:00	26.96	22.31	4.65	-1.88	137.50
19:00	28.27	22.59	5.68	-2.14	132.70
20:00	28.46	22.36	6.10	-2.16	156.71
21:00	28.76	22.15	6.61	-2.14	158.84

表6 第11扇段1、2号冷却三角单侧出水柱壁温

Tab. 6 Single side outlet wall temperature of 1 and 2 cooling delta in sector 11

时间	1号冷却三角			2号冷却三角		
	左侧	右侧	差值	左侧	右侧	差值
13:00	25.34	25.12	0.22	22.64	22.38	0.26
14:00	25.29	25.17	0.12	22.33	22.23	0.11
15:00	24.70	25.00	0.30	21.66	22.07	0.42
16:00	25.03	25.11	0.08	22.32	22.41	0.09
17:00	25.43	25.62	0.19	22.31	22.47	0.16
18:00	26.86	27.06	0.21	22.26	22.36	0.11
19:00	28.38	28.15	0.23	22.65	22.53	0.12
20:00	28.84	28.09	0.75	22.68	22.04	0.65
21:00	28.90	28.63	0.27	22.39	21.91	0.48

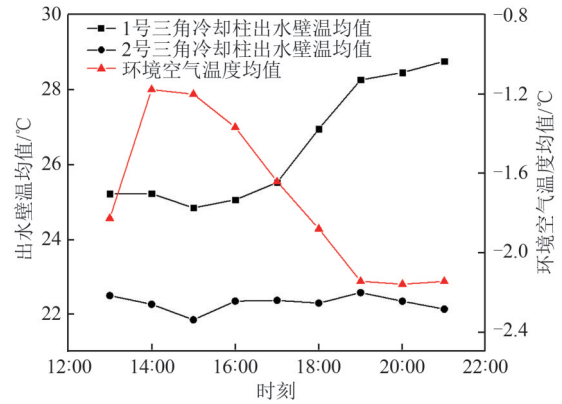


图14 1、2号冷却三角单元出水壁温及环境温度均值
Fig. 14 Change trend of 1 and 2 cooling delta units outlet average water temperature and ambient temperature

元两侧出水柱温度均差在0.8℃以内，且2号冷却三角单元两侧出水柱温度的均差波动幅度小于1号冷却三角单元。

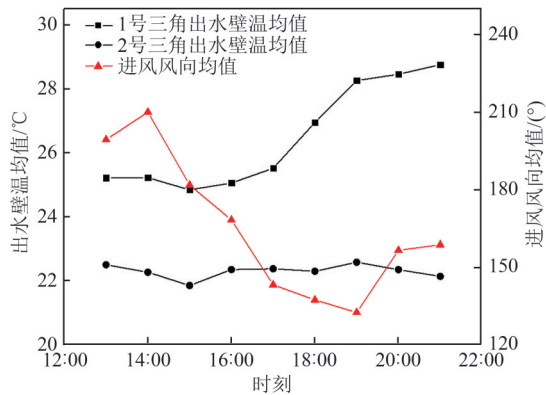


图12 1、2号冷却三角单元出水壁温均值及环境风向均值变化趋势

Fig. 12 Change trend of 1 and 2 cooling delta units outlet water average temperature and ambient wind direction

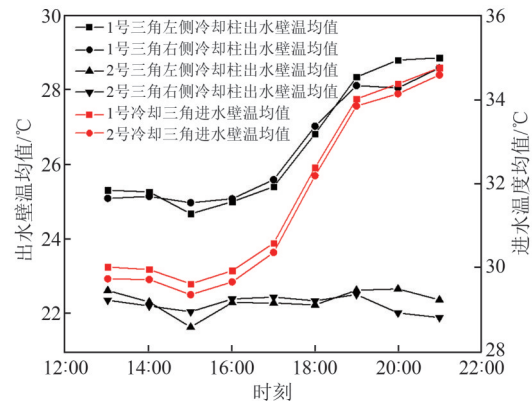


图15 单侧出水柱温度均值随时间变化趋势

Fig. 15 Change trend of the one-sided outlet column water temperature with time

1、2号冷却三角单元两侧出水柱温度均差与进出水壁温均值的比值随时间变化趋势如图16所示，由此分析气侧均流装置对两侧冷却柱换热稳定性的影响机制。

为衡量气侧均流消除冷却三角单元双侧冷却柱的出水温度偏差的作用，定义冷却三角单元两侧出水柱温度均差与进出水壁温均值的比值，比值越小，说明两侧出水柱的出水温差越小，冷却柱性能越好。如图16所示，在13:00—21:00时间段内，2号冷却三角单元两侧出水柱温度均差与进出水壁温均值的比值均小于1号冷却三角单元。在17:00之后，1、2号冷却三角单元两侧出水柱温度均差与进出水壁温均值的比值差距明显加大，

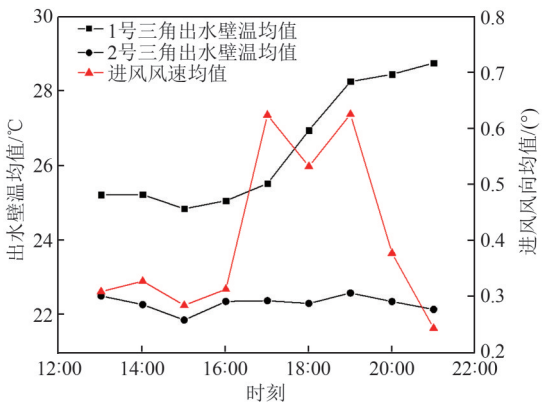


图13 1、2号冷却三角单元出水壁温均值及环境风速均值变化趋势

Fig. 13 Change trend of 1 and 2 cooling delta units outlet water average temperature and ambient wind velocity

13:00—21:00时间段内，1、2号冷却三角单元单侧出水柱壁温均值随时间变化趋势如图15所示，结合表5数据对比可得：1、2号冷却三角单

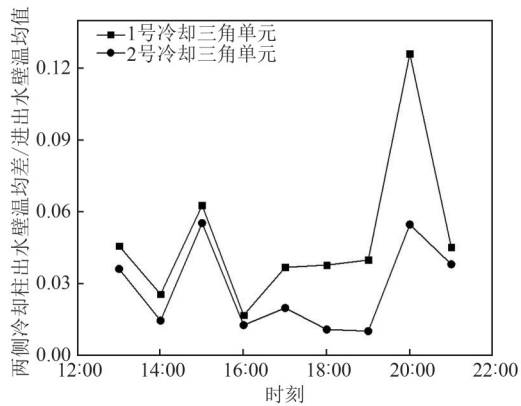


图16 1、2号冷却三角单元两侧出水柱壁温均差与进出水壁温均值的比值变化趋势

Fig. 16 Change trend of the outlet water column and the temperature water difference of the inlet and outlet water on both sides of the 1 and 2 cooling delta units

2号最低降低至1号的1/4。结合表5，在17:00之后环境风速由小风速变化至3 m/s以上，这表明气侧均流装置具备在强化冷却三角单元换热性能的基础上优化两侧冷却柱的换热稳定性的优点，该优势随风速等级增加而明显。

3 结论

针对典型自然通风间接空冷塔的基本换热元件即其冷却三角单元，研究气侧均流装置对冷却三角单元流动传热特性及出水壁温特性的影响机制，主要结论如下：

1) 所研究第3冷却扇段8、9号冷却三角单元左侧冷却柱沿散热管束横向迎风外侧风速都大于迎风内侧风速，右侧冷却柱沿散热管束横向迎风外侧风速普遍大于迎风内侧风速，部分时间点迎风外侧风速小于迎风内侧风速。

2) 所研究第3冷却扇段8、9号冷却三角单元内两侧冷却柱沿散热管束横向迎风内外侧风温变化趋势相同：迎风外侧风温小于迎风内侧风温；加装气侧均流装置的8号冷却三角单元横向迎风内外侧风温差小于9号冷却三角单元，表明气侧均流装置可平衡沿散热管束横向迎风风温分布。

3) 所研究第3冷却扇段8、9号冷却三角单元内两侧冷却柱沿散热管束迎风侧壁温沿横向由外向内均依次降低；加装气侧均流装置的8号冷却

三角单元迎风侧壁温横向差值小于9号冷却三角单元，表明气侧均流装置可平衡其两侧冷却柱沿散热管束横向循环水-空气换热稳定性。

4) 气侧均流装置对冷却三角单元出水壁温调控作用为，小环境风速工况下气侧均流装置强化了冷却三角单元的换热性能，优化了两侧冷却柱的换热稳定性，且气侧均流装置对冷却三角单元的换热性能强化幅度与百叶窗开度密切相关。

参考文献

- [1] 国家发展改革委，国家能源局. 全国煤电机组改造升级实施方案 [EB/OL]. (2021-11-03) [2023-07-25]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/5648562/files/044e56fa097944efa3f980ad0bd19588.pdf>. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. National coal-fired power unit transformation and upgrading implementation plan [EB/OL]. (2021-11-03) [2023-07-25]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/5648562/files/044e56fa097944efa3f980ad0bd19588.pdf>.
- [2] 张全斌，周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154. ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of "carbon peak and carbon neutralization" [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [3] 冯伟忠，李励. “双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 452-461. FENG W Z, LI L. Research and practice on development path of low-carbon, zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under "double carbon" targets [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.
- [4] 朱法华，许月阳，孙尊强，等. 中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 1-8. ZHU F H, XU Y Y, SUN Z Q, et al. Practice and enlightenment of ultra-low emission and energy-saving retrofit of coal-fired power plants in China [J]. Electric Power, 2021, 54(4): 1-8.
- [5] ZHAI H, RUBIN E, GROLE, et al. Dry cooling retrofits at existing fossil fuel-fired power plants in a

- water-stressed region: tradeoffs in water savings, cost, and capacity shortfalls[J]. *Applied Energy*, 2022, 306: 117997.
- [6] KRÖGER D G. Air-cooled heat exchangers and cooling towers: thermal-flow performance evaluation and design[M]. Tulsa, Oklahoma, USA: Pennwell Corporation, 2004: 361-400.
- [7] 丁尔谋. 发电厂空冷技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 37-56.
DING E M. Air cooling technology for power plants [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1992: 37-56.
- [8] DU PREEZ A, KRÖGER D. Effect of wind on performance of a dry-cooling tower[J]. *Heat Recovery Systems & CHP*, 1993, 13(2): 139-146.
- [9] 韩华锋, 陈庆杰, 赵元宾, 等. 基于冷却幅高的间接空冷塔冷却特性分析与评价[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2212-2221.
HAN H F, CHEN Q J, ZHAO Y B, et al. Analysis and evaluation of cooling characteristics of natural draft dry cooling tower based on the cooling approach[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2212-2221.
- [10] 赵振国, 石金玲, 魏庆鼎, 等. 自然风对空冷塔的不利影响及其改善措施[J]. *应用科学学报*, 1998(1): 112-120.
ZHAO Z G, SHI J L, WEI D Q, et al. The engineering improvement for weakening the bad effect of natural wind on the dry cooling towers[J]. *Journal of Applied Sciences*, 1998(1): 112-120.
- [11] MA H, SI F, KONG Y, et al. Wind-break walls with optimized setting angles for natural draft dry cooling tower with vertical radiators[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 326-339.
- [12] MA H, SI F, ZHU K, et al. The adoption of windbreak wall partially rotating to improve thermo-flow performance of natural draft dry cooling tower under crosswind[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 134: 66-88.
- [13] CHEN L, YANG L, DU X, et al. Performance improvement of natural draft dry cooling system by interior and exterior windbreaker configurations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 96: 42-63.
- [14] WANG W, ZHANG H, LÜ J, et al. Ventilation enhancement for a natural draft dry cooling tower in crosswind via windbox installation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 137: 93-100.
- [15] 赵元宾, 孙奉仲. 环境侧风下间接空冷塔水温分布特性的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5367-5376.
ZHAO Y B, SUN F Z. Study on water temperature distribution characteristics of dry cooling tower under crosswind impact[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5367-5376.
- [16] CHEN L, YANG L, DU X, et al. Performance improvement of natural draft dry cooling system by interior and exterior windbreaker configurations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 96: 42-63.
- [17] ZHAO Y, LONG G, SUN F, et al. Effect mechanism of air deflectors on the cooling performance of dry cooling tower with vertical delta radiators under crosswind[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 93: 321-331.
- [18] ZHAO Y, SUN F, LI Y, et al. Numerical study on the cooling performance of natural draft dry cooling tower with vertical delta radiators under constant heat load[J]. *Applied Energy*, 2015, 149: 225-237.
- [19] 陈铁锋, 陈庆杰, 王立东, 等. 间接空冷冷却三角气侧流动传热特性实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(S1): 188-194.
CHEN T F, CHEN Q J, WANG L D, et al. Experimental research on the air side flow and heat transfer characteristics of natural draft dry cooling tower cooling deltas[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(S1): 188-194.
- [20] ZHANG K, LI M, LIU H, et al. A general and rapid method to evaluate the effect of flow maldistribution on the performance of heat exchangers[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 170: 107152.
- [21] WANG Q, ZENG M, MA T, et al. Recent development and application of several high-efficiency surface heat exchangers for energy conversion and utilization[J]. *Applied Energy*, 2014, 135: 748-777.
- [22] KONG Y, WANG W, HUANG X, et al. Wind leading to improve cooling performance of natural draft air-cooled condenser[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 136: 63-83.
- [23] MA H, SI F, WANG J. Study on the effects of apex angle of the delta-type radiator on thermo-flow performance of natural draft dry cooling tower[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148: 119002.
- [24] 赵元宾, 孙奉仲, 杨玉杰, 等. 一种间冷塔垂直三角型散热器的气侧均流系统: CN104613807B[P]. 2016-06-22.

ZHAO Y B, SUN F Z, YANG Y J, et al. A kind of air-side current sharing system of vertical triangular radiator of intercooler cooling tower: CN104613807B [P]. 2016-06-22.

收稿日期: 2023-09-13。

作者简介:



郭滔

郭滔(1974), 男, 高级工程师, 主要研究方向为热能与动力工程, 12080127@chnenergy.com.cn;



于海洋

于海洋(1971), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电厂安全管理与节能管理, 12875667@ceic.com;



冯海波

冯海波(1979), 男, 工程师, 从事火电厂节能减排降耗工作, haibo.feng.f@ceic.com;



袁汉川

袁汉川(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事火电厂节能减排降耗工作, hanchuan.yuan@ceic.com;



田兵

田兵(1993), 男, 工程师, 主要研究方向为火电厂汽轮机本体及其附属系统检修技术, 409258223@qq.com;



杨玉杰

杨玉杰(1978), 女, 工程师, 主要研究方向为节能节水技术管理, 18653183092@163.com;



赵元宾

赵元宾(1981), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高效能量转换及节能技术, 本文通信作者, zhyb@sdu.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)