doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.003

# 一种干湿联合式机械通风冷却塔运行性能的试验研究

王明伟[1],张晓楠[2,3],孙全全[1],焦宗昌[1],孟庆良[1],张永振[1],李　明[1],刘天天[2,3],何锁盈[2,3]
(1. 山东凯翔传热科技有限公司,山东潍坊 261055;2. 山东大学 能源与动力工程学院,济南 250061;
3. 山东大学 高效储能及氢能利用山东省工程研究中心,济南 250061)

**摘　要:**为了解决机械通风空冷塔夏季冷却能力不足的问题,提出了一种干湿联合式机械通风冷却塔,并通过试验研究了3组循环水流量、2组进塔水温及2组风机频率下冷却塔的出塔水温和水蒸发量的变化规律。研究发现,循环水流量越大、进塔水温越低、风机频率越低,则循环水温降也越低。当进塔水温为40 ℃、风机频率为35 Hz时,干湿联合式机械通风冷却塔循环水流量为30,45,60 $m^3/h$时的循环水温降分别为4.74,3.95,3.56 ℃,与机械通风空冷塔相比(循环水温降分别为2.22,1.50,1.05 ℃),水温降进一步降低了2.52,2.45,2.51 ℃;不同循环水流量对应的水蒸发量分别为0.098,0.106,0.142 kg/s。干湿联合式机械通风冷却塔可借助少量水的蒸发,进一步降低空冷塔的出塔水温,有助于提升空冷塔夏季高温时段的冷却能力,研究结果可为空冷塔的节能增效提供理论指导。

**关键词:**机械通风空冷塔;填料;填料直接蒸发预冷;出塔水温;水蒸发量
**中图分类号:**TK514　　**文献标志码:**A

## Experimental study of operating performance of a mechanical draft dry-wet hybrid cooling tower

WANG Mingwei[1],ZHANG Xiaonan[2,3],SUN Quanquan[1],JIAO Zongchang[1],MENG Qingliang[1],
ZHANG Yongzhen[1],LI Ming[1],LIU Tiantian[2,3],HE Suoying[2,3]
(1.Shandong Casen Heat Transfer Technology Co.,Ltd.,Weifang 261055,China;2.School of Energy and Power Engineering,
Shandong University,Jinan 250061,China;3.Shandong Engineering Research Center for High-efficiency Energy Storage
and Hydrogen Energy Utilization,Shandong University,Jinan 250061,China)

**Abstract:**To address the issue of inadequate cooling capacity of mechanical ventilation air-cooled towers during the summer season,a kind of mechanical ventilation cooling tower with dry and wet combined ventilation is proposed,and the variation rules of water temperature and evaporation of cooling tower under 3 groups of circulating water flow,2 groups of inlet water temperature and 2 groups of fan frequency are studied experimentally. It has been discovered that a decrease in circulating water temperature is correlated with an increase in circulating water flow rate and a decrease in both inlet water temperature and fan frequency. When the inlet water temperature of the tower is 40 ℃ and the fan frequency is 35 Hz,the circulating water temperature drop of the combined dry and wet mechanical ventilation cooling tower is 4.74,3.95,3.56 ℃ when the circulating water flow rate is 30,45,60 $m^3/h$,respectively. Compared with the mechanically ventilated air cooling tower(the circulating water temperature drop is 2.22,1.50,1.05 ℃ respectively),the water temperature drop is further reduced by 2.52,2.45,2.51 ℃ . The water evaporation of different circulating water flow rates is 0.098,0.106,0.142 kg/s,respectively. It can be seen that the dry and wet combined mechanical ventilation cooling tower can further reduce the water temperature out of the air-cooling tower with the help of a small amount of water evaporation,which helps to improve the cooling capacity of the air-cooling tower in the summer high temperature period,and the research results can provide theoretical guidance for energy saving and efficiency improvement of air cooling tower.

**Key words:**mechanical draft dry cooling tower;wet media;packing direct evaporative pre-cooling;exit temperature of hot water;water evaporation rate

**收稿日期:** 2023－12－12　**修回日期:** 2024－10－24
**基金项目:** 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0756);潍坊市科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TS1007);山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME008);中国博士后科学基金项目(2023M732102)

## 0 引言

冷却塔是工业冷却过程中的重要设备，冷却塔按照水与空气的接触方式，可以分为空冷塔和湿冷塔。空冷塔中冷却水不与空气直接接触，无蒸发损耗，但在应用过程中会存在冷却能力不足的问题；湿冷塔内空气与水直接接触，存在水的蒸发损耗，故其冷却能力与空冷塔相比更好。

一些学者针对空冷塔在夏季高温工况下冷却能力不足的问题，开展了一系列研究，如蒸发预冷进风[1-2]、直接喷淋散热器[3]等。蒸发冷却技术在一定程度上可以解决空冷塔冷却能力不足的问题。蒸发冷却包括直接蒸发冷却和间接蒸发冷却。直接蒸发冷却中冷却介质和空气直接接触，通过水的蒸发，降低空气温度，冷却过程中既存在显热又存在潜热，是一个降温增湿的过程，直接蒸发冷却技术在炎热干旱地区的冷却效果更好[4]；间接蒸发冷却中空气与水不直接接触，仅存在显热交换，是一个等湿冷却的过程。间接蒸发冷却在间接蒸发冷却空调和冷水机组方面应用广泛[5-8]。

直接蒸发冷却可采用喷淋和填料两种形式，国内外一些学者对此进行了大量的研究。ZALEWSKI 等[9]对蒸发冷却的传热传质过程进行了理论和数值研究，并设计了可以用于蒸发冷却器设计参数优化的程序。CUCE 等[10]对不同类型的高效节能蒸发冷却技术进行了综述，结果表明蒸发冷却技术在干热气候地区节能潜力较大。张贯虹[11]研究发现，蒸发冷却技术可以改善高温干旱地区空冷塔的冷却效率，且改善效果最好的时间为最热月 7 月份，即高温时冷却效果较好。冷却介质是影响蒸发冷却系统冷却效率的重要因素。CHEN 等[12]提出了蒸发冷却系统冷却介质的选择标准。张庆民等[13]研究发现，波纹纸质填料在应用过程中冷却效率高，阻力小，可以作为直接蒸发冷却器的填料。高福东等[14]总结了填料在运行过程中存在的不足，为冷却塔冷却效率的提升提出了新的方向。HE 等[2,15]研究发现，在综合考虑蒸发预冷和额外压降的基础上，薄膜式填料的冷却效果要优于点滴式填料，且在所研究的 3 种薄膜式填料中，预冷效果最好的为 CELdek7060。根据徐梦菲[16]的研究可知，填料 CELdek7060 的厚度为 300 mm 时，冷却效率已超过 90%，此时，再增大填料厚度，对冷却效率的提升效果不明显。张贯虹[11]研究了不同填料布置方式对空冷塔冷却效率的影响，结果表明，夏季高温时，采用圆环形布置方式的冷却性能最优，此外，提出了填料直接蒸发预冷可以采用铰链门的形式来降低不需要填料直接蒸发预冷时的系统阻力。

上述研究大多是针对自然通风空冷塔，而机械通风空冷塔的研究较少。机械通风空冷塔依靠水和空气的显热交换传递热量，从而冷却循环水，受环境温度的影响较大，夏季时会出现冷却能力不足的问题，为解决此问题，有必要探究填料直接蒸发预冷系统对机械通风空冷塔冷却性能的提升效果。为此，本文搭建了试验测试平台，测量了填料直接蒸发预冷进风的机械通风空冷塔的运行性能，并与无填料直接蒸发预冷的机械通风空冷塔进行了对比研究，为空冷塔的节能增效提供理论指导。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设计

试验目的是研究不同进塔水温、水流量和风机频率下干湿联合冷却塔的运行性能变化规律，主要包括出塔水温和水蒸发量。试验时要求环境稳定，空气流通较好，天气晴朗。试验时干湿联合冷却塔采用 V 型翅片管换热器，冷却塔和 V 型翅片管换热器的基本参数见表 1。

**表 1 干湿联合冷却塔和 V 型翅片管换热器的基本参数**

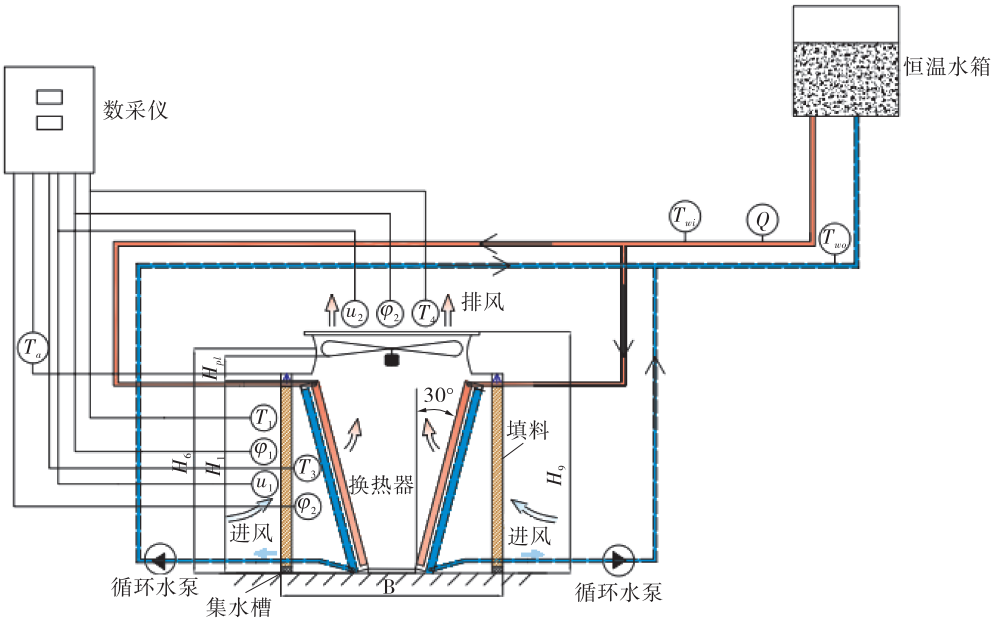
Tab.1 Basic parameters of dry and wet combined cooling tower and V-fin tube heat exchanger

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 塔高 $H_9$/m | 4.52 |
| 塔宽 $B$/m | 4.47 |
| 风机高度 $H_6$/m | 3.95 |
| 气室高度 $H_{pl}$/m | 0.65 |
| 换热器高度 $H_1$/m | 3.30 |
| V 型换热器夹角$\theta$/(°) | 60 |
| 管束数 $n_b$ | 8 |
| 管排数 $n_r$ | 4 |
| 每排管数 $n_{tr}$ | 50 |
| 管流程 $n_{tp}$ | 4 |
| 单管长 $L$/m | 2.60 |

试验主要研究了 3 组循环水流量、2 组进塔水温以及 2 组风机频率下冷却塔的出塔水温和水蒸发量的变化规律。3 组循环水流量分别为 60，45，30 $m^3/h$；2 组进塔水温分别为 45，40 ℃；2 组风机频率分别为 35，50 Hz。

### 1.2 试验装置

干湿联合冷却塔的模型框架由304钢板制作而成。据研究可知[16]，厚度为300 mm的CELdek7060冷却效果相对较好，故选取该填料进行试验研究。试验时，首先，对恒温水箱中的循环水进行加热，同时，开启填料预冷系统的喷淋，使得喷淋水充分润湿填料。待恒温水箱中水加热至所需温度时，再打开进水阀，由水泵将循环水送入冷却塔的V型换热器中，循环水在换热器中与经过填料直接蒸发预冷后的空气进行热量交换，空气温度升高，循环水温度降低。最后，冷却后的循环水经水泵送回到恒温水箱，完成循环，试验系统示意如图1所示。

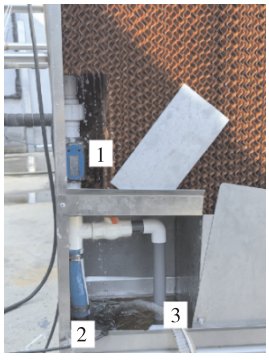



$Q$– 水流量；$T_{wi}$– 进塔水温；$T_{wo}$– 出塔水温；$T_a$– 喷淋水温；$T_1$– 进塔空气温度；$T_3$– 预冷后空气温度；$T_4$– 出塔空气温度；$\varphi_1$– 进塔空气湿度；$\varphi_2$– 出塔空气湿度；$u_1$– 进塔风速；$u_2$– 出塔风速。

图1 试验系统示意

Fig.1 Experimental system

填料直接蒸发预冷系统里的水由两台2.2 kW的水泵（型号100LP4–2.2）驱动，该系统主要包括水泵、集水槽、喷嘴、涡轮流量计等部件，试验设备如图2所示。




1– 涡轮流量计；2– 水泵；3– 集水槽。

图2 填料直接蒸发预冷系统

Fig.2 Direct evaporative precooling system of packing

试验开始时，打开水泵，水由水泵输送至填料顶部的喷嘴，均匀喷洒在填料上，充分润湿填料。一部分喷淋水与空气进行传热传质，蒸发到进风中；另一部分喷淋水顺着填料流到箱体底部的集水槽，经水泵循环利用。试验过程中，需观察集水槽中水量变化，及时进行补水。

安装在干湿联合冷却塔顶部的风机为空气流动提供动力，研究不同进塔水温和水流量的影响时，风机频率保持在35 Hz。研究风机频率的影响时，通过变频控制箱来调节风机频率。

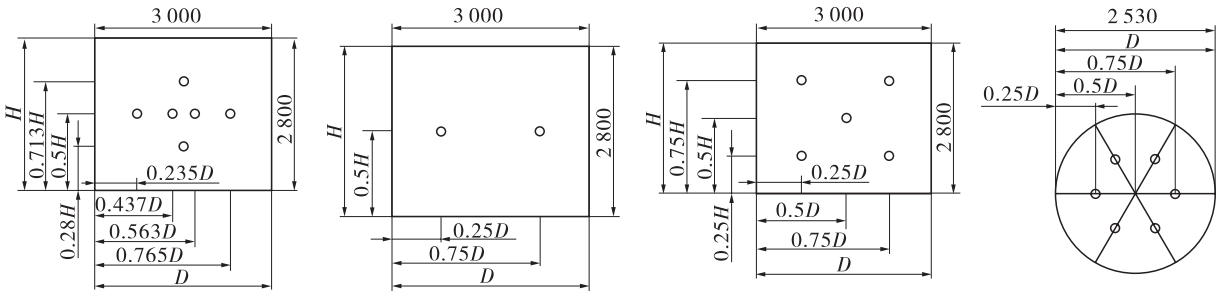
### 1.3 试验步骤

试验需要测量的参数主要包括进塔风速、温度、湿度，填料直接蒸发预冷后的空气温度、湿度，出塔风速、温度、湿度，进出塔水温，循环水流量，填料直接蒸发预冷系统的水温、水流量等，测量所用的仪器仪表信息见表2，测点布置如图3所示。

表 2　测量参数及仪器仪表

Tab.2　Measuring parameters and instruments

| 测量参数 | 所用仪器 | 仪器精度 |
|---|---|---|
| 进塔空气温湿度、预冷后空气温湿度、出塔空气温湿度 | Cos-03 温湿度传感器 | 温度：±0.2 ℃；湿度：±2% |
| 进塔风速、出塔风速 | 德图 testo425 热线风速仪 | 0.03 m/s+5% 测量值 |
| 喷淋水温 | Pt100 温度传感器 | ±0.1 ℃ |
| 进出塔水温 | FDWBP51ET（270×120）TH 温度变送器 | 0.25% |
| 循环水流量 | FDL94-LWCY-DN125-ERM2 涡轮流量计 | 1.5 级 |
| 喷淋水流量 | 涡轮电子流量计 | ±0.5% |
| 数据采集 | CH6 系列智能控制数采仪 | |




（a）进塔风速测点　（b）进塔温湿度测点　（c）预冷后空气温湿度测点　（d）出塔风速及温湿度测点

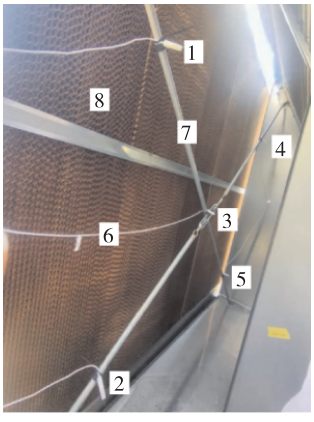
图 3　测点布置示意

Fig.3　Measuring point layout

试验时，循环水温度及流量分别由水温仪和流量计测量。填料直接蒸发预冷系统的喷淋水温由 PT100 温度传感器测量，通过测量进塔风速来计算进塔风量，进塔风速测点的布置如图 3（a）所示，共 6 个测点。每个测点测量多组数据，取每个测点的平均值作为该测点的风速值，取 6 个测点的平均值作为进塔风速。

选取外界环境较为稳定的时段进行测量，且进塔空气温湿度即为环境温湿度，故进塔空气温湿度的测点布置如图 3（b）所示。进塔温度共 2 个测点，每个测点测量多组数据，取每个测点的平均值作为该测点的温度值，取 2 个测点的平均值作为进塔温度；进塔湿度共 2 个测点，每个测点测量多组数据，取每个测点的平均值作为该测点的湿度值，取 2 个测点的平均值作为进塔湿度。

为了测量填料直接蒸发预冷后空气的温湿度，在填料的背风侧（即冷却塔经过填料后）安装了温湿度测点，测点布置如图 3（c）所示。填料背风侧的温湿度测点通过冷却塔支架和铁丝固定，如图 4 所示。




1~5- 温湿度传感器探头；6- 温湿度传感器延长线；7- 冷却塔支架；8- 填料。

图 4　试验时预冷后空气温湿度测点布置

Fig.4　Arrangement of air temperature and humidity measurement points after pre-cooling in the experiment

出塔参数的测点布置如图 3（d）所示，共 6 个测点。出塔参数主要测量了风速、温度、湿度。各参数均有 6 个测点，每个测点测量多组数据，取每个测点的平均值作为该测点的测量值，取 6 个

测点的平均值作为出塔参数。

试验开始前，需检查冷却塔箱体是否漏风，集水槽中水量是否充足，电路是否正确连接等。待准备工作完成后，打开风机，调节风机频率以满足测量需要的风速，启动填料直接蒸发预冷系统的喷淋水泵，润湿填料。待试验工况稳定后进行测量，每个测点均测量多组数据，选取平均值作为该测点的测量结果。每次改变试验工况时，不能立即进行测量，为了确保塔内空气流场、循环水达到稳定状态，应等待 10 min 以上再进行测量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冷却塔性能对比相关参数计算

#### 2.1.1 机械通风空冷塔的数值计算方法

冷却塔的运行满足能量方程和驱动力方程，其中，能量方程为[17]：

$$Q = m_a c_{pam}\left(T_{a4} - T_{a3}\right) = m_w c_{pw}\left(T_{wi} - T_{wo}\right) \quad (1)$$

式中，$Q$ 为冷却塔换热量，W；$m_a$ 为空气质量流量，kg/s；$c_{pam}$，$c_{pw}$ 为空气、水的比热系数，J/(kg·k)；$T_{a3}$，$T_{a4}$ 为空气流经换热器前、后的温度，K；$m_w$ 为管内流体质量流量，kg/s；$T_{wi}$，$T_{wo}$ 为冷却塔进、出塔水温，K。

也可以用 e-NTU 法计算冷却塔换热量：

$$Q = em_a c_{pam}\left(T_{wi} - T_{a3}\right) \quad (2)$$

式中，$e$ 为换热器实际换热量与最大可能换热量的比值。

冷却塔的驱动力方程是风机驱动力与塔内各部分阻力的平衡：

$$\Delta p_a = K_{Fs}\left(m_a / A_c\right)^2 / \left(2\rho_{a4}\right) \quad (3)$$

式中，$\Delta p_a$ 为空气流经冷却塔的各部分阻力之和；$K_{Fs}$ 为风机静压升系数；$A_c$ 风机机匣面积，$m^2$；$\rho_{a4}$ 为流经换热器后的空气密度，$kg/m^3$。

依据上述公式，编写了 MATLAB 迭代计算程序，迭代过程中冷却塔的参数、换热器参数、循环水流量、循环水入口温度为给定值，迭代变量为冷却塔的出塔空气温度。通过计算程序对机械通风空冷塔的运行进行仿真计算，从而得到冷却塔的运行参数，如出塔水温、水蒸发量等。

#### 2.1.2 干湿联合式冷却塔的水蒸发量

降低冷却塔的水损耗，对节约水资源意义重大。干湿联合式机械通风冷却塔的水蒸发量 $q$ 可由下式计算得到：

$$q = \left[\rho A\mu\left(d_2 - d_1\right)\right] / 1\,000 \quad (4)$$

式中，$\rho$ 为空气密度，kg/s；$A$ 为进风口面积，$m^2$；$\mu$ 为进塔空气速度，m/s；$d_2$ 为预冷后空气含湿量，g/kg；$d_1$ 为预冷前空气含湿量，g/kg。

#### 2.1.3 出塔水温

通过对比干湿联合式机械通风冷却塔和机械通风空冷塔的出塔水温，可以更好地体现干湿联合式机械通风冷却塔的冷却效果。冷却塔的运行满足式(1)和式(2)的能量方程，依据测量数据和式(1)可计算出塔水温。

### 2.2 各因素对干湿联合冷却塔运行性能的影响规律

#### 2.2.1 循环水流量的影响分析

表 3 列出进塔水温为 40 ℃、风机功率为 35 Hz 时，干湿联合式机械通风冷却塔在不同循环水流量下的出塔水温和水蒸发量。由表可知，冷却塔出塔水温随着循环水流量的增大而升高。对于干湿联合式机械通风冷却塔，当循环水流量分别为 30，45，60 $m^3/h$ 时，对应的出塔水温分别为 35.26，36.05，36.44 ℃，即循环水温降分别为 4.74，3.95，3.56 ℃。通过计算分析机械通风空冷塔发现，在进塔水温为 40 ℃、风机功率为 35 Hz 工况下，当循环水流量分别为 30，45，60 $m^3/h$ 时，机械通风空冷塔的出塔水温分别为 37.78，38.50，38.95 ℃，即循环水温降分别为 2.22，1.50，1.05 ℃。与机械通风空冷塔相比，干湿联合式机械通风冷却塔的水温降进一步降低了 2.52，2.45，2.51 ℃。

**表 3 不同循环水流量下的出塔水温和水蒸发量**

Tab.3 Water temperature and water evaporation of exit tower under different circulating water flow

| 参数 | 循环水流量 / ($m^3 \cdot h^{-1}$) | 风机频率 / Hz | 进塔水温 / ℃ | 出塔水温 / ℃ | 循环水温降 / ℃ | 水蒸发量 / ($kg \cdot s^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 30 | 35 | 40 | 35.26 | 4.74 | 0.098 |
| | 45 | 35 | 40 | 36.05 | 3.95 | 0.106 |
| | 60 | 35 | 40 | 36.44 | 3.56 | 0.142 |

当冷却塔进塔水温相同时，循环水流量越大，水蒸发量越大，水损耗也越大。当循环水流量分别为 30，45，60 $m^3/h$，对应的水蒸发量分别为 0.098，0.106，0.142 kg/s。

#### 2.2.2 进塔水温的影响分析

表 4 列出循环水流量为 60 $m^3/h$、风机功率为 35 Hz 时，干湿联合式机械通风冷却塔在不同进

塔水温下的出塔水温和水蒸发量。

表 4 不同进塔水温下的出塔水温和水蒸发量

Tab.4 Exit water temperature and water evaporation at different inlet water temperature

| 参数 | 循环水流量 /（$m^3 \cdot h^{-1}$） | 风机频率 / Hz | 进塔水温 / ℃ | 出塔水温 / ℃ | 循环水温降 / ℃ | 水蒸发量 /（$kg \cdot s^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 60 | 35 | 40 | 36.44 | 3.56 | 0.142 |
| | 60 | 35 | 45 | 40.68 | 4.32 | 0.177 |

由表可知，当循环水流量相同时，进塔水温越高，对应的出塔水温也越高，循环水温降越大，冷却效果越好。这是因为进塔水温越高，循环水与预冷后空气间的温差越大，换热驱动力越大，故冷却效果越好。

对于干湿联合式机械通风冷却塔，当进塔水温为 40，45 ℃时，对应的出塔水温分别为 36.44，40.68 ℃，即循环水温降分别为 3.56，4.32 ℃；通过计算分析机械通风空冷塔发现，在循环水流量为 60 $m^3$/h、风机功率为 35 Hz 的工况下，当进塔水温为 40，45 ℃时，机械通风空冷塔对应的出塔水温分别为 38.95，43.54 ℃，即循环水温降分别为 1.05，1.46 ℃。干湿联合式机械通风冷却塔与机械通风空冷塔相比，干湿联合式机械通风冷却塔的水温降进一步降低了 2.51，2.86 ℃。

当循环水流量相同时，进塔水温越高，水蒸发量越大，水损耗也越大。对于干湿联合式机械通风冷却塔，进塔水温为 40，45 ℃所对应的水蒸发量分别为 0.142，0.177 kg/s。

2.2.3 风机频率的影响分析

表 5 列出循环水流量为 45 $m^3$/h、进塔水温为 40 ℃时，干湿联合式机械通风冷却塔在不同风机频率下的出塔水温和水蒸发量。

表 5 不同风机频率下的出塔水温和水蒸发量

Tab.5 Water temperature and water evaporation of exit tower at different fan frequencies

| 参数 | 循环水流量 /（$m^3 \cdot h^{-1}$） | 风机频率 / Hz | 进塔水温 / ℃ | 水蒸发量 /（$kg \cdot s^{-1}$） | 循环水流量 /（$m^3 \cdot h^{-1}$） | 水蒸发量 /（$kg \cdot s^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 45 | 35 | 40 | 36.05 | 3.95 | 0.106 |
| | 45 | 50 | 40 | 35.67 | 4.33 | 0.120 |

由表可知，风机频率越大，出塔水温越低。这是因为，风机频率越高，冷却塔的通风量越大，故冷却效果越好。对于干湿联合式机械通风冷却塔，在循环水流量为 45 $m^3$/h、进塔水温为 40 ℃的工况下，当风机频率分别为 35，50 Hz 时，出塔水温分别为 36.05，35.67 ℃，即循环水温降分别为 3.95，4.33 ℃；通过计算分析机械通风空冷塔发现，在循环水流量为 45 $m^3$/h、进塔水温为 40 ℃的工况下，当风机频率分别为 35，50 Hz 时，机械通风空冷塔的出塔水温分别为 38.50，37.93 ℃，循环水温降分别为 1.50，2.07 ℃。风机频率越大，水蒸发量越大，喷淋水损耗越大。当进塔水温均为 40 ℃时，对应的水蒸发量分别为 0.106，0.120 kg/s。

2.3 误差分析

试验时，每种工况下预冷后空气的温湿度有 5 个测点，进塔和出塔风速分别有 6 个测点，进塔空气的温湿度有 2 个测点，出塔空气的温湿度有 6 个测点。为了减小误差，取各个测点的算数平均值作为该测点的测量值，相比于单次测量，该值的离散程度更小[18-20]。根据 ISO 指南[21]对试验误差进行分析，结果见表 6。

表 6 试验误差

Tab.6 Experimental error

| 参数 | 传感器测量范围 | 传感器精度 | 最大平均标准差 |
|---|---|---|---|
| 出塔水温 /℃ | −50~100 | 0.25% | 0.270 |
| 进塔水温 /℃ | −50~100 | 0.25% | 0.250 |
| 循环水流量 /（$m^3 \cdot h^{-1}$） | 0~250 | ±0.50% | 0.210 |
| 水蒸发量 /（$kg \cdot s^{-1}$） | | | 0.011 |

传感器精度是基础误差，标准差 $s$ 计算式为：

$$s=\left[\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)^2/\left(n-1\right)\right]^{1/2} \quad (5)$$

式中，$n$ 为测量点个数；$\overline{X}$ 为每个测点的算数平均值，$\overline{X}=(X_1+X_2+\cdots+X_n)/n$。

平均标准差 $\sigma_m$ 计算式为：

$$\sigma_m=s/n^{1/2} \quad (6)$$

## 3 结论

（1）循环水流量越大、进塔水温越低、风机频率越低时，循环水温降越小；循环水流量越小、进塔水温越低、风机频率越低时，水蒸发量越小，水损耗越少。

（2）在进塔水温为 40 ℃、风机频率为 35 Hz 条件下，循环水流量分别为 30，45，60 $m^3$/h 时，干湿联合式机械通风冷却塔的循环水温降分别为 4.74，3.95，3.56 ℃，与机械通风空冷塔相比（循环水温降分别为 2.22，1.50，1.05 ℃），水温降进一

步降低了 2.52,2.45,2.51 ℃。不同循环水流量对应的水蒸发量分别为 0.098,0.106,0.142 kg/s。

干湿联合式机械通风冷却塔可借助少量水的蒸发,进一步降低空冷塔的出塔水温,有助于提升空冷塔夏季高温时段的冷却能力,为空冷塔的节能增效提供理论指导。

**参考文献:**


[1] 韩强,冯雷,刘严雪,等 . 侧风对喷淋蒸发预冷进风冷却塔换热性能的影响[J]. 流体机械,2022,50(10):38 – 46.
HAN Q,FENG L,LIU Y X,et al.The influence of crosswind on the thermal performance of cooling tower with spray evaporative pre-cooling of the inlet air[J]. Fluid Machinery,2022,50(10):38 – 46.

[2] HE S Y,GURGENCI H,GUAN Z Q,et al. Pre-cooling with munters media to improve the performance of natural draft dry cooling towers[J].Applied Thermal Engineering,2013,53(1):67 – 77.

[3] KROGER D G,BERGLES A E.Air-cooled heat exchangers and cooling towers:Thermal-flow performance evaluation and design[M].Tulsa:Pennwell Corporation,2004.

[4] 张玉东,宣永梅,黄翔 . 蒸发冷却适应性分区进展研究[J]. 制冷与空调(四川),2013,27(1):33 – 38.
ZHANG Y D,XUAN Y M,HUANG X.Study on the progress of adaptive partition of the evaporative cooling[J].Refrigeration & Air Conditioning,2013,27(1):33 – 38.

[5] 陈梦,黄翔,金洋帆,等 . 数据中心用间接蒸发冷却空调机组性能测试及适用性分析[J]. 流体机械,2022,50(9):7 – 13.
CHEN M,HUANG X,JIN Y F,et al.Performance test and applicability analysis of indirect evaporative cooling air conditioning unit for data center[J].Fluid Machinery,2022,50(9):7 – 13.

[6] 常健佩,黄翔,安苗苗,等 . 蒸发冷却冷水机组的原理、性能与适用性分析[J]. 化工学报,2020,71(增刊 1):236 – 244.
CHANG J P,HUANG X,AN M M,et al.Analysis of principle,performance and applicability of indirect evaporative water chiller[J].CIESC Journal,2020,71(Sup.1):236 – 244.

[7] 宋祥龙,韩玉,黄翔 . 立管式间接蒸发冷却器的结构与性能试验研究[J]. 流体机械,2023,51(1):13 – 17.
SONG X L,HAN Y,HUANG X.Structure and performance experimental study of vertical tube indirect evaporative cooler[J].Fluid Machinery,2023,51(1):13 – 17.

[8] 靳如意,黄翔,王颖,等 . 数据中心用高分子板翅式间接蒸发冷却器换热性能的试验研究[J]. 流体机械,2022,50(12):7 – 13.
JIN R Y,HUANG X,WANG Y.Experimental study on heat transfer performance of polymer plate-fin indirect evaporative cooler for data center[J].Fluid Machinery,2022,50(12):7 – 13.

[9] ZALEWSKI W,GRYGLASZEWSKI P A.Mathematical model of heat and mass transfer processes in evaporative fluid coolers[J].Chemical Engineering and Processing-Process Intensification,1997;36(4):271 – 280.

[10] CUCE P M,RIFFAT S.A state of the art review of evaporative cooling systems for building applications[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews,2016,54:1240 – 1249.

[11] 张贯虹 . 蒸发预冷进风空冷塔的性能优化及其经济性分析[D]. 济南:山东大学,2019.
ZHANG G H.Performance optimization and economic analysis of pre-cooled natural draft dry cooling towers[D].Jinan:Shangdong University,2019.

[12] CHEN H C,YU S Z,ZHU G H,et al.Research on evaporative cooling medium for large generator[C]// Proc.17th IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS),Hangzhou,PEOPLES R CHINA,2014:2369 – 2371.

[13] 张庆民,陈沛霖 . 空气经过淋水纸质填料时的热湿交换过程[J]. 同济大学学报(热能工程版),1995(6):648 – 653.
ZHANG Q M,CHEN P L.Heat and mass transfer performance of a domestic product of sprayed corrugated cellulose media[J].Journal of Tongji University(Natural Science),1995(6):648 – 653.

[14] 高福东,孙奉仲,王凯 . 电厂冷却塔填料的发展与研究[J]. 电站系统工程,2007(5):7 – 10.
GAO F D,SUN F Z,WANG K.Development and study of cooling tower fill in power plant[J].Power System Engineering,2007(5):7 – 10.

[15] 何锁盈,孙奉仲,高明,等 . 基于填料蒸发预冷原理的自然通风干式冷却塔夏天运行效率的优化[J]. 太阳能学报,2017,38(11):3022 – 3028.
HE S Y,SUN F Z,GAO M,et al.Performance optimization of natural draft day cooling tower using wetten-medium evaporative per-cooling[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2017,38(11):3022 – 3028.


(下转第 73 页)

heat exchanger under heat and release storage condition [J].Fluid Machinery,2023,51(6):46 – 52.

[17] 李琛,黄晓岚,金伟平,等.明胶/魔芋葡甘聚糖相行为调控共混膜结构及在热封包装中的应用[J].包装与食品机械,2024,42(3):8 – 17.
LI C,HUANG X L,JIN W P,et al.Regulation of phase behavior in gelatin/konjac glucomannan blend films and application in heat-seal packaging[J].Packaging and Food Machinery,2024,42(3):8 – 17.

[18] 姚小彦,陈晓文,黄勇,等.跨临界 $CO_2$ 储能系统中填充床蓄冷性能的动态分析[J].流体机械,2024,52(6):49 – 57.
YAO X Y,CHEN X W,HUANG Y,et al.Dynamic analysis of the performance of filled-bed cooling storage in transcritical carbon dioxide energy storage systems [J].Fluid Machinery,2024,52(6):49 – 57.

[19] 吴志伟,王通,王彦龙,等.高效管换热器壳程传热强化效果及机理[J].压力容器,2023,40(8):44 – 52.
WU Z W,WANG T,WANG Y L,et al.Shell-side heat transfer enhancement effects and mechanisms of heat exchangers with high-efficiency tubes[J].Pressure Vessel Technology,2023,40(8):44 – 52.

[20] LIU J,WANG F H,CAI W L,et al.Numerical study on the effects of design parameters on the heat transfer performance of coaxial deep borehole heat exchanger [J].International Journal of Energy Research,2019,43(12):6337 – 6352.

**作者简介**:谷伟(1981),男,副总工程师,从事供热行业,涉及暖通、自动化、空气能、地热能等新能源应用及运营,E – mail:guwei4532@126.com。

**通信作者**:丛培德(1969),男,主要从事地热能等新能源开发及建筑供热、供冷应用,通信地址:300300 天津市河东区卫国道 189 号天津地热开发有限公司,E – mail:congpd168@126.com。

**本文引用格式**:
谷伟,丛培德,李博,等.热储层渗流对中深井地埋管系统换热性能及地层温度恢复的影响[J].流体机械,2025,53(2):65 – 73.
GU W,CONG P D,LI B,et al.The influence of thermal reservoir seepage on the heat exchange performance and stratum temperature recovery in medium-deep borehole exchanger systems[J].Fluid Machinery,2024,53(2):65 – 73.

(上接第 22 页)

[16] 徐梦菲.机械通风干湿联合冷却塔的换热性能及其运行调控研究[D].济南:山东大学,2022.
XU M F.Study on heat transfer performance and operation regulation of mechanical draft dry-wet hybrid cooling tower[D].Jinan:Shandong University,2022.

[17] 庞慧敏.防风板与喷淋预冷耦合作用下空冷塔热力性能的模拟研究[D].济南:山东大学,2023.
PANG H M.Simulation on thermal performance of natural draft dry cooling towers under the coupling effect of windbreaks and spray pre-cooling[D].Jinan:Shandong University,2023.

[18] 李启华,余锦,刘菊英.标准偏差和平均值的标准偏差探讨[J].金属材料与冶金工程,2013,41(5):45 – 48.
LI Q H,YU J,LIU J Y,et al.Discussion standard deviation and standard deviation of the mean value[J].Mental Materials and Metallurgy Engineering,2013,41(5):45 – 48.

[19] 谢春法,刘虎,尹清斌,等.核电钢质安全壳形位公差的控制方法[J].压力容器,2023,40(4):80 – 86.
XIE C F,LIU H,YIN Q B,et al.Shape and position tolerance control method of nuclear power steel containment[J].Pressure Vessel Technology,2023,40(4):80 – 86.

[20] 李根银,郁冶,王异成,等.风电场功率预测的研究进展及发展趋势[J].排灌机械工程学报,2024,42(8):778 – 784.
LI G Y,YU Y,WANG Y C,et al.Research progress and development trend of wind farm power prediction [J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2024,42(8):778 – 784.

[21] JCGM/WGI.Evaluation of measurement data guide to the expression of uncertainty in measurement:JCGM 100:2008[S].Joint Committee for Guides in Metrology,2008.

**作者简介**:王明伟(1984),男,助理工程师,主要从事冷却塔节能节水技术研究,E – mail:wangmingwei@casen-group.com。

**通信作者**:何锁盈(1987),男,博士,副教授,主要从事传热传质强化与过程节能研究,通信地址:250061 山东省济南市历下区经十路 17923 号山东大学千佛山校区,E – mail:suoyinghe@hotmail.com。

**本文引用格式**:
王明伟,张晓楠,孙全全,等.一种干湿联合式机械通风冷却塔运行性能的试验研究[J].流体机械,2025,53(1):16 – 22.
WANG M W,ZHANG X N,SUN Q Q,et al.Experimental study of operating performance of a mechanical draft dry-wet hybrid cooling tower[J].Fluid Machinery,2024,53(1):16 – 22.