文章编号:0253-4339(2024) 03-0050-14
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2024.03.050

冷却塔冷却技术的应用与优化

余志康　黄世芳　张小松　伍文聪

(东南大学能源与环境学院　南京　210096)

摘　要　冷却塔冷却是指利用冷却塔来散去生产或生活中产生的废热,从而降低循环水温的技术。与其他制冷方式相比,具有制冷效果好、耐腐蚀、成本低等优势。基于近年来国内外文献分析,主要从冷却塔冷却的应用及性能优化两方面进行阐述。对冷却塔在工业冷却和建筑供冷方面的应用及相关研究进行了归纳分析,并对其在碳捕集和余热回收方面的应用进行了拓展分析。在性能优化方面,总结了包括模型优化、结构优化和运行优化三个方向的诸多方法,重点讨论了该技术在当前研究与应用中依旧面临的挑战,并指出了未来的发展方向,助力于冷却塔系统高效、绿色和稳定运行。

关键词　冷却塔;蒸发冷却;热力特性;性能优化

中图分类号:TQ053.5;TU831　　**文献标识码**:A

Application and Optimization of Cooling Technology for Cooling Tower

Yu Zhikang　Huang Shifang　Zhang Xiaosong　Wu Wencong

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract　Cooling towers dissipate waste heat generated in industrial or domestic processes, thereby reducing the temperature of circulating water. Compared to other cooling methods, it has the advantages of effective cooling, corrosion resistance, and low cost. This paper discusses the application and performance optimization of cooling towers based on a literature review of recent domestic and international studies. It summarizes and analyzes the applications and related research on cooling towers for industrial cooling and building cooling. It also extends and analyzes cooling tower's application in carbon capture and waste heat recovery. Various methods have been reviewed for performance optimization, including model, structural, and operational optimization. This paper highlights the challenges that still exist in the state-of-the-art and discusses its future development directions, which will facilitate efficient, green, and stable operation for future cooling tower systems.

Keywords　cooling tower; evaporative cooling; thermodynamic characteristics; performance optimization

由于人口快速增长,世界能源需求正在上升。能源消耗的增加主要是因为更高的生活要求,以及工业、建筑和交通的迅速扩张。这些行为使得能源短缺和温室效应成为当今世界面临的重大挑战。全球能源消耗中有很大一部分是专门用于建筑供冷,以满足热舒适性的要求[1]。电力需求在全球能源消费中的占比如图 1 所示,制冷能耗占全球能源消耗需求总量的比例最高(约 37%)[2]。进入 21 世纪,气候湿热、人口众多的发展中国家有可能采用更多的制冷空调系统。至 2050 年底,全球家用空调需求预计将增长 2/3[3]。鉴于全球严重的能源和环境问题,许多国家正在优化现有制冷系统和探索新型制冷技术,以提升他们的电能使用效率[4]。

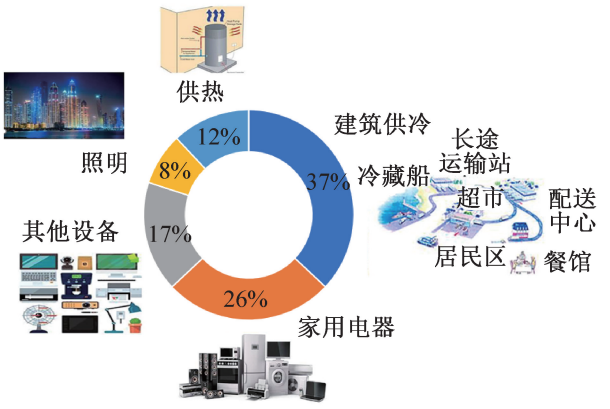


图 1 电力需求在全球能源消费中的占比[2]

Fig.1 Share of electricity demand in global energy consumption[2]

冷却塔作为制冷系统中的重要散热设备,广泛应用于各类国民支柱产业中。其历史最早可以追溯到 19 世纪,蒸汽机的发展推动了冷却塔的开发,最初是以冷凝器的形式控制机车引擎的温度。直至 1902 年,工程师 Barnard 设计了一种无风扇自冷塔。1918

收稿日期:2023-04-17;修回日期:2023-06-10;录用日期:2023-07-31

年,荷兰工程师 Gerard Kuypers 首次获得双曲面冷却塔的专利,并于同年在海尔伦附近建成[5]。经过一百多年的发展,冷却塔的设计和制造技术得到了大幅提升。21 世纪以来,随着环保和能源节约意识的不断增强,人们开始关注冷却塔的节能、减排等问题,也促使冷却塔技术的不断创新和改进。

本文基于前人对冷却塔冷却技术的研究进行了较为全面的回顾,阐述了基本原理,分析了应用现状,并重点讨论了目前应用中面临的挑战,同时对冷却塔冷却应用的优化和创新方向进行了总结与展望,可以为冷却塔冷却的应用推广和性能优化提供参考。

1 冷却塔原理及分类

长期以来,冷却塔一直是各类支柱产业中广泛使用的冷却设备之一。其工作原理是将热量经水/空气界面由热水传递至空气,与其他工业换热器相比,冷却塔可以轻松提高传热率并降低能耗(图 2)[6]。冷却塔需要在流动的空气下将热水均匀分布于填料层上,通过降低水温来带走热量。随着能源成本上升和水资源短缺,人们也在努力提高冷却塔的效率以节省能源成本。据评估,现有冷却塔系统运行低效,约有 5%的热能被浪费。因此,提高冷却塔的效率对节能至关重要。

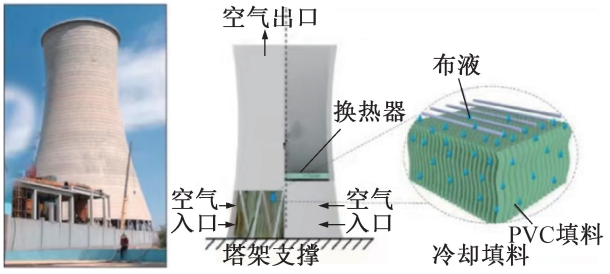


图 2 冷却塔及内部填料结构[6]

Fig.2 Illustration of cooling tower and its internal packing[6]

根据气流入塔方式的不同可以把冷却塔分为两类,即自然通风冷却塔和机械通风冷却塔[5]。在自然通风冷却塔中,热传递完全是通过冷却塔内部循环的空气自然对流发生的,由于与外界空气的密度差[7],温暖潮湿的空气自然上升,从而产生通过冷却塔的气流(图 3)。在机械通风冷却塔中,通过风机的作用使冷却塔内实现空气循环。根据风机工作方式的不同又可将机械通风冷却塔分为引风式和鼓风式,如图 4 所示。

根据冷却塔传热方式的不同还可以分为干式冷却塔、湿式冷却塔和干湿式冷却塔[8]。在干式冷却塔中,工作流体与环境空气分离,换热过程类似于管式换热器,对流传热起主要作用。除了内部结构外,其形状也与湿式冷却塔(图 2)相似,湿式冷却塔是利用蒸发冷却的原理进行散热。干湿式冷却塔是将干式和湿式冷却塔有机结合,组合形式包括串联和并联,该新型冷却塔可将耗水量降至传统湿式冷却塔的约 20%,其结构如图 5 所示。

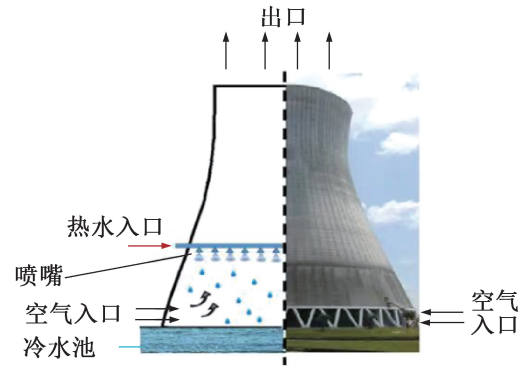


图 3 自然通风冷却塔(湿式)[5]

Fig.3 Natural draft cooling tower (wet type)[5]

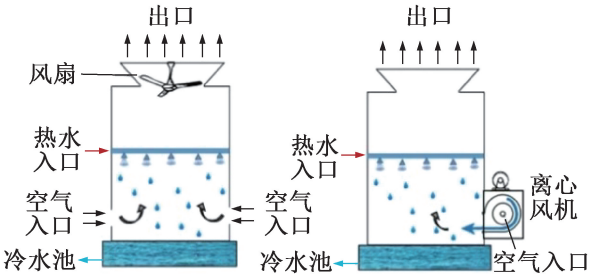


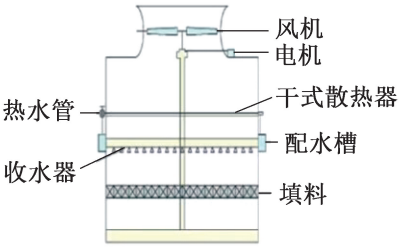
图 4 机械引风式(左)和鼓风式(右)[5]

Fig.4 Mechanical draft induced type (left) and forced type (right)[5]

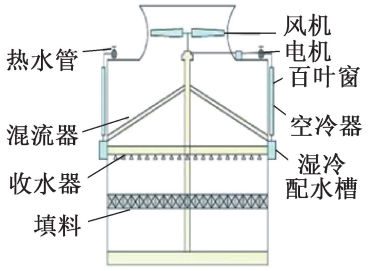
此外,根据水气接触方式的不同,还可将冷却塔分为开式冷却塔和闭式冷却塔。开式冷却塔是通过水与空气的直接接触,同时由风机带动冷却塔内气流流动,从而达到蒸发冷却的目的。闭式冷却塔一般无填料,核心部件为盘管,需冷却介质在管内流动,与环境空气在塔内进行间壁换热。水气流动方向的差异还可将冷却塔分为逆流式、横流式和混流式。因此,不同类型的冷却塔其性能有所差异,应针对不同的需求和环境条件选用不同类型的冷却塔。

2 冷却塔冷却应用

由于冷却塔冷却具有换热效果好、耐腐蚀、成本低等优势,在生产生活的各领域应用非常广泛。本节针对冷却塔冷却系统在工业冷却、建筑供冷和其他方面的应用进行了介绍与讨论。



（a）串联式干湿式逆流塔



（b）并联式干湿式逆流塔

图 5 干湿式冷却塔[8]

Fig.5 Dry-wet cooling tower[8]

2.1 工业冷却

工业生产中产生的大量废热需要通过冷却设备散发出去，否则会对生产设备和生产环境产生不良影响。冷却塔冷却技术能够很好地解决该问题，同时能够改善传统制冷技术高能耗、低效率和环境污染等现象，因此该技术广泛应用于石油化工[9-10]、能源电力[11-13]和制造加工[14-15]等行业。

为了提升系统性能和经济性能，化工领域内，A. B. Hernández 等[10]研究了硝酸厂生产过程中的中间冷却温度对其热效率和能源成本的影响，并提供了有效性经济分析和先进的有效性经济指标的计算方法。能源领域内，Chen Hua 等[11]为解决大功率电子器件和高效能量转换对高效冷却技术的需求，提出了高热通量耗散和精确温度控制的前瞻性冷却策略，将余热再利用和高峰负荷转移至喷雾冷却中，研究表明采用的喷雾冷却系统可以提高能量转换效率、功率密度，且节能节水。电力领域内，对于联合循环发电厂而言，两种最主要的冷却系统分别是湿式冷却塔系统和干式冷却塔系统[12]。I. H. Njoku 等[13]针对尼日利亚 5 个具有不同气候条件和用水成本的典型热带地区，对配备湿式和干式冷却系统的汽轮机循环进行了技术经济对比分析。研究表明，高温环境会增加风冷系统的尺寸和成本要求，而相对湿度会显著影响水冷系统的总功耗。加工领域内，S. Jagtap 等[15]介绍了一种基于物联网技术的饮料工厂水资源管理方案，在确保冷却塔组冷却效果的同时，有助于提高水的可持续性，并使饮料厂的日常用水量减少了 11%。

2.2 建筑供冷

建筑物在使用空调设备时，会产生大量热能，Y. Ohashi 等[16]通过使用由城市冠层模型和建筑能量模型组成的耦合模型，发现东京办公区域的空调废热在工作日上升了 1~2 ℃或更多。Wen Yuangao 等[17]开发了一个箱体模型，定量的确定了中国武汉地区使用家用空调会引起室外空气温度上升。若不将这些热量及时散发出去，会导致建筑内部温度过高，从而影响人们的生活和工作。

冷水机组作为重要的制冷设备，广泛用于建筑物供冷[18]。带有冷却塔的水冷式冷水机组通常用于大型建筑物。典型的水冷式冷水机组由两个水回路组成：冷冻水回路和冷凝水回路。冷冻水回路将冷水机组产生的冷能输送至需求侧；冷凝器水循环通过冷却塔中发生的水蒸发将冷水机组的废热排放至周围环境中。其中，冷却塔的蒸发水冷技术是一种在环境空气与水直接接触的情况下，通过水蒸发吸热来降低循环水温度的节能冷却技术。基于西北地区丰富的干空气能，蒸发水冷技术可以在一定空气状态参数下为温湿度独立控制空调系统制备所需的冷水，可显著降低空调系统的能耗[19]。事实上，R. Watt John 等[20]早在 20 世纪就提出了一种新型的间接蒸发式水冷空调系统，该系统由鼓风机、冷却盘管和冷却塔组成。间接蒸发式冷水空调系统是将一部分冷却塔出水引入表面干燥的冷却盘管，对进入冷却塔的空气进行预冷。通过降低入塔空气的湿球温度，最终降低冷却塔的出水温度，为空调系统提供温度较低的冷水。21 世纪初，清华大学江亿院士团队研发了世界第一台间接-直接蒸发式冷水机组，利用外置间接蒸发冷却器对空气进行预冷，以降低环境的湿球温度，从而实现 16~18 ℃冷水的制备[21-22]。Huang Xiang 等[23]提出了一种间接-直接蒸发式冷水机组，采用间接蒸发冷却对进气口进行预冷，并应用于新疆维吾尔自治区数据中心降温项目，空调系统实现全年 100% 自然降温。该系统安全可靠、节能节水，具有可观的经济效益。

随着过渡季节及冬季的到来，室外的气温逐渐下降，相对湿度会有所降低，湿球温度也随之降低。而此时若冷却塔出水温度与空调末端所需冷冻水水温相吻合，即可关闭制冷机组，选用冷却塔自然供冷系统，以流经冷却塔的循环冷却水直接或间接向空调系统供冷，这样既能满足空调系统舒适性的要求，还能依托自然冷源实现节能的目的[24]。

此外，对于能耗巨大的数据中心而言，通过利用自然冷源实现自然冷却可以降低整体能耗[25]（图

6)。数据中心自然冷却技术通常可分为风侧自然冷却、水侧自然冷却和热管自然冷却。使用自然冷却系统的数据中心通常位于可以提供冷空气或水的地方[26]。除了这些直接冷源外,还可以收集太阳能、数据中心余热[27]等热源作为冷水机组、水泵、冷却塔和换热器等机械装置的电源。自然冷源可能不直接参与内部热源的换热过程。例如,一些水侧自然冷却系统从辅助风冷或冷却塔系统获取冷水,用于冷却在节能模式下工作的空调内的循环水[28]。空气冷却系统与干式冷却器集成,直接实现数据中心冷冻水与环境冷空气之间的换热。冷却载体可与不同的非稳定自然冷源灵活组合,形成统一的冷却资源,从而实现高效传热。

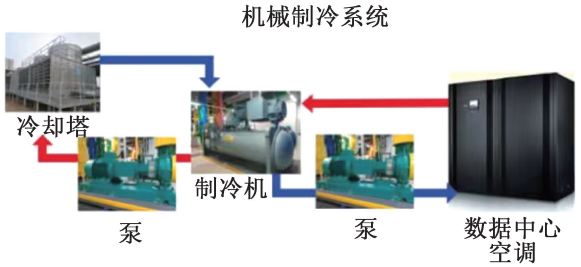


图 6 典型的机械制冷系统结构[25]

Fig.6 The structure of a typical mechanical refrigeration system[25]

2.3 其他应用

2.3.1 碳捕集

随着“双碳”战略的实施,碳捕获、使用和储存(CO_2 capture, utilisation and storage,CCUS)被认为是现阶段减少 CO_2 排放最有希望的一种方法[29]。对于该技术,从燃烧排放气体中分离和回收 CO_2 的方法有多种,例如化学吸收法、固体吸附剂法和膜分离法,并且正在进行研究以实现 CO_2 的高效回收。在这些方法中,最成熟的是基于吸附塔利用单乙醇胺水溶液对 CO_2 进行捕集,这是一种化学吸收的方法[30]。此外,基于单乙醇胺水溶液的 CO_2 捕集工艺即将商业化[31]。还有众多学者着眼于大气中的碳捕集,因此直接空气捕集(direct air capture,DAC)技术一直是研究的热点。与传统的碳捕集技术将捕集目标设定在高浓度的大型 CO_2 排放源上不同,DAC 直接从低 CO_2 浓度的大气中去除或提取 CO_2[32]。当环境空气与吸附剂接触时,可以实现捕集,吸附剂通常分为两类:水基碱性吸附剂[33]和多孔固体负载胺[34]。从分布式源捕集 CO_2 被认为是 DAC 技术的主要优势之一。Dong Peixin 等[35]提出了一种新型的直接空气捕集系统,集成了传统的自然通风干式冷却塔和当前的直接空气捕集技术,其工艺流程及系统结构如图 7 所示,在新型系统中,CO_2 捕集模块在自然通风干式冷却塔的下方,吸收剂 NaOH 溶液分布于模块的顶部,在重力作用下由毛细管均匀地喷洒至捕集模块上。当空气因密度差由润湿模块的下方流入干式冷却塔时[7],空气中的 CO_2 会与 NaOH 溶液发生反应,生成 Na_2CO_3。同时,由于在碳吸附的过程中会蒸发出大量的水,使入口空气被预冷[36],从捕集模块中排出更多的热量。该系统降低了 CO_2 捕集过程中的运行成本并增强了冷却塔的冷却效果。

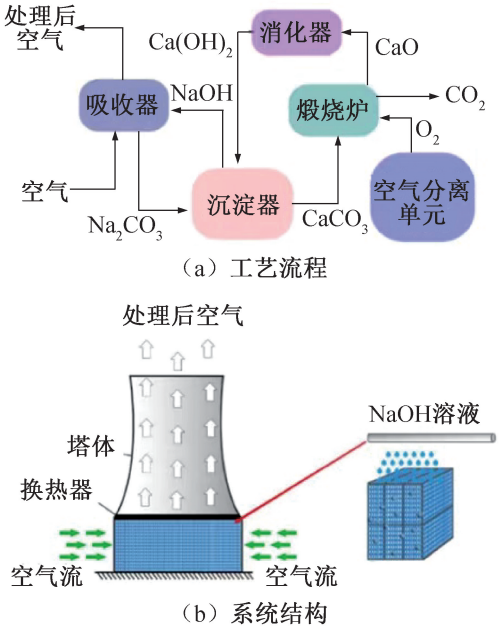


图 7 通过自然通风干式冷却塔直接空气捕集[35]

Fig.7 Direct air capture via natural draft dry cooling tower[35]

2.3.2 余热回收

由于冷却塔具有传热温差小、耐腐蚀、成本低等优点,可以作为一种理想的全热回收设备。燃气锅炉的烟气中含有大量水蒸气,携带着大量潜热。可通过冷却塔使烟气与冷却水直接接触换热,烟气温度可降至露点温度以下,冷却水可以回收显热和潜热[37]。该举措将显著提高燃气锅炉的效率,也有助于节水[38]。此外,回收的热量可用于加热水或供热,或作为热泵的低温源[39]。热泵可以提升余热品位并将其供应给热网,以提高燃气锅炉区域供热系统的整体效率[40],流程如图 8 所示。

在魏茂林等[41]的实验研究中,全热回收是通过两个配备内部水循环的喷淋塔实现的,锅炉排放的烟气露点温度约为 60 ℃,实验结果表明,排烟温度降至 30 ℃,回收热量为 127.5 kW,提高锅炉效率 10%。

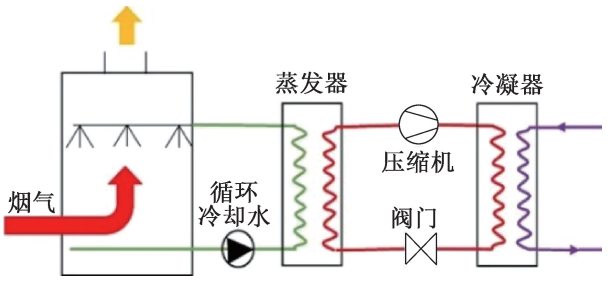


图 8 热泵提升烟气余热[40]

Fig.8 Heat pump upgrade flue gas waste heat[40]

全热回收还可以通过一个由干燥剂材料制成的焓轮与喷淋塔的组合实现[42]。焓轮是一种性能良好的焓回收装置,Fu Huangxi 等[43]已经验证了焓轮在高温高湿条件下的性能,发现实验总回收效率约为 80%,且焓轮的体积比喷淋塔的体积小得多。

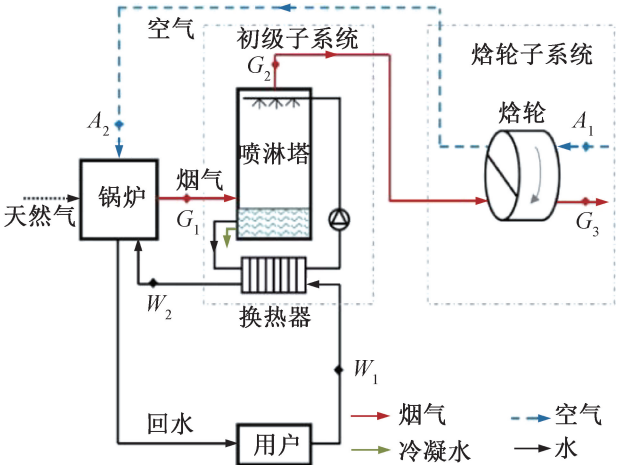


图 9 余热回收系统:配备喷淋塔和热焓轮的锅炉[42]

Fig.9 Waste heat recovery systems: boiler equipped with a spray tower and an enthalpy wheel[42]

3 冷却塔冷却系统优化

虽然冷却塔的应用十分广泛,但其整体性能还有待提升。冷却塔冷却系统性能的主要评价指标是其热力性能,相关参数包括冷却数、冷却温差、效率系数、传质系数、Lewis 数[44]等。此外,影响冷却塔性能的因素很多,包括计算模型、内外结构、运行环境和操作参数等。由于单一的优化方式一般不能使其整体性能同时达到最优,所以本文将从以上方面阐述冷却塔冷却系统的性能优化。

3.1 模型优化

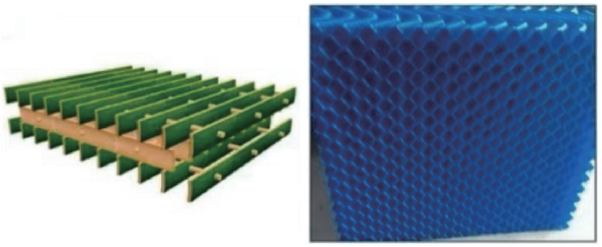
冷却塔传热模型的优化对整个制冷系统至关重要。1925 年,F. Merkel[45]将水滴的传热方程与传质方程相结合,以焓差为驱动力,推导出冷却塔的焓平衡方程。基于 Merkel 的焓差模型,H. Jaber 等[46]将传热设计理论应用于冷却塔的传热,提出了路易斯数为 1 时的有效传热单元数(ε-NTU)模型。随后,M. Poppe 等[47]确定了路易斯因子并考虑传热过程中水的变化。通过加入空气湿度和水循环方程,该方法可以准确预测冷却塔出口湿度比、出口水温和水蒸发量。为了评估这三种方法的准确性,J. C. Kopplers 等[48]对比了 Merkel 法、Poppe 法和 ε-NTU 法在不同条件下的情况。研究表明,Merkel 法和 ε-NTU 法可以准确计算出水温度,而 Poppe 法在传热率方面的精度更高。基于上述模型,可以恰当地描述冷却塔的运行过程。随着人工智能的发展,Qi Xiaoni 等[49]建立了基于神经网络的模型,预测冷却塔的出口参数。虽然出口参数与环境有着复杂的关系,但预测值与实验值吻合良好。此外,针对现有方法的适用局限性,Ma Keyan 等[50]提出了一种新型冷却塔的传热模型,为验证模型的准确性并论证非设计条件的适用性,建立了冷却塔空气/水传热性能评价实验系统。实验结果表明,提出的冷却塔模型具有高精度预测能力和对非设计条件的适应性。与其他方法相比,提出的冷却水系统在线优化方法可降低能耗 15.3%。

3.2 结构形式优化

3.2.1 填料优化

填料是冷却塔的心脏,通过填料减小水滴的尺寸,增加气液间的接触面积,提高传热传质性能。填料占建塔总成本的 20%~25%[51],还承担了塔内高达 60%~70% 的散热[52]。填料的材质主要有木材[53]、混凝土[54]、纸蜂窝和塑料[55]等。20 世纪 60 年代以前,木质填料因易于加工、安装、成本低等优点得到广泛应用。后来由于木材短缺[56],纸蜂窝和混凝土填料逐渐兴起。纸蜂窝填料具有较高的冷却效率,但容易破裂。混凝土填料因其良好的刚度和热性能被使用了很长时间,但其难以自然降解[57]。从 70 年代开始,聚氯乙烯(PVC)填料开始用于冷却塔。其具有低密度、高强度和良好的冷却性能,占据了冷却塔 96%以上的市场份额[58]。然而,PVC 填料也存在结垢以及耐久性低等缺点,且 PVC 难以降解,对环境有害。20 世纪 70 年代出现了竹制填料,具有良好的冷却能力、强度高和使用寿命长,且不易积垢[6],如图 10 所示,但传统的竹制填料生产工艺效率低下,原料不规范。与 PVC 填料相比,竹制填料由于制作方法不同,竹材重量大,操作复杂,运输成本较高。通过 Chen Lisheng 等[59-60]将竹格填料的热力性能与 PVC 填料进行了对比,研究表明竹格填料的热力性能略低。近年来,随着新型材料加工技术的不断发展,填料逐渐采用了多孔性、纳米技术等材料,诸如陶

瓷泡沫填料、金属丝网填料等,具有更高的导热系数和耐腐蚀性能。Xu Zhen 等[61]开发了一种陶瓷泡沫波纹填料用于提高冷却塔内部的紧凑性,其传热和传质性能已被证明优于传统的规整填料。因此,需要针对不同的应用环境和冷却负荷,采用不同材质的填料。

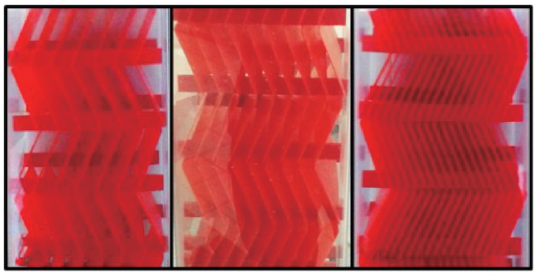


(a) 竹栅填料　(b) 波纹PVC填料

图 10 用于冷却试验的两种规格填料[6]

Fig.10 Two types of packing used in cooling test[6]

除了填料材质的优化演变,还有大量学者对其表面结构进行优化。H. R. Goshayshi 等[58]实验研究了波纹填料的形状和表面粗糙度对冷却塔中压降和传质的影响。研究表明传质系数会随着填料层的片间距和层间距的增加而降低。进一步研究发现,具有垂直波纹填料的塔比水平波纹填料的塔具有更高的冷却效率[62]。P. Shahali 等[63]还研究了填料的形式(7、9、18 个肋)对湿式冷却塔性能的影响(图 11)。研究表明,增加肋片后水的温降和冷却效率有所提高。Gao Ming 等[64]还提出了填料的非均匀排列,以充分利用环境空气和水之间的传热和传质潜力。填料层基本上分为内区、中区和外区三部分,内区降低,外区升高,而中间区不变。通过热态实验发现,优化填料布局后测试系统的冷却性能提高了 30%。即使在侧风条件下,填料的非均匀排列也可以提高自然通风湿式冷却塔的传热传质性能[65]。A. Mirabdolah Lavasani 等[66]还提出了一种针对机械通风冷却塔的旋转飞溅式填料,该填料可以显著提升冷却效率。M. Amini 等[67]实验研究了使用纳米流体的旋转飞溅型填料的热力性能。结果表明,性能取决于纳米流体的类型、入口温度和纳米流体的浓度。



(a) 7个肋　(b) 9个肋　(c) 18个肋

图 11 实验中使用的填料类型[63]

Fig.11 Various packing types used during the tests[63]

为了更好地评估冷却塔的热力性能,学者们还开发了许多关于填料或盘管的理论研究模型。N. Milosavljevic 等[68]建立了一个可以预测不同填料热力性能的数学模型。A. I. Petruchik 等[69]提出了一个使用双波纹聚氯乙烯填料蒸发冷却水膜的数学模型。Xie Xiaocui 等[70]基于闭式冷却塔,开发了三种翅片管(普通、椭圆形和纵向翅片管)热力性能模型,通过数值模拟研究了各种翅片管传热传质系数与压降的相关性。

3.2.2 预冷优化

由于冷却塔是通过塔外冷空气与塔内喷淋水之间的热交换实现冷却,所以塔外空气的干湿球温度至关重要[71]。特别是在夏季高温季节,环境空气的温度较高,冷却塔的效率会有所降低,干式冷却塔的效率下降最为显著。为解决干式冷却塔在高温季节的低性能问题,许多技术被用来降低入塔空气的温度,包括湿介质蒸发冷却、高压雾化、空气冷凝器蒸发冷却、吸收式冷却器冷却和热能储存等[72-76]。其中,在高温时期使用蒸发冷却对干式冷却系统的入口空气进行预冷是一种经济且节水的解决方案[77]。图 12 是一个典型的双曲线自然通风干式冷却塔,Ma Huan 等[78]引入了一种环形布置的湿介质的新颖配置,湿介质沿着塔筒径向安装在两个三角形散热器之间。在该配置中,塔的整个圆柱壳入口区域均覆盖有湿介质。水通过布水管分布于被润湿介质的顶部,并通过重力作用向下滴落,使介质均匀润湿。多余的水被收集在介质底部,并通过水泵进行再循环。空气在浮力的作用下穿过介质,形成错流传热传质过程。沉积在介质上的水通过从气流中提取其蒸发热而蒸发,从而冷却空气。预冷空气随后流过三角散热器管束,以冷却来自热电厂的管侧流体。然而,由于潮湿介质的结构紧凑,会额外产生明显的流动阻力,这会影响干式冷却塔的通风量,尤其是自然通风冷却塔。因此,在选择湿介质预冷时,需要在冷却性能和流阻之间加以权衡。合理布置的湿润介质可作为低穿透外挡风墙,改善散热器的进风条件。同时,流入的空气在通过潮湿介质时可以被预冷,该方案能够兼顾预冷和风阻。He Suoying 等[79]通过一维数学模型发现存在临界环境温度,低于该温度时,潮湿介质预冷不再提高塔性能。潮湿介质预冷的有效性受环境条件、塔设计、介质类型和尺寸、空气和水流量的影响。

3.2.3 进风优化

与高环境温度相比,侧风效应要复杂得多,也更

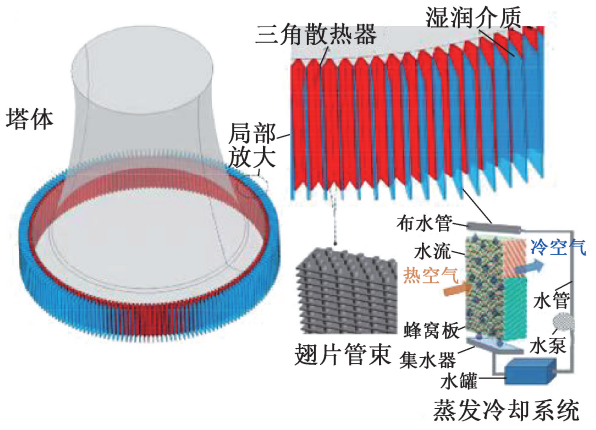


图 12 环形布置湿介质的示意图[78]

Fig.12 Schematic of the annular-arranged moist media[78]

难预测[80]。研究表明,对于自然通风干式冷却塔而言,由于侧风效应,会在冷却塔的迎风侧内部形成高风速区,即低压区,从而产生空气涡流,这会降低通过冷却塔的空气流量,其热力性能会显著下降,某些部分甚至可能停止工作[81]。侧风对湿式冷却塔的影响较小,但对其整体性能的影响而言依旧很显著[82]。

针对侧风效应,学者们提出了许多缓解技术来处理该问题。典型的方法就是空气侧优化,该方法旨在通过改善进入冷却塔的气流或改善冷却塔的空气流出量来提高冷却塔的性能。通常采用挡风墙来减轻侧风的影响,挡风墙可以分为内部式、外部式和组合式。内部挡风墙有“+”形[83]或三叶形[84],如图 13(a)所示。通过应用内挡风墙,能有效阻挡侧风对室内流场的直接冲击,改变侧风方向,迫使气流通过换热器。此外,学者们还研究了挡风墙几何形状和孔隙率的影响。在湿式冷却塔中,Chen Youliang 等[83]提出多孔墙比实心墙更好,空气能够穿透多孔墙体并流入更深的雨区,这会大幅改善气液间的传热传质。R. Al-waked 等[85]模拟了冷却塔在不同侧风条件下和不同壁孔隙率下的性能,研究表明孔隙率对冷却塔热力性能的影响并不显著。

M. Goodarzi 等[86]还研究了外挡风墙的配置,但只有当风向垂直于墙体时才能实现这种挡风墙的增强功效。由于内外挡风墙的工作机制不同,R. Al-waked 等[85]研究发现外挡风墙在低侧风速度下效果更好,内挡风墙在高侧风速度下效果更好。因此,H. Ghasemi Zavaragh 等[87]提出了内平外圆挡风墙组合式挡风墙。研究指出,内部挡风墙是为了消除侧风的偏移效应,而外部挡风墙是为了延迟分离而设计的。组合墙可以提供这两种功能,并且可以增加通过换热器的空气流量。

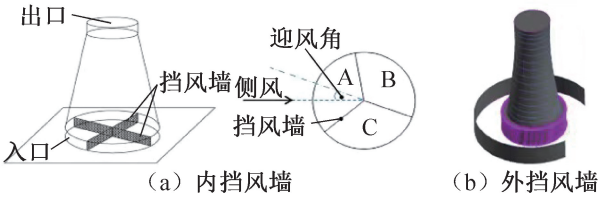


图 13 挡风墙

Fig.13 Windbreak wall

此外,针对机械通风冷却塔而言,风机的运行状态会决定入塔的风量以及塔内气流的分布,对塔内的气液间的换热有很大影响,所以需要对风机的状态进行实时精准控制,掌握风机的实时风量和风压是基础,机械塔的性能得益于两者的良好匹配。曹旭光等[88]采用静压落差法完成风量风压测定系统的设计,实验表明,系统测定的风量和风压误差在允许范围内,其精度和稳定性达到设计要求。

3.2.4 配水优化

配水优化是通过重新分配循环水流量来优化冷却塔的性能。通常在冷却塔的设计和运行过程中,若塔内无风、气流均匀,则干式塔的换热器管束或湿式塔的填料层均会通过相同的水流。在侧风的情况下,空气穿过换热器/填料层的均匀状态就会被破坏,这意味着一些换热器管束将具有更高的排热能力,而其他换热器管束将无法达到其设计排热能力。为解决上述问题,Li Xiaoxiao 等[89]提出了优化配水以提高冷却塔在大风条件下的性能。该方法的总体思路是对冷却塔不同区域的热水流量进行调节,以更好地与空气进行热质交换。若干式塔中的换热器管束或湿式塔中的填料层因为侧风而获得更多空气,则会有更多热水被分配至该区域。当通过换热器或填料层的气水比均匀时,冷却塔可以实现最佳性能,其中出口水温可以更均匀且产生更小的熵[90]。对于小型冷却塔,水的流量可以通过比例控制阀调控,而在大型冷却塔中,水的流量可以通过使用变速泵进行控制[89]。

然而,自然通风冷却塔在无风条件下,只有很少的冷却空气可以进入冷却塔中心区域的填料,温度高,湿度大,填料的散热潜力未得到充分利用[91]。有学者提出了非均匀布水结构,使填料外侧喷水率大于内侧。Jin T. 等[92]使用了双分区配水系统。采用该系统后,出水温度降低了 0.5 ℃以上。Li Hongwei 等[92]提出了三区布水结构,所研究的自然通风湿式冷却系统的出口水温下降了 0.9 ℃。

为减少雨区循环水的势能损失,降低配水过程中水泵的功耗,高位集水自然通风湿式冷却塔受到越来越多的关注。在这种湿式冷却塔中,填料底部安装了集水装置,消除了雨区的空气流动阻力,同时这也大

幅减少了雨区的噪声污染。虽然集水装置带来了额外的通风阻力,但高位集水自然通风湿式冷却系统的整体性能仍优于传统系统。Zhao Yuanbin 等[94]借助三维数值模拟对比了高位集水自然通风湿式冷却塔(high level water collecting natural draft wet cooling tower,HNDWCT)与常规自然通风湿式冷却塔(usual natural draft wet cooling tower,UNDWCT)的热力性能,发现所研究的湿式冷却塔的整体通风阻力小于常规塔,同时提高传热传质性能。

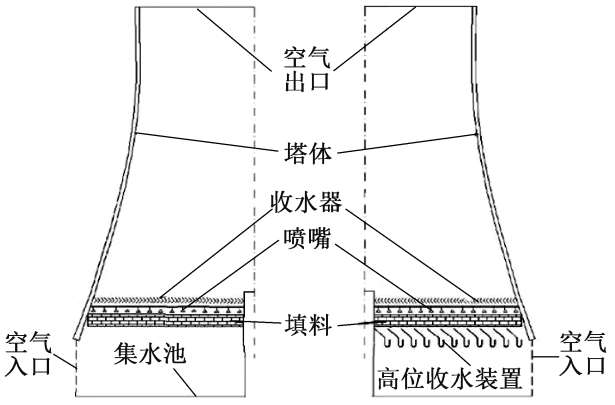


图 14 常规自然通风湿式冷却塔和高位收水自然通风湿式冷却塔的半剖面图[94]

Fig.14 Schematic of the UNDWCT and HNDWCT in half-section[94]

3.3 运行优化

由于冷却塔能耗大、运行成本高[95],近几十年来学者一直热衷于对冷却塔设计和运行进行优化。为了追求多样化的优化指标,采用了不同的优化方法,特别是单目标方法。经济性能是最为关注的优化目标。J. C. Kloppers 等[96]优化了冷却塔的几何形状,通过使用约束优化算法来实现最低建造总成本的目的。M. Serna-González 等[97]陈述了一系列经典的冷却塔案例,并利用混合整数非线性规划的方法优化了年度总成本。R. V. Rao 等[98]利用人工蜂群算法和改进的 Jaya 算法对这些案例进行了验证。通常使用粒子群算法来寻找冷却塔的最佳操作点,它已被证明可以很好地用于不同冷水机组的整体优化[99],以及在负载跟踪条件下热电站的锅炉优化[100]。此外,对比了遗传算法、蚁群优化和粒子群优化对机器学习目标函数的影响,发现粒子群优化优于其他算法,特别是在计算成本方面[101]。

除成本外,最小总能耗也作为重要的优化目标。K. Singh 等[102]利用逆反馈模型在不同的操作条件下获得了适当的气水比。R. Ramakrishnan 等[103]利用响应面法(response surface methodology,RSM)和人工神经网络(artificial neural network,ANN)来获取机械通风冷却塔的最佳冷水温度。Mu Baojie 等[104]使用了一种极值搜索控制的无模型优化方法,能够最大限度地减少冷水机组的总功耗,并通过模拟测试验证了该方法。Chang C. C. 等[105]通过减少风扇启动和停止次数以降低能耗。此外,针对冷却塔运行过程中的变风量、变流量问题,李龙[106]提出将变频技术融入冷却塔的控制系统中,通过对 200 t/h 机械通风逆流冷却塔进行分析,研究了多种因素对冷却塔变工况的影响,并评价了变水流量及变风量的节能效果。上海艾克还提出了一种全工况变流量冷却塔[107],产品采用自适应变流量高效布水系统,使通过部分负荷时能较好地利用富余的填料传质散热面积,得到较理想的冷却气水比,智能化系统以最低的风机能耗实现尽可能低的冷却水温,使冷却始终运行于最佳 COP(coefficient of performance),实现风机和冷水机组的整体节能。

有时要求同时满足几个相互冲突的目标,就需要综合考虑所有目标并针对这些情况进行多目标优化,从而提供折中的结果。K. Singh 等[108]通过非支配排序遗传算法(NSGA-II)对机械通风冷却塔进行了多目标优化。目标函数包括进出水温差、效率和冷却数的最大值和水蒸发速率的最小值。K. Singh 等[109]使用遗传算法对单个冷却塔进行多目标优化,使用经验公式来确定最佳逼近度、蒸发速率和运营成本。K. Singh 等[110]还为商业冷却塔制定了一个约束优化问题,在满足热负荷的同时最大限度地减少烟破坏,他们使用增强的拉格朗日遗传算法解决了非线性优化问题。

4 挑战与展望

4.1 提效降耗

由于冷却塔的冷却效率对整个制冷系统而言至关重要,以上通过对填料或盘管的结构优化,以及单塔运行参数的优化均能起到很好的效果。但冷却塔在实际应用中大多以塔群的形式存在,影响其效率的因素更为繁多。因此,未来的研究不仅要着眼于关键部件的材料改性、结构优化,更应着眼于塔组的优化,从系统层面上实现整体的提效降耗。

4.2 绿色环保

由于国家的环保监管越来越严格,绿色环保型冷却塔是未来的主流方向。基于环保理念对冷却塔的优化大多应围绕水质、噪音和漂水进行。传统的药剂水处理污染严重,后续的研究应聚焦于清洁药剂的研发,以及合理的排水方案。雨区和风机的噪声污染也

是严重的问题,目前多采用消声材料或结构,未来应更加注重整体的优化,改善气动性能和雨区的动能回收,兼顾降噪降耗。此外,运行中造成的漂水损失也是亟待解决的难题,虽然有学者提出收水器等装置,但其会影响塔的整体性能,未来需要研发高性能的组合装置,在满足冷却需求的同时最大程度上减少风阻和水损。

4.3 稳定运行

冷却塔的高效运行是由多个参数决定的,目前大多数学者聚焦于冷却塔个体或简单制冷系统控制策略的研究。由于区域供冷的普及,整个制冷系统趋向复杂化,冷却塔作为核心设备,单一的优化方式不能满足系统的需求,在实际运行过程中问题频频发生。未来需要基于整个制冷系统对其进行控制运行优化,实现各子系统的有机耦合,以保证系统的高效稳定运行。

5 结论

本文基于冷却塔冷却技术的发展过程,对其背景、原理和分类进行了回顾,从冷却塔技术的应用和优化两个方面的发展进行了梳理,主要得到以下结论:

1)由于冷却塔的冷却性能良好,且低碳环保,因此应用广泛,包括工业冷却、建筑供冷、城市区域供冷、碳捕集及余热回收等。将冷却塔冷却技术与其他可再生能源相结合,可在满足冷却负荷的前提下带来可观的节能收益。

2)冷却塔冷却技术节能减碳潜力巨大,其主流优化方向包括换热模型的优化、核心器件结构优化及材料改性、运行优化等,多方面优化后的冷却塔系统热力性能提升显著。

3)大型冷却塔组的高效稳定运行仍面临着诸多挑战。除冷却性能外,还需考虑节能环保、运行成本和稳定性,这也将作为未来冷却塔冷却技术大规模应用的重要参考。

参考文献

[1] WU Tongling, CAO Bin, ZHU Yingxin. A field study on thermal comfort and air-conditioning energy use in an office building in Guangzhou[J]. Energy and Buildings, 2018, 168: 428-437.

[2] ABDULLAH S, ZUBIR M N B M, MUHAMAD M R B, et al. Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: a review[J]. Energy and Buildings, 2023, 283: 112805.

[3] GOETZLER W, GUERNSEY M, YOUNG J, et al. The future of air conditioning for buildings[R]. Burlington: Oak Ridge National Laboratory, 2016.

[4] 范新舟, 姚晔. 集中空调水系统节能优化策略及仿真研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(5): 64-72. (FAN Xinzhou, YAO Ye. Study on energy-saving optimization strategy and simulation of central air-conditioning water system[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(5): 64-72.)

[5] AFSHARI F, DEHGHANPOUR H. A review study on cooling towers; types, performance and application[J]. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2019: 1-10.

[6] MA Xinxin, CAI Liping, CHEN Lisheng, et al. Bamboo grid versus polyvinyl chloride as packing material in cooling tower: energy efficiency and environmental impact assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 286: 112190.

[7] MA Huan, SI Fengqi, WANG Junshan. 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.

[8] 赵延春, 程菲, 潘欣全, 等. 湿式冷却塔消雾节水技术及其评价方法综述[J]. 山东电力技术, 2021, 48(6): 56-63, 80. (ZHAO Yanchun, CHENG Fei, PAN Xinquan, et al. Review about the plume abatement and water-saving technology and evaluation method for wet cooling tower[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(6): 56-63, 80.)

[9] SU Zhanguo, SU Yiping, MAJDI H, et al. 4E analyses of a novel multi-generation system based on methanol-steam reforming integrated with scramjet multi cooling cycle and ammonia synthesis[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 171: 578-590.

[10] HERNÁNDEZ A B, FAJARDO J G, BARRETO D, et al. Conventional and advanced exergoeconomic indicators of a nitric acid production plant concerning the cooling temperature in compression Train's intermediate stages[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101214.

[11] CHEN Hua, RUAN Xiaohui, PENG Yuhang, et al. Application status and prospect of spray cooling in electronics and energy conversion industries[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102181.

[12] ZHAI Haibo, RUBIN E, GROL E J, 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.

[13] NJOKU I H, DIEMUODEKE O E. Techno-economic comparison of wet and dry cooling systems for combined cycle power plants in different climatic zones[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 227: 113610.

[14] POPOV D, AKTERIAN S, FIKIIN K, et al. Multipurpose system for cryogenic energy storage and tri-generation in a food factory: a case study of producing frozen French fries [J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 7882.

[15] JAGTAP S, SKOUTERIS G, CHOUDHARI V, et al. An Internet of things approach for water efficiency: a case study of the beverage factory[J]. Sustainability, 2021, 13 (6): 3343.

[16] OHASHI Y, GENCHI Y, KONDO H, et al. Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46 (1): 66-81.

[17] WEN Yuangao, LIAN Zhiwei. Influence of air conditioners utilization on urban thermal environment [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(4): 670-675.

[18] WESTPHALEN D, KOSZALINSKI S. Energy consumption characteristics of commercial building HVAC systems. Volume II: thermal distribution, auxiliary equipment, and ventilation [R]. Cambridge: Arthur D. Little Inc. (ADLI), 1999.

[19] 王兴兴. 干燥地区蒸发冷却温湿度独立控制空调系统工程应用研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2017. (WANG Xingxing. Study on engineering application of evaporative cooling temperature and humidity independent control air conditioning system in dry area[D]. Xi′an: Xi′an Polytechnic University, 2017.)

[20] WATT JOHN R. Evaporative air conditioning handbook [M]. 3rd ed. US: Springer, 1986.

[21] JIANG Yi, XIE Xiaoyun. Theoretical and testing performance of an innovative indirect evaporative chiller [J]. Solar Energy, 2010, 84(12): 2041-2055.

[22] XIE Xiaoyun, JIANG Yi. Comparison of two kinds of indirect evaporative cooling system: to produce cold water and to produce cooling air[J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 881-890.

[23] HUANG Xiang, GUO Zhicheng, TIAN Zhenwu, et al. Application of new evaporative cooling air-conditioning system in a data center in Xinjiang[C]//Proceedings of the 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC 2019). Singapore: Springer Singapore, 2020: 727-735.

[24] 王瑾, 李新林, 李书生, 等. 空气、水节能器替代冷水机组的节能方案[J]. 制冷学报, 2011, 32(3): 56-59. (WANG Jin, LI Xinlin, LI Shusheng, et al. Energy saving solution with combined air-energy saving system and water-energy saving system instead of water chiller[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(3): 56-59.)

[25] ZHANG Qingxia, MENG Zihao, HONG Xianwen, et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization [J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 119: 102253.

[26] LEE K P, CHEN H L. Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for data centers in worldwide climate zones[J]. Energy and Buildings, 2013, 64: 103-112.

[27] HE Zhiguang, DING Tao, LIU Yu, et al. Analysis of a district heating system using waste heat in a distributed cooling data center [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 1131-1140.

[28] LI Jiajie, LI Zhengwei. Model-based optimization of free cooling switchover temperature and cooling tower approach temperature for data center cooling system with water-side economizer [J]. Energy and Buildings, 2020, 227: 110407.

[29] CZERNICHOWSKI-LAURIOL I, BERENBLYUM R, BIGI S, et al. CO_2GeoNet actions in Europe for advancing CCUS through global cooperation [J]. Energy Procedia, 2018, 154: 73-79.

[30] ROCHELLE G T. Amine scrubbing for CO_2 capture[J]. Science, 2009, 325(5948): 1652-1654.

[31] LI Kangkang, LEIGH W, FERON P, et al. Systematic study of aqueous monoethanolamine (MEA)-based CO_2 capture process: techno-economic assessment of the MEA process and its improvements[J]. Applied Energy, 2016, 165: 648-659.

[32] MILANI D, LUU M T, NELSON S, et al. Analysis for a solar stripper design for carbon capture under transient conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 166: 120799.

[33] HOLMES G, KEITH D W. An air-liquid contactor for large-scale capture of CO_2 from air [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370(1974): 4380-4403.

[34] LU Weigang, SCULLEY J P, YUAN Daqiang, et al. Carbon dioxide capture from air using amine-grafted porous polymer networks[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(8): 4057-4061.

[35] DONG Peixin, LI Xiaoxiao, YU Yuanyuan, et al. Direct air capture via natural draft dry cooling tower [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021,

109: 103375.

[36] DE JONGE M M J, DAEMEN J, LORIAUX J M, et al. Life cycle carbon efficiency of direct air capture systems with strong hydroxide sorbents[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 80: 25-31.

[37] JIANG Yan, ZHANG Huan, WANG Yaran, et al. Performance investigation of a counterflow packing tower for flue gas waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117315.

[38] LI Jingwei, LIU Zhifeng, HE Chunyang, et al. Water shortages raised a legitimate concern over the sustainable development of the drylands of Northern China: evidence from the water stress index [J]. Science of the Total Environment, 2017, 590/591: 739-750.

[39] DUDKIEWICZ E, SZAŁAŃSKI P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 18: 100522.

[40] JOUHARA H, KHORDEHGAH N, ALMAHMOUD S, et al. Waste heat recovery technologies and applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 6: 268-289.

[41] 魏茂林, 张世钢, 付林, 等. 基于烟气-空气全热交换的余热回收系统实验研究[J]. 区域供热, 2018(4): 6-13, 18. (WEI Maolin, ZHANG Shigang, FU Lin, et al. Experimental study on gas-air total heat exchange based waste heat recovery system[J]. District Heating, 2018(4): 6-13, 18.)

[42] MEN Yiyu, LIU Xiaohua, ZHANG Tao. Performance comparison of different total heat exchangers applied for waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 115715.

[43] FU Huangxi, LIU Xiaohua, XIE Ying, et al. Experimental and numerical analysis on total heat recovery performance of an enthalpy wheel under high temperature high humidity working conditions [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 482-494.

[44] KLOPPERS J C, KRÖGER D G. The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(9): 879-884.

[45] MERKEL F. Verdunstungskühlung [J]. VDI-Zeitchrift, 1925, 70: 123-128.

[46] JABER H, WEBB R L. Design of cooling towers by the effectiveness-NTU method[J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111(4): 837-843.

[47] POPPE M, RÖGENER H. Berechnung von Rückkühlwerken[J]. VDI-Wärmeatlas, 1991: Mi 1-Mi 15.

[48] KLOPPERS J C, KROGER D G. Cooling tower performance evaluation: merkel, poppe, and e-NTU methods of analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 1-7.

[49] QI Xiaoni, LIU Yongqi, GUO Qianjian, et al. Performance prediction of a shower cooling tower using wavelet neural network[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 475-485.

[50] MA Keyan, LIU Mingsheng, ZHANG Jili. Online optimization method of cooling water system based on the heat transfer model for cooling tower[J]. Energy, 2021, 231: 120896.

[51] WU Tiancheng, GONG Meng, XIAO J. Preliminary sensitivity study on an life cycle assessment (LCA) tool via assessing a hybrid timber building [J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2020, 5(2): 108-113.

[52] WILLIAMSON N, BEHNIA M, ARMFIELD S. Comparison of a 2D axisymmetric CFD model of a natural draft wet cooling tower and a 1D model[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9/10): 2227-2236.

[53] OBREGON QUIÑONES L G, PERTUZ J C, DOMÍNGUEZ R A. Análisis del desempeño de una Torre de enfriamiento a escala de laboratorio Para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire[J]. Prospectiva, 2017, 15(1): 42-52.

[54] KONG Qingjie, ZHAO Xueyi, XIE Deqiang, et al. Experimental investigation of the heat and mass transfer phenomena in a counterflow wet cooling tower with foam ceramic packing[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(1): 168781401775257.

[55] RAMKRISHNAN R, ARUMUGAM R. Experimental study of cooling tower performance using ceramic tile packing [J]. Processing and Application of Ceramics, 2013, 7(1): 21-27.

[56] WU Yingji, GE Shengbo, XIA Changlei, et al. Using low carbon footprint high-pressure carbon dioxide in bioconversion of aspen branch waste for sustainable bioethanol production[J]. Bioresource Technology, 2020, 313: 123675.

[57] HE Sheng, LIN Lanying, WU Zaixing, et al. Application of finite element analysis in properties test of finger-jointed lumber [J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2020, 5(2): 124-133.

[58] GOSHAYSHI H R, MISSENDEN J F. The investigation of cooling tower packing in various arrangements[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(1): 69-80.

[59] CHEN Lisheng, FEI Benhua, MA Xin, et al. Investigation of bamboo grid packing properties used in cooling tower

[J]. Forests, 2018, 9(12): 762.
[60] CHEN Lisheng, FEI Benhua, MA Xinxin, et al. Effects of hygrothermal environment in cooling towers on the chemical composition of bamboo grid packing[J]. Forests, 2019, 10(3): 274.
[61] XU Zhen, XIE Yingchun, ZHANG Feng. Development of mass transfer coefficient correlation for a ceramic foam packing humidifier at elevated pressure [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 560-565.
[62] GHARAGHEIZI F, HAYATI R, FATEMI S. Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(1): 277-280.
[63] SHAHALI P, RAHMATI M, ALAVI S R, et al. Experimental study on improving operating conditions of wet cooling towers using various rib numbers of packing[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 65: 80-91.
[64] GAO Ming, ZHANG Lei, WANG Nini, et al. Influence of non-uniform layout fillings on thermal performance for wet cooling tower[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 549-555.
[65] 武健, 解岳, 胡三季. 大型自然通风冷却塔热力性能研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(2): 100-104. (WU Jian, XIE Yue, HU Sanji. Study on thermal performance of large natural draft cooling tower[J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(2): 100-104.)
[66] MIRABDOLAH LAVASANI A, NAMDAR BABOLI Z, ZAMANIZADEH M, et al. Experimental study on the thermal performance of mechanical cooling tower with rotational splash type packing[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 530-538.
[67] AMINI M, ZAREH M, MALEKI S. Thermal performance analysis of mechanical draft cooling tower filled with rotational splash type packing by using nanofluids [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 115268.
[68] MILOSAVLJEVIC N, HEIKKILÄ P. A comprehensive approach to cooling tower design [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(9): 899-915.
[69] PETRUCHIK A I, SOLODUKHIN A D, FISENKO S P. Evaporative cooling of water in complex-configuration film spray zones [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2008, 81(1): 182-187.
[70] XIE Xiaocui, HE Chang, XU Tao, et al. Deciphering the thermal and hydraulic performances of closed wet cooling towers with plain, oval and longitudinal fin tubes [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 203-218.
[71] 李永安, 尚丰伟, 潘强. 空调用封闭式冷却塔的研究[J]. 制冷学报, 1997, 18(1): 48-50, 12. (LI Yongan, SHANG Fengwei, PAN Qiang. A study on the closed cooling tower for air conditioning[J]. Journal of Refrigeration, 1997, 18(1): 48-50, 12.)
[72] KUTSCHER C, COSTENARO D. Assessment of evaporative cooling enhancement methods for air-cooled geothermal power plants [R]. Golden, CO. (US): National Renewable Energy Lab., 2002.
[73] AL-IBRAHIM A M, VARNHAM A. A review of inlet air-cooling technologies for enhancing the performance of combustion turbines in Saudi Arabia[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(14/15): 1879-1888.
[74] ASHWOOD A, BHARATHAN D. Hybrid cooling systems for low-temperature geothermal power production [R]. Golden, CO. (US): National Renewable Energy Lab., 2011.
[75] DAVIS G, SELKOWITZ S, BROOK M. Comparison of alternate cooling technologies for california power plants economic, environmental and other tradeoffs [R]. California: Electric Power Research Institute, 2002.
[76] ALKHEDHAIR A, GURGENCI H, JAHN I, et al. Numerical simulation of water spray for pre-cooling of inlet air in natural draft dry cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 416-424.
[77] FRANCO A, VALERA D L, PEÑA A, et al. Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 218-230.
[78] MA Huan, CAI Liang, SI Fengqi, et al. Exploratory research on annular-arranged moist media to improve cooling capacity of natural draft dry cooling tower and thermo-flow characteristics of its radiators [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 172: 121123.
[79] HE Suoying, GURGENCI H, GUAN Zhiqiang, 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.
[80] LI Xiaoxiao, GURGENCI H, GUAN Zhiqiang, et al. A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 250-270.
[81] ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, LI Yan, 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.
[82] CHEN Youliang, SHI Yongfeng, HAO Jiangang, et al. Experimental research on optimizing inlet airflow of wet cooling towers under crosswind conditions [J]. IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 114: 012005.

[83] CHEN Youliang, SUN Fengzhong, WANG Hongguo, et al. Experimental research of the cross walls effect on the thermal performance of wet cooling towers under crosswind conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(17/18): 4007-4013.

[84] LU Yuanshen, GUAN Zhiqiang, GURGENCI H, et al. Experimental investigation into the positive effects of a tri-blade-like windbreak wall on small size natural draft dry cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 1000-1012.

[85] AL-WAKED R, BEHNIA M. Enhancing performance of wet cooling towers [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(10): 2638-2648.

[86] GOODARZI M, KEIMANESH R. Heat rejection enhancement in natural draft cooling tower using radiator-type windbreakers [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71: 120-125.

[87] GHASEMI ZAVARAGH H, CEVIZ M A, SHERVANI TABAR M T. Analysis of Windbreaker combinations on steam power plant natural draft dry cooling towers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 550-559.

[88] 曹旭光. 通风机风量风压测定系统的研发[J]. 机械管理开发, 2022, 37(11): 216-218. (CAO Xuguang. Research and development of fan air volume and pressure measurement system [J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(11): 216-218.)

[89] LI Xiaoxiao, XIA Lin, GURGENCI H, et al. Performance enhancement for the natural draft dry cooling tower under crosswind condition by optimizing the water distribution [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 107: 271-280.

[90] SMREKAR J, OMAN J, ŠIROK B. Improving the efficiency of natural draft cooling towers [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(9/10): 1086-1100.

[91] HUANG Xianwei, CHEN Lin, YANG Lijun, et al. Cooling performance of natural draft hybrid system with parallel air path[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 169: 114971.

[92] JIN T, ZHANG Li, LUO K, et al. Three-dimensional numerical study on thermal performance of a super large natural draft cooling tower of 220 m height[J]. Journal of Thermal Science, 2013, 22(3): 234-241.

[93] LI Hongwei, DUAN Wenbo, WANG Suobin, et al. Numerical simulation study on different spray rates of three-area water distribution in wet cooling tower of fossil-fuel power station[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1558-1567.

[94] ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong, LONG Guoqing, et al. Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual cooling tower [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 116: 150-164.

[95] HAMAWAND I. Anaerobic digestion process and bio-energy in meat industry: a review and a potential[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 37-51.

[96] KLOPPERS J C, KRÖGER D G. Cost optimization of cooling tower geometry [J]. Engineering Optimization, 2004, 36(5): 575-584.

[97] SERNA-GONZÁLEZ M, PONCE-ORTEGA J M, JIMÉNEZ-GUTIÉRREZ A. MINLP optimization of mechanical draft counter flow wet-cooling towers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2009, 88(5): 614-625.

[98] RAO R V, MORE K C. Optimal design and analysis of mechanical draft cooling tower using improved Jaya algorithm [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 82: 312-324.

[99] KARAMI M, WANG Liping. Particle Swarm optimization for control operation of an all-variable speed water-cooled chiller plant [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 962-978.

[100] TUTTLE J F, VESEL R, ALAGARSAMY S, et al. Sustainable NOx emission reduction at a coal-fired power station through the use of online neural network modeling and particle swarm optimization[J]. Control Engineering Practice, 2019, 93: 104167.

[101] ZHOU Hao, ZHENG Ligang, CEN Kefa. Computational intelligence approach for NOx emissions minimization in a coal-fired utility boiler [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(3): 580-586.

[102] SINGH K, DAS R. A feedback model to predict parameters for controlling the performance of a mechanical draft cooling tower[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 105: 519-530.

[103] RAMAKRISHNAN R, ARUMUGAM R. Optimization of operating parameters and performance evaluation of forced draft cooling tower using response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN)[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(5): 1643-1650.

[104] MU Baojie, LI Yaoyu, HOUSE J M, et al. Real-time optimization of a chilled water plant with parallel chillers based on extremum seeking control[J]. Applied Energy, 2017, 208: 766-781.

(下转第 71 页)

Fengkun, et al. Study on mass fraction limits of R744/HCs mixtures used as refrigerant for heat pump system[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2012, 11(4): 363-368.)

[20] 刘学武, 覃旭松, 杜永强, 等. CO_2/DME 混合工质热泵循环性能分析及可燃性研究[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(2): 136-140. (LIU Xuewu, QIN Xusong, DU Yongqiang, et al. Heat pump cycle performance analysis and flammability study of the CO_2/DME mixture refrigerant [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2015, 29(2): 136-140.)

[21] LUO Jielin, WANG Qin, ZHEN Zhao, et al. Theoretical investigation on the heating performance of a recuperative heat pump water heater using CO_2/HCs with large temperature glides in cold regions[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2022, 14(3): 031012.

[22] 公茂琼, 孙守军, 郭浩, 等. 一种空气源大温跨高温热泵烘干系统: 109827419B[P]. 2020-10-27. (GONG Maoqiong, SUN Shoujun, GUO Hao, et al. Air source large-temperature-span high-temperature heat pump drying system: 109827419B[P]. 2020-10-27.)

[23] 秦晓宇, 郭浩, 公茂琼, 等. 混合工质回热式大温跨供热热泵循环的理论分析[J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 32-39. (QIN Xiaoyu, GUO Hao, GONG Maoqiong, et al. Theoretical analysis of mixture recuperative heat pump with high temperature span[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(1): 32-39.)

[24] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012. (Code for design of heating, ventilation, and air conditioning in civil buildings: GB 50736—2012 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.)

通信作者简介

王勤,男,教授,博士生导师,浙江大学制冷与低温研究所 0571-87951738,E-mail:wangqin@zju.edu.cn。研究方向:混合工质制冷技术,空气源热泵,冷藏冷冻设备节能,新型制冷剂。

About the corresponding author

Wang Qin, male, professor, Ph.D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, 86-571-87951738, E-mail: wangqin@zju.edu.cn. Research fields: mixed refrigerant refrigeration technology, air-source heat pumps, energy-saving refrigeration and freezing equipment, new refrigerants.

(上接第 62 页)

[105] CHANG C C, SHIEH S S, JANG S S, et al. Energy conservation improvement and ON-OFF switch times reduction for an existing VFD-fan-based cooling tower[J]. Applied Energy, 2015, 154: 491-499.

[106] 李龙. 机械通风冷却塔变工况节能分析[J]. 节能, 2019, 38(9): 61-64. (LI Long. Energy-saving analysis of mechanical ventilation cooling tower under variable conditions[J]. Energy Conservation, 2019, 38(9): 61-64.)

[107] 全工况变流量冷却塔[J]. 上海节能, 2023(2): 232-233. (Full-operating variable flow cooling tower [J]. Shanghai Energy Saving, 2023(2): 232-233.)

[108] SINGH K, DAS R. An experimental and multi-objective optimization study of a forced draft cooling tower with different fills[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 111: 417-430.

[109] SINGH K, DAS R. Simultaneous optimization of performance parameters and energy consumption in induced draft cooling towers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 123: 1-13.

[110] SINGH K, DAS R. Exergy optimization of cooling tower for HGSHP and HVAC applications [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 136: 418-430.

通信作者简介

张小松,男,教授,东南大学能源与环境学院,13951974528,E-mail:rachpe@seu.edu.cn。研究方向:新型制冷技术,高效空调系统与热泵技术,太阳能利用与建筑节能。

About the corresponding author

Zhang Xiaosong, male, professor, School of Energy and Environment, Southeast University, 86-13951974528, E-mail: rachpe@seu.edu.cn. Research fields: new refrigeration technology, efficient air conditioning system and heat pump technology, solar energy utilization and building energy saving.