

文章编号: ISSN1005- 9180 (2008) 03- 0052- 07\*

# 蒸发式换热器研究进展和应用状况

李鹏飞<sup>1</sup>, 王志远<sup>1</sup>, 薛玉卿<sup>1</sup>, 原如冰<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 车辆与动力工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400450)

[摘要] 着重比较了不同型式冷凝器的相关应用参数; 对蒸发式换热器国内外研究进展和国内应用状况进行了介绍; 分析总结了蒸发式冷凝器在应用中存在的问题, 并针对相关问题提出了相应对策; 最后, 指明了蒸发式冷凝器的应用前景和发展方向, 并通过实践证明了节能型的产品在国内外具有良好的市场。

[关键词] 蒸发式冷凝器, 蒸发式换热器, 节能

[中图分类号] TB657.5; TQ051.6+1; TQ051.6+2

[文献标识码] C

## The State of the Art of Research and Application on Evaporative Exchanger

LI Pengfei<sup>1</sup>, WANG Zhiyuan<sup>1</sup>, XUE Yuqing<sup>1</sup>, YUAN Rubing<sup>2</sup>

(1. Vehicle and Motive Power Engineering College, Henan Technology University, Luoyang Henan 471003;

2 Chongqing University, Motive Power Engineering College, Chongqing 400450, china)

**Abstract:** The paper introduces the state of the art of research and application on evaporative exchanger, relevant issues and its countermeasures, finally puts forward the prospect and development tendency, and testifies the energy saving products have wide prospect at Chinese and overseas market.

**Keywords:** Evaporative condenser, Evaporative heat exchanger, Energy-saving

## 1 引言

由于人口膨胀和经济发展, 水资源短缺的现象正在世界许多地方相继出现, 尤其是城市缺水状况, 越来越加剧。我国的水力资源可开发量虽达 3.79 亿千瓦, 但人均不到 0.3 千瓦。《中国节水技术政策大纲》中指出: “大力发展和推广工业用水重复利用技术, 提高水的重复利用率是工业节水的首要途径, 发展高效冷却节水技术是工业节约用水的重点。” 冷凝冷却设备是工业耗能耗水大户, 制冷冷却耗能量占工业用能的 13%~15%, 耗水占工业用水的 70%~80%, 而间接冷却用水又占冷却用水的 70%~80%<sup>[1]</sup>。也正是在这样的情况下, 蒸发式冷凝技术应运而生, 成为水循环重复利用的重要

技术之一。蒸发式冷凝技术在航空、电力、机械、纺织等工业领域中起着重要作用。同时, 冷却塔、喷淋塔、蒸发式冷凝器等就是冷却水重复利用的关键设备, 蒸发式冷凝器的节能、节水效果不仅在理论上是明显的, 在实际应用中也得到很好的证明<sup>[2]</sup>。所以, 研究和发发展蒸发式冷凝冷却设备, 极具现实意义。

## 2 蒸发式冷凝器

根据蒸发式冷凝器的工作原理可知, 由于蒸发式冷凝器主要利用水的汽化潜热带走制冷剂冷凝过程中放出的冷凝热量, 所以冷却水的用量要比水冷式冷凝器少得多。实际补充水量为水冷式的 1/25~1/50, 其特别适用于缺水地区。

\* 收稿日期: 2008-3-20; 修回日期: 2008-4-26

作者简介: 李鹏飞 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 蒸发式冷凝器流动与传热机理研究。E-mail: lipengfei650@163.com.

文献 [3] 和文献 [4] 对各种冷凝器的性能与耗水情况分别进行了比较。据计算, 以氨为制冷剂, 产冷量在  $3.8 \times 10^6 \text{ kJ/h}$  时, 蒸发冷凝器比壳管式冷凝器平均每年节电  $3.4 \times 10^5 \text{ kWh}^{[5]}$ 。

### 3 蒸发式换热器的理论研究进展

#### 3.1 国外理论研究进展

国外的蒸发冷凝技术发展比较早, 所取得的理论和研究成果也比较高。蒸发式冷凝设备基本传热传质理论是在 1925 年由 merkel 所提出并发展起来的, 为以后的理论研究奠定了基础。之后在二十世纪中期, S. G. Chuklin、尾花英郎等提出了关于蒸发式冷凝器设计的普遍化方法。Parker 和 Treyball 研究了蒸发式冷却器的传热、传质性能, 阐明了蒸发式冷却器的传热、传质机理。文献 [6] 对蒸发式冷凝器与凉水塔混合系统的实验表明此系统能显著降低冷凝温度, 并节约换热面积。开发了一套用于设计水平或竖直放置的光管、翅片管蒸发式冷凝器与凉水塔混合系统的计算机程序。文献 [7] 对竖直管蒸发式冷却器做了传热传质试验研究, 结果表明控制热阻发生在空气与水的交界面, 并建立了适用于光滑竖直管蒸发式冷凝器性能计算的关联式。文献 [8] 对蒸发式换热器 (凉水塔、流体冷却器、冷凝器) 做了性能模拟, 其模拟算法与制造厂家 (美国巴尔的摩) 提供的数据差别在  $\pm 3\%$  以内。文献 [9] 对几种蒸发式冷却器芯体的设计方案做了模拟计算探讨, 发现添加的塑料材料 (Munter) 可以显著地增强光滑管冷却器的传热性能, 而不需要使用成本很高的翅片管以增加传热面积。文献 [10] 给出了蒸发式冷凝器一种新传热传质数学模型, 该模型准确的描述了传热传质过程; 编制了适用于光管蒸发式冷凝器的计算机仿真模拟程序, 通过试验验证, 其计算结果同试验结果相比较平均误差为  $3\%$ , 其中最大误差也不超过  $20\%$ ; 并且计算结果具有很高的精度, 验证了计算机程序的合理性。文献 [11] 研究了在负的大气压下蒸汽混合物对 DCXs 型换热器的性能影响, 通过试验测试研究了 DCXs 型换热器中入口处不凝性气体的影响, 给出了数学计算模型, 并指出该模型可为冷凝器设计提供依据。文献 [12] 和 [13] 对两步式蒸

发冷却器的性能做了实验研究, 分析比对了直接蒸发式冷却器和间接蒸发式冷却器的性能, 结果表明带有凉水塔的两步式蒸发冷却器比没有凉水塔的系统具有更高的换热效率, 也优于一步式、直接接触式蒸发冷却器。文献 [14] 讨论了蒸发式流体冷却器的传热传质过程, 建立了逆流蒸发式流体冷却器的数学模型。研究了管束的分列排布对光管式流体冷却器的热性能影响。结果表明, 对于蒸发式水冷却器, 模拟计算值和试验值具有很好的吻合性, 相对误差不超过  $6\%$ , 通过试验数据回归, 总结出传质效率的关联式。文献 [15] 介绍了一种描述蒸发式冷凝冷却设备通用的无量纲数学模型, 该数学模型给出了水、空气和被冷却流体在系统中非绝热蒸发的换热过程。

应用无量纲微分方程建立的数学模型极大的降低了计算的参数量并且简化了计算。分析表明, 该无量纲因次的数学模型具有广泛的应用性。文献 [16] 对蒸发式冷凝器 (采用两组翅片管+ 填料的结构型式) 的性能进行实验研究, 同时和风冷式冷凝器进行比较, 结果表明蒸发式冷凝器的系统效率介于  $97\% \sim 99\%$  之间, 而风冷式冷凝器系统效率介于  $88\% \sim 92\%$  之间。文献 [17] 在相同的实验条件下, 对光管和翅片套管蒸发式冷却器的传热性能进行分析研究。通过试验证明, 当空气的迎面风速从  $1.66 \sim 3.57 \text{ m/s}$  变化时, 翅片套管蒸发式冷却器比光管蒸发式冷却器的换热性能提高了  $92\% \sim 140\%$ , 在假定换热器喷淋水温度不变的前提下, 建立了光管和翅片套管蒸发式冷却器的热力学性能数学模型。文献 [18] 在同样实验条件下, 对椭圆光管和圆管蒸发式冷却器进行了性能比较试验研究。研究表明, 椭圆管的平均传质 Colburn 因子  $J_m$  是圆管的  $89\%$ , 椭圆管的平均摩擦因子 ( $f$ ) 是圆管的  $46\%$ , 而椭圆管的  $J_m/f$  是圆管的  $1.93 \sim 1.96$  倍。实验证明, 椭圆管的综合性能优于圆管, 具有很好的换热和传质特性。文献 [19] 对直接式和间接式冷却塔和冷凝器的性能进行了分析。基本原理依据 merkel's 理论, 针对常用的三种换热器应用统一理论和相同的操作方法进行分析, 总结出了换热效率和热阻的计算关联式。文献 [20] 建立了关于闭式冷却塔的基于热质传递守恒的简化效率模型, 在假定盘管间冷却水膜温度为常数的条件下, 研究了冷

却塔在风量变化时性能的变化,并计算了耗水量。模拟计算的结果和已有的数据相吻合,其误差控制在10%以内。文献[21]主要对比了制冷系统现在使用的三种冷凝器特性,即空气冷却式冷凝器、水冷却式冷凝器和蒸发式冷凝器在相同的试验条件下分别进行试验研究,结果表明,在蒸发温度为 $-24 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 时,水冷却式冷凝器和蒸发式冷凝器相比,制冷量和能效比分别提高了2.9%~14.4%和1.5%~10.2%,但耗电量增加了2.3%~4.2%。在蒸发温度为 $-24^{\circ}\text{C}$ 时,蒸发式冷凝器和空气冷却式冷凝器相比,制冷量和能效比分别提高了31.0%和14.3%,耗电量增加了10.1%。文献[22]介绍了一种基于计算流体力学的关于湿空气和水的两相流动的新型冷却塔的数学模型。在气体流动段采用欧拉方法分析,在水滴下落阶段应用拉格朗日方法分析研究。试验研究表明,液滴尺寸的影响是最主要的因素,当喷淋水量一定时,液滴尺寸越小,换热效率越高,冷却水入口温度和空气湿球温度相差越大换热效率越高。文献[23]应用ANNs(人工智能网络)技术对蒸发式冷凝器的冷凝负荷进行了模拟和控制研究。研究结果表明,在热力学系统中,ANNs控制器适合取代PID控制器。文献[24]应用ANNs对带有蒸发式冷凝器的系统性能进行预测。通过改变蒸发器的负荷、空气和水流过蒸发冷盘管的速度和冷凝器入口处空气的干湿球温度对系统进行稳态测试。其预测值和试验值以及关联式计算的相对误差在1.90%~4.18%内,结果表明ANNs在逆流蒸发式冷凝器的复杂系统中应用时具有很高的精度。文献[25]对蒸发式流体冷却器和蒸发式冷凝器的数学模型进行了细致研究。通过和前人研究结果相比较,验证该模型的合理性。该模型考虑了污垢对换热性能的影响,建立了计算污垢热阻的相关方程,并利用此方法对换热器性能进行研究,为蒸发式换热器设计计算提供试验依据。文献[26]对蒸发式换热器进行敏感性分析,所谓敏感性分析就是对影响换热器性能模型参数逐一进行分析。分析结果表明,对蒸发式冷却器,影响其换热效率的主要因素是流体流动速率;而对蒸发式冷凝器,影响其换热效率的主要因素是空气入口处的湿球温度和冷凝温度。文献[27]依据热力学第一、二定律对逆流式冷却塔和蒸发式换热器进行了

热力学性能分析,利用热力学平衡分析影响系统不可逆损失的因素。研究表明,换热器的入口湿球温度的增加总会提高热力学第二定律的效率。应用热力学方法丰富蒸发冷凝冷却技术的研究手段,但是仍难以准确的表达传热传质的过程。

蒸发式冷凝冷却技术在国内外的研究从上个世纪至今从未间断过,并且在理论研究方面也取得了较大的成果,但大多局限于管内无相变的蒸发式冷却器的研究和蒸发式冷凝器的理论及性能模拟。随着节水和节能的需求,蒸发式换热器在系统中应用的深入研究将成为势在必行的重要研究课题。

### 3.2 国内理论研究进展

20世纪80年代,同济大学陈沛霖教授在美国加州劳伦斯伯克利研究所从事蒸发冷却技术的国际合作研究,并将这一技术引入我国。近年来,一些企业和科研单位对蒸发冷凝冷却技术进行了理论和试验研究,并取得了一定的成果。1986年,文献[28]通过实验研究分析冷凝温度、空气进口湿球温度、风量和喷淋水量对氨蒸发式冷凝器单位面积热负荷的影响,同时验证在不同工况下氨蒸发式冷凝器冷凝能力变换曲线的可靠性,为设计蒸发式冷凝器提供参考。

1990年,文献[29]把蒸发式冷凝器中的冷凝温度与水膜平均温度之差转换为焓差,并用算术平均焓差代替对数平均焓差导出了不含水膜温度的单位面积热负荷的简化计算公式,与常用的比较繁琐的试凑法或图解法相比,这种方法对于工程设计计算相当方便。

1999年,文献[30]介绍了一种简单实用的带预冷器的蒸发式冷凝器的设计方法,此法可用于常规蒸发式冷凝器的设计计算。

2003年,文献[31]介绍了蒸发式冷凝器的工作原理、传热计算、设计参数选择和结构设计存在的问题,建议在缺水地区使用蒸发式冷凝器最为经济。

2004年,文献[32]对几种间接蒸发冷却器的热工计算数学模型进行了简要介绍和对比,并对其两种计算方法进行了实验验证,结果表明周孝清、陈沛霖提出的方法更适用于工程实践。

2005年,文献[33]~[34]建立了蒸发式冷凝器和蒸发式冷却器的数学模型。对换热器管外水膜的

温度分布和焓值沿换热器高度方向变化进行了研究,并根据传热学理论得到了模型的解析解,为设计蒸发式换热器提供了依据。文献 [35] 采用分布参数法对蒸发式冷凝器建立了数学模型,模型对蒸发式冷凝器的结构设计和性能的优化提供了帮助。

2006-2007年,文献 [36] 分析了喷淋蒸发翅管式冷凝器的传热过程,建立其传热传质数学模型和设计计算方法。文献 [37] 用温降算法进行蒸发式冷凝器的选型计算,指出设置洗涤式油分离器对于氨制冷系统的有利作用,同时结合工程实例对蒸发式冷凝器的管路进行了设计,并对其结构提出了改进意见。文献 [38] - [46] 建立了蒸发式冷凝器实验平台,测试了不同喷淋密度及迎面风速对管外水膜与空气传热与阻力性能的影响,得到了管外水膜与空气传热系数算式。

用 FLUENT 软件对圆管、扭曲管和交变曲面波纹管 3 种管束中空气的速度场、压力场及温度场进行了模拟,在适当简化模型的基础上,采用可实现 k-E 模型,强化壁面处理方法和速度-压力耦合的 SIMPLE 算法,获得了有代表性的来流流场及其对传热与流阻性能的影响量。研究表明扭曲管和管外亲水处理都能获得较好的水膜分布,而且还可以达到减小水膜热阻和提高蒸发式冷凝器传热性能的目的。研究结果对蒸发式冷凝器的设计和实际应用具有一定的指导意义。

可见,蒸发式冷凝技术在国内的研究开始得较晚,理论研究主要体现在实验分析方面,通过实验得出的关联式和国外的相比也不尽相同。而模拟计算所采用的数学模型主要以国外的理论为依据,通过实验和模拟计算的结果比对,其相对误差较大。由于蒸发式换热器内部的传热传质机理非常复杂,通过国内外的理论研究表明,要精确的描述蒸发式换热器的传热传质过程,仍有很长的路要走。

## 4 蒸发式冷凝器应用状况和存在问题

### 4.1 蒸发式换热器应用研究

蒸发冷凝技术的应用带来了巨大的经济效益和社会效益,其广泛用于航空发动机、燃气轮机、空气压缩机等机械装置中。目前,由于工业生产及人们生活的需要,该技术越来越受到人们的关注与

重视。而市场经济的发展,为蒸发式冷凝器的应用提供了有利条件。由于蒸发式冷凝器是蒸发式换热器中的主要换热设备种类,所以本文着重介绍蒸发式冷凝器在国内的应用状况。

目前,国内蒸发式冷凝器的生产,除了上海、大连两大合资企业外,还出现了一批中小生产企业。2001年, Yunho. hwang 等人依据 ASHRAE 第 116 号标准,对蒸发式冷凝器和空气冷却式冷凝器在常见小型系统中的应用进行性能评估。结果表明,蒸发式冷凝器比空冷式冷凝器制冷量高出 1.8% ~ 8.1%, COP 的值高出 11.1% ~ 21.6%, SEER 的值高出 14.5%, 压缩机的能耗降低了 11.4%<sup>[47]</sup>。K. A Manske 等人对蒸发式冷凝器在工业制冷系统中的应用进行了模拟和试验研究,对冷凝器的选型和压力控制进行了优化,文献提出的优化控制方法可以使系统的年运行能耗减少 11%<sup>[48]</sup>。由于蒸发式冷凝器具有良好的节水、节能特性,所以蒸发式冷凝器市场的竞争十分激烈,在降低成本的同时提高蒸发式冷凝器的性能成为企业当前迫切需要解决的问题。

邱嘉昌等通过对美国 58 家和加拿大 4 家冷库使用的冷凝器进行调查表明,蒸发冷凝器已经在国外广泛应用<sup>[49]</sup>。调查结果如表 1 所示:

表 1 美国和加拿大 62 家冷库使用的冷凝器

冷凝器型式	立式	卧式	蒸发式	空冷式	板式
冷库数(个)	2	3	58	8	1

注: (1) 美国 58 家, 加拿大 4 家;  
(2) 有的冷库采用两种冷凝器型式。

水资源紧缺、能源危机和节水环保等因素促进了有关蒸发式冷凝器的应用研究。西北工业大学周景锋等人研究了蒸发冷凝技术在液体除湿和海水淡化技术中的应用以及蒸发式冷凝器在海水淡化装置中的应用<sup>[50] - [51]</sup>, 研究结果表明,蒸发式冷凝器在海水淡化装置中具有良好的使用性能。包卫分析了蒸发式冷凝器用在火电厂冷却系统中所具有的优点,论证了把蒸发冷运用在火电厂中是可行的<sup>[52]</sup>。李志清等人研究了蒸发式冷凝器在矿井冻结工程中的应用,实践证明 ZL 型蒸发式冷凝器与立式冷凝

器相比,可节水约 97.7%,取得了很好的节水效果<sup>[53]</sup>。李志明等对蒸发式冷凝器在工程实际中的应用进行了总结,对三种冷凝方式进行了系统能效比较,其比较结果表明,蒸发式冷凝器具有明显的节水、节能作用<sup>[54]</sup>。

王会串概述了蒸发冷在合成氨、尿素生产中的应用,指出蒸发冷具有比普通水冷凝器投资少、能耗低、安装简单、占地少、操作方便等诸多优点<sup>[55]</sup>。王少为等人介绍了应用于家用中央空调机组的小型氟里昂蒸发冷的设计方法、设计参数的选取以及设计时应注意的问题和为了控制结垢需要注意的一些关键因素。实践证明,在相对干燥的地区使用蒸发式冷凝器,系统的能耗相对节省了 16%,制冷性能相对提高了 55%。通过试验研究了对蒸发式换热器热质交换的各种影响因素,确定了蒸发式换热器的最佳范围,供工程设计、选型和生产参考。试验研究表明,采用蒸发式冷凝器可使房间空调器的能效比 (EER) 提高 50%~70%,并指出蒸发式冷凝式空调在空调市场具有很好的发展前景<sup>[56]-[58]</sup>。王铁军等分析了蒸发式冷凝器的传热机理、结构和技术特点,基于投资经济学理论及其分析方法建立了经济技术分析模型,应用该模型对制冷装置的冷凝器选型做了运行期经济效益分析计算<sup>[59]</sup>。李丹冲从蒸发冷的选配程序、水垢控制技术、运行管理以及在大型系统中的安装四个方面研究了蒸发冷在大型工业系统中的应用<sup>[60]</sup>。

以上文献是国内学者对蒸发式冷凝器在一部分领域的应用研究。在蒸发式冷凝器的应用领域方面,啤酒、食品、饮料、制药、石油化工等行业也越来越多的采用蒸发式冷凝器。实践应用表明蒸发式冷凝器相对于其它形式冷凝器具有明显优势,在内陆地区应优先选用节水、节电尤为显著的蒸发式冷凝器。另外,实践应用证明,在选用蒸发式冷凝器时,除了要重视其结构型式、应用特点外,还应对其选型计算、管路系统设计和循环水的水质处理等进行认真研究。

#### 4.2 蒸发式冷凝器存在的问题及对策

4.2.1 蒸发式冷凝器在理论研究方面存在的问题及对策 蒸发式冷凝器作为生产应用中的一种高效节能换热器,其传热传质原理和结构特点决定了在理论研究和生产应用中不可避免的存在一些问

题,其中一些在前人的研究中已经给出了相应的对策,也有一些需要人们进一步的研究分析。

在理论研究方面,由于蒸发式冷凝器的传热传质过程相当复杂,目前,国内外的大多数学者在相关的理论研究方面是基于种种假设的基础上的,所以建立精确的描述蒸发式冷凝器的理论模型是亟待解决的问题。另外,研究高效换热管提高蒸发式冷凝器的效率和优化冷凝器的结构也是需要进一步解决的问题。

4.2.2 蒸发式冷凝器在实际应用中存在的问题及对策 首先是结垢问题。实验和应用表明,污垢是影响蒸发式冷凝器盘管换热性能的最主要因素之一。因此,为了最佳的传热效率和最长的使用寿命,应考虑循环水的水质处理和循环水的循环周期,并采用较为先进的防结垢技术。催勋章等人对换热管的垢样进行了分析,其成分如表 2 所示<sup>[61]</sup>。并建立了喷淋式循环清洗工艺系统,通过实践检验,采用此喷淋式循环清洗工艺系统对蒸发式冷凝器盘管的清洗切合实际而且相当有效。

表 2 换热盘管垢样成分表

成分	质量分数
$\text{CaCO}_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2$	85%
ZnO	5%
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4$	5%
其它	5%

其次是腐蚀问题。由于蒸发式冷凝器是在潮湿的环境下运行的,易于腐蚀,所以其换热盘管、箱体以及风机电机都需要采用防腐处理。换热盘管的腐蚀问题是制约蒸发式冷凝器发展的关键因素,蒸发式冷凝器的换热盘管一般采用整体热浸锌防腐,并且要保证镀锌层的厚度,镀锌层的厚度不够或者镀锌不均都会影响蒸发冷的性能和寿命。

最后是水量和风量的合理分配问题。理论研究发现,水量和风量是影响蒸发冷的主要因素之一。应用中,冷却水流量远远超过理想指标,这与喷嘴型式和换热器型式有关。应用中有两种改进方式,一种是牺牲水泵的功率,加大循环冷却水的流量。但是,随着冷却水量的增大,管子表面的水膜的厚

度将增大, 管外局部换热系数却迅速下降, 而且水泵的功率加大, 所以这种方法不可取。另一种是改变蛇型盘管管的断面形式, 用椭圆管代替圆管。这种方式提高了冷却水的覆盖率, 但是没有从根本上解决问题。而实际应用中风量的分配也是采用强大的风力使冷却水在换热管底部形成水膜, 提高水的覆盖率, 打乱管底部的滞留区, 以提高换热效率。这种以牺牲风机功耗的方法来获得换热效率的增强, 不利于蒸发式冷凝的推广, 是不可取的。过大的水量和风量都不能使换热器高效的运行, 所以合理的分配冷凝器的水量和风量对提高换热器的性能有很重要的影响。

## 5 结论

在我国水资源匮乏, 尤其近年来电力资源日趋紧张的局势下, 加强对具有节水、节能、结构紧凑和占地面积小等优点的蒸发式换热器的研究已刻不容缓。对占我国面积一半以上的西北地区, 空气干燥, 夏季昼夜温差大, 冬季多为干冷气候, 常年平均相对湿度在 80% 以下, 正是应用蒸发式换热器的好地方。研究表明, 在新疆及其它干燥地区大力推广蒸发式换热器的应用是具有广阔前景的。但是蒸发式换热器作为制冷、冶金和化工等行业新型的热交换设备之一, 虽然具有节水、节能、结构紧凑等优点, 但依然存在一定的局限性和缺点。其理论和应用研究仍有很大的发展余地, 随着新技术的出现, 新产品的开发和应用方式的改进, 都为蒸发式换热器的发展提出新课题。

## 6 参考文献

- [1] 朱冬生, 涂爱民, 蒋翔等. 蒸发式冷凝冷却设备的研究状况及其应用前景分析[J]. 化工进展, 2007, 26(10): 1404-1410
- [2] 蒋翔, 朱冬生. 蒸发式冷凝器发展和应用[J]. 制冷, 2002, 21(4): 29-33
- [3] 谈向东, 向海容. 蒸发式冷凝器[J]. 制冷空调与电力机械, 2002, (4): 50-51
- [4] 邹克明. 蒸发式冷凝器使用效果浅析[J]. 冷藏技术, 1990(4): 9-11
- [5] 王振辉, 崔海亭, 于新奇. 制冷装置中冷凝器的现状及发展趋势[J]. 河北轻化工学院学报, 1997(1): 32-34
- [6] Uriyel Fisher, Wolfgang Leidenfrost, Jiashang Li. Hybrid Evaporative Condenser Cooling Tower. Heat Transfer Engineering, 1983, 4(2): 28-41
- [7] H. Perez-Blanco, W. A. Bird. Study of Heat and Mass Transfer in a Vertical-Tube Evaporative Cooler. Transactions of the ASME, 1984, 106: 210-215
- [8] Ralph L Webb, Alejandro Viliacres. Performance Simulation of Evaporative Heat Exchangers( Cooling, Fluid Coolers and Condensers). Heat Transfer Engineering, 1985, 6(2): 31-38
- [9] P. J. Erens. Comparison of Some Design Choices for Evaporative Cooler Cores. Heat Transfer Engineering, 1988, 9(2): 29-35
- [10] Wojciech Zalewski. Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes in Evaporative Condensers. Int. J. Refrig, 1993, 16(1): 23-30
- [11] M. C. DE ANDRES, E. HOO. AND F. ZHANGRANDO. Performance of direct-contact heat and mass exchanges with steam-gas mixtures at subatmospheric pressures. Heat and mass transfer, vol 39, no 5. 1996 p965-973
- [12] FaisalI. Al- Juwayhel, AmirA. Al- Haddad, HabibI. ShabanI. A. El- Dessouky. Experimental Investigation of the Performance of Two- Stage Evaporative Coolers. Heat Transfer Engineering, 1997, 18(2): 21-32
- [13] Hisham El- Dessouky, Hisham Ettouney, Ajeel Al- Zeefari. Performance analysis of two-stage evaporative coolers. Chemical Engineering Journal, 102 (2004) 255-266
- [14] Wojeiech Zalewski, Piotr Antoni Gryglaszewski. Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes in Evaporative Fluid Coolers. Chemical Engineering and Processing, 1997, 36(4): 271-280
- [15] Boris Halasz. A General Mathematical Model of Evaporative Cooling Devices. Revue Generale de Themique, 1998, 37(4): 245-255
- [16] Hisham M. Ettouney, et al. Performance of Evaporative Condensers. Heat Transfer Engineering, 2001, 22(4): 41-55
- [17] Ala Hasan, Kai Siren. Performance Investigation of plain and finned tube evaporatively cooled heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3): 325-340
- [18] Ala Hasan, Kai Siren. Performance Investigation of plain circular and oval tube evaporatively cooled heat exchangers. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5-6): 777-790
- [19] Jlebun PhD, C Aparecida silva PhD, F Trebilcock Msc and E Winandy PhD. Simplified models for direct and indirect contact cooling towers and evaporative condensers. Building services Engineering research and Technology, v25, no1, 2004, 25-31
- [20] Pascal Stabat, Dominique Marchio. Simplified model for indirect-contact evaporative cooling-tower behaviour. Applied Energy, 78 (2004) 433-451
- [21] M. Hosoz and A. Kilicaslan. Performance evaluations of refrigeration systems with air-cooled, water-cooled and evaporative condensers. Int. J. Energy Res, 2004; 28: 683-696

- [ 22 ] A. S. Kaiser, M. Lucas, A. Viedma, B. Zamora Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(2005) 986– 999
- [ 23 ] A Abbassi, L. Bahar Application of neural network for the modeling and control of evaporative condenser cooling load. *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005) 3176– 3186
- [ 24 ] H. M. Ertunc, M. Hosoz Artificial neural network analysis of a refrigeration system with an evaporative condenser. *Applied Thermal Engineering*, 26 (2006) 627– 635
- [ 25 ] Bilal A Qureshi, Syed M Zubair. A comprehensive design and rating study of evaporative coolers and condensers Part I. Performance evaluation. *International Journal of Refrigeration*, 29 (2006) 645– 658
- [ 26 ] Bilal A Qureshi, Syed M Zubair. A comprehensive design and rating study of evaporative coolers and condensers Part II. Sensitivity analysis. *International Journal of Refrigeration*, 29(2006) 659– 668
- [ 27 ] Bilal A Qureshi, Syed M. Zubair. Second- law- based performance evaluation of cooling towers and evaporative heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 46 (2007) 188– 198
- [ 28 ] 蔡祖康. 氨用蒸发式冷凝器冷凝能力的变换 [C]. 全国暖通空调制冷. 1986年学术年会论文集, 1986
- [ 29 ] 刘焕成, 蔡祖康. 蒸发式冷凝器热力计算的简化方法[J]. 上海交大科技, 1990 (2): 88– 93
- [ 30 ] 王东屏. 蒸发式冷凝器的设计[J]. 大连铁道学院学报, 1999, 20 (1): 45– 49
- [ 31 ] 晏刚, 马贞俊, 周晋等. 蒸发式冷凝器的设计与应用[J]. 制冷与空调, 2003, 3 (3): 43– 45
- [ 32 ] 屈元, 黄翔. 间接蒸发冷却器热工计算数学模型及验证[J]. 流体机械, 2004, 32 (11): 50– 53
- [ 33 ] 唐伟杰, 张旭. 大型工业用蒸发式冷却器的换热模型与仿真[J]. 制冷空调与电力机械, 2005, 26 (1): 8– 11
- [ 34 ] 唐伟杰, 张旭. 蒸发式冷凝器的换热模型与解析解[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2005, 33 (7): 942– 946
- [ 35 ] 郝亮, 阚杰, 袁秀玲. 蒸发式冷凝器稳态模型数值模拟[J]. 制冷与空调, 2005, 5 (4): 31– 34
- [ 36 ] 王铁军. 喷淋蒸发翅管式冷凝器传热传质研究[J]. 制冷技术, 2006, 34 (4): 299– 302
- [ 37 ] 洪兴龙, 李瑛. 蒸发式冷凝器的设计选型及在氨制冷系统中的应用[J]. 流体机械, 2006, (12): 80– 83
- [ 38 ] 朱冬生, 沈家龙, 蒋翔等. 湿空气对蒸发式冷凝器性能的影响[J]. 制冷技术, 2006, (6): 17– 22
- [ 39 ] 蒋翔, 唐广栋, 朱冬生等. 来流场对蒸发式冷凝器性能影响的研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(4): 17– 22
- [ 40 ] 张景卫, 朱冬生, 吴治将等. 蒸发式冷凝器管束中强制对流空气 CFD 模拟[J]. 石油化工设备, 2007, 36 (4): 1– 5
- [ 41 ] 蒋翔, 朱冬生, 唐广栋. 蒸发式冷凝器管外水膜与空气传热性能及机理的研究[J]. 流体机械, 2006, 34 (8): 59– 62
- [ 42 ] 朱冬生, 沈家龙, 蒋翔等. 蒸发式冷凝器性能研究及强化[J]. 制冷学报, 2006, 27 (3): 45– 49
- [ 43 ] 朱冬生, 沈家龙, 唐广栋等. 水分布对蒸发式冷凝器传热传质的影响[J]. 工程热物理学报, 2007, 28 (1): 83– 85
- [ 44 ] 唐广栋, 蒋翔, 沈家龙等. 蒸发式冷凝器管外水膜分布[J]. 石油化工设备, 2006, 35 (4): 5– 8
- [ 45 ] 朱冬生, 沈家龙, 蒋翔等. 蒸发式冷凝器管外水膜传热性能实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2007, 21 (1): 31– 36
- [ 46 ] 朱冬生, 沈家龙, 蒋翔等. 蒸发式冷凝器管外水膜流动实验研究[J]. 化学工程, 2006, 34 (8): 17– 20
- [ 47 ] Yunho. hwang, Reinhard Rademacher, William Kopko. An experimental evaluation of a residential- sized evaporatively Cooled condenser. *International journal of refrigeration*, 24 (2001) 238– 249
- [ 48 ] K. A. Manske, D. T. Reindl, S. A. Klein. Evaporative condenser control in industrial refrigeration. *International journal of refrigeration*, 24(2001) 676– 691
- [ 49 ] 邱嘉昌, 刘黄炳. 制冷系统采用蒸发式冷凝器的节能效果[J]. 上海节能, 2006, (2): 29– 31
- [ 50 ] 周景锋, 原郭丰, 张立希等. 几种热泵式海水淡化装置的性能比较研究[J]. 工业用水与废水, 2006, 37 (2): 61– 64
- [ 51 ] 蒋妮. 蒸发冷凝传热传质研究及应用 [D]. 西北工业大学, 2002
- [ 52 ] 包卫. 蒸发式冷凝器用于火电厂冷却系统的可行性分析[J]. 浙江电力, 2004, (4): 46– 49
- [ 53 ] 李志清, 马万昌, 张强等. ZL 型高效蒸发式冷凝器在冻结工程中的应用[J]. 建井技术, 2000, 21 (6): 35– 38
- [ 54 ] 李志明, 杨红波. 蒸发式冷凝在制冷工艺上的应用[J]. 技术交流, 2004, (6): 79– 82
- [ 55 ] 王会串. 谈蒸发式冷凝器的使用[J]. 山西化工, 2003, 23 (1): 24– 31
- [ 56 ] 刘宪英, 葛虹, 孙纯武等. 蒸发式冷凝器应用于房间空调器的试验研究[J]. 暖通空调, 1997, 27 (5): 31– 34
- [ 57 ] 刘洪胜, 孟建军, 陈江平等. 家用中央空调机组用蒸发式冷凝器的开发[J]. 流体机械, 2004, 32 (10): 53– 56
- [ 58 ] 王少为, 于立强. 蒸发式冷凝器应用于户式空调的实验研究[J]. 节能, 2003, (3): 9– 12
- [ 59 ] 王铁军, 吴昊, 刘向农等. 蒸发式冷凝器经济技术分析[J]. 低温与超导, 2003, 31 (2): 65– 69
- [ 60 ] 李丹冲. 蒸发式冷凝器在大型氨制冷系统中的应用[J]. 冷藏技术, 2005, (3): 13– 18
- [ 61 ] 崔勋章, 韩祺召, 陈洪等. 蒸发式冷凝器的喷淋化学清洗[J]. 清洗世界, 2005, 21 (10): 14– 16