



蒸发冷却空调 理论与应用

THEORY AND
APPLICATIONS OF EVAPORATIVE
AIR CONDITIONING

黄翔 等编著

中国建筑工业出版社

蒸发冷却空调理论与应用

黄翔 等编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

蒸发冷却空调理论与应用/黄翔等编著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2010.8
ISBN 978-7-112-12195-3

I. ①蒸… II. ①黄… III. ①蒸发冷却制冷-制冷
技术 IV. ①TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 116002 号

本书是为适应从事蒸发冷却空调技术的工程技术人员和研究工作者的需要, 作者在总结十余年来蒸发冷却空调技术理论研究成果和工程实践经验的基础上完成的。全书共分 14 章, 内容涵盖了蒸发冷却空调的基础理论、蒸发冷却空调的气候适应区及室内热舒适性、直接蒸发冷却器 (段) 用填料、直接蒸发冷却器 (段)、喷水室、间接蒸发冷却器 (段)、集中式蒸发冷却空调系统、半集中式蒸发冷却空调系统、蒸发冷却技术与其他空调新技术的结合、建筑表面被动蒸发冷却、蒸发冷却空调其他方面的问题、蒸发冷却空调的应用及蒸发冷却空调标准等方面。全书反映了进入 21 世纪以来国内外蒸发冷却空调技术发展的最新动态和研究进展及成果。书中着重启示工程应用; 突出“创新”意识、“实用”价值; 注重将蒸发冷却空调理论与应用相结合。并力求反映作者最新的研究成果。

本书适用于从事蒸发冷却空调技术的工程设计、施工、研究及应用的技术人员参考, 还可供高等学校建筑环境与设备工程、制冷与低温工程等专业的师生作为暖通空调制冷新技术和热质交换原理与设备及建筑环境传热质学等课程教学时参考。

* * *

责任编辑: 张文胜 姚荣华
责任设计: 李志立
责任校对: 王金珠 陈晶晶

蒸发冷却空调理论与应用

黄翔 等编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 33 $\frac{3}{4}$ 字数: 842 千字

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月第一次印刷

定价: 88.00 元

ISBN 978-7-112-12195-3

(19437)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书编委会

主 编 黄 翔

参编人员 宣永梅 颜苏芊 强天伟 狄育慧

屈 元 吴志湘 武俊梅 汪 超

靳贵铭 吴 生 樊丽娟 徐方成

文 力 殷清海 刘小文

序 一

我于 20 世纪 80 年代中期与美国劳伦斯—伯克利实验室进行蒸发冷却空调技术的国际合作研究。当时,我注意到 20 世纪 70 年代美国等国家出现石油危机以后,将蒸发冷却技术用于空调,并且日益受到人们的重视。一些工厂开发了有关直接蒸发冷却和间接蒸发冷却的产品,逐步实现了商业化。与此同时,对蒸发冷却空调技术的研究及其实际应用在不断扩大。美国 ASHRAE 早已成立了名为“蒸发冷却”的技术委员会(TC 5.7),还成立了一个制订“额定间接蒸发冷却器的试验方法”标准的委员会(SPC 143P)。在其他国家(如澳大利亚等)也已在多年前生产出间接蒸发空气冷却器。在一些空调系统中采用了这一技术后,取得了极为明显的节能效果。通过不断的研究,在国外已出现了无论在干燥地区还是非干燥地区都可避免使用机械制冷设备的空调系统,使得空调技术在其发展途径中出现另一个很有前景的领域。为此,本人多次撰文建议国内应投入一定精力从事间接蒸发冷却技术的研制,尽早在我国推广这一技术。

我于 1989 年在《暖通空调》第 2 期上曾发表过“论间接蒸发冷却技术在我国的应用前景”一文,事隔 10 年后的 1999 年 4 月 22 日,受西安制冷学会的邀请,我和秦慧敏教授、张旭教授及李峥嵘教授前往西安,出席了在西安建国饭店召开的“蒸发冷却与热能回收新技术交流及申海集团新产品推广会”。在会上与当时的西北纺织工学院空调教研室主任黄翔教授和该校其他专家作了全面的交流。黄教授作了主题为“两种适合于西北地区气象条件的新型空调设备的开发”的报告,同时还作为西安制冷学会常务理事,代表学会作了总结发言。当时我对他的第一印象是非常谦虚好学,且具有年轻人的朝气。

从那以后至今又过去了十年,黄翔教授现在已是西安工程大学的教授、副校长,西安制冷学会理事长。10 年来,他率领的蒸发冷却研究团队,紧密结合我国西部地区的气象条件特征,开展了利用干燥空气可再生自然湿能的蒸发冷却空调技术理论与工程应用的研究。主要研究成果包括蒸发冷却技术的工程设计简化模型及设计方法、新型间接蒸发冷却器的开发、蒸发冷却与机械制冷相结合的多级蒸发冷却空调系统及自动控制系统的开发、蒸发冷却与辐射供暖/供冷及置换通风相结合的半集中式空调系统的开发、建筑物的被动蒸发冷却技术、蒸发冷却水质处理方法及蒸发冷却高温冷水机组等,使蒸发冷却空调技术在我国西北地区的旅馆、写字楼、商场、体育馆、影剧院、展览馆、工业厂房等多个工业与民用建筑实际工程中得到应用。《中国制冷史》第 253 页 1. 6. 4 节中记载“进入 21 世纪后,西安工程大学对蒸发冷却技术开展了大量的研究和推广应用工作,取得了可喜的成果”。看到黄翔教授和他所领导的蒸发冷却研究团队十年来取得如此多的成绩,尤其是看到蒸发冷却空调技术在我国广东、福建、江苏、浙江、湖南等沿海地区及新疆、甘肃、青海、宁夏、陕西等西北地区得到推广应用,我感到由衷的高兴和欣慰。

俗话说“十年磨一剑”。《蒸发冷却空调理论与应用》一书无疑是黄翔教授领导的蒸发冷却研究团队十年来所取得成果的展示。黄翔教授组织翻译的美国约翰·瓦特教授等编著

的《蒸发冷却空调技术手册》(原书第3版)堪称国际蒸发冷却空调方面的经典之作。但该书主要反映的是上个世纪即1997年以前美国等国外的蒸发冷却空调技术的有关情况。而进入21世纪的近十年来,随着材料科学、高效换热器技术及智能控制技术等学科的快速发展,现代蒸发冷却空调技术也得到了长足的发展,如直接蒸发冷却器用多孔陶瓷填料、热管式和露点式间接蒸发冷却器、半间接蒸发冷却器、采用干式风机盘管或毛细管等空调显热末端装置的半集中式蒸发冷却空调系统、蒸发冷却空调循环水质处理系统、蒸发冷却空调自动控制系统、建筑表面被动蒸发冷却以及蒸发冷却空调标准等。另外,蒸发冷却与自然通风技术的结合、蒸发冷却与置换通风技术的结合、蒸发冷却与辐射供冷(暖)技术的结合、蒸发冷却与机械制冷的结合及蒸发冷却与除湿技术的结合、蒸发冷却空调应用实例等。而这些恰恰是黄翔教授领导的蒸发冷却研究团队十年来的主攻研究方向和科研课题,已充分反映在该书的相关章节之中,从而体现出“创新”意识。

十年来,黄翔教授领导的蒸发冷却研究团队紧密围绕着工程应用开展了广泛的产学研合作,大量研究是深入新疆等蒸发冷却空调工程实际调查研究和现场测试所获得的第一手资料,搭建了多个适合干燥地区和中等湿度地区气象条件的集中式和半集中式蒸发冷却空调系统实验台,所获得的实验数据具有一定的准确性和可靠性。研究出的集中式和半集中式蒸发冷却空调系统工程设计计算方法,对工程设计人员正确地选择和设计蒸发冷却空调设备及系统具有一定的指导意义。书中的许多实例和有关图表来自国内生产蒸发冷却空调设备的骨干企业,从而体现出“实用”价值。

黄翔教授领导的蒸发冷却研究团队还十分重视蒸发冷却空调工程应用理论的研究。运用CFD技术、智能控制技术和纳米、陶瓷材料科学等新技术提升蒸发冷却空调的工程应用理论。优化了原有直接和间接蒸发冷却器的数学模型,建立了新的热管式间接蒸发冷却器和露点式间接蒸发冷却器数学模型等。注重将蒸发冷却空调理论与应用相结合,将传统蒸发冷却空调技术与现代高新技术相结合,将蒸发冷却空调技术与机械制冷、除湿等空调技术相结合,为蒸发冷却空调工程的应用奠定了坚实的基础,从而体现出“三结合”。

当前,节约能源是我国经济和社会发展的一项战略任务。黄翔教授等编著的《蒸发冷却空调理论与应用》一书,对暖通空调行业来说,无疑是雪中送炭,填补了我国在该领域的空白。我深信该书的出版必将对我国的节能减排工作起到积极的促进作用,会为我国建筑节能作出一定的贡献。衷心地祝愿黄翔教授领导的蒸发冷却研究团队在未来的征程中,再接再厉,不断创新,再创辉煌!

同济大学教授 陈序霖
2010年4月22日于上海

序 二

蒸发冷却空调技术是一种高效环保而且经济的冷却方式，能有效降低系统耗电量和用电高峰期对电能的要求、能减少温室气体等的排放，是真正意义上的节能环保和可持续发展的制冷空调技术。

目前，蒸发冷却空调技术在我国西北地区等地得到了大量的应用和推广，且形成了一定的产业规模，涌现出一批掌握先进技术的企业，产品已形成系列化。如此快速的生长，使我们相信这项技术具有很强的竞争力，可以依赖市场而良好地生存发展。

西安工程大学副校长黄翔教授很早就进行了蒸发冷却空调技术方面的工作，有着十余年的蒸发冷却空调技术理论研究和工程实践经验。为了推动蒸发冷却空调技术在我国的应用与发展，以及满足从事蒸发冷却空调技术的工程技术人员和研究工作者的需要，编著了《蒸发冷却空调理论与应用》一书。本书内容翔实，结合我国大量工程实践，较强的突出“创新”意识和“实践”价值，注重理论研究和实际应用的结合，反映出作者最新的研究成果。本书从基础理论、气候适应区及室内热舒适性、主要系统设备、不同系统构成、同其他空调新技术的结合、技术应用领域、标准规范等方面对蒸发冷却空调技术进行了全面的介绍和总结，这对蒸发冷却空调技术在实际中的推广应用有良好的指导作用。本书的出版对推动蒸发冷却空调技术在国内健康发展是一项十分有益的事。

本书的出版是对蒸发冷却空调技术应用发展的一大贡献，编者为此付出了辛勤的劳动，本人对该书的出版发行表示衷心的祝贺。

中国建筑学会暖通空调分会理事长

中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院院长

2010年4月28日

前 言

西安工程大学蒸发冷却空调研究团队是由该校供热、供燃气、通风及空调工程学科带头人黄翔教授率领的 10 余位教师及 40 余名研究生所组成的队伍。该团队在进入 21 世纪的近十年来,结合我国西部地区的气象条件特征和纺织行业空气热湿处理的特点,系统地开展了利用干燥空气可再生自然湿能的蒸发冷却空调技术理论与工程应用的研究,取得了阶段性成果,并得到了国家自然科学基金专项基金的资助(项目编号:50846056)。主持的陕西省科技厅工业攻关科技计划项目“包覆吸水性材料椭圆管式间接蒸发冷却器的研究”(项目编号:2005K07-G7)通过陕西省科技厅组织的技术鉴定,达到国际先进水平。该项目荣获 2009 年陕西高等学校科学技术一等奖和陕西省科技二等奖;主持的项目“节能生态型管式间接蒸发冷却空调的开发”荣获中国纺织工业协会 2009 年度科学技术进步三等奖;主持的陕西省教育厅产业化培育项目“热回收型热管式间接—直接蒸发冷却空调机组的开发”(项目编号:07JC02)和“蒸发冷却空调机组自控系统的开发”等项目分别通过陕西省科技厅组织的技术鉴定,达到国际先进水平;主编的国际大型实用工具书《纺织空调除尘手册》,获中国纺织工业协会 2005 年度科学技术进步二等奖;主编的 21 世纪高等教育建筑环境与设备工程系列规划教材《空调工程》,被批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,并获中国纺织工业协会 2008 年度科学技术进步三等奖;组织翻译了国际蒸发冷却空调经典之作,美国约翰·瓦特等编著的《蒸发冷却空调技术手册》译著,参编《制冷学科进展研究与发展报告》和《实用供热空调设计手册》(第二版)。近年来在国内外刊物上发表有关论文 200 余篇,其中被三大检索收录 30 余篇,获奖论文近 10 篇;荣获省部级科技奖 10 余项(其中二等奖 4 项、三等奖 5 项);目前已申报近百项国家专利,其中已获得“一种椭圆管式间接蒸发冷却器”、“热回收型热管式两级蒸发冷却器”、“一种露点板式间接蒸发冷却器”、“强化管式间接蒸发冷却器换热管外传热传质的方法”、“一种蒸发冷却与机械制冷复合空调机组”、“基于蒸发冷却的置换通风与辐射供冷/热复合空调系统”、“一种四级蒸发冷却组合式空调机组”、“多孔陶瓷板翅式间接蒸发冷却器”、“一种多孔陶瓷管式露点间接蒸发冷却器”、“一种热端带有多孔陶瓷储水器的热管间接蒸发冷却器”、“立管式露点间接蒸发冷却器”、“蒸发冷却空调机组自控装置”、“节能生态型智能化蒸发冷却组合式空调机组自控装置”、“蒸发冷却空调循环冷却水的臭氧净化装置”、“冷风/冷水复合型空调机组”、“一种热管冷回收型蒸发冷却式高温冷水机组”及“管式蒸发冷却器、蒸发冷却盘管组成的闭式空调机组”等 50 余项专利授权;参编国家标准《蒸发式冷气机》和《水蒸发冷却空调机组》及《水蒸发冷却工程技术规程》,并多次在国际会议及中国香港、中国台湾等地进行学术交流。

“十年磨一剑”,由黄翔教授组织编著的《蒸发冷却空调理论与应用》一书,正是对十年研究工作的全面总结。全书共分 14 章,内容涵盖了蒸发冷却空调的基础理论、蒸发冷却空调的气候适应区及室内热舒适性、直接蒸发冷却器(段)用填料、直接蒸发冷却器

(段)、喷水室、间接蒸发冷却器(段)、集中式蒸发冷却空调系统、半集中式蒸发冷却空调系统、蒸发冷却与其他空调新技术的结合、建筑表面被动蒸发冷却、蒸发冷却空调其他方面问题、蒸发冷却空调的应用及蒸发冷却空调标准等方面。其中第1章由黄翔编著;第2章由武俊梅、黄翔、强天伟和屈元编著;第3章由狄育慧和黄翔编著;第4章由宣永梅、黄翔和刘小文编著;第5章由黄翔、吴生和汪超编著;第6章由颜苏芊和黄翔编著;第7章由黄翔、樊丽娟和文力编著;第8章由屈元和黄翔编著;第9章由宣永梅、黄翔和靳贵铭编著;第10章由黄翔、徐方成和樊丽娟编著;第11章由颜苏芊、黄翔编著;第12章由强天伟、黄翔编著;第13章由吴志湘、黄翔和殷清海编著;第14章由汪超和黄翔编著。全书由黄翔统稿。

本书在编著过程中得到了暖通空调界前辈们的亲切关怀和同仁们的鼎力支持,以及在蒸发冷却空调技术领域辛勤耕耘和潜心研究者的鼓励和鞭策。特别要感谢同济大学陈沛霖教授十年来时时刻刻对我们研究团队所给予的悉心关怀和指导。即便在他身患疾病的情况下,还为本书作序,充分体现出老一辈暖通空调专家的高尚品德及对年轻一代的提携和关爱。感谢中国建筑学会暖通空调分会理事长、中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院徐伟院长对蒸发冷却空调技术的关爱及对我们的指导与帮助,尤其是他在百忙中抽出时间为本书作序,对我们研究团队给予了极大的鼓舞和鞭策。感谢新疆绿色使者空气环境有限公司、西安井上人工环境有限公司、澳蓝(福建)实业有限公司、东莞市科达机电设备有限公司、杭州兴环科技开发有限公司、南通昆仑空调有限公司及TROX妥思空调设备(苏州)有限公司等单位为本书提供了相关的资料和支持。

本书是团队集体智慧的结晶,特向全体作者的愉快合作表示祝贺,同时向大家表示感谢。另外还要感谢研究生汪超、郑小丽、刘小文、孙铁柱、尧德华、卢永梅、李成成、王伟等同学,他们为本书做了大量的文字处理、绘制图表、整理等工作,特别是汪超同学协助导师做了大量协调和校对工作,使得本书能够如期完成。

最后,对所有关心和支持本书编著的人士表示真挚的谢意!尤其是感谢中国建筑工业出版社及本书的责任编辑张文胜和姚荣华两位同志,为本书的出版付出了辛勤的劳动,对作者给予了极大的支持。

十年的研究只是蚕蛹破茧,我们还只是针对我国西北等干燥地区的蒸发冷却空调的应用做了一些基础研究工作。在未来的十年,我们还将永不放弃蒸发冷却空调技术这一研究方向,继续做好干燥地区蒸发冷却空调的推广应用工作,并在此基础上进一步研究中等湿度地区蒸发冷却空调与机械制冷等技术的集成等技术问题,不断拓展蒸发冷却空调的应用范围和提高蒸发冷却空调的稳定性及可靠性。未来十年,我们的目标是使蒸发冷却空调这一可再生能源技术在我国干燥地区成为主流空调,在中等湿度地区成为机械制冷空调重要的预冷装置,降低机械制冷空调的负荷,尽量减少人工冷源的开启时间。为我国的节能减排和建筑节能作出应有的贡献。

由于本书作者水平有限,书中难免存在疏漏,敬请读者不吝赐教。

作者

2010年4月于西安工程大学

符 号 说 明

$AUST$ ——加权平均温度, $^{\circ}\text{C}$

B ——宽度, m ; 当地大气压, Pa

C ——浓度, mol/m^3

c_p ——干空气的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

c_{pa} ——空气的定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

c'_{pa} ——以湿空气湿球温度定义的空气定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

c_{pw} ——以空气湿球温度定义的湿空气定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$

D ——扩散系数, m^2/s

d ——含湿量, g/kg 干空气; 直径, m

E ——蒸发率

EER ——能效比, kW/kW ;

F ——面积, m^2

g ——重力加速度, m/s^2

H ——高度, m

h ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; 焓, kJ/kg ;

h_m ——对流传质系数, m/s

K ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$

k ——斜率

L ——风量, m^3/h

l ——长度, m

M ——质量流量, kg/s

NTU ——传热单元数

P ——输入功率, kW ; 压力, Pa

Q ——热量、负荷, kW

q ——风量, kg/s ; 单位面积淋水密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 热量, kJ

r ——热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

t ——温度, $^{\circ}\text{C}$

U ——湿周, m

V ——流量, m^3/h

v ——迎面风速, m/s

W ——加湿量 kg/s ; 湿负荷, kg/s

希腊字母:

- α ——空气与水的换热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
 β ——逐时变化系数
 δ ——厚度, m
 ϵ ——发射率
 ζ ——蒸发阻力, $\text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{kg}$
 η ——直接蒸发冷却器的换热效率, %
 λ ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
 ν ——水的运动黏性系数, m^2/s
 ξ ——比表面积, m^2/m^3
 ρ ——密度, kg/m^3 ; 反射率
 τ ——时间变量, s
 φ ——相对湿度, %
 Γ ——单位长度淋水密度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

准则数:

- Nu ——努谢尔特准则
 Pr ——普朗特准则数
 Re ——雷诺准则

下标:

- a ——空气
 b ——饱和
 DEC ——直接蒸发冷却器
 e ——当量
 g ——干球
 IEC ——间接蒸发冷却器
 l ——露点
 n ——房间
 o ——送风
 r ——平均
 s ——湿球
 w ——水
 $DIEC$ ——露点间接蒸发冷却器

目 录

序一

序二

前言

符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 直接蒸发冷却器	1
1.2 间接蒸发冷却器	8
1.3 复合式蒸发冷却空调系统	15
1.4 蒸发冷却空调技术相关问题	19
1.5 结束语	21
参考文献	22
第 2 章 蒸发冷却空调的基础理论	38
2.1 直接蒸发冷却空调的基础理论	38
2.2 间接蒸发冷却空调的基础理论	53
参考文献	76
第 3 章 蒸发冷却空调的气候适应区及室内热舒适性	79
3.1 气候及其划分	79
3.2 蒸发冷却空调应用范围分区	85
3.3 蒸发冷却的热舒适性区域及设计参数	106
参考文献	130
第 4 章 直接蒸发冷却器 (段) 用填料	136
4.1 概述	136
4.2 填料种类及性能	136
4.3 填料降温性能	140
4.4 填料加湿性能	160
4.5 填料过滤除尘性能	165
参考文献	171
第 5 章 直接蒸发冷却器 (段)	173
5.1 概述	173

5.2 普通(商用)直接蒸发冷却器	174
5.3 家用直接蒸发冷却器	182
5.4 新型直接蒸发冷却器	183
5.5 直接蒸发冷却器的性能评价	188
参考文献	192
第6章 喷水室	193
6.1 概述	193
6.2 喷嘴	195
6.3 喷水室的热工性能和影响因素分析	203
6.4 低速喷水室的热工计算	205
6.5 高速喷水室的热工计算和实验研究	212
6.6 流体动力式喷水室	215
6.7 复合式喷水室	219
参考文献	225
第7章 间接蒸发冷却器(段)	227
7.1 概述	227
7.2 板翅式间接蒸发冷却器	227
7.3 管式间接蒸发冷却器	231
7.4 热管式间接蒸发冷却器	245
7.5 露点式间接蒸发冷却器	254
7.6 半间接式蒸发冷却器	263
7.7 间接蒸发冷却器的性能评价	265
参考文献	266
第8章 集中式蒸发冷却空调系统	268
8.1 概述	268
8.2 系统流程及应用模式	268
8.3 多级蒸发冷却空调机组	271
8.4 集中式蒸发冷却空调系统设计	291
参考文献	297
第9章 半集中式蒸发冷却空调系统	299
9.1 概述	299
9.2 系统流程及应用模式	300
9.3 蒸发冷却新风机组	308
9.4 蒸发式冷水机组及冷却塔	318
9.5 半集中式蒸发冷却空调系统末端装置	336

9.6 半集中式蒸发冷却空调系统设计	349
参考文献	367
第 10 章 蒸发冷却技术与其他空调新技术的结合	369
10.1 概述	369
10.2 蒸发冷却与机械制冷的结合	369
10.3 蒸发冷却与除湿技术的结合	388
10.4 蒸发冷却与辐射供冷(暖)技术的结合	394
10.5 蒸发冷却与自然通风技术的结合	396
10.6 蒸发冷却与置换通风技术的结合	398
10.7 蒸发冷却与工位—环境送风技术的结合	399
10.8 蒸发冷却与纳米光催化技术的结合	401
10.9 蒸发冷却与负离子净化技术的结合	402
参考文献	403
第 11 章 建筑表面被动蒸发冷却	404
11.1 概述	404
11.2 建筑表面被动蒸发降温基础	414
11.3 多孔调湿材料被动蒸发冷却综合实验研究	419
11.4 新型建筑表面被动蒸发冷却技术	425
参考文献	428
第 12 章 蒸发冷却空调其他方面的问题	430
12.1 概述	430
12.2 蒸发冷却空调自动控制系统	431
12.3 蒸发冷却空调循环水质处理系统	459
参考文献	470
第 13 章 蒸发冷却空调的应用	472
13.1 工业应用	472
13.2 农业应用	482
13.3 公共建筑应用	485
参考文献	497
第 14 章 蒸发冷却空调标准	498
14.1 概述	498
14.2 国外蒸发冷却空调标准	502
14.3 国内蒸发冷却空调标准	514
参考文献	524

第 1 章 绪 论

蒸发冷却空调技术是一项利用水蒸发吸热制冷的技术。水在空气中具有蒸发能力。在没有别的热源的条件下,水与空气间的热湿交换过程是空气将显热传递给水,使空气的温度下降。而由于水的蒸发,空气的含湿量不但要增加,而且进入空气的水蒸气带回一些汽化潜热。当这两种热量相等时,水温达到空气的湿球温度。只要空气不是饱和的,利用循环水直接(或通过填料层)喷淋空气就可获得降温的效果。在条件允许时,可以将降温后的空气作为送风以降低室温,这种处理空气的方法称为蒸发冷却空调。

蒸发冷却空调技术是一种环保、高效、经济的冷却方式。它具有较低的冷却设备成本,能大幅度降低用电量和用电高峰期对电能的要求,能减少温室气体和 CFC 的排放量。因此,广泛应用于居住建筑和公共建筑中的舒适性冷却,并可在传统的工业领域,如纺织厂、面粉厂、铸造车间、动力发电厂等工业建筑中提高工人的舒适性。蒸发冷却空调可以降低干球温度,给居住者提供一个较舒适的环境。蒸发冷却空调还可通过控制干球温度和相对湿度来改善农作物的生长环境及满足生产工艺要求。

在我国,将蒸发冷却空调技术作为自然冷源替代人工冷源的研究早在 20 世纪 60 年代已引起国内学者的关注。20 世纪 80~90 年代,开展蒸发冷却空调技术的研究主要集中在同济大学、哈尔滨工业大学、天津大学、北京工业大学等高校,主要对蒸发冷却空调技术的传递过程理论分析、热湿交换计算、填料性能以及在空调机组、风冷热泵中的应用进行了研究和相关试验,对蒸发冷却空调技术与晚间通风、机械制冷联用进行了研究,并开发出了直接蒸发冷却局部空调器。与此同时,哈尔滨空调机厂生产出了我国第一台填料蒸发式空气冷却器,新疆绿色使者环境技术有限公司开发出了亲水性铝填料直接蒸发冷却器和板翅式间接蒸发冷却器等系列产品,澳蓝(福建)实业有限公司开发出系列蒸发式冷气机。进入 21 世纪,西安工程大学对蒸发冷却空调技术开展了大量的研究和推广应用工作,取得了可喜的成果^[1]。

目前,蒸发冷却空调技术已在我国的新疆、甘肃、青海、宁夏、陕西等西北地区及广东、福建、江苏、浙江等沿海地区得到推广应用。

以下从直接蒸发冷却器、间接蒸发冷却器、复合式蒸发冷却空调系统、蒸发冷却空调技术相关问题等四个方面,系统地介绍进入 21 世纪以来国内外蒸发冷却空调技术的发展概况。

1.1 直接蒸发冷却器

目前,直接蒸发冷却器主要有两种类型:一类是将直接蒸发冷却装置与风机组合在一起,称为单元式空气蒸发冷却器;另一类是将直接蒸发冷却装置设在组合式空气处理机组内作为直接蒸发冷却段。

填料或介质是直接蒸发冷却器的核心部件。目前,填料主要有木丝填料、刚性填料和合成填料三种。国内市场上常见的刚性填料有瑞典某公司生产的 CELdek 有机填料和 GLASdek 无机填料及国产的金属(不锈钢或铝箔)填料等。国家空调设备质量监督检验中心对三种填料的检验结果如表 1-1 所示。从填料的热工性能来看,三种填料中无机填料最好。综合考虑填料的防腐耐久性、防火性能、除尘性能及经济性等,金属填料性能最好,目前在工程中应用最广^[2]。

1.1.1 填料的传热传质性能

Dzivama 对四种作为主动式蒸发冷却器填料的材料(碎海绵、茎海绵、黄麻纤维及炭)进行了测试^[3],结果表明,当周围温度为 32℃、相对湿度为 25%时,茎海绵的性能最好,能使温度降到 18℃,相对湿度达到 84%。

国家空调设备检验中心对三种填料的检验结果 表 1-1

湿材 类型	填 料 前			填 料 后		测 试 结 果		
	干球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	迎面风速 (m/s)	干球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	填料前后 温差 (℃)	加湿量 (g/kg)	风侧阻力 (Pa)
有机	40.02	24.99	2.59	32.66	25.48	7.36	4.06	36.8
无机	40.06	23.54	2.45	29.58	23.74	10.48	9.70	26.7
金属	40.01	23.50	2.61	37.10	25.01	2.91	3.63	38.4

Faleh 设计了一种专门的测试装置,对用于蒸发冷却器填料的三种天然纤维[棕榈(茎)纤维、黄麻和 Luffa 纤维]的性能进行了评估^[4]。结果表明,几种湿填料中,黄麻的平均冷却效率最高,达到 62.1%,Luffa 纤维为 55.1%,棕榈(茎)纤维为 38.9%,用来作对比的商用填料的平均冷却效率为 49.9%。材料性能测试结果表明,黄麻的盐沉积最少,其次是棕榈(茎)纤维和 Luffa 纤维,而商用填料则最多;Luffa 纤维抵制发霉的能力最强,其次是棕榈(茎)纤维,而商用填料和黄麻纤维则很差。冷却效率衰减幅度的研究表明,Luffa 纤维在整体上强于棕榈(茎)纤维,商用填料的冷却效率衰减明显,而黄麻纤维则最差。总体结果显示,Luffa 纤维最好,对于黄麻纤维,如果能对表面作防霉处理,那么它将成为商用填料的最佳替代物。

Chung-Min Liao 等人设计了一个简洁紧凑的风洞,用于模拟蒸发冷却填料—风机系统,以便能够直接测试系统的性能^[5]。选择了孔径为 2.5mm 的粗糙 PVC 海绵筛网和孔径为 7.5mm 的优质 PVC 海绵筛网两种填料进行测试。通过风洞实验,测试了空气流速、水流量、通过填料的静压降、填料厚度等对蒸发冷却效率的影响情况,以及填料—风机系统正常运行下,填料的迎面风速和相关的静压降,得到了不同厚度填料介质时热质传递系数的量纲方程。测试结果表明,在淋水密度为 15L/(min·m²),填料厚度为 150mm,气流速度为 0.75~1.5m/s 等条件下,粗糙 PVC 海绵筛网的冷却效率为 81.75%~84.48%,优质 PVC 海绵筛网的冷却效率为 76.68%~91.64%。Chung-Min Liao 等人还对无纺纤维多孔填料和椰子皮纤维填料进行了风洞实验^[6],得到了不同厚度替代填料的蒸发冷却过程的热质传递系数的量纲方程。测试结果表明,当气流速度为 2.0~3.0m/s 时,对于

150mm 厚的填料来讲,通过无纺纤维多孔填料的静压降和冷却效率分别为 48~108Pa, 89.69%~92.86%;而通过椰子皮纤维填料的则分别为 60~130Pa, 89.69%~92.86%。

Y. J. Dai 考察了一个填料由湿的耐用蜂巢纸构成的交叉流直接蒸发冷却器,建立了一个包括液膜、气态物质、交界面边界条件等诸多控制方程在内的数学模型^[7]。综合各方面因素,预测了降膜的界面温度。分析结果表明,存在一个最佳气流通道长度使温度最低,通过优化选型参数,可进一步提高系统的性能。

由世俊对金属填料表面上的热质传递性能进行了理论与实验研究^[8],建立了理论模型,采用差分法建立方程组并求解。得出了填料表面水温和空气温湿度的分布规律。理论分析和实验结果表明,填料的传质系数不仅与淋水密度、空气的质量流速、填料的进口水温、进口空气状态有关,还与填料的材料、表面处理方法、几何尺寸等多个因素有关。采用比表面积为 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ 的铝合金填料,在高度为 400mm、沿气流方向长度为 500mm 时,空气比焓降可达到 37kJ/kg。

邢永杰和孙贺江分别对金属填料的传热传质性能进行了实验研究^[9,10]。通过采用美国“SAS 对实验数据多元回归分析”专用统计分析软件,对填料出口空气温度、相对湿度、填料两侧静压差及接触系数等回归公式中的变量进行了显著性分析。结果表明,相关系数均大于 0.98,各因素的显著水平均在 0.05 以上。

由世俊和邢永杰还分别选择了铝质和不锈钢薄板金属制孔板波纹填料进行了冷却除湿实验研究^[11,12]。实验表明,金属填料是一种性能良好的空气热湿处理材料,不但可实现绝热加湿过程,还可实现冷却除湿过程。在实际应用中,建议风速取 2.2~2.8m/s。如果综合考虑填料的热质传递性能和阻力,比表面积为 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ 、沿空气流动方向填料的长度为 500mm、高度为 500~800mm 的填料是最佳的。

天津大学的华君和李泌如也分别对金属填料的除湿性能及加热加湿性能进行了研究。华君的硕士学位论文题目为《金属填料冷却除湿性能的研究》^[13]。李泌如的硕士学位论文题目为《金属填料加热加湿性能的研究》^[14]。

黄翔、宣永梅和武俊梅分别对采用木丝和 GLASdek 两种不同填料的直接蒸发冷却式空调机进行了实验研究^[15~17]。系统地分析了进口空气干湿球温度和相对湿度对两种不同填料空调机温降、加湿管冷却效率及加湿效率的影响。对目前直接蒸发冷却式空调机常用的有机填料、无机填料、金属填料和无纺布填料的热工性能进行了对比分析。结果表明,GLASdek 填料的热工性能最好,但金属填料的综合性能最好。另外,从填料层厚度的优化、淋水量的优化、迎面风速的优化、过滤器设置、风机选择、风量调节、水泵选择、室内湿度控制以及空调机整体结构的优化等方面,提出了直接蒸发冷却式空调机优化设计的主要措施,以提高其综合性能。

杜鹃通过对直接蒸发冷却式空调机与冷却塔的传热传质过程进行类比分析,推导出了直接蒸发冷却式空调机的热工计算方法^[18],并分别对迎面风速,空气与填料表面的换热系数、填料厚度及填料的面积系数等影响直接蒸发冷却式空调机热湿交换性能的各因素进行了详细分析。在此基础上,对直接蒸发冷却空调系统的传热传质过程进行了数值模拟^[19],采用 SIMPLE 算法求解后,将数值模拟值与实验测试值进行了对比。结果表明,二者吻合得很好,得到了温度场和湿度场的分布图,并通过在求解程序中改变不同变量的值,根据数值模拟结果绘出了迎面风速、填料厚度及空气入口状态参数等因素对直接蒸发