



中国建筑工业出版社  
学术著作出版基金项目



# 空调系统 能量回收新技术

---

## 间接蒸发冷却原理与应用

杨洪兴 郭春梅 陈奕 吕建 著

中国建筑工业出版社

# 空调系统能量回收新技术 ——间接蒸发冷却原理与应用

杨洪兴 郭春梅 陈奕 吕建 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

空调系统能量回收新技术：间接蒸发冷却原理与应用/杨洪兴等著. —北京：中国建筑工业出版社，2019.9  
ISBN 978-7-112-23687-9

I. ①空… II. ①杨… III. ①空气调节设备-节能-回收技术-研究 IV. ①TB657.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 085603 号

责任编辑：张文胜

责任校对：王 瑞

空调系统能量回收新技术——间接蒸发冷却原理与应用

杨洪兴 郭春梅 陈 奕 吕 建 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

\*

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：12¼ 字数：303 千字

2019年8月第一版 2019年8月第一次印刷

定价：38.00 元

ISBN 978-7-112-23687-9

(34002)

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)

# 前 言

资源潜力的充分挖掘与可再生能源的开发利用并举，已经成为当前世界各国保障能源安全、加强环境保护、应对气候变化的重要举措。我国在“十三五规划”中提出要统筹推进生态文明建设，围绕着这项目标，住房城乡建设部颁布的《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》中明确提出加快推进建筑节能的发展是加快生态文明建设的重要体现，也是促进整个社会节能减排以及应对全球气候变化的重要手段。

传统的蒸发冷却节能作为一项以干空气加湿降温为主的空气调节技术，清洁高效，在高温干燥地区应用广泛，却受到使用地区气候条件的限制。而间接蒸发冷却能量回收(Energy Recovery Indirect Evaporative Cooling, ERIEC)复合空调系统，将新风与经过喷淋的空调排风通过换热器进行间接换热，降低新风温度和湿度，从而达到能量回收的节能目的。该间接蒸发冷却系统的传热传质的驱动力是空调排风所具有的较高的干湿球温度差，而不是新风的干湿球温度差，在排风通道里少量喷淋水蒸发达到降温的目的。当壁面温度低于新风的露点温度时，新风通道会发生凝结换热，实现对新风的降温除湿过程。理论与实践证明，该项技术突破了传统蒸发冷却技用在使用气候区域上的限制，可用于高温高湿地区并有着显著的节能效果。

本书主要总结了笔者近年来在间接蒸发冷却技术方面的理论研究成果和实际工程经验。主要内容包括：间接蒸发冷却空调技术的发展与现状，间接蒸发冷却能量回收技术的传热传质原理与数值解法，间接蒸发冷却能量回收系统能效的影响因素及其评价方法与优化措施，以及间接蒸发冷却能量回收复合空调系统的设计与运行调节，并通过实际工程案例对该系统的设计步骤、运行能效及其经济效益和环境效益进行了全面的探讨。本书旨在让读者了解国内外间接蒸发冷却技术的发展与节能潜力，促进我国绿色低碳空调技术的发展，给建筑空调领域从事相关工作的研究人员、工程人员和大专院校师生提供一定的参考。

本书由香港理工大学杨洪兴教授、陈奕博士与天津城建大学郭春梅教授、吕建教授合著。参与本书著作的还有天津城建大学由玉文副教授，香港理工大学可再生能源研究室的闵韵然和刘佳博士生、张甜甜和游田博士，以及天津城建大学间接蒸发冷却能量回收研究课题组的郑斌、陈通、蒋晖和黄高昂同学。同时，本书在写作过程中，中国建筑工业出版社张文胜编辑给予了极大的帮助和支持。在此一并表示衷心的感谢！

由于水平有限，本书难免有不妥甚至错误之处，欢迎广大同行不吝赐教，批评指正。

## 符号表

$A$	换热面积, $\text{m}^2$	$d_e$	通道的水力直径, $\text{m}$
$B$	大气压力, $\text{Pa}$	$h$	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
$H$	冷却器高度, $\text{m}$	$h_m$	传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$L$	冷却器长度, $\text{m}$	$h_{\text{fg}}$	水蒸发潜热, $\text{J}/\text{kg}$
$P$	水蒸气压力, $\text{Pa}$	$i$	空气焓, $\text{J}/\text{kg}$
$R$	冷凝比	$m$	质量流量, $\text{kg}/\text{s}$
$T$	热力学温度, $\text{K}$	$n$	通道数目
$Pr$	普朗特数	$q$	单位质量的总传热率, $\text{kW}/\text{kg}$
$NTU$	传热单元数	$s$	通道间距, $\text{m}$
$c_{\text{pa}}$	空气比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$t$	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
$c_{\text{pw}}$	水比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$u$	空气流速, $\text{m}/\text{s}$
希腊符号			
$\omega$	空气含湿量, $\text{kg}/\text{kg}$	$\mu$	动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\sigma$	润湿率	$\nu$	运动黏度, $\text{m}^2/\text{s}$
$\eta$	湿球效率	$\lambda$	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
$\epsilon$	扩大系数		
下标			
$c$	冷凝	$\text{cw}$	冷凝水
$e$	蒸发	$\text{ew}$	蒸发水膜
$p$	一次空气/新风	$\text{qb}$	饱和蒸气压
$s$	二次空气	$\text{wb}$	湿球温度
$w$	壁面	$\text{sat}$	饱和湿空气

# 目 录

<b>第 1 章 间接蒸发冷却技术概述</b> .....	1
1.1 间接蒸发冷却技术的发展与现状 .....	1
1.1.1 间接蒸发冷却技术的基本原理 .....	2
1.1.2 蒸发冷却技术的分类及特点 .....	10
1.2 空调系统间接蒸发冷却能量回收 .....	18
1.2.1 ERIEC 空调技术的基本原理 .....	19
1.2.2 ERIEC 空调系统的构成 .....	20
1.3 本章小结 .....	21
本章参考文献 .....	22
<b>第 2 章 空调系统间接蒸发冷却能量回收技术的理论基础</b> .....	31
2.1 间接蒸发冷却器传热传质模型研究进展 .....	31
2.2 叉流板式间接蒸发冷却传热传质模型 .....	33
2.2.1 不同的凝结状态 .....	33
2.2.2 理论模型假设条件 .....	34
2.2.3 物理模型 .....	34
2.2.4 传热传质过程微分方程的建立 .....	36
2.2.5 理论模型中计算参数的确定 .....	38
2.2.6 数值计算方法 .....	40
2.2.7 数值计算准确性验证 .....	42
2.3 逆流板式间接蒸发冷却传热传质 $\epsilon$ -NTU 模型 .....	44
2.3.1 $\epsilon$ -NTU 法中修正参数的推导 .....	45
2.3.2 $\epsilon$ -NTU 方法的类比 .....	46
2.3.3 无冷凝状态 .....	46
2.3.4 完全冷凝状态 .....	47
2.3.5 部分冷凝状态 .....	48
2.3.6 判断凝结状态的方法 .....	49
2.3.7 计算流程 .....	49
2.4 模型验证 .....	51
本章参考文献 .....	52
<b>第 3 章 间接蒸发冷却传热传质过程的数值解法</b> .....	54
3.1 数值求解的基本思想 .....	54
3.1.1 基本思想 .....	54
3.1.2 基本步骤 .....	54

3.1.3	CFD 软件求解流程 .....	56
3.2	离散方程及代数方程的建立 .....	57
3.2.1	通用型流动控制方程 .....	57
3.2.2	线性离散方程 .....	58
3.3	相变模型调节系数的确定 .....	59
3.3.1	调节系数对出口含湿量的影响 .....	59
3.3.2	调节系数对出口温度的影响 .....	61
3.3.3	不同一次进口工况下调节系数的取值 .....	62
3.4	间接蒸发冷却传热传质过程的数值求解 .....	64
3.4.1	物理模型 .....	64
3.4.2	控制方程求解 .....	65
3.4.3	材料属性 .....	68
3.4.4	边界条件 .....	69
3.4.5	网格划分及求解 .....	71
3.5	模型验证及误差分析 .....	72
3.5.1	建模误差 .....	72
3.5.2	离散误差 .....	72
3.5.3	计算误差 .....	73
3.5.4	结果验证 .....	73
3.6	间接蒸发冷却传热传质过程的模拟结果 .....	73
3.6.1	换热器内部温度分布 .....	74
3.6.2	换热器内部水蒸气浓度分布 .....	75
3.6.3	一次通道壁面冷凝水分布 .....	76
3.6.4	换热器内部压力分布 .....	76
	本章参考文献 .....	77
<b>第 4 章</b>	<b>间接蒸发冷却能量回收系统的能效评价</b> .....	<b>78</b>
4.1	间接蒸发冷却系统能效的评价指标 .....	78
4.2	间接蒸发冷却系统能效评价指标分析 .....	80
4.2.1	间接蒸发冷却能量回收实验测试系统 .....	81
4.2.2	一次空气温度对换热效率的影响 .....	83
4.2.3	一次空气湿度对换热效率的影响 .....	85
4.3	本章小结 .....	86
	本章参考文献 .....	87
<b>第 5 章</b>	<b>间接蒸发冷却性能的影响因素及其优化</b> .....	<b>88</b>
5.1	间接蒸发冷却性能的影响因素 .....	88
5.1.1	新风侧温湿度的影响 .....	88
5.1.2	回风侧温湿度的影响 .....	90
5.1.3	新风侧风速的影响 .....	92
5.1.4	回风侧风速的影响 .....	92

5.1.5	板间距的影响	94
5.1.6	板面润湿率的影响	95
5.1.7	流动方向板高度的影响	96
5.1.8	空气流动方向的影响	96
5.2	影响因素的敏感度分析	100
5.2.1	间接蒸发冷却器的性能评价	101
5.2.2	正交试验	101
5.2.3	数据分析方法	102
5.2.4	敏感度分析结果	103
5.3	间接蒸发冷却器结构参数优化	105
5.3.1	参数设置	105
5.3.2	板间距的优化	106
5.3.3	传热单元数的优化	108
5.3.4	板面高长比的优化	109
5.4	本章小结	110
	本章参考文献	110
<b>第6章</b>	<b>间接蒸发冷却能量回收空调系统</b>	<b>112</b>
6.1	ERIEC 空调技术的基本原理	112
6.2	ERIEC 空调系统的组成	116
6.2.1	ERIEC 实验系统流程	116
6.2.2	实验系统的主要部件介绍	118
6.2.3	测量与控制装置	119
6.2.4	实验系统控制原理	122
6.3	间接蒸发冷却回收与空调系统	123
6.3.1	空调系统的分类	123
6.3.2	ERIEC 空调系统的分类	125
	本章参考文献	129
<b>第7章</b>	<b>间接蒸发冷却能量回收空调系统的设计与运行调节</b>	<b>130</b>
7.1	室外气象参数与间接蒸发冷却空调系统设计	130
7.1.1	典型年气象数据	131
7.1.2	不保证率气象数据	133
7.2	ERIEC 空调系统设计	133
7.2.1	空调负荷计算	133
7.2.2	空调送风量的计算	134
7.2.3	ERIEC 空调系统设备选型	136
7.3	ERIEC 空调系统的运行调节	139
7.3.1	空气处理过程及运行调节	140
7.3.2	ERIEC 全空气空调系统运行工况分区	141
7.3.3	ERIEC 空调系统的控制	144

本章参考文献 .....	145
<b>第 8 章 间接蒸发冷却能量回收空调系统实施案例 .....</b>	<b>147</b>
8.1 项目概况 .....	147
8.2 ERIEC 空调系统设计 .....	148
8.2.1 空调冷负荷计算 .....	148
8.2.2 空调送风量计算 .....	150
8.2.3 空气处理系统 .....	150
8.2.4 设计工况下的 ERIEC 系统节能率的计算 .....	152
8.3 ERIEC 空调系统选型设计 .....	152
8.3.1 间接蒸发冷却器选型 .....	152
8.3.2 风机选型 .....	153
8.3.3 水泵选型 .....	154
8.3.4 整机组设计 .....	155
8.4 数据监测与控制系统 .....	156
8.5 数据测试结果与分析 .....	158
8.5.1 典型日 .....	158
8.5.2 典型月 .....	159
8.6 ERIEC 空调系统全年节能特性分析 .....	162
8.6.1 ERIEC 空调系统全年运行状态 .....	162
8.6.2 ERICE 系统全年节能特性分析 .....	163
8.7 ERIEC 系统与转轮热回收系统性能对比 .....	164
8.7.1 实测结果对比与分析 .....	164
8.7.2 HRW 系统全年节能特性分析 .....	167
8.7.3 HRW 系统的年运行费用 .....	170
8.8 ERIEC 空调系统全寿命周期成本分析与环境影响评价 .....	171
8.8.1 全寿命周期成本分析 .....	171
8.8.2 生命周期环境影响评价 .....	179
本章参考文献 .....	185

# 第 1 章 间接蒸发冷却技术概述

随着生活水平的提高,人们对室内环境热舒适的需求也在增加。据统计,空调能耗占建筑总能耗的 50%以上。当今的空调市场主要由传统的蒸汽压缩式制冷系统占领,它利用氯氟烃类制冷剂的相态变化制冷。其中,压缩机作为该系统一个重要的部件,利用电力驱动将制冷剂蒸汽压缩,不仅能耗大,而且带来大量温室气体的排放。此外,氯氟烃类制冷剂会破坏臭氧层,同时也是一种温室气体。总之,传统的蒸汽压缩式空调系统不仅能耗大,还会造成严重的环境污染问题。据报道,2013 年我国暖通空调系统消耗能源 1506 百万吨油当量,排放了 47.62 亿吨碳<sup>[1]</sup>。全球能源短缺和日益严重的环境污染给建筑行业带来了巨大挑战,当前需要寻求新的方法来减少化石燃料消耗,并充分利用可再生能源提供空调解决方案。

## 1.1 间接蒸发冷却技术的发展与现状

蒸发冷却是一项历史悠久的制冷技术,早在公元前 2500 年就在埃及地区出现过。后来该项技术被引入中东地区,在炎热和干旱地区发展迅速。随着蒸发冷却相关应用越来越普遍,如多孔水盆、水池和薄水槽,并出现了将类似结构组合到建筑物中,为建筑环境进行降温,既简单又有效<sup>[2]</sup>。现代的蒸发冷却技术起源于美国,起初主要应用于纺织厂等工厂空气环境的清洁和冷却。在 20 世纪初,美国东部地区开始生产纺织厂空气清洁蒸发冷却器,主要应用于英格兰南部的工业区。在此期间,美国亚利桑那州和加利福尼亚州也开始生产直接和间接式蒸发冷却器<sup>[3]</sup>。蒸发冷却器在 20 世纪 50 年代初实现了大规模生产,并在美国、加拿大和澳大利亚得到了广泛应用。20 世纪 80 年代,蒸发冷却技术开始引入我国,并于 20 世纪 90 年代末被我国空调专业人士所熟知<sup>[4]</sup>。

作为一种节能、环保的空调方式,蒸发冷却技术( EC )利用水蒸发吸热的原理,通过将空气中的显热转化为潜热来制冷。由于蒸发冷却器不使用压缩机和氯氟烃类制冷剂,仅依靠风机和水泵从水蒸发过程中获取冷量,所以它被认为是一种绿色的空调方案。蒸发冷却技术利用空气的干湿球温度差作为制冷的驱动力,因此在干湿球温度差较大的地区,对湿度较低的新鲜空气可以实现的冷却能力更大,制冷效果更好。在我国西北部的干燥地区,可以直接利用蒸发冷却技术提供冷却的新风或高温冷水,经过冷却的空气可以直接供应到建筑内部,被广泛应用。

然而,在我国南方沿海地区,一次空气被降低的温度限于新鲜空气的湿球温度,间接蒸发冷却器的制冷能力受到高湿的限制,无法独立作为空调使用。因此,在这些地区它被用作能量回收装置安装在空调(A/C)系统的空调机组(AHU)或冷却盘管之前,将空调区域的具有较低湿球温度的排风用作二次空气,以预冷一次空气。这种复合冷却系统将间接蒸发冷却和机械制冷系统结合起来,近年来因其极具吸引的节能潜力而备受关注<sup>[5,6]</sup>。

与直接蒸发冷却技术 (DEC) 相比, 间接蒸发冷却技术 (IEC) 不会增加所处理空气的含湿量, 并可以保证热舒适性, 其应用在过去几十年的全球商业市场中不断扩大。如今, 蒸发冷却技术广泛应用于许多国家的炎热干旱地区, 其中应用最多的是澳大利亚, 其蒸发冷却技术占据了空调市场的 20%<sup>[7]</sup>, 且主要集中在气候炎热干旱的澳大利亚南部地区。在美国, 蒸发冷却设备占据美国 5% 的商业空调市场, 而且这一比例在逐年增长<sup>[8]</sup>。在我国 (主要是西部地区), 蒸发冷却设备的安装量从 1998 年的数千份增加到 2009 年的 50 万份<sup>[9]</sup>。调查显示, 在 1999 年, 近 2000 万户住宅采用了蒸发冷却设备, 其中印度占 800 万~1000 万, 其余主要分布在美国、澳大利亚、南非、巴基斯坦和沙特阿拉伯<sup>[10]</sup>。

间接蒸发冷却技术作为一种减少空调空间的能量需求和消耗的方式, 由于其显著的冷却潜力, 它的推广与应用也在不断发展, 在一些气候条件下具有非常可观的应用前景。而且, 它可以用于改善室内通风所需的回风气流的热回收过程, 从而利用来自空调空间的回风来冷却新鲜空气。如今, 对间接蒸发冷却系统的研究不仅包括参数变化对其热力学和水力性能的影响, 而且还涉及间接蒸发冷却冷却器的经济性问题, 能耗和节能潜力研究<sup>[11]</sup>, 以促进间接蒸发冷却技术在全球范围内的广泛应用。

蒸发冷却的主要研究领域在于针对热量和质量传递过程建模、配置优化以及节能潜力分析。但是, 随着技术的快速发展, 出现了一些新的研究领域, 包括新型换热器的开发、喷淋水优化、亲水涂层应用和自动控制等, 见证了从单一学科领域到多学科 (包括热力学、材料科学和化学工程) 领域的综合发展。蒸发冷却技术未来的发展趋势和研究热点可分为以下 9 个方面: (1) 研究和开发低成本且高效的材料; (2) 优化设备结构; (3) 优化喷淋水系统; (4) 研究和开发高效经济的换热器; (5) 设计间接蒸发冷却系统的动力装置; (6) 研究和开发间接蒸发冷却器的空气过滤装置; (7) 研究与开发复合系统; (8) 系统的优化与控制; (9) 有关蒸发冷却技术标准规范的制定。

### 1.1.1 间接蒸发冷却技术的基本原理

蒸发冷却技术利用水蒸发吸收热量来冷却空气, 具有高效、低能耗、无污染且易于维护的特点, 是一种具有应用前景的自然冷却技术。蒸发冷却技术包括直接蒸发冷却 (DEC) 和间接蒸发冷却 (IEC)。

直接蒸发冷却 (DEC) 是最古老、最简单的蒸发冷却方法, 其通过直接向空气中喷淋水来冷却空气<sup>[12]</sup>, 由水泵将循环水送入上方的分配系统并通过喷嘴进行喷淋, 由风机送入的空气在装置内部经过等焓冷却并被加湿, 之后作为“洗涤空气”离开。理论上, 离开装置的空气可接近其进口状态下的湿球温度并达到饱和状态。然而, 由于空气和水之间的接触面积以及处理时间是有限的, 实际上不可能将空气降低至湿球温度。DEC 的示意图和处理过程如图 1-1 所示<sup>[13]</sup>。市场上大多数直接蒸发冷却器的冷却效率可达 70%~95%, 具体取决于机组配置和运行条件。DEC 具有配置简单、低能耗和高效率的优点, 然而, 该项技术会使所处理空气的湿度增加。因此, 它只能用于没有湿度要求的室内环境或需要同时加湿和冷却的场合。

间接蒸发冷却 (IEC) 由 Willi Elfert 博士于 1903 年开发。与 DEC 相比, IEC 在处理空气的过程中可以不增加空气的含湿量, 因此它能够提供更高的室内热舒适性而具有更广

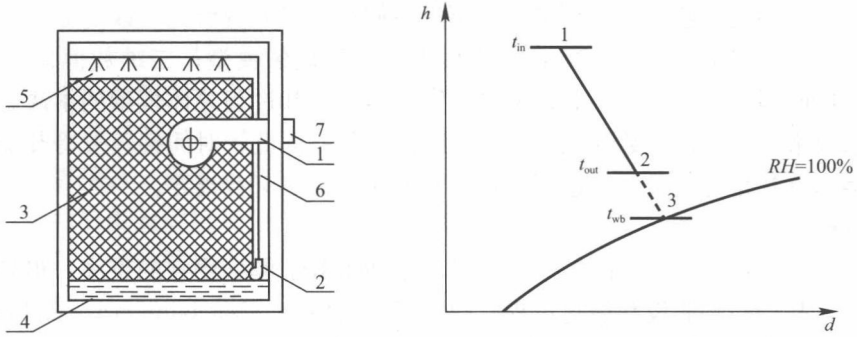


图 1-1 DEC 的原理图和处理空气过程

1—风机；2—水泵；3—垫片材料；4—积水盘；5—布水装置；6—进水管；7—出风口

泛的应用。IEC 单元的结构如图 1-2 所示，由如下几部分组成：空气—空气换热器、喷淋水系统、除湿装置、水箱、套管、循环水泵、阀门、送风机、排风机和空气过滤器。其中，IEC 单元中的热交换器由薄平板组成，这些平板组装成干湿通道交替的夹层，也被称为一次空气和二次空气通道。一次空气指待冷却的新鲜空气，二次空气一般为室外新鲜空气或室内排风。在湿通道中，喷淋水在板表面上形成一层很薄的水膜，并通过吸收板的热量蒸发到二次空气中，进而排出湿通道，相邻干通道中的一次空气由低温壁面进行冷却。当 IEC 使用来自空调区域的排风作为二次空气时，该热回收系统可称为再生蒸发冷却（RIEC）系统，从低温干燥的排风中回收能量，可增强 IEC 装置在炎热且潮湿地区的冷却效果。

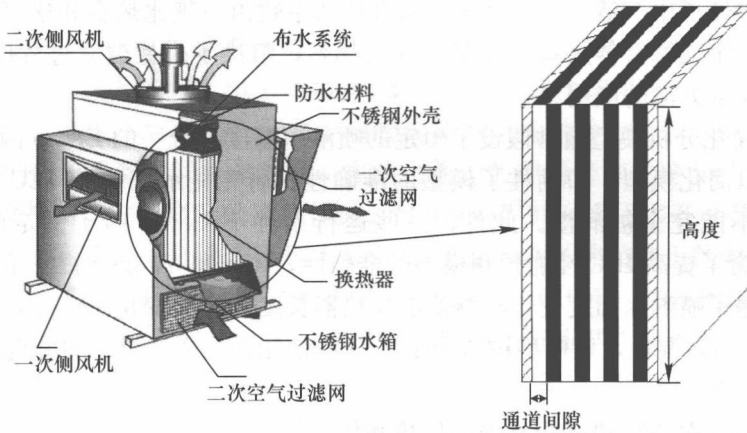


图 1-2 间接蒸发冷却（IEC）装置结构图

IEC 单元的工作原理如下：循环水泵向喷淋装置供水，喷淋水在薄板壁表面上形成水膜润湿二次空气通道壁面，二次空气经由风机送入湿润的二次通道内，使水膜蒸发、吸收热交换器薄板表面的热量，在二次空气和水膜之间的气液交界面处发生热量和质量交换，由被降温的薄板另一侧表面冷却一次空气（新鲜空气）。因此，IEC 能在不加湿的情况下冷却一次空气，并且将潮湿的二次空气排出<sup>[3-5]</sup>。

### 1. IEC 模型的发展

寻找合适的数学模型来研究蒸发冷却器中发生的传热和传质过程，是对整个 IEC 系统

进行相关创新和优化的基础。多年来,专家学者们进行了大量研究,以建立准确的蒸发冷却器数学模型,主要分为以下三类:分析模型;一维数值模型;二维数值模型<sup>[11]</sup>。基于经典的传热传质理论,通过一些假设来简化间接蒸发冷却过程总体模型的解决方案,并且开发一些系数来建立运行参数和系统性能之间的关系。因此,对间接蒸发冷却器的相关模型进行分类和总结是有意义的,这将为进一步的研究提供有益指导。

### (1) 分析模型

间接蒸发冷却器内部耦合的传热传质过程增加了数学模型建立的难度,得到了广泛的研究。首先,基于一些假设和简化过程,建立了分析模型。Maclaine-cross and Banks 提出了一种线性近似模型<sup>[14]</sup>,用于分析 IEC 中的热质交换过程,其中用到了两个经典假设:1) 湿空气的比焓是空气温度和含湿量的线性函数;2) 气液交界面的空气含湿量是水膜表面温度的线性函数。另一个简化模型是由 Erens 和 Dreyer<sup>[15]</sup>提出的,其假设了循环水温度恒定,可以独立求解一次空气温度与二次空气的焓值,该简化模型可以为 IEC 系统工程设计提供足够的精度。后来, San Jose Alonso 等人<sup>[16]</sup>开发了一个方便用户的简化模型,用于分析板式 IEC 的热性能,其提出了等效水温的概念并应用于计算过程,模拟结果采用 Pescod 模型<sup>[17]</sup>以及 Erens 和 Dreyer 的模型进行验证,误差分别为 2.2~2.4℃和-0.1~-0.6℃。Stoitchkov 和 Dimitrov<sup>[18]</sup>提出了一种基于 Maclaine-cross 和 Banks 模型的便捷模型,用于计算交叉流板式 IEC 的运行效率,该模型考虑了实际条件下的水膜流动,提出了平均水膜温度的计算方法并引入了显热比的公式。由于 IEC 的湿通道表面同时涉及传热和传质过程,与干通道表面的显热传递有很大不同。Chen P. L<sup>[19]</sup>建立了 IEC 中的传热传质模型,其中湿通道中气液交界面之间的综合传热系数由空气比热容和焓值以及能量守恒方程表示,通过定义综合传热系数和湿空气比热容,解决了模型建立过程中的关键问题,促进了传热单元数方法的应用。

上述 IEC 简化分析模型通常假设了恒定的喷淋水温度、统一的 Lewis 因子和完全润湿的湿通道表面以简化模型,却牺牲了模型的准确性。研究显示<sup>[20]</sup>,在 IEC 的实际运行中湿通道表面并不能完全被润湿。此外,一些运行条件下 Lewis 因子恒定的假设是无效的<sup>[21]</sup>。因此,为了提高 IEC 性能预测模型的准确性, Ren 和 Yang<sup>[22]</sup>提出了改进的分析模型,该模型考虑了喷淋水温度变化与焓值沿换热器长度方向的变化。此外,考虑了变化的 Lewis 因子和壁面润湿性,该模型被认为是在 IEC 性能预测中最全面的分析模型。

### (2) 数值模型

为了进一步探索 IEC 热交换器内的传热和传质机制,数值模型由于具有较高的精度而得到迅速发展,文献中应用到的数值方法包括:有限差分法、基于 EES (Engineering Equation Solver) 的牛顿迭代法、基于 Multiphysics 软件的有限元法、Runge-Kutta 方法以及基于 CFD 模拟软件的有限体积法。随着数值模拟技术的发展,越来越多的因素可以被考虑进 IEC 模型中,如三维换热结构、分散的喷淋水滴、凹凸不平的热交换壁面,不均匀的气流分布与水膜的湍流耗散等,但求解模型的过程需要消耗更多的计算资源和时间。总体而言,IEC 数值模拟的发展使得越来越多的研究开始关注于换热器表面润湿性、喷淋水温度变化、非稳定 Lewis 数以及新型气流配置等不同因素,为具有更复杂的结构和更高效率的、新型 IEC 的设计和优化带来了巨大潜力。

有限差分法被广泛应用于控制方程的离散。例如, Stefan 等人<sup>[23]</sup>开发了一种叉流 IEC

模型,该模型考虑了热交换器表面的实际润湿性,并采用 IEC 在典型数据中心的实地运行数据对模型进行了验证。Heidarinejad 等人<sup>[24-26]</sup>考虑了壁面纵向热传导和喷淋水温度变化,采用有限差分法对控制方程进行离散化,联合向前差分与中心差分格式来求解耦合方程,提出了新的 IEC 数值模型。Min 等人<sup>[27]</sup>采用有限差分法求解了叉流 IEC 在考虑一次风冷凝状态下的二维偏微分模型,与文献中的实验和模拟数据进行对比,该模型可以准确地描述换热器内部的温度及湿度场分布。Zhou 等人<sup>[28]</sup>建立了一种新型热电辅助 IEC 的计算模型,并采用有限差分法迭代进行求解,迭代顺序按照二次风流动方向逐步向前进行差分,直到获得最终结果。

基于 EES 软件的牛顿迭代法也被用来进行 IEC 数值模型的研究<sup>[29-31]</sup>,Zhan 等人<sup>[29]</sup>采用牛顿迭代法求解 M-cycle 逆流与叉流型 IEC 中的一系列耦合传热传质方程,并通过实验进行验证模型的误差在 2%~10% 范围内。Woods 等人<sup>[30]</sup>基于 EES 平台建立了一种溶液除湿与间接蒸发冷却的复合系统模型,采用牛顿迭代法使数值解残差小于  $10^{-5}$ ,通过实验验证了模型的精度在  $\pm 10\%$  之间。Zhao 等人<sup>[32]</sup>基于 EES 平台建立了一种新型的逆流露点蒸发冷却器模型,网格划分采用等边三角形模式,对每一个单元考虑能量守恒并通过牛顿迭代法进行求解。Riangvilaikul 等人<sup>[31]</sup>采用牛顿迭代法求解 IEC 数值模型,研究了一种新型露点蒸发冷却器在不同进口参数下的理论性能。

尽管上述 IEC 模型的数值求解方法均能在合理的计算时间内获得令人满意的模拟结果,但是仍然存在一些局限性,例如难以处理 3D 问题,以及更复杂的水力和热力的耦合性能。随着计算机技术的快速发展,计算流体动力学(CFD)近年来得到了很大发展,其作为一种精确的流体分析技术,可以通过求解连续性、动量、能量以及多相流等过程来分析复杂的传热传质过程,从而获得模型中的速度、压力、温度和浓度的分布情况。

2008 年, Jorge<sup>[33]</sup>首先采用 FLUENT 求解器为间接式冷却塔建立了二维网格,以分析其内部传热传质过程,结果表明,由于液膜的非均匀流动分布,Zhukauskas 关联式和 CFD 模拟得出的传质系数之间存在差异。在此之前,关于间接蒸发冷却的 CFD 模拟的研究仅考虑了热交换器与空气之间的显热传递。Herrero<sup>[34]</sup>针对采用多孔介质的半间接式蒸发冷却器,对比了实验、理论计算和 FLUENT 模拟结果在传热特性上的差异,在 CFD 模型中,蒸发/冷凝过程中的源项是通过实施用户定义函数(UDF)来开发的。Zhu 等人<sup>[35]</sup>建立了气液两相流的二维 CFD 模型,用来模拟逆流和平行流结构下的板式蒸发式冷凝器的性能,并分析了喷淋水流动、风速与气流方向对水膜的影响,模拟结果与实验结果吻合较好。文献 [36, 37] 采用 CFD 建立了逆流间接蒸发冷却器的二维模型,气液交界面处水蒸气的质量分数通过用户定义函数(UDF)进行定义,采用二阶形式与 SIMPLE 算法求解能量守恒方程,并用所得的局部 Nusselt 数和 Sherwood 数作为模型输入,以提高模型准确性,模拟结果与文献所述吻合较好。Zhang 等人<sup>[38]</sup>采用 CFD 建立间接蒸发冷却器的三维数值模型,以预测其流场、温度场和浓度场分布,并分析了不同流动通道对换热器性能的影响。Cui 等人<sup>[39]</sup>采用 ANSYS FLUENT 14.0 软件建立了一种新型露点蒸发冷却器模型,其湿表面不被视为薄水膜,而是被视为均匀分散的液滴,将空气流作为稳定的连续相,水滴作为离散相,并采用欧拉-拉格朗日方法来进行求解。

一些其他数值方法也应用在 IEC 模型的求解中。Lin 等人<sup>[40]</sup>采用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件,提出了逆流 IEC 的数学模型,预测其冷却过程中瞬态和稳

态的性能与主要影响因素。Anisimov 等人<sup>[41-43]</sup>针对不同流动配置的 IEC，采用 Runge-Kutta 方法建立了一系列传热传质数值模型，并通过实验数据验证了数值模型具有合理的准确性和稳定性。Chen 等人<sup>[44]</sup>建立了一种太阳能辅助溶液除湿与再生型间接蒸发冷却器相结合的复合系统模型，其中再生器、发生器与间接蒸发冷却器的模型为一阶常微分方程组，通过 Runge-Kutta 方法进行求解。

2. 性能影响因素

参数研究是 IEC 系统设计的关键，通过参数研究可以分析 IEC 适宜的运行条件并对结构优化提供有价值的指导。现有的 IEC 研究工作，重点在于分析热交换器内部的传热传质过程、评估各种运行条件下不同结构 IEC 的性能、优化热交换器内水/空气分布的结构和几何尺寸、选择适合换热器制造的材料和适合的工作条件等。近年来，国内外众多学者针对不同进口状态（温度、湿度、流速、水流量、空气流量比）和几何尺寸（长度、高度、通道间隙）对 IEC 性能的影响进行了大量研究，包括传统式 IEC、M-cycle IEC 和其他露点 IEC。基于 IEC 参数研究的结果，一些学者提出了强化换热的措施以提高 IEC 效率，包括改善换热器结构和材料、运行模式、湿通道表面材料以及水流分布和处理措施等。

对于普通板式间接蒸发冷却器，根据进口空气条件、系统结构配置、几何尺寸、一次空气与二次空气的比率以及空气流度，其湿球效率在 40%~90% 波动。露点 IEC 和 M-cycle IEC 实现更高的冷却效率，因为这些间接蒸发冷却器可以预冷一部分二次空气。再生型 IEC (RIEC) 利用来自空调空间的回风作为二次空气，可以提供更大的冷却能力。表 1-1 总结了关于间接蒸发冷却器的一些参数研究情况。

间接蒸发冷却器的参数研究

表 1-1

文献编号	IEC 类型	研究参数及范围	特征
[22]	平行流和逆流板式 IEC	$t_{p,in}=21\sim 50^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,in}=21\sim 35^{\circ}\text{C}$ , $\omega_{s,in}=9.41\sim 21.71\text{g/kg}$	考虑了非稳定 Lewis 因子与湿通道表面润湿性
[45]	带有肋片的逆流 RIEC	$m_{ew}=0.15\sim 1.0\text{L/min}$ , $t_{p,in}=27.5\sim 32^{\circ}\text{C}$ , $\omega_{p,in}=9.19\sim 18.11\text{g/kg}$ $t_{p,in}=24\sim 40^{\circ}\text{C}$ , $RH_{p,in}=30\%\sim 90\%$ ,	实验及模拟
[46]	逆流板式 IEC	$u_p=0.5\sim 5.0\text{m/s}$ , $t_{s,in}=20\sim 28^{\circ}\text{C}$ , $RH_{s,in}=40\%\sim 70\%$ , $u_s=0.5\sim 5.0\text{m/s}$ , $\sigma=0\sim 1$ , $s=2\sim 10\text{mm}$ , $H=0.1\sim 2.0\text{m}$	考虑了干通道中的冷凝
[47]	叉流板式 IEC	$t_{p,in}=24\sim 36^{\circ}\text{C}$ , $t_{p,wb,in}=17.7\sim 28.3^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,in}=22\sim 28^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,wb,in}=16\sim 21^{\circ}\text{C}$	采用了平均水膜温度
[48]		$t_{p,in}=35\sim 45^{\circ}\text{C}$ , $t_{p,wb,in}=19.5\sim 23.3^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,in}=23.5\sim 27.2^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,wb,in}=16.8\sim 18.6^{\circ}\text{C}$	采用了等效水膜温度
[49]		$t_{p,in}=25\sim 45^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,in}=25.0^{\circ}\text{C}$ , $t_{s,wb,in}=11.4\sim 23.8^{\circ}\text{C}$ , $u_p=0.5\sim 4.5\text{m/s}$ , $m_s/m_p=0.5\sim 2$ , $\sigma=0\sim 1$ , $s=2\sim 10\text{mm}$	2-D 模型
[50]		$t_{p,in}=30\sim 45^{\circ}\text{C}$ , $t_{p,wb,in}=15, 20, 25^{\circ}\text{C}$ , $m_p c_{pa,p}/m_s c_{pa,s}=0.5\sim 10$	考虑了纵向热传导
[51]		$t_{p,in}=39\sim 43^{\circ}\text{C}$ , $RH_{p,in}=37\%\sim 46\%$ , $V_p=0.065\sim 0.843\text{m}^3/\text{s}$ , $V_s=0.833\text{m}^3/\text{s}$	测试了不同尺寸与冷却介质

续表

文献编号	IEC 类型	研究参数及范围	特征
[52]	逆流与叉流 IEC	$t_{p,in}=30\sim 36^{\circ}\text{C}$ , $RH_{p,in}=25\%\sim 85\%$ , $t_{s,in}=20\sim 29^{\circ}\text{C}$ , $RH_{s,in}=30\%\sim 70\%$ , $NTU=2\sim 10$ , $m_s/m_p=0.2\sim 1$	比较了逆流与叉流 IEC 中干通道的冷凝量
[31]	M-cycle 逆流 IEC	$t_{p,in}=25\sim 45^{\circ}\text{C}$ , $\omega_{p,in}=7\sim 26\text{g/kg}$ , $u_p=1.5\sim 6.0\text{m/s}$ , $s=1\sim 10\text{mm}$ , $L=0.1\sim 3\text{m}$ , $m_s/m_p=0.05\sim 0.95$	一种新型的逆流露点 IEC
[53]	M-cycle 叉流 IEC	$t_{p,in}=25\sim 40^{\circ}\text{C}$ , $RH_p=10\%\sim 90\%$ , $u_p=0.5\sim 4.0\text{m/s}$ , $m_s/m_p=0.1\sim 0.9$ , $s=2\sim 20\text{mm}$ , $L^*=50\sim 600$	比普通叉流 IEC 效率高出 16.7%
[54]	M-cycle 叉流与逆流 IEC	$t_{p,in}=25\sim 40^{\circ}\text{C}$ , $RH_p=50\%$ , $V_p=130\text{m}^3/\text{h}$ , $t_{p,in}=25\sim 45^{\circ}\text{C}$ , $\omega_{p,in}=6.9\sim 26.4\text{g/kg}$ , $u_p=2.4\text{m/s}$ , $m_s/m_p=0.33$	比较了 M-cycle 逆流与叉流 IEC 的性能

为分析 IEC 性能的综合影响因素以及配置复杂的换热结构,需建立更精确的专用模型来描述 IEC 内部的传热和传质机制。研究表明,当水流量不能满足热交换器壁面润湿性的要求时,IEC 内部壁面上不均匀的水流分布会降低一次空气和水膜之间以及水膜和二次空气之间的热量/质量传递速率,这最终会显著降低间接蒸发冷却器的效率。

现有的 IEC 模型一般通过假设完全润湿表面或者用系数来表示润湿面积比,难以准确评估热交换器表面的实际润湿性。Antonellis 等人<sup>[23]</sup>对间接蒸发冷却器进行了一系列详细的实验研究,为水泵系统设置了的三种不同配置并进行对比,并建立了换热器表面的润湿系数与实际进口参数之间的关联式,结果表明,采用所提出的润湿系数关系式可以大大降低出口气温的预测值和实验值之间的差异。

目前 IEC 中最常用的布水方式是喷淋水系统。在该方法中,湿通道的表面和二次空气被冷却,使得它们能够吸收相邻的干通道内一次空气的热量,从而使一次空气的温度下降。喷淋水布水方法在使用过程中会出现一些问题<sup>[55]</sup>: 1) 当二次空气的速度/压力较高且通道间距较大时,很难实现均匀的水流分布; 2) 使用喷嘴喷雾器难以获得均匀分配的水流量; 3) 过大的喷雾器的雾化能力,容易导致水循环泵的功率大于预期; 4) 循环水泵功率与蒸发所需水量不匹配; 5) 湿通道表面的亲水性能差,使得水不能在其表面均匀扩散。

为了更好地设计喷淋水系统并提高 IEC 的工作效率,需要有效的模型来描述湿通道内的气液两相流动。CFD 方法广泛用于不同装置中喷淋系统的性能研究,大多数模型采用欧拉-拉格朗日方法来描述湿空气中分散的水滴,其中连续相(空气)表示在欧拉参考系中,而离散相(水滴)表示在拉格朗日参考系中。Lacour<sup>[56]</sup>建立了一个描述热喷淋水分散过程中温度和含水量的三维分布模型,并分析了一些关键参数,例如喷射半径、喷嘴孔径、水-空气流速、喷嘴和热交换器之间的最佳距离等,水流量造成热交换器中通道堵塞的阈值由分散半径和蒸发速率决定。Montazeri 等人<sup>[57]</sup>采用欧拉-拉格朗日方法通过 CFD 模拟了蒸发冷却系统中的喷淋水,分析了连续相、粒子流数量和喷嘴喷射角的影响,并通过风洞实验证明了该模型用于预测蒸发过程的偏差小于 10%。

为解决上述问题,国内外学者进行了大量的研究和实验。Wang<sup>[58]</sup>研究了铝箔表面的润湿性,采用表面润湿因子估算壁面不完全润湿效果对 IEC 冷却性能的影响,通过实验定量测量了不同铝箔表面前进和后退接触角和保水能力,并发现在壁面上涂覆粗糙纤维可以增加保水性,并因此提高 IEC 的冷却效率。Zhou<sup>[55]</sup>对布水器的优化设计进行了研究,实验测试了适用于 IEC 的几种可用的布水器和布水模式,并分析了 IEC 的理论喷水量计算模型,提出了改善水分布均匀性的方法,包括增加通道间距、降低二次风速、通过斜纹或凹槽线提高湿壁面的保水能力、将布水器安装到适当的高度以及加配水网等。

热/质量交换介质(壁面材料)的特性对间接蒸发冷却(IEC)系统的性能以及系统的冷却效率有直接影响。与 DEC 不同的是,IEC 的湿通道发生热量和质量传递同时与 IEC 干燥通道发生的空气和“壁”之间的显热交换结合在一起。在 IEC 的湿通道中,需要能够吸收并维持水量的材料层以使水蒸发并引起相邻干通道的显热交换。通过增加壁与湿通道内二次空气之间的接触面积,增强干通道和湿通道之间的热量传递。在间接蒸发冷却器中,热交换壁面材料的吸湿能力、扩散性和蒸发能力会极大地影响润湿区域,从而影响 IEC 系统的冷却效率和性能。

Zhao 等人<sup>[59]</sup>研究了几种材料作为间接蒸发冷却器中的热交换壁面的潜力,包括金属、织物、陶瓷、沸石和碳,实验结果表明,材料的热传导系数和保水能力(孔隙率)对传热传质的影响较小,相反,材料的耐久性、与防水涂层的相容性、污染风险以及成本是更重要的问题,结果显示金属(铜或铝)的芯(烧结、网格、凹槽)是最合适的材料/结构。Xu 等人<sup>[60]</sup>研究了各种纤维编物(纺织品)的蒸发冷却效果,发现织物的毛细效应、扩散能力和蒸发能力分别比常规用于湿表面介质的牛皮纸高出 171%, 298%, 77%。

近年来,纤维材料,包括纤维素、椰壳、棕榈茎,黄麻、葫芦、牛皮纸等被开发使用<sup>[61-64]</sup>。总体而言,纤维具有良好的透水性,允许水在湿表面上扩散并产生良好的蒸发和传热效果。在纤维片的一侧,通过设置防水涂层或铝箔(片)以防止水分进入 IEC 的干通道内。Huang 等人<sup>[65]</sup>针对管式间接蒸发冷却器的布水不均匀问题,提出了布水器结构的改进,并采用吸水性材料进行实验研究,结果表明可以使热质交换效率提高 5%~8%。

### 3. IEC 节能潜力

近年来,国内外许多学者对 IEC 系统在不同地区进行了应用型研究,包括:评估单级 IEC 系统或 IEC 复合系统用于各种气候区域的住宅和商业应用的可行性,以及与 IEC 制造业相关的设备成本计算、节能潜力、投资回报、生命周期、基于碳排放的环境影响研究等。表 1-2 总结了 IEC 在不同地区建筑中的应用及节能效果。

IEC 在不同地区建筑中的应用及节能效果

表 1-2

文献	IEC 类型	建筑面积	风量	地点	季节节能特性
[67]	板式 IEC	—	4248m <sup>3</sup> /h	科威特	(12.4~6.3)×10 <sup>3</sup> kWh
[68]	逆流露点 IEC	—	127m <sup>3</sup> /h	中国	13%~58%
[5]	叉流 IEC	—	1698m <sup>3</sup> /h	伊朗	55%
[44]	LDD-EC	260m <sup>2</sup>	1230m <sup>3</sup> /h	中国香港	23.5%
[69]	再生型 IEC	15m <sup>2</sup>	125m <sup>3</sup> /h	比利时	60%
[70]	叉流 M-cycle	—	—	美国	70%~90%