




青年科技创新人才学术文库

环保工质热泵技术

HUANBAO GONGZHI REBENG JISHU

张仙平 王 方 著

 郑州大学出版社




青年科技创新人才学术文库

环保工质热泵技术

HUANBAO GONGZHI REBENG JISHU

张仙平 王方 著

 郑州大学出版社
郑州

图书在版编目(CIP)数据

环保工质热泵技术/张仙平,王方著. —郑州:郑州大学出版社,
2014.9

ISBN 978-7-5645-2013-7

I. ①环… II. ①张…②王… III. ①热泵 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 204199 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

郑州龙洋印务有限公司印制

开本:710 mm×1 010 mm 1/16

印张:19.25

字数:336 千字

版次:2014 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

印次:2014 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-2013-7 定价:38.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

内容提要



本书着重阐述以 CO_2/HCs 和 $\text{HFC125}/\text{HCs}$ 为代表的环保工质热泵应用技术,共分 6 章,内容包括绪论、环保工质选用、环保工质换热技术、热泵循环形式、环保混合工质热泵系统性能和环保工质热泵应用等方面。重点介绍了环保工质选用标准、基于传热窄点的环保工质换热技术、适用环保工质的热泵循环形式以及环保工质热泵应用前景等。

本书可作为高等学校“供热、供燃气、通风及空调工程”等专业的研究生和高年级本科生的教材,也可供相关领域的科研人员参考。

前 言

能源是社会发展的基本需求,而环境则是人类生存的载体。自 20 世纪 70 年代以来,世界能源形势日趋严峻,由此导致的环境问题也日渐突出。人们开始关注能源开发利用的新途径。正是在这种形势下,热泵(heat pump)技术受到了世界范围的关注。

热泵作为一种高效节能技术,当前发展面临着两大挑战:其一,系统能效的持续提升;其二,新型制冷工质的研发。这也正是撰写本书的初衷。

本书针对我国建筑供热空调和工业用热领域广泛应用的传统工质 HCFC22(R22)热泵系统,从可持续发展角度,围绕 CO_2/HCs 和 HFC125/HCs 环保工质热泵系统理论及应用技术展开探讨。全书分 6 章,第一章绪论,解决为什么编写这本书的问题;第二章环保工质选用,解决如何选择环保工质的问题;第三章环保工质换热技术,解决基于传热窄点的换热问题;第四章热泵循环形式,解决采取合适的循环形式的问题;第五章环保混合工质热泵系统性能,解决不同工况下热泵系统性能的问题;第六章环保工质热泵应用,解决新型环保工质应用前景的问题。

本书是作者在长期研究环保工质热泵技术的基础上撰写的,力图反映环保工质热泵研究方面近年来的新发展。本书可作为“供热、供燃气、通风及空调工程”相关专业的研究生和高年级本科生教材,也可作为相关领域技术人员的参考资料。

本书由河南工程学院张仙平博士和中原工学院王方博士撰

写。中原工学院郑慧凡博士参与了部分章节的撰写工作。全书由河南工程学院张仙平博士统稿。

本书撰写过程中,参考了近年来出版的环保工质教材、热泵教材和部分科研及生产单位的研究成果和相关资料,谨向这些文献的著作者表示诚挚的感谢!同时也得到了郑州大学出版社的大力支持,在此深表谢意!

由于作者水平有限,加之写作时间仓促,虽经诸多努力,但书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

张仙平 王 方

2014年6月

主要符号表及物理量

英文字母

<i>COP</i>	制热性能系数(—)
<i>d</i>	直径(m, 或 mm)
<i>h</i>	比焓(kJ/kg)
<i>K</i>	传热系数[kW/(m ² · K)]
<i>m</i>	质量流量(kg/s)
<i>P</i>	压力(MPa)
<i>Q</i>	换热量(kW)
<i>q</i>	比换热量(kJ/kg 或 kJ/m ³)
<i>RE</i>	制冷性能系数(—)
<i>r</i>	压比(—)
<i>s</i>	比熵[kJ/(kg · K)]
<i>T</i>	温度(K)
<i>t</i>	温度(°C)
<i>w</i>	比功(J/s)
<i>x</i>	混合工质配比(—)

英文缩写

ATL	(atmospheric lifetime) 大气寿命
ATEL	(acute toxicity exposure limit) 高浓度毒性曝露极限
FCL	(flammability concentration limit) 可燃浓度极限
GWP	(global warmth potential) 温室效应指数
HOC	(heat of combustion) 燃烧热
LC	(lethal concentration) 致命浓度
LFL	(lower flammability limit) 可燃下限
ODP	(ozone depletion potential) 臭氧消耗潜能指数
RCL	(refrigerant concentration limit) 制冷工质浓度极限
TLVs	(threshold limit values) 安全阈値

TLV-TWA (threshold limit values-time weighted average) 安全阈值时间加权平均值

希腊字母

η	效率(%)
λ	导热系数[$W/(m \cdot K)$]
σ	表面张力(N/m)
χ	干度(-)

下标

c	压缩机
co	冷凝器
cr	临界值
dsh	过热度
ev	蒸发器
ex	节流阀
gc	气冷器
h	加热
hr	放热
ma	质量份额
opt	最优值
r	制冷工质
s	亚临界循环
t	跨临界循环

目 录



第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 环保工质研究进展	4
第三节 混合工质研究概况	23
第四节 混合工质热泵技术研究进展	31
第二章 环保工质选用	39
第一节 混合工质的筛选原则	39
第二节 CO ₂ 混合工质第二备选组分的确定	45
第三节 HFC125 混合工质第二备选组分 HC _s 的确定	64
第三章 环保工质换热技术	86
第一节 两相流的基本定义	86
第二节 常用两相传热及压降关联式	90
第三节 换热器性能评价方法	100
第四节 传热窄点	103
第五节 基于传热窄点的 HFC125/HC _s 混合工质优化配比区间的确定	115
第四章 热泵循环形式	123
第一节 热泵基本循环	123
第二节 热泵循环模型	135
第三节 循环性能分析	147
第五章 环保混合工质热泵系统性能	178
第一节 CO ₂ /HC290 混合工质试验装置	178

第二节	HFC125/HCs 混合工质实验装置	197
第三节	CO ₂ /HC290 混合工质热泵系统特性	207
第四节	HFC125/HCs 混合工质热泵系统特性	232
第六章	环保工质热泵应用	286
第一节	热泵在空调供热方面的应用	286
第二节	热泵在工农业生产中的应用	295



第一章 绪论

第一节 概 述

能源是社会发展的基本需求,而环境则是人类生存的载体。自20世纪70年代以来,世界能源形势日趋严峻,由此导致的环境问题也日渐突出。人们开始关注能源开发利用的新途径。正是在这种形势下,热泵(heat pump)技术受到了研发人员的青睐。

热泵作为一种高效节能装置,是将热能从低温物系(如环境大气)向加热对象(高温热源,如室内空气)输送的装置,其本质是消耗高品质能以实现热量从低温热源向高温热源的传输。热泵系统通常是双向的,即它们能够实现加热或冷却,或者有时同时加热和冷却。其热力学原理与制冷机相同,都是从低温热源吸取热量并向高温热源排放,在此过程中消耗一定功。热泵早在18世纪初即已出现,其发展受制于能源价格和技术条件,历史较为曲折,但由于热泵能够实现把低温位热能输送至高温位的功能,能够大量利用自然资源和余热资源中的热量,有效减少了输入能,因而可以节省采暖、空调、供热水和工业加热所需的一次能源,具有广阔的发展前景。需要指出的是,热泵利用的低温热源通常可以是环境(大气、地表水和大地)或各种废热,而这些热量属于可再生的能源。

许多国家把推广应用热泵作为减少 CO₂ 排放的一种手段。美国、日本和西欧等国是热泵发展和应用的主要国家,几乎占领了全部的热泵市场。美国热泵的发展是以单元式热泵空调为先导,主要生产以空气为低位热源的单元式热泵空调机组,同时在空气-空气单元式热泵空调机组的基础上又开发了适用于商业建筑的空气-水热泵和水环热泵系统。日本由于国内能源十分贫乏,主要集中在小型空气源热泵的研究。西欧各国则致力于大型热泵装置的研发,生产出的大型热泵主要应用于集中供热或区域供热。如瑞典现有 35 万户住宅用热泵供热,在各种类型供热方式中使用热泵供热占家庭总数的 28.5%。这些热泵中,除大多数用于房屋采暖空调外,还有部分用于区域集中加热和供冷、工业加热、食品加工、化学原料生产、干燥除湿、蒸发浓缩等。由于它对环境的污染远低于燃煤锅炉,而同时又具有制冷空调能力,因此在大城市的大型建筑物中大量应用。此外,热泵用作小范围的局部采暖和空调,更有其独特的优势,因此热泵的使用从综合的经济效益和社会效益看都非常理想。

简单地回顾暖通空调的发展历程,可以发现,早在 1805 年,Evans 首次提出了采用挥发性流体在封闭回路中将水制成冰的思想,1824 年卡诺(Carnot)循环的提出奠定了制冷和热泵循环的理论基础,1834 年,Perkins 以二乙醚为制冷工质的第一台蒸气压缩制冷机专利的公开,开启了真正意义的制冷剂制冷时代。在接下来的近 200 年时间里,暖通空调与制冷(HVAC&R)行业获得了蓬勃发展,为人类的生产生活提供了适宜的人工环境。从某种意义上可以说“没有暖通空调,就没有现代文明”。但时至今日,世易时移,暖通空调行业的发展面临着两大挑战:其一,制冷系统能效的持续提升;其二,新型制冷工质的研发。

在应对能源短缺和温室气体减排的全球性能源挑战面前,尤其是近来“碳税”概念的提出,使得可再生能源技术的研究、开发和应用显得异常重要。热泵技术正是作为一种绿色节能技术,以其能够高效提供的空间供热/冷、热水供应及工业加热而受到世界范围的广泛关注。许多国家更是把推广应用热泵技术作为节能和减少 CO₂ 排放的一种手段。1997 年,全球 CO₂ 排放 220 亿 t,仅热泵技术一项就减排 12 亿 t,占排放量的 6%。就我国来说,截至 2013 年,建筑物能耗已占能源消耗总量约 33%,其中用于暖通空调的能耗占 30%~50%。国家“十二五”计划已把降低能源消耗强度和碳排放强度列为保证经济可持续增长、缓解能源需求快速增长带来的压力的两大主要措施。大力发展高效节能、先进环保和循环应用等关键技术、装备及系统,已被确定为我国战略性新兴产业方向。“积

极发展建筑节能技术,大力提高一次能源利用效率和终端用能效率”已成为我国中长期科技发展规划发展思路。研发环保、高能效比制冷剂及发展地热源、水源、空气源热泵技术和污水源热泵技术则已列入《中国节能技术政策大纲》。在当前形势下,研发高效热泵技术已成为业界共识。热泵主要由压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器等部件构成,在过去的20年间,由于压缩机技术的进步,其能效已提升近30%,研究人员更多地将精力放在了蒸发器、冷凝器两器传热性能的提升上面,主要体现为增加两器的传热面积、增强制冷剂侧的流动扰动及采用微通道换热技术等措施。而对热泵系统实际运行时的系统性能来讲,运行优化与控制技术则显得更为重要。未来一段时间内,高效压缩机、高效紧凑型换热器、新型控制设备与技术将是热泵技术领域能效提升的主要方向。

如前所述,热泵作为一种高效节能技术,在能源与环境保护方面具有独特的优势。自20世纪80年代初始,我国暖通空调领域掀起了一股“热泵热”。90年代以来,空调用热泵在我国长江中下游等地得到了广泛应用。房间空调器在北京、上海、广州等城市居民普及率高达40%以上,其中约1/3为热泵型。近年来,在我国政府和有关政策的支持下,热泵在建筑供热空调和一些工业用热领域中的应用日趋增多。

目前我国热泵系统采用的工质主要是HCFC22,但HCFC22对环境有较大危害,其臭氧消耗潜能指数ODP(ozone depletion potential)为0.05,100年时间累积的温室效应潜能指数GWP(global warmth potential)高达1810。随着对环保要求的提高,开始采用过渡工质HFC134a、R410A和R407C。这些氟利昂类替代工质的ODP为零,但GWP还较高,100年时间累积的GWP分别为1430,1600和1900,按照《京都议定书》对全球减少温室气体排放制定的严格目标,此类工质只能是过渡选择,不可能被长期使用。国内外学者在不断探寻更环保、性能更好的替代工质,到目前为止,尚未找到一种性能理想的替代工质。从可持续发展角度看,自然工质将是解决工质替代问题的根本办法。在这种背景下,自然工质包括CO₂、R290、NH₃、空气和水等又重新受到越来越广泛的关注。

由于煤电在我国电力结构中占主导地位,意味着耗电大户暖通空调系统在给人们带来舒适的同时,要向大气排放大量温室气体CO₂,目前仍在大量使用的传统氟利昂工质也造成环境污染问题。因此,加强暖通空调行业节能、环保技术的研究与应用对缓解日趋严重的能源短缺状况和减少环境污染具有重要的现实意义。

目前,我国能源消耗总量逼近世界第一能源消费大国——美国,然而,我国能源生产的增长慢于能源消费的增长,这不仅给能源供应造成巨大压力,而且带来环境污染等一系列问题。能源和环保问题已经成为制约我国经济社会发展的瓶颈,为此,我国政府先后在国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)和“十二五”能源规划前期重大问题研究选题指南中明确强调要积极发展节能、环保、可再生能源等关键技术。

进入20世纪80年代后,全球气温明显上升,南北极冰川融化速度加快,多国频发强震、洪涝、干旱等自然灾害,直接影响甚至威胁人类的生存和发展。为此,2009年12月联合国气候变化大会于哥本哈根召开,100多个国家的领导人为1997年《京都议定书》第一承诺期2012年到期后全球应对气候变化的努力达成了一致,就发达国家实行强制减排温室气体和发展中国家采取自主减缓行动做出了安排,明确发出了鼓励推广低碳科技的经济信号。2011年上半年以来,北半球多个国家遭遇百年一遇的旱灾,包括中国在内的部分国家大旱过后又发生数百百年一遇的洪涝灾害。灾害天气发生频率增加,破坏力加剧,这是全球变暖的重要标志之一。保护大气环境,保障生态安全的任务迫在眉睫。

第二节 环保工质研究进展

制冷剂的发展变化更多地受技术、市场和政策的影响。相对于热泵系统的性能提升,新型制冷工质的研发更多地涉及臭氧层破坏及温室气体排放问题。1974年,美国两位科学家英利纳(M. J. Molina)博士和罗兰(F. S. Rowland)博士发现制冷剂中氯原子对大气臭氧层存在破坏作用,此后,氟利昂类工质CFCs和HCFCs对环境的负面作用逐渐引起了人们的广泛关注。

大量的研究证实了地球臭氧层变薄的事实,如图1-1所示。2011年科学家更是首次发现北极地区也出现了臭氧空洞,在

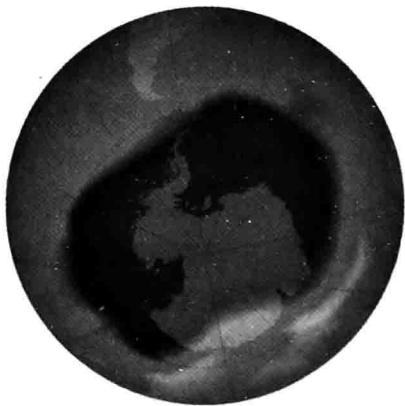


图1-1 南极臭氧层空洞(2006.09)

2010 年冬至 2011 年春天, 北极地区 15 ~ 23 km 的高空臭氧严重减少, 最大幅度减少发生在 18 ~ 20 km 的位置, 减少幅度超过 80%。同时, 温室气体的排放关系到地球变暖问题, 19 世纪以来, 地球表面平均温度已上升了 0.74 °C, 如不采取任何措施, 至 2100 年, 地球表面温度仍将上升 1.8 ~ 4 °C, 这将导致极端气候现象的频繁发生, 比如, 在过去的一个世纪, 海平面已经上升 10 ~ 20 cm, 到 2100 年, 海平面还将上升 18 ~ 59 cm。为适应保护臭氧层降低温室效应的要求, 国际社会于 1987 年 9 月签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》, 以控制 CFCs 和 HCFCs 的生产和消费。值得关注的是, 2007 年 9 月《蒙特利尔议定书》第 19 次缔约方大会上通过了加速淘汰 HCFCs 的方案, 规定发展中国家 2013 年 HCFCs 消费和生产水平冻结在 2009 ~ 2010 年的平均水平, 2015 年完成削减基线水平 10%, 2020 年削减 35%, 2025 年削减 67.5%, 2030 年仅允许 2.5% 的维修量, 如图 1-2 所示。

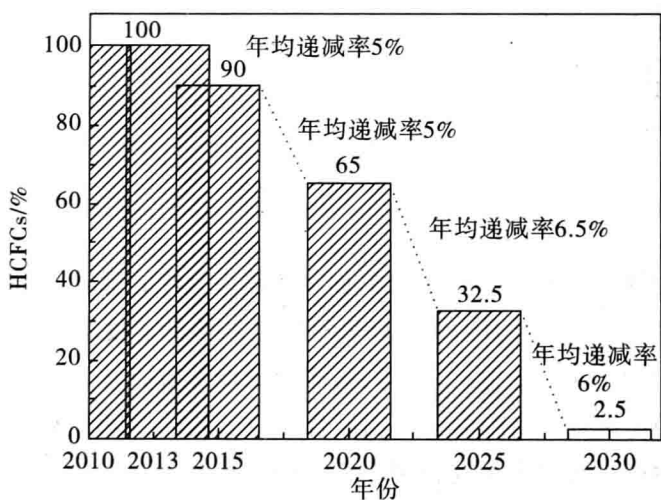


图 1-2 HCFCs 制冷剂削减进度图

欧盟更是制定了严格的法规, 法案 2006/40/EC 中规定, 2011 年 1 月 1 日起, 在欧盟成员国上市的新型号汽车, 所使用的空调制冷剂 GWP 不能超过 150, 从 2017 年 1 月 1 日起, 所有新生产汽车的空调系统制冷工质 GWP 均不能超过 150。美国专家、同时也是 ASHRAE (american society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers 美国采暖、制冷与空调工程师学会) 标准制定委员会成员之一

的 James M. Calm 博士,更是把制冷剂的发展划分为四个阶段,如图 1-3 所示。在此形势下,科学家们通过不懈努力研发新型替代工质,美国杜邦(DuPont)公司宣称研发出 GWP 新低的制冷剂 DR-4 和 DR-5,但杜邦公司尚无将其精确混合成分公开的打算。

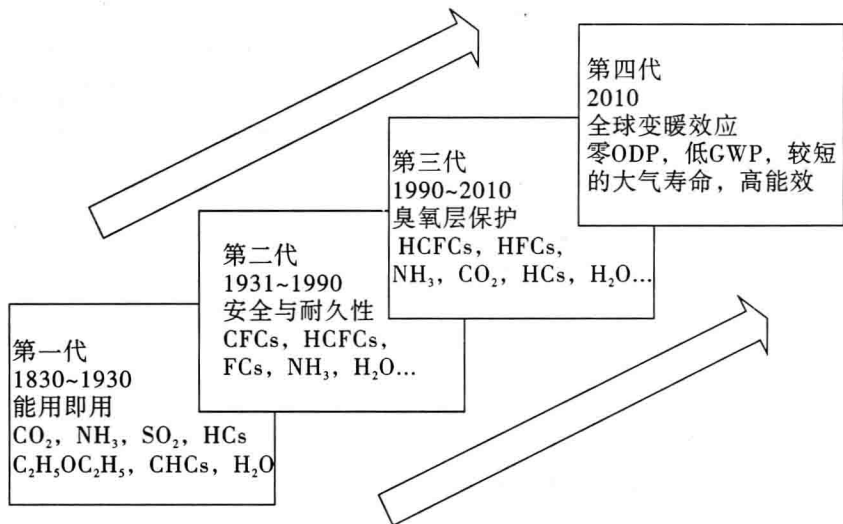


图 1-3 制冷剂进展

我国作为制冷剂生产和使用大国,面临着较为严峻的挑战。据统计,2008 年 HCFCs 总使用量达 10.46 万 t,并且以每年超过 20% 的速度增长,2013 年的冻结用量(基线水平)为 13.81 万 t。同时,我国在制冷工质研发方面较落后,几乎所有人工合成纯质制冷工质和商业化的混合制冷工质的原创性发展均在海外,国内只有后续生产工艺和少量混合制冷工质拥有自己的知识产权。因此,明确工质替代路线,研究合适的替代技术,加强具有自主知识产权的新型制冷剂的研发具有重要的现实意义。

制冷剂按其组成可分为纯工质和混合工质两类。顾名思义,纯工质就是单一成分工质,即用作制冷剂的物质在化学上是单一的、纯净的物质,不含有溶液或其他混合物,如 HFC125 、 $\text{R744}(\text{CO}_2)$ 、 HCFC22 、 R290 、 R32 等。而混合工质是指由两种或两种以上的纯工质按一定比例混合而成的混合物。混合工质按照混合后的溶液是否具有共沸的性质,可分为下列三种:①共沸混合物(azeotropic):和纯工质一样,在一定压力下发生相变时,具有恒定的相变温度,而且气相和液

相始终保持相同的成分。②近共沸混合物(near azeotropic):是一种泡露点温度差足够小的非共沸混合物,在某些特定场合分析时,忽略这个温度差也不会产生明显误差。③非共沸混合物(non-azeotropic):没有共沸点,在定压下蒸发或凝结时,气相和液相的成分不同,温度也在不断变化。严格说来,近共沸物质也属于非共沸范畴,由于其物性和应用的特殊性,故将其区分开来。

一、HFC125 制冷剂的特性及研究现状

氢氟烃(HFCs)类工质不含氯原子,因此对大气臭氧层无害,臭氧消耗潜能(ODP)为0,但往往具有较高的全球变暖潜能(GWP)。在HFC类纯工质制冷剂中,HFC134a、HFC125和HFC32等产品逐渐受到市场的关注,其中HFC134a作为CFC12的替代物已在汽车空调和冰箱空调等制冷设备中得到广泛应用,HFC125和HFC32主要参与混配环保制冷剂等产品。从HFC125、HFC32和HFC134a等参与的混配制冷剂中,HFC125在混配制冷剂的应用最广,几乎在4系列的环保制冷剂中都要用到,并且是所占份额较大的纯质制冷剂。随着全球环保意识的增强,环保制冷剂将逐渐占据市场,并成为主要角色,其中HFCs混配制冷剂是选择之一。下面从环境、安全等性能方面对HFC类工质进行比较分析。

从表1-1可以看出,HFCs纯质GWP值从12~11700变化跨度较大,从混配工质的环境性能角度考虑,希望得到GWP较低的替代制冷剂,基于上述考虑,上述HFCs纯质中GWP偏大的HFC143a、HFC236fa及HFC23被排除出HFC/HCs混配工质的筛选范围。

除了环境性能之外,鉴于第二组分HCs具有可燃性,期待通过工质混配,在形成优势互补的混合替代工质的同时,尽可能降低混配工质的可燃性,这就要求作为基础组元的HFC纯质具有一定的阻燃性。如表1-2所示,结合工质的环境性能,可以发现HFC125、HFC134a和HFC227ea三种纯质在ASHRAE34-2010的安全分类中属于A1级,具有作为HFC/HCs混合工质基础组元的潜力,但有研究发现HFC134a在温度22℃和压力142.695kPa的条件下可以燃烧,并实验证明其临界燃烧压力为135.8~204.755kPa;HFC227ea在室温下的临界燃烧压力为3.203MPa,基于此,本文选择HFC125为HFC/HCs二元混合工质的基础组元。