



最新

# 制冷空调技术

王如竹 丁国良 等 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 最新制冷空调技术

王如竹 丁国良 等著



A1021720

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍制冷与低温工程学科以及暖通空调学科中的前沿技术,主要内容有制冷空调的动态特性和智能仿真、制冷空调中的能源利用与节能技术、蓄冷和蓄热、制冷空调及热泵工质、建筑物复合能量系统、低温气体制冷机热力学机理、超流体传热及其在空间技术中的应用、液化天然气技术、空调送风与系统节能、制冷空调中的现代控制技术和强化传热技术等。

本书可以作为制冷空调专业本科生和研究生的学科前沿教材,可供研究单位和企业培训研究开发及管理人员之用。

### 图书在版编目(CIP)数据

最新制冷空调技术/王如竹,丁国良等著. —北京:科学出版社,2002  
ISBN 7-03-010677-6

I. 最… II. ①王… ②丁… III. 制冷-空气调节器-基本知识  
N. TB657.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057816 号

责任编辑:刘宝莉 责任校对:刘小梅  
责任印制:钱玉芬 封面设计:张 放

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2002年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2002年9月第一次印刷 印张:25 3/4

印数:1—3 000 字数:510 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

近十余年来制冷空调技术得到了飞速发展,传统行业与信息产业得到了有效的结合,可以说制冷空调技术和产品日新月异:新型热力循环得到了应用,新型制冷压缩机得到了发展,微电子技术已经应用到制冷产品的各个角落,仿真技术在制冷空调系统设计中得到了推广应用,制冷空调技术与能源有效利用实现了真正结合,CFCs 替代促进了天然工质的开发研究和应用,各类热泵技术得到了空前发展,小型回热型制冷机及空间低温制冷机得到了迅速使用,与此相关的传热强化与蓄能技术也获得了实际应用。

有关制冷原理及技术的教材国内已经比较多,但从国内教材情况看:

① 总体上比较陈旧,目前出版的教材与 20 年前差别不大,而用人单位对所培养的学生在新技术的了解方面普遍感到不够。

② 制冷原理及设备往往在教材中是分开的,低温技术教材也单独存在,作为制冷原理及技术的应用领域——空调往往在教材中不作考虑,可以说制冷、空调、低温被认为是三个不同的领域。

③ 控制技术在制冷空调及低温技术教材中没有得到重视,而这正是目前专业教材跟不上技术发展的重要原因。

④ 有关学科前沿新技术未得到充分认识,以往教材从总体上受“教学内容一定要是很成熟的内容”观念的束缚,这也是制冷空调教材较大落后于技术发展的重要原因。

根据 2001 年 9 月教育部热能动力工程专业教学指导委员会会议精神,需要一批能反映学科前沿发展、内容更新的学术丛书,可以作为专业教材的有效补充。通过每隔 3~5 年的更新和修订,可以使得学科前沿内容突出,使得学生和专业技术人员能花较小时间来较全面地了解学科水平及其发展趋势。

上海交通大学曾根据这种现状于 1995 年开始开设了“制冷与低温工程学科前沿”课程,主要通过教授讲座形式进行实施,受到了本科生和研究生的一致欢迎。然而毕竟受到师资地域的限制,为了上好一门课,我们不可能把所有一流的、站在学科前沿的师资请来,所授内容并不能较全面地反映学科前沿。为此有必要出一本由许多相关领域的专家所著的文集,使得学生能够得到真传。为此我们根据学科前沿特点,邀请全国各方面有代表性的专家、教授完成本书的编写工作,各篇内容具有一定独立性,相应地从不同角度反映了制冷空调学科研究进展。本书旨在给我国制冷空调领域的学生和科研人员提供最新的前沿知识,使他们的知识及时得到补充

和更新,这可以大大弥补专业课程的不足。

本书主要介绍制冷与低温工程学科以及暖通空调学科中的前沿技术,主要内容有制冷空调的动态特性和智能仿真、制冷空调中的能源利用与节能技术、蓄冷和蓄热、制冷空调及热泵工质、建筑物复合能量系统、低温气体制冷机热力学机理、液化天然气技术、空调送风与系统节能、制冷空调中的现代控制技术和强化传热技术等。值得一提的是,本书中许多内容反映了国家重大基础研究课题“高效节能中的重大科学问题”(G20000263)的新进展,如制冷空调仿真、制冷空调中的强化传热、吸附式制冷和热泵、建筑物复合能量系统等。参加本书撰写的有上海交通大学王如竹教授、丁国良教授、徐烈教授、连之伟教授、吴静怡教授、陆震教授、张鹏博士、姜周曙博士,清华大学过增元院士、张寅平教授,浙江大学陈国邦教授、陈光明教授,天津大学马一太教授,香港大学李玉国副教授(上海交通大学客座教授)。

由于作者水平有限,书中错漏之处在所难免,欢迎读者批评指正。

王如竹 丁国良

2002年4月于上海交通大学

制冷与低温工程研究所

# 目 录

前言	
<b>第一章 制冷空调应用新工质的探讨</b> .....	1
1-1 制冷和热泵循环中混合工质和自然工质的研究与进展 .....	1
1-2 跨临界二氧化碳汽车空调.....	16
参考文献 .....	37
<b>第二章 热泵/制冷技术的新发展</b> .....	41
2-1 压缩式热泵 .....	41
2-2 吸收式制冷 .....	61
2-3 吸附式制冷与热泵 .....	75
参考文献 .....	96
<b>第三章 建筑物复合能量系统</b> .....	103
3-1 建筑物节能与复合能量系统 .....	103
3-2 冷热电联产建筑物能量系统 .....	127
3-3 蓄冷和蓄热 .....	148
参考文献.....	173
<b>第四章 新型通风空调技术</b> .....	179
4-1 多元通风技术 .....	179
4-2 下送风空调技术 .....	192
参考文献.....	211
<b>第五章 低温技术的新发展</b> .....	213
5-1 小型回热式气体制冷机及其应用 .....	213
5-2 超流氮传热 .....	243
5-3 非机械式空间低温制冷技术 .....	269
5-4 天然气液化、贮运及其应用 .....	284
参考文献.....	312
<b>第六章 制冷空调装置仿真新发展</b> .....	317
6-1 制冷空调数值仿真方法 .....	317
6-2 基于仿真的优化设计方法 .....	322
6-3 基于模型的智能仿真方法 .....	331
参考文献.....	343

<b>第七章 制冷空调中的强化传热技术</b> .....	344
7-1 对流换热强化新技术 .....	344
7-2 潜热型功能热流体换热强化 .....	359
参考文献.....	379
<b>第八章 制冷空调控制技术</b> .....	382
8-1 PLC 在制冷空调产品中的应用 .....	382
8-2 制冷机组的群控和远程通信 .....	387
8-3 制冷空调系统智能控制的发展 .....	392
参考文献.....	405

# 第一章 制冷空调应用新工质的探讨

## 1-1 制冷和热泵循环中混合工质 和自然工质的研究与进展\*

节能和环保是 21 世纪科学技术发展的两大议题。人们广泛应用的制冷空调和热泵系统,由于本身耗能和传统制冷剂对环境的破坏,系统的节能和制冷剂的替代成为工程热物理学的前沿课题。在蒸气压缩式制冷与热泵循环中,工质的热物性对循环有着重要作用。可以说制冷与热泵技术的进展就是循环装置的完善与工质的更新。在循环节能方面,从只注意提高标准工况能效比,发展成为提高系统运行季节能效比;制冷剂的替代也由无臭氧层破坏到同时满足臭氧层保护和阻止全球变暖的双重要求上来。

在关注纯工质研究的同时,混合工质和自然工质成为工质研究的重要方向。混合工质在近期替代 CFCs 方面具有很大的潜力和应用前景,可以满足各种不同设备的特定性能要求。合理选择混合工质的组分和配比,可得到对环境影响小、改善溶油性、抑制燃烧、提高能效比的目的。

考虑环境的长期安全性,应尽量避免使用那些最终会排放到生物圈中并影响生态平衡的非自然工质,重新起用自然工质是一种非常安全的选择。从工质利用的历史来看,人类最初使用的是自然工质,如  $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}_2$  等,随着科技的进步,制造出了 CFC、HCFC 等合成工质,提高了循环性能,却造成了人们不可预测的环境问题,于是人们又把目光重新投到自然工质上来,这也正符合哲学思想上的否定之否定规律。自然工质被已故前国际制冷学会主席 G. Lorentzen 称为解决环境问题的最终方案<sup>[1]</sup>。美国、德国、挪威等国家学术研究和商业推广齐头并进,我国学者近年来也开始了自然工质的研究。本文从混合工质和自然工质的研究历史出发,分别介绍了 20 世纪 80 年代中期以前以节能和提高循环性能为目的的混合工质及以后以环保为主要目的的混合工质研究进展,并对 90 年代重新崛起的自然工质的研发状况做了综合全面的分析。

---

\* 本节由马一太撰写。



## 1-1-1 混合工质

### 1. 混合工质的概念及分类

所谓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溶和物,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 共沸混和物(azeotropic):它和单一的物质一样,在一定的压力下发生相变时,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 近共沸混和物(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(nonazeotropic):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。

### 2. 历史回顾

在制冷循环中采用混合工质的想法至少可以追溯到 19 世纪末。早在 1888 年, Raoul Pictet 提出用  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的混合物作制冷剂,不过当初还没有考虑到混合制冷剂需要满足哪些要求才能使循环性能得到改善。1939 年, G. Maiuri 首先提出混合工质在变温下制冷可能节省能耗的优点,但当时采用乙烷/甲烷混合物,并未得到满意的效果<sup>[2]</sup>。直到 1949 年, F. Carr<sup>[3]</sup>才从热力学观点阐述利用混合工质在变温下制冷达到节能的可能性,并以碳氢化合物作为研究对象,得出当被冷却介质存在较大温差时,才有节能的可能性。1950 年以后,共沸混合工质首先走向实用,这就是以 R500 为编号的系列共沸物。在国内外有相当多的学者对混合工质进行过研究,本文不可能也没必要对所有研究进行回顾,但希望能把关键的工作列出。

20 世纪 60 年代以来,为了挖掘制冷装置的潜力,混合工质的各项研究工作非常活跃,主要表现在:

- ① 当被冷却介质有较大温度变化时,利用混合工质节能。
- ② 在中等压比条件下,用单级制冷压缩机获得较低的温度。
- ③ 环害工质的混合工质替代研究。
- ④ 混合工质基本物性测试和其他性质的研究。

### 3. 混合工质循环的理论基础——劳伦兹循环

为了分析非共沸混合工质的循环特点,有必要对变温热源的热力循环进行分析。严格说制冷或热泵是在变温热源下工作的,一方面冷凝器中的载热流体由于热负载的存在有较大的进出口温差,另一方面蒸发器中的载冷流体也有较大的进出口温差,以便于充分利用余热资源。用流体的显热作热源的热力循环的研究由来已

久。在1894年H. Lorenz发表论文,针对一侧以冷冻盐水,另一侧以冷却水作为热源的制冷机提出变温热源的理想循环,他当时称为多变循环<sup>[4]</sup>,后来的学者称为劳伦兹循环。该循环由两个绝热过程和两个多变过程组成,其多变过程要保证过程的温度变化与外界热源的温度变化一致。该循环是变温条件下热力学最完善的循环,也是经济性最高的循环,其原理如图1-1所示。 $\Theta_1$ 、 $T_1$ 、 $\Theta_2$ 、 $T_2$ 为循环四个拐点的温度, $C_1$ 、 $C_2$ 为两个热源流体的比热, $K$ 、 $S$ 为两个热源流体的质量流量。

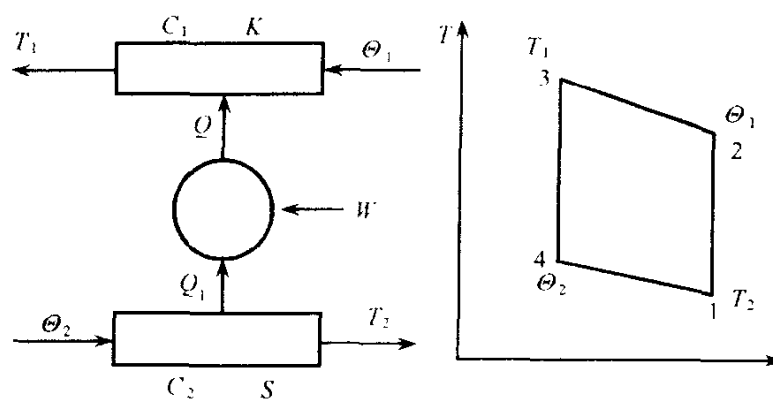


图 1-1 劳伦兹循环示意图

由热力学基本原理,劳伦兹循环存在如下关系:

$$\left(\frac{T_1}{\Theta_1}\right)^{C_1 K} = \left(\frac{\Theta_2}{T_2}\right)^{C_2 S} \quad (1-1)$$

用今天习惯的符号,式(1-1)可以变换为

$$m_1 C_{p1} \ln\left(\frac{T_3}{T_4}\right) = m_h C_{ph} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (1-2)$$

由热力学第一定律,变温热源可逆循环的热效率为

$$\eta = 1 - \frac{\frac{T_1 - T_4}{\ln\left(\frac{T_1}{T_4}\right)}}{\frac{T_2 - T_3}{\ln\left(\frac{T_2}{T_3}\right)}} = 1 - \frac{T_{lm}}{T_{hm}} \quad (1-3)$$

式中, $T_{hm}$ 、 $T_{lm}$ 分别称为高、低温热源热力学平均温度。

对于变温热源可逆热泵循环,其致热系数也有类似的推导过程

$$\text{COP}_1 = \frac{T_{lm}}{T_{hm} - T_{lm}}, \quad \text{COP}_h = \frac{T_{hm}}{T_{hm} - T_{lm}} \quad (1-4)$$

式(1-4)说明变温热源理想热泵循环的用能效率只受热源温度的影响。用人们熟知的热力学理论来分析,劳伦兹循环并无独特之处,它是针对一种特定热源条件下的理想循环。卡诺定理早就指出,工作在两个给定热源间的热机,以可逆机的热效率最高。人们关心的是,在这种特定条件下,用什么方式来实现或是说接近这一循环。由此,便为非共沸混合物的研究提供了理论基础和广阔的应用前景。

#### 4. 早期基于提高性能为目的的混合工质研究

##### (1) 混合工质性能的实验研究

由于能源危机的推动,在 20 世纪 60 年代末到 80 年代初,混合工质节能有强大的吸引力。在技术上实现劳伦兹循环的方式之一即是利用非共沸混合工质的变温相变特性。从 1961 年起,McHarnes 和 Chapman<sup>[5]</sup>对纯工质、共沸和非共沸制冷剂进行了大量运行测试,发现采用非共沸制冷剂引起了制冷量变化,但没有考虑变温过程引起的节能效果。1975 年,A. Lorenz<sup>[6]</sup>成功地进行了 R12/R11 混合工质的变温实验,实验结果表明,在蒸发温度为 0℃,冷凝温度为 35℃,R11 质量浓度达到 0.6 时,实际制冷系数超过理论值 33%,实验结果与 R12 对比,可以节能 20%,从实验中还发现选择合适的混合工质组元对系统性能有着很大的影响,并指出为了很好地匹配空气温度的变化,相变温差应为 20~25℃。

随着节能技术研究的逐步深入,世界各国学者对混合工质用于制冷和热泵循环进行了大量的研究,最为活跃的是前苏联、德国、英国、法国、日本等。前苏联学者研究 R12/R22、R12/R23 用于制冷循环,R12/R11、R142b/R143a 用于热泵循环,R12/R142b 用于茶叶热泵干燥,以及 R12/R22/R142b 用于电冰箱节能等。敖得萨食品冷冻工学院的 B. Φ. 柴可夫斯基进行了混合工质用于制冷循环的实验,采用 R13/R12 非共沸混合工质,当蒸发压力为 1 大气压,压比为 11 时,采用单级压缩机成功地维持最低蒸发温度 -80℃;随后他们又用 R12/R22 和 R12/R123 等进行了制冷循环和传热传质的深入研究。1967 年印度的 Arora<sup>[7]</sup>采用 R22/R114 进行了实验,结果显示,在 R114 质量百分比为 12%时,其功耗比采用 R22 节约 17%。联邦德国汉诺威工学院的 Kruse<sup>[8]</sup>等对非共沸的 R12/R114 和 R22/R114 进行了分析,在 R114 浓度为 50%时,热泵系统可节能 25%,而且通过改变组元配比可以进行热泵系统的连续容量调节,以适应环境系统的变化。表 1-1 为早期研究过的二元混合工质(“O”代表重点研究的物质)。

表 1-1 早期二元混合工质研究

	R22	R12	R12B1	R142b	R152a	R13B1	R114	R11
R113								
R11								
R114		O						
R142b	O	O						
R152a	O							
R12B1								
R13B1								
R12								

但是,学术界对混合工质的节能评价也不一致,如美国橡树岭国家实验室的 Little 使用 R22/R114 替代 R22 在实际的双蒸发器冰箱进行了类似的实验,结果并不令人满意,几种浓度下的实测性能系数没有明显变化。1989 年 Kruse<sup>[9]</sup>在 ASHRAE 会议上报告他使用 R12/R142b 在双蒸发器制冷机上的实验结果,结论是系统在稳态运行和启停时分别节能 1.5% 和 10%。可见在实际研究中,因运行条件、评价方式不同,对混合工质的节能潜力各不相同。

### (2) 混合工质性能的模拟计算

在广泛开展实验研究的同时,许多学者对混合工质制冷循环的节能特性进行了模拟计算。Stoecker 和 Walukas<sup>[10]</sup>给出了 R12/R114 的计算结果,其中他们假定低温蒸发器的热负荷是高温蒸发器的两倍,结果显示:当 R114 质量百分数为 50%,系统可以节能 12%。Kruse<sup>[11]</sup>采用 R22/R114 和 R13B1/R114 也作过理论计算,利用 RKS 状态方程计算混合物的性质,结论是:对于 R22/R114(R22 质量浓度为 0.4),系统的 COP 可以提高 18%~20%;对于 R13B1/R114(R13B1 占 0.7),COP 提高 20%。我国的天津大学率先进行这方面研究,主要是 R22/R142b、R22/R152a 在热泵循环中的节能研究。

## 5. 近期基于环保目的混合工质研究

传统的混合工质节能理论是基于当换热面积足够大换热温差趋于 0 时,可以通过混合物的“温度滑移”得到节能效果,但实际的制冷系统往往存在较大的换热温差,采用混合工质若不增加换热面积,则改进的效果甚微;若增加换热面积,纯工质亦可节能,所以到 20 世纪 80 年代中期,对非共沸混合工质的应用前景并不乐观。在此之后,随着保护臭氧层的蒙特利尔议定书的生效,CFCs 工质的替代问题提到首要位置,一批常用氟利昂制冷剂如 R12、R11、R113、R114 和 R115,也包括全部已编号的共沸制冷剂都面临禁用和淘汰。人们自然想到尚可用的为数不多的几种纯工质混合起来作为直接(drop-in)替代工质,以解燃眉之急,1988 年 Kruse 提出可用混合工质解决 CFCs 问题。近期研究的二元工质如表 1-2 所示。

表 1-2 近期二元混合工质研究

	R227ea	R245cb	R125	R134a	R143a	R152a	R32	R600
R290								
R600a								
R32			○	○				
R152a								
R143a								
R134a								
R125								
R245cb								

在国外,美国的杜邦公司推出了 MP 系列(R22/R152a/R124)替代 R12 的直接替代工质<sup>[12]</sup>。荷兰的飞利浦研究室也作过 R22/R152a,R22/R142b 工质的冰箱实验。Blaise 等人对工业用热泵进行了实验,发现用三元非共沸混合工质替代 R12 可以提高系统的性能系数,而且泄露对系统的影响很小。目前,ASHRAE 已列出了一些 R12、R22 和 R502 的过渡性替代物和长期替代物,已被命名为 R401~R412,如表 1-3 所示。

表 1-3 R400 系列混合制冷剂

ASHRAE 命名	组 分	质量浓度	替代对象	ODP
R401A *	R22/124/152a	53 : 34 : 13	R12	0.037
R401B *	R22/124/152a	61 : 28 : 11	R12	0.04
R401C *	R22/124/152a	33 : 52 : 15	R12	0.03
R402A *	R22/125/290	38 : 60 : 2	R502 R22	0.021
R402B *	R22/125/290	60 : 38 : 2	R502	0.033
R403A *	R22/218/290	75 : 20 : 5	R502	0.027
R403B *	R22/218/290	56 : 39 : 5	R502	0.031
R404A	R125/143a/134a	44 : 52 : 4	R502 R22	0
R405A	R22/152a/142b/RC318	45 : 7 : 5.5 : 42.5	R12	0.028
R406	R22/600a/142b	55 : 4 : 41	R12	0.057
R407A	R32/125/134a	20 : 40 : 40	R502	0
R407B	R32/125/134a	10 : 70 : 20	R502 R12	0
R407C	R32/125/134a	23 : 25 : 52	R22	0
R407D	R32/125/134a	15 : 15 : 70	R12	0
R408A *	R22/125/143a	47 : 7 : 46	R502	0.026
R409A *	R22/124/142b	60 : 25 : 15	R12	0.048
R410A	R32/125	50 : 50	R22	0
R410B	R32/125	50 : 50	R22	0
R411A	R1270/22/152a	1.5 : 87.5 : 11	R12	0.048
R412A	R22/218/142B	70 : 5 : 25	R12	0.055

注:带 \* 为过渡性替代物。

除去欧美研究者外,我国学者也很快把这项研究从节能为主题转向替代为主题,对混合工质的研究又被推上新的高潮。天津大学率先对 R22/R142b、R32/R124 和 R22/R152a/R142b 在家用冰箱及汽车空调中进行了研究<sup>[13]</sup>。同时西安交通大学对 R22/R152a、R32/R152a、R22/R152a/134a 和 R32/R152a/R134a 进行了研究<sup>[14]</sup>。随着国际上替代研究从 CFCs 转向 HCFCs,逐步确立了 R400 混合工质系列。应该指出,除去 R407 和 R410 外,其中大部分并没有达到实际商业化水平。值得一提的是,在我国有许多高校对 R22/R152a 的热物性、循环特性进行研究,并在我国较大批量的冰箱生产中实际应用,说明这是符合我国国情的混合工质。

## 6. 混合工质筛选及配比原则

从理论上讲,几种优势互补的纯工质经合理配比,总可得到与被替代物性能相当的混合物,但如何通过筛选合理的组元及配比却一直是个难题。天津大学首先提出了替代混合物的优选方法和配比原则<sup>[15]</sup>,使其得以解决。

1) 在优势互补的原则下,以 COP 值相近的纯工质为组元,使混合物系在较宽的配比范围内 COP 值偏差较小,以消除泄漏对组分的影响。但片面强调替代物 COP 值的最优化而忽略其他技术参数的合理性是不可取的。

2) 筛选及配比过程中,重视替代物与被替代物之间由于压比差异导致容积制冷效率的不同对标准容积制冷量影响的问题。作为灌注式替代物应当保证它的标准容积制冷量与被替代物的标准容积制冷量匹配。

3) 二元混合物由于配比组分的单一确定性,其组分配比的可塑性较差;三元混合物由于组分的增加,其配比组分的可塑性较强,并且新增加三个二元混合物系制冷剂,因此更有利于混合物筛选的优化组合。

4) 在不同工况,灵活的采用不同配比的混合物替代特定工质。

具体来讲,如选择 R22 的三元替代物,在选择浓度时,首先考虑的范围是满足运行安全的不燃区域;其次是所选工质的浓度要在 R22 等容积制冷量线的附近区域(称为近容积制冷量区);在此基础上应尽量使工质的能效比接近或超过 R22,即要在有相当能效比的区域内选择。当然冷凝压力等参数最好也在 R22 相应参数附近,并在这几个区域重叠部分选择泡露点差较小的浓度。

## 7. R32-R125-R152a 物系替代性能分析

合理的 R22 替代混合物含有可燃纯质,如二元混合工质 R32/152a,在其中加入不可燃的 R125,可在合适条件下形成 R22 的理想替代物。目前国际上研究较多的 R22 替代工质是 R32/R125/R134a。天津大学对该物系和新物系 R32-R125-R152a 进行了理论分析和实验研究<sup>[16]</sup>,下面以 R32-R125-R152a 物系为例介绍其替代性能。图 1-2 表示了该新物系在三角浓度图内工质的不燃充灌浓度、近容积制冷量及近能效比的三个区域,以及各等参数线的变化趋势(箭头方向)。替代混合物应在不燃充灌区、近容积制冷量区及较高能效比区的重叠区内选择。但由于不燃充灌区与近能效比区不重叠,考虑到实际运行中对可燃性的要求不同,选择 1、2 两种浓度的工质作为研究对象。工质 1 在不燃充灌浓度区边缘,除能效比稍低外,其余参数与 R22 很接近。工质 2 处于可燃区,有与 R22 相近的容积制冷量和稍高的能效比。

通过计算可得出该三元物系在各种浓度下等相对单位容积制冷量、相对能效比的参数曲线。由于工质 2 的充灌浓度处于不可燃充灌浓度之外,故需进一步考察其最小运行空间比 RVM 是否大于 1。RVM 远大于 1 的混合物,对一般空调系统

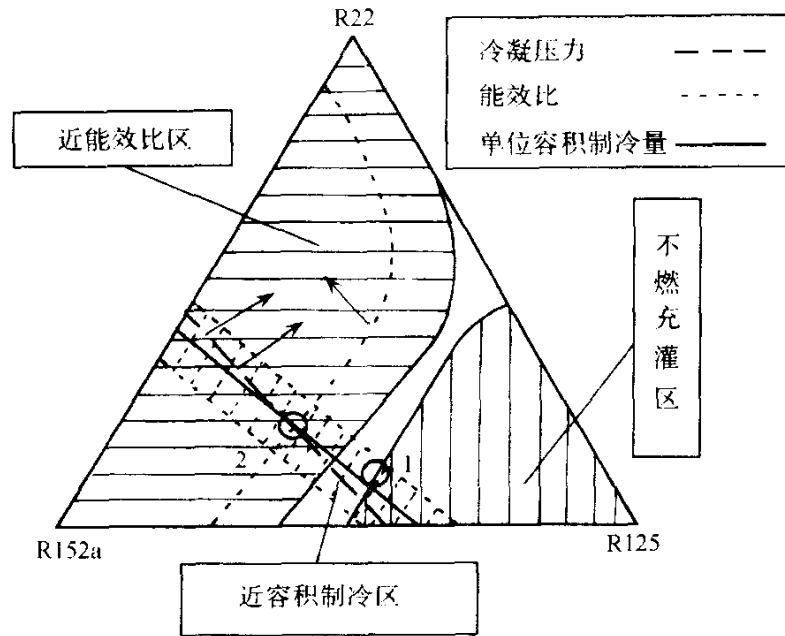


图 1-2 R32-R125-R152a 的综合性能

是安全的。

#### 8. 研究和开发混合工质的意义

综上所述,研究和开发混合工质具有以下原因和意义:

1) 改善现有工质的热物理性质。通过某种工质的第二种组元,从而使工质的性质得到改善。如 R134a 加入 R290,不仅可以增加工质的溶油性,而且可以提高容积制冷量。再如增加第二种不可燃组元可以降低混合物的可燃性。

2) 提高工质的循环性能。由于纯工质的蒸发、冷凝过程是一个等温等压过程,这样会增大工质与热源的换热温差,使得工质与热源间的匹配性能下降,无形之中就增大了传热的不可逆损失。非共沸混合工质可以实现变温的蒸发、冷凝过程,从而减少换热温差,提高循环系统的性能系数。

3) 调制冷空调系统的负荷,实现连续的容量调节。通过改变混合工质的组元匹配,使其容积制冷量发生变化,从而达到调节系统负荷、提高系统性能的目的。

4) 替代环害工质。纯工质的理想替代物是非常有限的,但可以通过少数几种低环害制冷工质组合出很多工质,从而解决大多数制冷剂对环境的危害。

#### 1-1-2 自然工质

替代工质研究的另一方面是放弃使用化工合成物,采用和环境相容的纯天然工质,主要包括水、碳氢化合物、氨、二氧化碳和空气等。研究表明,  $\text{NH}_3$ 、HCs 和  $\text{CO}_2$  在常规制冷范围 ( $-50 \sim 10^\circ\text{C}$ ) 具有较高的使用价值,下面就对这几种主要的自然工质进行介绍。

## 1. 水

水是人类赖以生存的极其珍贵的自然资源,作为制冷工质,对环境无任何破坏作用,同时,其优良的物理和化学性质,亦不会对人类产生任何不良影响。在吸收式制冷系统中,利用水作为制冷剂已有几十年的历史。在某些场合,水也被用来作为直接蒸发冷却的工质。最近,以水作为制冷剂的压缩式制冷研究也受到了人们的重视<sup>[17]</sup>。德国的 Essen 大学已成功地建造了制冷容量为 800kW 的制冷循环装置,见图 1-3。水的物理特性决定了系统要在远低于常压下的工作压力下运行,与吸收式制冷相似,系统真空度的保持,对系统的运行效果极其重要。其次,尽管冷凝压力和蒸发压力都较低,但系统的压缩比却较高,容积流量较大,需要采用专门的压缩机和采用多级压缩的方式。在中高温热泵领域,水被认为是一种理想的制冷工质,以水作为工质的应用技术关键是研究和开发适宜低压水蒸气的制冷压缩机。

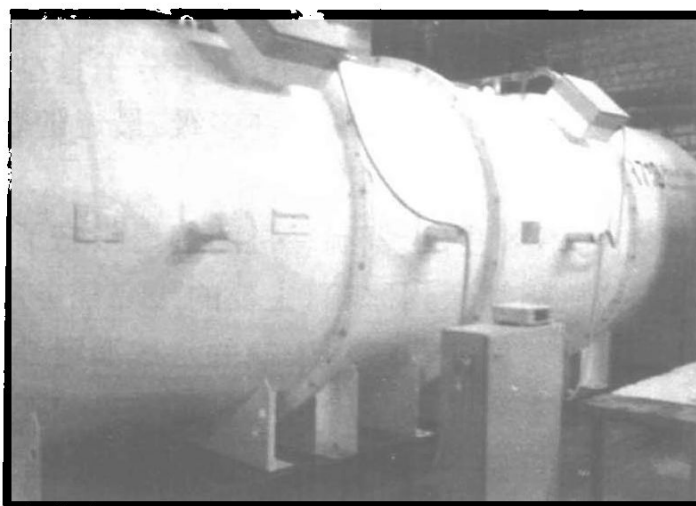


图 1-3 以水为工质的压缩机制冷系统

## 2. 氨

氨已被使用达 120 年之久而至今仍在许多国家的大型工业系统中应用。其优点是 ODP=0、GWP 接近于 0,具有优良的热力性质,价格廉且容易检漏,是当今自 25kW 起的采用往复式或回转式压缩机的标准制冷装置中最有生命力的制冷剂,在适宜的机器设备中甚至更小容量的氨制冷机也已逐渐推向市场,新设计的系统中所需氨的充灌量已大为减小,系统的密封性能有较大的改进。

人们对氨考虑更多的是氨的安全性,主要是毒性和可燃性,其次是具有刺鼻的气味。这方面的缺陷在“氟利昂时代”往往被夸大了。实际上它的毒性只有氯气的  $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{50}$ ;其着火极限为 15.5%(容积比),比通常的烃类和天然气高 3~7 倍,而燃烧热却比它们少一半左右。100 多年的历史经验表明,氨的事故率是很低的。一项最近的调查表明<sup>[18]</sup>,氨的事故率至多是和卤化物一样的。由于氨有强烈的刺激性



气味,实际上氨蒸气在空气中的浓度达 5ppm 时,已能闻到,这比眼睛和喉咙受到刺激的浓度低 5~10 倍,因此一旦有微小的泄露就会被及时发现,而这一浓度远低于氨的着火浓度。另外,氨比空气轻,很容易上升从屋顶逸出室外,当氨和水接触时,能很快被水吸收,这一性能可用来消除空气中的氨蒸气,大大减少了事故的发生。

通过近几年的研究和开发,新型氨制冷系统已较有效地解决了安全性问题。新设计的系统中氨的充注量已大为减少,密封性能也有较大的改进。首先,新一代的氨制冷装置需要有可靠的报警系统和氨清除系统。在中央空调系统、大型商店和超级市场的氨制冷系统中,一般采用带载冷剂的间接制冷系统。将氨制冷机设置在公共建筑内,单位制冷量氨的充灌量不得超过 0.1~0.15 kg/kW。其次,为强化传热和减少氨容量,采用两种形式的板式蒸发器。小冷量的采用沉浸式,载冷剂在板间流动,氨在壳体中浸润板式蒸发器;大冷量的采用传统的板式换热器,材料为不锈钢或铝,也有采用淋浇式蒸发器,液氨用泵再循环通过喷嘴喷淋在管子上<sup>[19]</sup>。

对于那些需用离心式压缩机的大型装置中,由于分子量小,限制了在给定叶轮圆周速度时的压缩比,即使中等压缩比也需要许多级。最近随着新材料的开发和应用,可采用更高的圆周速度,便能弥补此缺陷。

由于氨和普通润滑油的不溶性,给氨制冷机的润滑带来了困难。为扩大氨的应用范围,进一步扩展到小型机组和家用冰箱,主要的研究任务应是开发气体冷却的半封闭或全封闭压缩机,目前已研制出能溶于氨的合成润滑油,也研制出能耐氨和该种润滑油的铝导线和绝缘材料<sup>[20]</sup>。一种新型氨压缩机如图 1-4 所示,在该压缩机中,定子与转子之间设置的屏蔽罩可有效防止氨泄漏并保护电机绕组的安全。

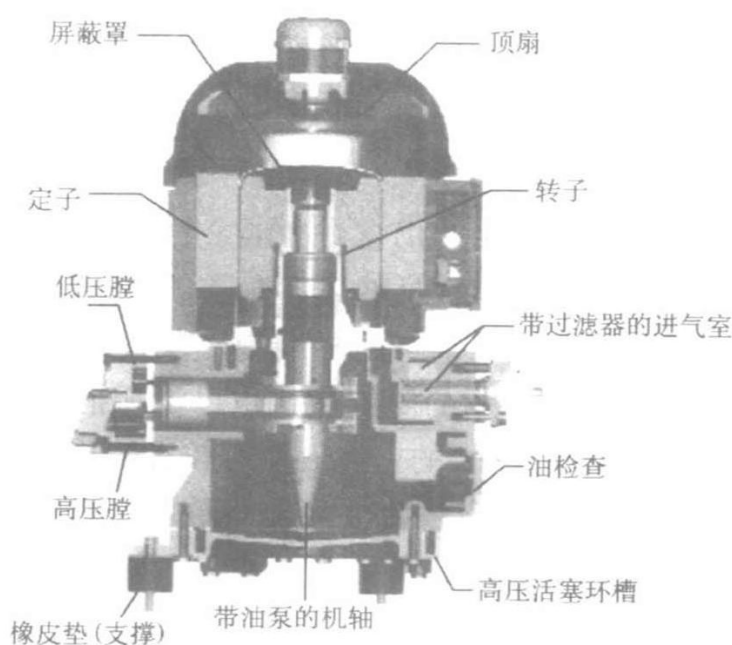


图 1-4 FRIGOPOL 压缩机结构