

高温热泵在我国的应用及研究进展*

赵 力

(天津大学机械工程学院热能系 天津 300072)

摘 要 综述了近年来高温热泵技术在我国的应用和研究进展。列举了高温热泵的应用实例和效果,并提供了多种公开发表的有关高温热泵技术的研究成果,如高温热泵循环工质、高温热泵循环系统的优化等。在此基础上,指出了现有研究内容的不足和高温热泵未来几年的研究方向。

关键词 工程热物理; 高温热泵; 综述; 非共沸混合工质

Application and Development of High Temperature Heat Pumps in China

Zhao Li

Tianjin University, Tianjin, 300072, China

Abstract The situation is described about application and development of the high temperature heat pumps (HTHP) in China recently. Some engineering examples and systematic parameters of the HTHP are stated. Some published research conclusions of the HTHP are summarized, such as working fluids for the HTHP and parts matching. According to above information, some shortcomings of current studies are pointed out and the future directions of research and development are suggested.

Keywords Engineering thermophysics; high temperature heat pumps; review; non-azeotropic mixtures

1 引言

热泵是以消耗一部分高质能(机械能、电能等)或高温位能为代价,通过热力循环,把热能由低温物体转移到高温物体的能量利用系统^[1]。

表 1 各工业部门所需热能的供热温度/%^[2]

行业	需求温度/℃			
	< 100	100—150	150—183	> 183
食品烟草	2.5	62.5	16.6	18.4
纤维工业	0.4	50.3	49.3	0.0
木材工业	1.1	9.3	6.6	83.0
纸浆加工	0.0	85.9	4.1	0.0
化学工业	4.8	26.9	50.0	18.3
橡胶制品	0.0	26.3	53.4	20.4
皮革制品	0.0	100.0	0.0	0.0
陶瓷工业	0.0	85.6	14.4	0.0

按工作原理的不同,热泵可分为压缩式、吸收式、喷射式、吸附式和化学热泵等,其中应用最广的是压缩式热泵系统。另外,根据热泵系统冷凝温度的不同,又可将热泵系统分为常温热泵和高温热泵。根据表 1 可知,冷凝温度达到 150℃的高温热泵系统可以满足大多数工业用户(如皮革制品、纸浆加工、陶瓷工业、食品烟草和纤维工业等)的需求,这表

明高温热泵具有广阔的应用空间。

表 2 某些行业可资利用的余热温度^[3]

行业		余热温度/℃	
化学行业		蒸馏工业	50—120
食品工业	干燥	加压常压干燥	60—150
		真空(冷冻干燥)	40—80
	杀菌	几分钟到几十分钟	60—80
		几秒	80—140
	热处理	支化作用	88—100
		罐头密封	68—85
造纸工业		蒸煮工程	150—160
		加热干燥工程	80—130
纤维工业		染色工程	50—80
木材工业		干燥	45
电解工厂		加热	50—60
		镀锌	20—25

高温热泵系统在工业领域中的应用具有如下意义:首先,大量的工业余热为其解决了低温热源问题(参见表 2),这就可以使热泵既充分利用其它方法较难利用的工业余热,又以远高于其它供热方式的效率(热泵系统循环效率一般为 3 左右)提供工业所需热能。从 ASHRAE 对美国 and 加拿大等地的调查

* 收稿日期:2004 年 08 月 25 日

结果看,这一思路的前景是乐观的^[4];其次,工业余热经热泵利用后,能以较低的温度排放,减少了对环境的热污染;再次,应用热泵供热对降低温室效应也具有积极作用,与燃煤锅炉相比,通过节约燃料,其二氧化碳排放量可降低30%~50%^[5]。目前,冷凝温度低于50℃的常温热泵已经比较成熟,它的末端散热装置主要是风机盘管;冷凝温度在50~65℃之间的中温热泵的循环工质多为R22,受冷凝压力的限制,它的供水温度应在55℃以下,所以必须采用特殊的末端散热型式(如:风机盘管或地板辐射采暖);冷凝温度为80~100℃的高温热泵可以将供水温度提高到70℃或者80℃以上,基本达到北方供热的设计标准,所以高温热泵的末端散热装置可以是价格低廉的铸铁散热器,因而该类热泵可以作为普通建筑的供热热源,也可以用于老建筑的改造(代替燃煤锅炉),实际上高温热泵不仅可以用作采暖热源,也可以用于其它多种行业,如干燥等。

由于高温热泵有良好应用前景,使其成为近年国际热泵研究的一个基本方向。在日本的超级热泵项目^[6],美国IEA热泵中心和IIR热泵发展计划^[7]及欧洲的大型热泵研究计划中,高温热泵均是其中的重点研究内容之一。

综上所述,高温热泵具有明显的经济效益和社会效益,市场潜力巨大,因此,如何提高其效率、保障其正常运行为目的的各种研究项目具有非常重要的意义。

2 工质的研究进展

谈及高温热泵系统,首先将要面对热泵系统中循环工质的选择问题。只有选择适宜的循环工质,热泵系统才能达到设定的工况要求。

当前已鉴定的有机物有500多万种,无机物也有5万多种,但其中适合作高温热泵循环工质的并不多。在进行工质的选取时,所需考虑的主要因素如下:

- (1)适宜的冷凝压力,应在2.4MPa以下(压缩机的承压能力一般为2.5MPa);
- (2)适宜的蒸发压力,应在0.1MPa以上,以免在系统中形成负压;
- (3)适宜的容积制热量,应在2.5J/cm³以上,以免使压缩机体积过大,造成设备费用升高;
- (4)作为循环工质的其它共同要求,如无毒、对环境危害小、化学性质稳定、热物性优良等;
- (5)在满足上述要求的前提下,追求更高的循环

性能系数。

以日本为首,国际上已有多名学者针对高温热泵系统中的非共沸混合工质进行了较多的研究。如1993年,Akio Miyara以R22/R114为工质进行了实验研究(冷凝器入水温度40℃,出水温度60℃;蒸发器进口水温30℃,出口10℃)^[8];Kazo Nakatani等对以R22/R134a、R22/R152a、R22/R142b和R22/R123做工质,冷凝温度为70℃的热泵性能进行了测试^[9];日本超级热泵计划中所研制的高效升温型热泵,采用R123/R134a混合工质,将热水从50℃升温到85℃^[10];另外,Leon Liebenberg等将R22/R142b用作热水热泵的工质来提供60℃热水^[11];W. Vance Payne等对用R32/R290、R32/R152a和R290/R600a为工质的热泵制冷制热性能进行了测试^[12];Sukumar Devotta^[13]等于1994年对当时已提出的HFCs和HFEs纯质进行了理论循环分析。计算的冷凝温度范围为80~120℃,对所有物质均指定循环条件为无过冷、无过热、无压降、绝热压缩,温升40℃。结果表明,R143和R134的COP相对较高,上述成果主要是从非共沸混合工质的热力学循环性能研究中得到的。

国内方面,目前主要有四家研究单位(清华大学、天津大学、上海交通大学和中科院广州能源所)对高温热泵进行了研究。清华大学^[14]申报了R124/R142b混合工质专利,给定高温水源热泵的冷凝温度为90℃。上海交通大学利用混合工质R22/R141b将冷凝水从70℃加热到80℃,并针对压缩机频率和COP的关系进行了初步的研究^[15]。天津大学自上世纪80年代末开始针对高温热泵开展了一系列的研究工作,其中包括在固定温升为40℃、冷凝温度为60~80℃、过热度为10℃左右、过冷度为5℃左右的条件下,对R142b、R227ea/R600、R22/R142b和R124/R141b工质进行了理论循环分析和热泵性能实验研究^[16];利用R22/R142b/R21和R290/R600a/R123等混合工质,得到了热泵出口水温85℃、COP在3以上的实验结果^[17];最近又将冷凝温度升高到95℃,提供了90℃的冷凝水^[18]。

上述已有研究在高温热泵工质方面做出了积极的探索。但总的说来,相关文献数量还不多,且大都处于非共沸混合工质的简单热力学循环分析及初步实验验证阶段,尚不足以为高温热泵系统的实际运行提供充分的理论保障。

3 系统的研究进展

为了推动高温热泵的应用,研究人员正在对循

环过程本身进行优化。系统循环的优劣主要归结到三个方面：(1)工质热物性对循环系统的影响；(2)系统自身的匹配性能；(3)系统的控制策略。

在热泵系统中，蒸发器中的换热强化问题和冷凝器中的强化问题具有同等重要的地位。不同的是，在蒸发器中工质在进行沸腾换热。通常所用的方法是建立在还原论的基础上，数学方法是线形的，而沸腾系统是非平衡的，非线形的，随机的，复杂的和非还原性的，必须用整体系统论的思想和非线形的数学工具来研究。基于这种原因，清华大学力学系把混沌数学中的分岔和突变理论引入了沸腾系统，欲在沸腾机理上有所突破^[19]。针对工质在蒸发器中的相变传热，Kedzierski 和 Bryant 认真研究了蒸发器中换热面角度对传热的影响^[20]。Bivens 对蒸发器中混合工质 R32/R125/R134a 的蒸发过程进行了研究^[21]。以 G. Venkatarathnam^[22, 23, 24] 为主针对非共沸混合工质的相变换热特性进行了较详尽的理论研究，指出了蒸发器、冷凝器中换热窄点存在的条件和可能性，以及如何避免换热窄点发生的方法，为非共沸混合工质在实际工程中的应用奠定了必要的理论基础。

另外，中科院工程热物理研究所对制冷系统中毛细管内的蒸发传热进行了一定的理论和实验研究^[25]；上海交通大学也在毛细管的通用积分模型上也做了相应的理论研究^[26]。天津大学在高温热泵压缩机的变频特性^[27]、工质泄漏对系统循环的影响^[28]及高温热泵系统负荷的智能调控^[29]等角度也进行了许多有意义的尝试。

纯工质多级压缩热泵系统和装置，以双级或三级压缩为主，采用多级离心或螺杆式制冷压缩机^[30]，用于区域供热或工业工艺流程供热。此类热泵的工作流程与双级压缩制冷系统类似，但一般采用了与压缩级数相同的多个冷凝器对载热介质进行逐级加热，且其工作温度范围和所使用的工质与制冷系统不同，技术成熟，已在供热方面获得工程实际应用。吸收-压缩组合热泵系统和装置将吸收式和压缩式系统组合在一起，采用沸点相差很大的工质作为循环的工质对，利用其溶液对低沸点工质的吸收作用来改善循环某些方面的特性，此类循环种类繁多，研究表明，这类循环能较好地改善吸收式或蒸汽压缩式热泵的性能，极具发展潜力^[31]。

智能控制方法应用于制冷、热泵机组只是近几年的事情，目前日本正在加紧研制小型变容量蒸汽压缩式热泵空调系统控制技术，并对组成空调系统

的关键部件：变频压缩机、电子膨胀阀、换热器风扇及其相关技术进行了分析和评述^[32]。

国内有许多学者针对空调器进行了较多的智能控制研究，西安交通大学针对小型空调器进行了模糊控制理论的研究^[33]；东南大学利用计算机仿真技术对空调换热器的传热特性进行了研究^[34]，上海交通大学也进行了大量智能控制技术的基础性研究^[35]，主要集中在人工神经网络对制冷设备部件的系统辨识上，得到了很好的结论，但实践应用较少。

由以上分析可以预测，研究应用于热泵机组上的智能控制方法是一种趋势，它的应用会使系统运行更加平稳，能耗降低，并能提高人的舒适度。有理由相信，使用了智能控制技术的高温热泵机组，将更具有市场竞争力。

4 国内应用介绍

经过十几年的研究发展，在河北、山东和天津等地已有几处高温热泵系统得到了实际应用，下面将简单介绍一下各系统的特点和运行参数。

(1)河北某公司新建办公楼(1800m²)和生产车间(800m²)，另有门卫等平房建筑，供热面积约2700m²。办公楼和车间要求不同，所提供的供热水温也不同。

原始条件及要求：

- a. 有两眼浅井(1眼生产, 1眼回灌)，水温 15℃，作为低温热源(冷源)；
- b. 办公楼系统终端用风机盘管，冬季热风采暖，夏季空调降温；
- c. 生产车间系统终端用铸铁散热器，冬季热水采暖，夏季不要求降温。



图 1 高温热泵系统

题主要和工质及换热介质的物性参数有关,是高温热泵系统中相对静态的问题。

在目前已提出的高温热泵循环工质中,绝大部分是非共沸混合工质,而且其中大部分工质在高温工况时的温度滑移非常明显。由于换热流体(一般为水或空气)的焓值随温度的变化基本呈线性关系,而非共沸工质相变时的焓值随温度的变化往往具有明显的非线性,这就有可能导致传热热点的发生;

其二是非共沸混合工质在高温热泵系统蒸发器和冷凝器中的非完全相变现象缺乏理论判据及相应的实验验证,另外非完全相变和高温热泵系统各循环参数之间的关系尚不明确(所谓非完全相变是指特定工况下非共沸混合工质由于换热介质流动参数的变化等原因,而由正常的完全相变过渡到非完全相变的过程。非完全相变现象的出现会导致系统循环的急剧恶化^[39]。非共沸工质非完全相变不仅和工质、换热介质的物性有关,而且和系统的运行调节过程有关,并由工质外部的某类系统参数激发而体现,所以它是高温热泵系统中相对动态的问题。

在高温热泵系统工作正常的前提下(此时非共沸工质处于完全相变状态),保持蒸发器或冷凝器入口的换热介质温度,提高换热介质流量;或保持蒸发器或冷凝器入口的换热介质温度和流量,以及工质的蒸汽压力,降低压缩机频率。以上两种常见调控方式都有可能引发非共沸工质在换热器内的非完全相变,从而导致循环恶化(COP 大幅度降低)。开展非共沸工质的非完全相变机理研究可以明确此现象发生的前提条件,划定工况范围,从而在系统实际运行中避免进入非完全相变发生区,使系统安全、稳定、高效的运行。

由于高温热泵系统的运行调节策略可通过非共沸工质非完全相变的实验结果来制定,在工质由完全相变到非完全相变过渡时,通过对换热流体流量、温度,以及工质的温度滑移、相变压力和换热器内的压降等参数的持续测量,可以获得非完全相变是否发生的理论判别式,从而可以用数学模型表达高温热泵系统避免进入非完全相变区的调控策略。

参考文献:

- 1 吕灿仁. 热泵与节能. 自然杂志, 1981, 4: 426-429
- 2 李新国. 中高温热泵及其用压缩式制冷机的研究. [硕士学位论文]. 天津: 天津大学研究生院, 1989年5月
- 3 山崎公丸. 高温ヒートポンプ(1), (日)冷冻, 1985, 60(698): 1170-1176

- 4 Cane R L D, Clemes S B, Fogas D A: Heating-recovery heat pump operating experiences, ASHRAE Trans., 1994, 100(2): 165-172
- 5 卓存真. 国际热泵技术发展动态. 制冷学报, 1994, 15(1): 52-58
- 6 Honjo K et al. Current status of super heat pump energy accumulation systems Heat pumps for Energy Efficiency and Environmental Progress, 1993, 553-561
- 7 Motal R. Heat pump technology and working fluids. XIXth International Congress of Refrigeration, Holland, 1995, 4B, 1334-1341
- 8 Akio Miyara, Shigeno Koyama, Tetsu Fujii. Consideration of the Performance of a Vapor Compression Heat Pump Cycle Using Non-zeotropic Refrigerant Mixtures. International Journal of Refrigeration, 1992, 15(1): 35-40
- 9 Kazuo Nakatani, Mitsuhiro Ikoma, Koji Anita, et al. Development of High-Temperature Heat Pump Using Alternative Mixtures. National Technical Report, 1989, 35(6): 12-16
- 10 高田秋一. 热泵技术的最新发展和进步. 陆震译. 制冷技术, 1997, (3): 18-28
- 11 Leon Liebenberg, Josua P Meyer. Potential of the zeotropic mixtures R22/R142b in high temperature heat pump water heaters with capacity modulation. ASHARE Trans 1998, 104(1): 418-429
- 12 W Vance Payne, Piotr A. Domanski and Jaroslaw Muller. NISTIR(U. S. A), 1996. 6330
- 13 Sukumar Devotta, V. Rao Pendyala. Thermodynamic Screening of Some HFCs and HFEs for High-temperature Heat Pumps as Alternative to CFC114. Int. J. Refrig., 1994, 17: 338-342
- 14 史琳等. 一种高温水源热泵的制冷工质. 中国, 发明专利, 01120434. 6.
- 15 Li T. X. High temperature hot water heat pump with non-azeotropic refrigerant mixture HCFC-22/HCFC-141b. Guo. K. H. and Wang R. Z., energy conversion and management, 2002, 43(15): 2033-2040
- 16 陈东. 压缩式中高温热泵低环害循环工质的理论和实验研究[博士学位论文]. 天津: 天津大学研究生院, 1997年9月
- 17 赵力. 中高温地热泵循环工质及系统智能调控的研究[博士学位论文]. 天津: 天津大学研究生院, 2001年3月
- 18 H. WANG. Working Fluids for Moderate and High Temperature Heat Pumps. L. MA, H. LI. Proceedings of the 5th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids (Guangzhou, China) 2002, 393-399
- 19 王补宣. 沸腾系统中的分岔和突变现象. 中国工程热物理学会. 传热传质学学术会议论文集, 1998
- 20 Kedziarski, Mark A. Effect of inclination on the performance of a compact brazed plate condenser and evaporator. Heat

- Transfer Engineering, 1997, 18(3): 25-38
- 21 Bivens, Donald B. et al. Performance of R-32/R-125/R-134a mixtures in systems with accumulators or flooded evaporators. ASHRAE Transactions, 1997, 103(1): 777-780
- 22 G. Venkatarathnam, Girish Mokashi and S. Srinivasa Murthy, Occurrence of pinch points in condensers and evaporators for zeotropic refrigerant mixtures. Int. J. Refrig., 1996, 19: 361-368
- 23 G. Venkatarathnam and S. Srinivasa Murthy, Performance of some zeotropic mixtures as alternative refrigerants to R22 and R502. Int. J. Energy Res., 1998, 22: 1065-1073
- 24 G. Venkatarathnam and S. Srinivasa Murthy, Effect of mixture composition on the formation of pinch points in condensers and evaporators for zeotropic refrigerant mixtures. Int. J. Refrig., 1999, 22: 205-215
- 25 苗建印. 不同截面毛细管内蒸发传热的分析. 王金亮. 中国工程热物理学会. 传热传质学学术会议论文集, 1998
- 26 丁国良等. 毛细管的通用积分模型. 中国工程热物理学会. 传热传质学学术会议论文集, 1998
- 27 赵力. 关于频率和热泵输出负荷之间的关联. 张启. 太阳能学报, 2003, 24(3): 311-315
- 28 赵力. 循环工质的泄漏对于中高温热泵性能的影响. 张启. 太阳能学报, 2003, 24(2): 152-156
- 29 L. Zhao. Theoretical and basic experimental analysis on load adjustment of geothermal heat pump systems. L. L. Zhao, Q. Zhang, G. L. Ding. energy conversion and management, 2003, 44(1): 1-9
- 30 Cecilia Gabrieli, Lennart Vamling. Drop-in replacement of R22 in heat pumps used for district heating - influence of equipment and property limitations. International journal of refrigeration, 2001, 24: 660-675
- 31 周湘江. 高温热泵在我国应用的可行性分析. 连之伟. 流体机械, 2003, 31(7): 55-58
- 32 山中晤郎. 住环境技术的现状与展望. 三菱电机技报, 1996, 70(8): 21-29
- 33 傅明星. 空调器新型模糊控制器研究. 曹琦, 王宜义. 暖通空调, 2000, 30(2): 38-40
- 34 周乐平. 空调换热器性能模拟与优化仿真[硕士学位论文]. 长沙: 东南大学研究生院, 2000年5月
- 35 丁国良. 制冷压缩机热力计算的复合模糊模型. 张春路, 詹涛. 科学通报, 2000, 45(6): 660-663
- 36 L. Zhao. Affection of two systematic parameters on the geothermal heat pump system operation. T. J. Zhang, Q. Zhang, G. L. Ding. renewable energy, 2003, 28(1): 35-43

信息报道

《制冷学报》参考文献著录格式要求

- 1、期刊等连续出版物
 序号 作者. 文章题目. 其他责任者. 刊名. 出版年份. 卷号(期号): 起始页~终止页
 说明: 西文期刊的缩写刊名后不加缩写点; 其他责任者, 只标注第二、三责任者(姓名之间加逗号)。
- 2、专著
 序号 作者. 书名. 其他责任者. 版本(第1版不标注). 出版地: 出版者, 出版年.(专著中的析出文献应注明起止页码)
 说明: 格式中, 著者超过三人的, 只标注前三人(作者姓名之间加逗号), 后加“等”, 英文加“et. al”字样. 西文著者姓名也采用姓前名著录法, 西文作者的名字部分可缩写, 并省略缩写点“.”。
- 3、学位论文
 序号 作者. 文章题目. [学位论文]. 保存地点: 保存单位, 年份
 说明: 学位论文应具体写明硕士或博士学位论文。
- 4、标准规范
 序号 标准代号. 标准顺序号-发布年份. 标准名称
- 5、论文集
 序号 作者. 文章题目. 见(英文用 In); 编者. 论文集名. 出版地: 出版者, 出版年. 起始页~终止页
- 6、法令条例
 序号 名称. 生效日期
- 7、专利文献
 序号 专利申请者. 专利名称. 专利国别, 专利文献种类, 专利号. 出版日期
- 8、报纸
 序号 作者. 文章题目. 报纸名. 年一月一日(版次)
- 9、音像出版物
 序号 题名. 见: 音像出版物名. 出版地. 出版者, 出版年
- 10、其他
 10.1 引用日文文献中的汉字不用中文汉字代替。
 10.2 引用西文文献格式与上述有出入时, 请作相应修改。
 10.3 引用源自非正式出版物的文献, 不应列入参考文献表, 宜在正文中以脚注的形式说明出处。
 10.4 请注意著录格式中标点符号的使用。