

文章编号: 0253-4339(2011)06-0053-06

DOI编码: 10.3969/j.issn.0253-4339.2011.06.053

制冷剂替代技术研究进展及发展趋势

李连生

(合肥通用机械研究院压缩机技术国家重点实验室 合肥 230031)

摘要 蒙特利尔议定书第19次缔约方会议通过了加速淘汰HCFCs制冷剂的调整案, 给我国制冷行业带来了较大压力。根据联合国环境规划署“气候友好制冷剂之路”国际会议信息, 介绍了制冷剂替代技术的国内外研究现状。欧盟正积极推进天然制冷剂的应用, 美国杜邦公司等正在开发和宣传化学合成制冷剂的优越性, 而非非洲、东南亚等发展中国家更关注制冷剂替代技术和替代资金的来源。我国在HCFCs替代方面, 除了研究适合国情的R32等过渡制冷剂替代技术之外, 还应该进一步研究CO₂、R290等天然制冷剂的应用技术, 同时开发GWP值较小但与HCFCs类制冷剂的物性更加接近的制冷剂。另外, 这里还强调了HCFCs替代技术涉及到的相关标准的制订是行业发展的基础, 应该受到特别关注。

关键词 工程热物理; 制冷剂替代; 进展; 发展趋势

中图分类号: TB61⁺2

文献标识码: A

Research Progress on Alternative Refrigerants and Their Development Trend

Li Liansheng

(State Key Laboratory for Compressor Technology, Hefei General Machinery Research Institute, Hefei, 230031, China)

Abstract The new agreement about “accelerate the phase-out of production and consumption of hydro-chlorofluorocarbons (HCFCs)” on the 19th meeting of the Parties to the Montreal Protocol put much more pressure on Chinese refrigeration industry. On the basis of message gotten from the conferences organized by UNIDO in Vienna in 2008 and UNEP in Cairo in 2010, the author summarized the research progress in the HCFCs replacement in recent years in the world. EU have been developing natural refrigerants, such corporations as Dupont are researching and propagating the good performances of HFO-1234yf, DR-2, etc., while the countries in Africa and south-east Asia put more attention to where to get the refrigerant replacement technology and the fund. As for China, besides R32 being considered as a interim refrigerant suitable for China's actual conditions, more works should be done on the development of such natural refrigerants as CO₂, R290 as well as the alternative refrigerants with low GWP and thermodynamic properties similar to HCFCs. In addition, special attention should be paid to the standards for the replacement of HCFCs, which is the motivation for the development of refrigeration industry.

Keywords Engineering thermophysics; Alternative refrigerants; Progress; Development trend

制冷技术作为二十世纪对人类社会产生重大影响的技术成就之一, 在人们的日常生活、工业领域技术进步及国防建设中起着越来越重要的作用。

制冷剂的发展推动着制冷技术的进步。上世纪30年代以来氟利昂制冷剂的问世, 使制冷装置在小型化、高效率、高可靠性以及品种规格、用途多样化等方面得到了前所未有的发展。然而, 氟利昂制冷剂对臭氧层的破坏作用及温室效应又使得人们不得不寻找替代此类制冷剂的新工质。为保护地球环境, 国际社会达成了许多共识, 如1985年制定的

保护臭氧层的《维也纳公约》、1987年制定的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》和1997年通过受限温室气体的《京都议定书》。2007年9月, 蒙特利尔议定书第19次缔约方会议又通过了加速淘汰HCFCs的调整案, 规定发展中国家HCFCs制冷剂完全淘汰的时间提前至2030年, 对HCFCs消费和生产冻结的时间提前至2013年, 而且在2015年前完成消减基线水平10%的任务。履行议定书的承诺, 发展中国家面临着资金、法规与技术的巨大压力, 我国制冷行业也面临着巨大挑战。

另一方面, 至今为止国际社会尚未形成清晰

的适应全球制冷剂替代的技术路线及各地区均可操作的技术方案,地区发展的差别十分明显。但无论如何,我国已成为全球制冷产品生产基地。在这种背景下,必须关注制冷剂替代技术的国际发展趋势,及时研讨我国的制冷剂替代技术路线,开发适应于我国国情又能在国际竞争中处于优势的替代制冷剂及相关技术,履行我国政府向国际社会的承诺,促进我国制冷学科和行业的可持续发展。

根据2008年2月18日至20日联合国工业发展组织在奥地利首都维也纳召开的“发展中国家淘汰HCFCs技术研讨会”(Seminar on Alternative Substances and Technologies to Phase Out HCFCs in A5 Countries and Countries with Economies in Transition),以及联合国环境规划署和美国采暖、制冷与空调工程师协会(ASHRAE)于2010年9月30日至10月1日在埃及首都开罗共同举办的“气候友好制冷机之路国际会议”(International Conference “Road to Climate Friendly Chillers”)上交流的信息,总结了国内外制冷剂替代技术研究现状和发展趋势,希望对于我国的制冷剂替代工作提供一些借鉴和参考。

1 制冷剂替代相关技术研究现状

1.1 自然工质

1.1.1 CO₂(R744)

自然工质大体上可分为两类:一类是HCs类物质,如丙烷、丁烷和异丁烷等;另一类是各种天然无机物,如NH₃、水、空气和CO₂等。其中CO₂制冷技术是全球范围内制冷剂替代技术研究的热点之一。

压缩机是制冷系统的关键部件。与使用普通制冷剂的压缩机相比,CO₂跨临界循环压缩机具有工作压力高、压差大、压比小、体积小、重量轻、运动部件间隙难以控制、润滑较困难等特点。因此CO₂压缩机的研究开发一直是制冷技术发展的难点。目前,世界上许多知名公司都相继开发了不同形式的CO₂压缩机,其中部分产品已经市场化和系列化,用于热泵热水器、大型超市陈列柜等。

德国的Jurgen Sub和Horst Kruse对CO₂活塞式压缩机的指示效率进行了理论分析和实验研究^[1],实验结果表明,阀室的压力损失和气缸壁的传热损失对指示效率的影响很小,但气缸的泄漏损失对指示效率的影响很大。美国普渡大学的Hubacher和Groll教授开发了制冷量为2.8kW的全封闭双级转子式CO₂压缩机^[2],压比为1.5~5时,压缩机的容积效率为0.9~0.78,等熵效率为0.7,但在压比大于2时,

等熵效率下降明显。美国马里兰大学Radermacher和日本静冈大学Fukuta合作进行了滑片式压缩机应用于CO₂跨临界制冷循环的研究^[3]。结果表明滑片压缩机可作为单级压缩机、双级压缩机和压缩膨胀机应用于CO₂跨临界循环中,泄漏损失是影响效率的主要因素,若把CO₂压缩机的间隙量减小到R134a压缩机间隙量的三分之二(约15μm),可获得相同的容积效率。

近几年来,我国在CO₂制冷技术研究方面也取得了较大进步,开发了CO₂制冷压缩机样机,进行了性能模拟和实验研究^[4],研究了CO₂膨胀机^[5-6]和CO₂制冷系统喷射器^[7],取得了阶段性研究成果。

1.1.2 氨(R717)

氨(NH₃)是近几年来制冷剂替代技术发展的另一个热点,但氨的燃烧性、爆炸性和毒性是影响它在民用空调领域应用的最主要原因,解决易燃、易爆和毒性等问题,是氨制冷技术推广应用的关键。

氨制冷剂在NH₃/CO₂复叠式制冷系统、NH₃-CO₂载冷系统、氨冷水机组中已有应用,近年来在欧洲的技术开发与推广发展比较快。NH₃/CO₂复叠式制冷系统节能效果显著^[8],满负荷工况下与氨单级制冷系统相比,单位冷吨的耗电减少25%,与氨双级制冷系统相比则减少7%。NH₃-CO₂载冷系统有效减少了氨的充注量,降低了危险性。氨制冷系统安全性方面的研究进展也促进了氨冷水机组的应用。

氨制冷系统的技术发展将集中在寻找与氨互溶的润滑油、开发半封闭式结构压缩机、换热器小型化以及安全性和可靠性等方面。

1.1.3 水(R718)

Kilicarslan和Muller对水与其它一些常用制冷剂(R134a、R290、R22等)在系统COP、运行成本、制冷量以及对环境的影响等方面进行了比较^[9],主要结果包括:在系统其它参数相同,蒸发温度达20℃以上、冷凝温度和蒸发温度之差为5K时,水作为制冷剂的压缩系统的COP值最高。

Wight等人研究了离心式水蒸气压缩机^[10],研究结果表明:对于单级离心压缩机,当有-30°后倾角和叶片扩压器、转速为5491r/min时,设计点效率最高;对于两级压缩机,则针对压比相同、比速度相同、功率相同等三种不同的压比分配方式进行了研究。Brandon等人对容量为3250kW的水蒸汽压缩冷水机组进行了可行性研究^[11],结果显示,水蒸汽压缩系统的COP值与R134a相当,但等熵压缩

终了温度远远高于R134a。水蒸汽压缩系统对于压缩机入口处的过热度比较敏感,因此常采用适合大容积流量的离心压缩机或轴流压缩机。同时,由于离心压缩机单级压比很小,因此采用多级压缩中间冷却的结构。闪蒸中间冷却方式,可以大幅度降低压缩机级间蒸汽温度,相比于没有中间冷却的结构,COP值有很大提高。

1.1.4 碳氢化合物(HC)

碳氢化合物(R290, R600, R600a及其混合物)目前在冷冻箱和家用电冰箱上有着广泛的应用。德国的冷藏箱和冷冻箱几乎都采用碳氢化合物,我国的家用电冰箱也已经大部分采用R600a。

Eric Granryd和Pelletier O研究了碳氢化合物的传热特性^[12],通过对丙烷(R290)在家用热泵空调器中的传热特性研究分析,认为制冷剂侧的压力降低于R22的大约40%~50%。因此,可通过优化设计换热器结构,获得最佳的压力降与传热系数。

Sariibrahimoglu K等人^[13]对异丁烷(R600a)封闭式制冷压缩机中轴承的(烧结铁/100Cr6摩擦副)摩擦性能进行了研究,润滑油采用矿物油的结果表明:由于R600a对润滑油的黏度和泡沫特性存在影响,阻碍了摩擦副烧结铁表面氧化层的形成,因此,轴承摩擦将增大。

近两年来,德国联邦政府自然环境保护与核安全部(Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety)实施了一项资助计划,在我国珠海格力电器有限公司建一条年产180000台的R290房间空调器示范线,旨在用R290替代R22。采用R290的房间空调器的主要优势包括:1)COP在3.52~3.55之间,优于欧洲空调能效A级标准;2)由于冷凝器和蒸发器使用管径更小的换热管及价格较低天然制冷剂,与R22、R407C和R410A相比,其制造成本更低;3)通过改进设计,R290制冷剂的充注量低于当前国际标准规定的充注量。而且,特有的压缩机制冷剂泄漏报警系统也使其安全性增强,并通过了符合欧盟标准的CE认证。4)R290压缩机采用特殊润滑油以及更理想的排气结构,提高了效率,COP高达3.4,成本与R410A压缩机相同。

1.2 过渡工质或其它工质

1.2.1 DR-2

美国杜邦公司(Dupont)开发了一种代号为DR-2的卤代烃制冷剂,它的ODP为0,GWP为9.4,热物性与化学性质较稳定,可与常用的润滑

油和塑料兼容并存,用于替代中央空调系统中的R123(ODP为0.02,GWP为77)。与R123制冷系统相比,DR-2的蒸发温度与冷凝温度分别为4.4℃和37.8℃时,蒸发压力下降23.1%,冷凝压力下降17.5%,压缩机的等熵效率为0.70。杜邦公司对DR-2与R123的对比实验表明,在相同的制冷能力与工作效率下,DR-2离心压缩机的叶轮外缘速度降低了1.4%,叶轮转速下降了13%,压缩机入口音速下降了4%,但叶轮直径增大13.3%。这表明DR-2具有替代R123的潜力。

1.2.2 HFO-1234yf

杜邦公司联合霍尼韦尔(Honeywell)公司开发了适用于汽车空调的替代制冷剂HFO-1234yf,它的ODP为0,GWP为4,毒性小,具有一定的可燃性(但可控),其热力性能与R134a相近。2007年以来,美国汽车工程师协会(SAE)组织对HFO-1234yf的安全性和综合性能进行了评估,发现HFO-1234yf斜盘压缩机的磨损与R134a系统基本相同,SAE认为是将来汽车空调的替代制冷剂之一。此外,HFO-1234yf也在欧洲通过了装车实验。目前,该公司正在研究HFO-1234yf应用在家用空调和冷水机组的可行性,从离心机组的分析结果来看,相比R134a,叶轮速度低18%,叶轮直径增大10%,压缩机耗功增加4%,体积流量增加8%。

1.2.3 R32

替代技术、替代成本以及替代资金来源,成为困惑发展中国家制冷剂替代技术发展的主要因素。寻找过渡制冷剂,开发GWP值低于HCFCs类但替代成本适中的制冷剂,或许是国际社会尤其是发展中国家未来一段时间的替代技术发展路线。

R32的GWP为675,ODP值为0,相对于R22(GWP为1810,ODP为0.055)与R410A(GWP为1810,ODP为0)来说,对环境的影响已有大幅降低,有可能成为我国制冷剂替代技术发展的过渡方案之一。

清华大学、浙江大学、合肥通用机械研究院等进行了R32制冷压缩机及其系统的理论与实验研究。史琳等对家用/商用空调中R32替代R22的可行性进行了分析^[14],认为R32的热工性能比R410A的要好,能效(COP)约高5.3%,冷量高12.7%,排气压力高 0.4×10^5 Pa,但排气温度高24℃。R32的沸腾换热系数比R22高一倍,但比R410A高不足一倍。从热工性能分析和实验结果来看,R32在制冷系统中的应用尚需解决如下技术问题:制热工况下

高排气温度, 专用压缩机开发、整机优化、微燃风险评估和模拟实验等。

2 我国发展CFC替代制冷剂的经验及HCFC替代技术的国内外进展比较

我国正在成为国际上制冷产品的生产基地和制冷技术的研发基地, 但目前制冷领域的核心技术大都为国外知名企业所拥有, 我国掌握的自主知识产权较少, 与发展制冷大国的地位极不相符。

在CFC制冷剂替代技术研究方面, 我国积累了许多成功的经验。例如, 在小型冷冻冷藏领域, 20年前我国一些单位准确地预测到家用冰箱须发展R600a技术, 在大型制冷装置中开发R134a技术的前瞻性和未来的市场潜力, 重点开发了R600a冰箱压缩机技术和R134a的工业合成技术, 并实现了大批量工业化生产。目前, 加西贝拉生产的R600a冰箱压缩机获大量出口, 204所开发的R134a制冷剂不仅满足了国内市场的需要, 而且出口到美国等海外市场。

在HCFCs制冷剂替代技术研究方面, 我国与国外先进水平相比存在较大差距。比如, 在CO₂制冷压缩机及其系统的研究领域, 日本在跨临界CO₂家用热泵热水器, 欧洲在跨临界CO₂汽车空调系统和复叠式低温装置的研究与应用方面处于国际领先水平, 已实现规模化生产。而我国近几年在CO₂制冷技术方面的研究成果大多处于实验室阶段, 尚无产业化。而且, 我国CO₂家用热泵热水器的研究开发仍未摆脱模仿国外先进技术的传统路线, 发展潜力和压力都很大。

3 国际组织的制冷剂替代示范工程

世界银行高级环境顾问Viraj Vithoontien^[15]总结了联合国双边基金和/或全球环境基金早期在泰国、墨西哥与土耳其资助完成的大型制冷机采用非CFC制冷剂的示范工程情况。加速替代CFC制冷剂, 寻找具有明显能效潜力的非CFC制冷机, 用户更具能效意识等是项目实施的主要目标。项目在替代技术实施的障碍与消除、提供或筹措资金的形式与程序、测量和证实省电的规程、项目是否适合每个国家的特别要求和制冷机市场的背景等方面都有经验和教训。印度、菲律宾、约旦及印度尼西亚的制冷机替代项目是一个旗帜性的项目, 它溶合了联合国双边基金、全球环境基金和清洁发展基金, 使用臭氧保护窗口来调节用于气候保护的基金, 用周转资金的新概念并利用这些基金去激励发展能效产

品。印度的制冷机能效项目的经验教训包括: 固有的障碍依然存在, 如能效投资边缘化, 缺乏节能的意识, 对节能要求打折扣, 不情愿地选择规定条款, 对替代制冷剂的不间断讨论和争论等。但是, 项目的实施给印度公共部门介入国际清洁发展机构创造了机会, 对印度的能效发展框架进行了补充, 而且能效标识计划、所选择部分的强制审计等则具开创性。

自然工质制冷技术的开发与应用, 一直是欧洲发达国家制冷剂替代技术发展的重点。为了推动世界上落后地区相关技术的发展, 德国联邦政府自然环境保护与核安全部在南非和毛里求斯资助了两个自然工质制冷系统应用的示范工程, 由德国技术合作公司(GTZ-Proklima)负责具体的技术实施。南非的示范工程是在气候不同的两个地区分别对一家超市的空调与冷冻冷藏系统进行改造。新的空调与冷冻冷藏系统采用NH₃-CO₂复叠式制冷循环, 其中氨制冷循环还为超市提供空调系统所需冷量。两家超市改造后的制冷系统与原系统相比, 能耗分别降低26%和19%, 每年节约用电132000kWh和173000kWh。在毛里求斯的示范工程则对政府大楼的中央空调系统进行了改造, 原系统采用R12离心压缩机, 新系统采用开式螺杆压缩机与氨制冷剂, 改造后的系统具有节能、环境友好等优点。

联合国开发计划署蒙特利尔议定书与化学品部门的首席执行官Suely Carvalho博士针对联合国在巴西的制冷机替代示范项目的实施情况指出^[16], 在制冷机替代方面应区分私人 and 公共因素的不同, 项目选择标准应适合制冷机替代, 臭氧和气候友好技术的选择需要认真地反复思考。这也说明了目前情况下全球范围内制冷剂替代技术的选择、发展与推广依然面临着许多困难。

4 制冷剂替代技术发展趋势

从制冷剂替代技术发展的现状来看, 国际社会还没有形成一致且清晰的适应全球制冷剂替代的技术路线以及各地区均可操作的技术方案, 替代制冷剂选择与技术开发交织在一起, 相互矛盾又相互促进。但国际社会对制冷剂替代技术发展的一些思路, 对于我国履行蒙特利尔议定书承诺, 制定适应我国国情的制冷剂替代技术路线, 是有重要参考价值的。

蒙特利尔议定书技术与经济评估组合作主席Stephen O. Andersen博士对一些制冷剂的应用做了评价^[17]。

1) 碳氢化合物和氨制冷剂。只有少数工业制冷机制造商在使用, 这种制冷剂容易获得, 价格有竞争性。绝大部分碳氢或氨制冷机组的运行效率都较低, 碳氢的毒性较小, 但氨的毒性比较大, 在京都议定书中没有限制碳氢和氨的排放, 它们的生产及销售也不受蒙特利尔议定书控制, 但在建筑设计规范和它的安全法规中常常限制它们的使用。

2) R134a。R134a是大部分制冷机生产企业选择的制冷剂, 而且生产这种制冷剂的公司也很多。R134a制冷系统能效高, 但低于R123。京都议定书中限制R134a的排放, 但易受总量管制和交易价格影响, 蒙特利尔议定书考虑进行逐渐减少的控制策略。欧盟汽车空调器协会在2017年之后将禁止R134a的使用, 但不确定欧盟在其它方面的行动。美国加利福尼亚等十余个州将制订有关限制R134a使用的法规。

3) R123。R123是全球最大的制冷机制造商选择的制冷剂之一。R123具有毒性小、不易燃等特点, 且能效最高, 由少数工厂生产。京都议定书不控制R123的排放, 但蒙特利尔议定书考虑限制它的生产和消耗, 在欧盟已禁止它的使用。

4) HFO-1234yf。HFO-1234yf的GWP为4, 而HC类制冷剂的GWP小于或等5, 二者相当。霍尼韦尔公司声称该制冷剂取得宽范围的应用专利, 但还没有任何制冷机制造商选择该制冷剂。京都议定书很可能限制HFC类制冷剂的排放, 但HFO-1234yf的超低GWP值将避免法规方面的影响。HFO-1234yf的毒性很小, 而且几乎不易燃, 但与R123、R134a制冷系统相比, 它的能效较低。

此外, Andersen博士表示, 到目前为止, 比较清晰的及可持续发展的技术选择包括: 冰箱、冰柜等小型制冷设备及小型空调器上的碳氢类制冷剂; 汽车空调器和大部分现在使用R134a的制冷系统上的HFO-1234yf; 建筑空调制冷系统上的R123; 碳氢、水和CO₂用于大部分发泡装置等。

5 结论

总的来说, 欧盟特别是欧洲工业国家正积极推进自然工质的应用研究与推广, 以美国杜邦公司为代表的制冷剂制造商在不断开发和宣传化学合成制冷剂的优越性, 而发展中国家尤其是非洲国家、东南亚国家等更关注替代技术和替代资金的来源。

在HCFCs替代技术方面, 除了研究适合我国国情的替代制冷剂过渡方案如R32外, 作为制冷大国及产品出口量的增加, 还应该进一步研究CO₂、

R290等天然制冷剂的应用技术, 并开发GWP值较小但与HCFCs类的物性更加接近的制冷剂。更高能效、更加环境友好将贯穿于制冷剂替代技术发展的全过程, 二者缺一不可。

另外, HCFCs替代技术涉及到的相关标准的制订是行业发展的基础, 应该受到特别关注。我国与美国、欧洲等相关组织正在共同制订CO₂制冷压缩机性能测试方法等标准, 将推动我国CO₂制冷技术的发展。

参考文献

- [1] Jurgen Sub, Horst Kruse. Efficiency of the indicated process of CO₂-compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21 (3): 194-201.
- [2] Hubacher B, Groll E A. Measurement of performance of carbon dioxide compressors [R/OL]. <http://www.arti-21cr.org/research/completed/>.
- [3] Mitsuhiro Fukuta, Radermacher R. Performance of a vane compressor for CO₂ cycle [C]// 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue University, USA, 2000: 339-346.
- [4] 杨军, 陆平, 张利, 等. 新型全封闭旋转式CO₂压缩机的开发及性能测试[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42 (3): 426-529. (Yang Jun, Lu Ping, Zhang Li, et al. Development and Performance Measurements of a New Hermetic Rotary CO₂ Compressor. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42 (3): 426-529.)
- [5] 李敏霞, 马一太, 安青松, 等. CO₂跨临界循环水源热泵的封闭式摆动转子膨胀机[J]. 机械工程学报, 2008, 44 (05): 160-164. (Li Minxia, Ma Yitai, An Qingsong, et al. Hermetic Swing Expander in Transcritical Carbon Dioxide Cycle Water Source Heat Pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44 (05): 160-164.)
- [6] 杨炳春, 郭蓓, 彭学院, 等. CO₂滑片膨胀机热力过程的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42 (3): 313-317. (Yang Bingchun, Guo Bei, Peng Xueyuan, et al. Experimental Research on Internal Working Process of Rotary Vane Expander in CO₂ Refrigeration System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (3): 313-317.)
- [7] 徐肖肖, 陈光明, 唐黎明, 等. 带喷射器的跨临界CO₂热泵热水器系统的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43 (11): 51-55. (Xu Xiaoxiao, Chen Guangming, Tang Liming, et al. Experiment on Performance of Transcritical CO₂ Heat Pump Water Heater System with Ejector[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43 (11): 51-55.)
- [8] 杨一凡. 氨制冷技术的应用现状及发展趋势[J]. 制冷学报, 2007, 28 (4): 12-19. (Yang Yifan. Application and

- Development of Ammonia Refrigeration Technology[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(4): 12-19.)
- [9] Ali Kilicarslan, Norbet Muller. A comparative study of water as a refrigerant with some current refrigerants [J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(11): 947-959.
- [10] Wight S E, Yoshinaka T, LeDrew B A, et al. The efficiency limits of water vapor compressors [R]. Report for Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute, 2000.
- [11] Brandon F, Lacher Jr, Gregory F, et al. The commercial feasibility of the use of water vapor as a refrigerant [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(4): 699-708.
- [12] Granryd, E. Hydrocarbons as refrigerants—an overview [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(1): 15-24.
- [13] Sariibrahimoglu K, Kizil H, Aksit M, et al. Effect of R600a on tribological behavior of sintered steel under starved lubrication[J]. Tribology International, 2009, 43(5-6): 1054-1058.
- [14] 史琳, 朱明善. 家用/商用空调用R32替代R22的再分析 [J]. 制冷学报, 2010, 31(1): 1-5. (Shi Lin, Zhu Mingshan. Re-analysis on Using R32 to Substitute for R22 in Household/commercial Air-conditioning[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1): 1-5.)
- [15] Viraj Vithoontien. Turning Challenges into Achievements to Green the Chiller Sector in Article 5 Countries [C]// Proceedings of UNEP / ASHRAE-RAL Joint Conference, Cairo, Egypt, 2010.
- [16] Suely Carvalho. UNDP Global Work in the Chillers Sector [C]// Proceedings of UNEP / ASHRAE-RAL Joint Conference, Cairo, Egypt, 2010.
- [17] Stephen O. Andersen. Global Outlook Of the Chiller Sector [C]// Proceedings of UNEP / ASHRAE-RAL Joint Conference, Cairo, Egypt, 2010.

作者简介

李连生, 男(1962-), 教授, 合肥市长江西路888号合肥通用机械研究院压缩机技术国家重点实验室, 230031, (0551)5335434, E-mail: lianshengli@126.com。研究方向: 压缩机工作过程, 制冷系统节能技术, 能量回收理论与应用。现在进行的研究项目有: 973项目子课题——压缩机工作过程数值仿真与节能关键技术研究等。

About the author

Li Liansheng (1962-), male, Ph. D./Professor, State Key Laboratory for Compressor Technology, Hefei General Machinery Research Institute, 888#, Changjiang West Road, Hefei, China, 230031, (0551)5335434, E-mail: lianshengli@126.com. Research fields: working process of compressor, energy saving technology of refrigerating system, theory of power recovery and its application. The author take on project supported by the 973 Plan: Numerical analysis of working process of compressor and energy saving key technology.