

家用冰箱节能研究新进展 (上)

——制冷系统部件节能的研究

西安交通大学 孟祥兆 罗昔联 张艳 王从飞 俞炳丰

随着家用电器的普及,家用电器的节能问题越来越受到关注。在欧洲,家用制冷设备消耗了欧洲总发电量的4%^[1]。由于家用冰箱日益普及,产品也向大容量、多间室和方便使用的方向发展,将来冰箱能耗占家庭总能耗的比例(美国为13%)会越来越高。这表明,21世纪的能源危机中,冰箱是否节能对于能源安全具有重要的意义。

冰箱在生产、使用和最后的报废过程均对环境产生污染。近几年,人们进一步认识到,冰箱在长期使用过程中耗电的间接影响是最大的。由于耗电产生的间接有害物占生产、使用、报废全过程中所产生的有害物的90%左右,因此冰箱的节能不仅对经济而且对环境保护也有深远的意义。提高冰箱能效比,已经受到世界各国政府和冰箱生产企业的普遍重视。为了鼓励企业和用户生产、购买节能冰箱,世界各国采取了一系列措施。据统计,到2001年,已经有37个国家和地区实施了能源效率新标准,如欧洲的节能计划(SAVE Programme)、美国能源部(DOE)、环保署(EPA)和工业界共同发起的能源之星(Energy Star)计划等。这些标准的实施有效地推动了冰箱节能的进程。

1. 箱体保温层的研究和改进^[2]

对于家用冰箱,箱体的漏热和压缩机运行能耗对整机的能耗高低,起着决定性作用。因此研究者在不断改进压缩机性能,提高压缩机效率的同时,对提高冰箱箱体的隔热性能也做了不懈的努力。到目前为

止,PU发泡材料仍然被视为最流行的隔热材料之一(导热系数约为 $21\text{mW/m}\cdot\text{K}$),广泛应用于冰箱、冷柜、展示柜和其它商用制冷设备中。然而,由于用于PU发泡剂中的HCFC-141b将被限制使用并将最终被淘汰,因此必须研究其他合适的隔热材料。基于环保和节能的考虑,先进的真空绝热板不仅符合未来环保的要求,也具备了良好的隔热性能(导热系数约为 $6\text{mW/m}\cdot\text{K}$)。Yen-Ming Chang等^[2]测试了两台冰箱样机,均为上冷冻室双门结构,总有效容积为480升,并具有“四星级”(-24°C)冰箱的冷冻能力。其中一台冷冻室箱体隔热层的58%采用真空绝热板,冷藏室箱体的21%采用真空绝热板,其他隔热结构采用PU发泡材料填充;另一台冰箱样机箱体保温层全部采用PU发泡材料。实验测量表明,各间室的总体换热系数对于箱体和环境之间的温差不敏感,而在相同的环境下,使用真空绝热板的箱体比PU发泡材料具有更好的隔热性能。在不同的箱体内外温差下,箱体的漏热系数没有明显的变化,而随着温差的增大,总体换热系数



也逐渐增大。同时对比两台冰箱样机的测量结果可以明显看出,采用真空绝热板的冰箱的漏热系数比使用传统的PU发泡材料的冰箱降低了10%,如果不考虑冷冻室冷藏室之间的温度梯度,采用真空绝热板的冰箱的热负荷也降低了10%。在较大温差下,两台冰箱冷冻室和冷藏室的总体换热系数相差不大。当冷冻室温度达到 -18°C 同时冷藏室温度达到 3°C 时,采用PU发泡材料的冰箱样机的热负荷为78W,使用真空绝热板的冰箱样机热负荷为72W。这说明采用真空绝热板可以降低热负荷。同时采用红外温度成像仪测得冰箱样机表面的温度分布表明,采用PU发泡材料的冰箱样机表面与环境之间的温差大于采用真空绝热板的冰箱样机。因此采用真空绝热板的冰箱具有较小的漏热系数和更好的隔热性能。冰箱的运行试验结果还表明,采用真空绝热板的冰箱样机的开停周期较长,然而其功率比采用PU发泡材料的冰箱高出4.2%,但是其压缩机开机时间较短,因此在长期运行时采用真空绝热板的冰箱总体能耗较低。

2. 采用新型制冷剂的换热器设计

由于CFC类制冷剂替代日期日益临近,各国学者和生产商对于替代制冷剂做了大量的研究,目前碳氢化合物及其混合物在冰箱中的应用取得了突破性进展。在20世纪90年代初期,德国和瑞典的制造商将采用HC-600a或HC-290/HC600a混合物作为制冷剂的家用冰箱推向市场,与采用HCFC制冷剂的冰箱相比,这些冰箱具有高可靠性和低能耗的特点。使用适当比例的HC-290/HC600a混合物作为制冷剂有可能降低压缩机的能耗,然而由于组分在冷凝和蒸发过程中的热力学性能与单一制冷剂不同,因此需要对混合物的传热条件以及换热器的结构和表面进行研究。在建立使用HC混合物的冷凝器数学模型之前,必须得到单一HC制冷剂的热力学性能。为了得到HC混合物的热力学性能,必须选择合适的管内两相流冷凝过程的模型来模拟实际的流动,也需要对许多与流动结

构有关的参数,如混合物的组分和比例,混合物每一相的粘性和密度,液相的表面张力,管路的几何参数,压力等进行分析。并且要分析传热条件,例如混合物与管路内壁面的温差,每一相的流动方向,液相的换热系数,冷凝液体的流动方式和热通量等。所有这些参数都随着管路长度的不同而变化。

实验结果表明,在假设的参数条件下,采用均相模型计算双组分HC混合物冷凝换热可以得到很好的结果。对于40%~60%R290和R600a的混合物,在3.3mm直径的管内冷凝时,当质量流量为 $0.0035\text{kg/s}\sim 0.005\text{kg/s}$ 时,采用Akers-Adams和Cavallini-Zecchin关联式效果最好,误差在 $-1\%\sim +9\%$ 之间;当质量流量为 $0.0075\text{kg/s}\sim 0.009\text{kg/s}$ 时,采用Shah关联式效果最好,误差在 $+2\%\sim +12\%$ 之间。这些结论为采用HC制冷剂及其混合物的冰箱冷凝器的设计提供了依据。

3. 新型节流装置的采用

1999年Clodic发明了使用微型透平机节流的制冷系统。制冷剂膨胀产生的机械功可以驱动一个或者多个换热器的风扇。

文献[3]测量了一台290升的家用风冷式冰箱,采用透平膨胀机代替毛细管。测试结果表明,在假设膨胀机效率为80%的条件下,由于采用透平膨胀机,COP提高了1.1%并产生了1.12W的机械功。同时发现,过冷度的增大在提高了制冷量的同时减少了透平膨胀机产生的机械功,因此要求透平膨胀机产生的机械功可以保证风扇产生足够的强制对流能力。为了提高透平膨胀机产生的机械功,最好的途径就是降低过冷度。图1给出了透平膨胀机产生的机械功和制冷量随过冷度变化的曲线。过冷度的提高可以提高产生的机械功但是降低了制冷量,也因此降低了系统的COP。在这种情况下,系统的节能来源于用机械功代替了电能来驱动风扇。

图2给出了不同过冷度下能耗计算结果与参照系统能耗的对比。其中模拟结果1为相对于参照过冷度(26.7K)节能10%。模拟计算2、3和4分别将过冷度降低为23.7、20.7和19.7K,分别节能9%、8.5%和8%。模拟计算4种透平膨胀机产生了1.8W的机械功但是系统的COP降低了0.5%。因此说明,当采用透平膨胀机产生的机械功驱动风扇时,在循环COP降低的同时节能也是可能的。

参考文献

- [1] Assaad Zoughaib, Denis Clodic. A Turbo Expander Development for Domestic Refrigeration Appliances. International Congress of Refrigeration 2003, Washington, DC
- [2] Yen-Ming Chang, Wen-Ruey Chang, Mei-Chu Perng, Eh-Dih Huang. Thermal Insulation performance of Refrigerator/Freezer Cabinets with Vacuum Insulation Panels Compared to PU Foaming Material. International Congress of Refrigeration 2003, Washington, DC
- [3] Stefan Reszewski. Propane-N-Butane Mixture Condensation Process in a Heat Exchanger's Internal Surface of a Household Refrigerator. International Congress of Refrigeration 2003, Washington, DC

