[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.06.002

空气源热泵热水器中R22替代工质的研究

何　俊，陶乐仁，袁朝阳，虞中旸

（上海理工大学 制冷与低温工程研究所，上海　200093）

摘　要：为了研究不同工作条件下R22替代工质在空气源热泵热水器中所展现的不同系统性能，课题组利用单级压缩制热循环系统对其替代工质做了理论分析，经计算得出R134a和R407C的性能较为优异，但是考虑到2者具有较高的全球变暖潜能值，并不适合作为长期使用的工质，而R32与其他制冷剂相比，除却排气温度稍高的问题以外，其综合性能最佳。随着市场上有效降低压缩机排气温度的技术逐渐成熟，在空气源热泵热水器中，R32作为R22的替代制冷剂将具有很好的应用前景。

关　键　词：空气源热泵热水器；R22制冷剂；替代工质；排气温度

中图分类号：TK124　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-2895(2017)06-0007-04

Study for Substitutions of R22 in Air Source Heat Pump Water Heater

HE Jun, TAO Leren, YUAN Chaoyang, YU Zhongyang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to different system performance under different working conditions of R22′s alternative refrigerant in air source heat pump water heater, the theoretical analysis using single stage compression heat pump system, the results showed that the performance of R134a and R407C were more excellent. But considering the higher global warming potential, they were not suitable for long-term use as a refrigerant. In addition to the problem of slightly higher exhaust temperature, the overall performance of R32 was the best. With the development of the technology to effectively reduce the exhaust temperature of the compressor in the market, in the air source heat pump water heater, R32 refrigerant has a better application prospect than R22 refrigerant.

Keywords: air source heat pump water heater; R22 refrigerant; substitution working medium; exhaust temperature

目前国内热水器的应用主要以燃气热水器、电热水器、太阳能热水器为主。其中燃气热水器消耗的是高品位能源，加热过程中放出废热、废气，既不环保也不节能。电热水器同样消耗高品位能源，且加热过程存在漏电等安全隐患[1]。太阳能热水器受天气的影响，而空气源热泵热水器的供热原理与太阳能热水器截然不同，它可以将低品位能量加以利用，且不受气象条件限制，节能高效地提供人们生活所需的热水。随着社会的发展，空气源热泵热水器将具有更加广阔的发展空间[2]。

在空气源热泵的使用过程中，不可避免地会遇到制冷剂选择的问题。目前普遍应用的R22因其对环境的破坏作用即将遭到淘汰，其替代品主要有R32、R134a、R410A、R407C及R417A等[3-5]。因此，为了使空气源热泵热水器兼具节能与环保，制冷剂的选择对系统运行稳定性及运行性能起着至关重要的作用。

课题组通过R22与R32、R134a、R410A、R407C这几种制冷剂在不同工况下各自蒸发压力、冷凝压力、排气温度、制热性能系数等热力性能的对比，选择出适合空气源热泵热水器的R22替代制冷剂，为之后的深入研究提供了一定的帮助。

1　理论循环计算工况

文中主要从2个方面对各制冷剂的热力循环进行理论计算：①一定工况下，各制冷剂的热力循环计算，

收稿日期：2016-08-11；**修回日期**：2017-04-17

基金项目：上海动力工程多相流动与传热重点实验室项目(13DZ2260900)。

第一作者简介：何俊(1993)，男，四川绵阳人，硕士研究生，主要研究方向为制冷系统的优化及仿真。E-mail：735353105@qq.com

选用3 个工况作为研究对象。②变工况下,对各制冷剂热力循环性能参数的比较。

1.1 定工况条件

表1 是根据上海当地近年来的气温变化,选用的3 个常用工况。根据国际用水卫生标准,全年的用水温度都设置在55 ℃,各个工况下的环境温度通过模拟来实现。

表1 热力计算工况

Table 1 Thermodynamic conditions ℃

工况	蒸发温度	冷凝温度	吸气过热	冷凝过冷	热水温度	环境温度
1(春秋)	10	60	5	5	55	20
2(夏季)	20	60	5	5	55	35
3(冬季)	-5	60	5	5	55	5

如图1 所示,系统采用单级压缩蒸气制热循环对制冷剂 R22、R32、R134a、R410A 及 R407C 在各工况下进行热力计算。图中 h 为焓,p 为压强。

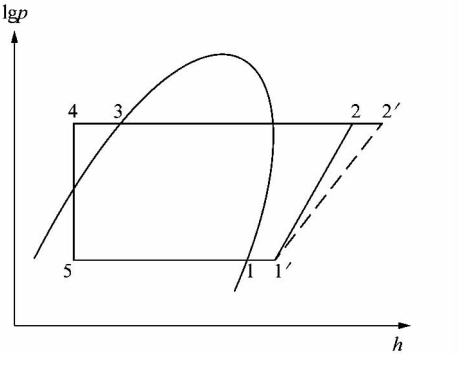

图1 热泵理论制热压焓图

Figure 1 *P-h* diagram of heat pump

理论循环计算比较各制冷剂的单位制热量 Q、制热性能系数 $C_{\mathrm{COP,h}}$,其计算公式如下:

$$Q = h_{2'} - h_4;$$

$$C_{\mathrm{COP,h}} = (h_{2'} - h_4)/(h_2 - h_{1'})。$$

1.2 变工况条件

空气源热泵热水器工质的选取,既要达到环保和热水温度等方面的要求,又要尽量节能,提高系统运行的稳定性。综合分析各制冷剂在变工况条件下的循环性能,可更全面地对工质进行对比选择。在进行变工况的理论计算时,模拟室外环境温度不变,逐渐升高冷凝温度,设定压缩机效率为 0.8,蒸发温度为 8 ℃,过热度和过冷度都为5 ℃。理论循环中的单位体积制冷量 Q_v 可由计算公式(1)得到,其中各点温度、焓值通过 NIST 公司的 Refprop 9.0 物性软件得到。

$$Q_v = \rho_1(h_5 - h_{1'})。$$

式中 ρ_1 为设定蒸发压力下的制冷剂密度,kg/m^3。

2 计算结果分析

2.1 定工况计算结果分析

几种工质在3 种工况下的热力性能比较,分别列于表2 ~4 中。

表2 工况1 各工质热力性能比较

Table 2 Comparison of thermal performance under 1 working condition

制冷剂	p_e/MPa	p_c/MPa	Q_h/kW	$C_{\mathrm{cop,h}}$	T_d/℃
R22	0.68	2.42	183.1	4.48	94.7
R32	1.10	3.93	281.4	4.24	110.1
R134a	0.41	1.68	166.9	4.47	75.4
R410A	1.08	3.83	178.9	4.05	90.9
R407C	0.64	2.52	175.6	4.13	83.8

表3 工况2 各工质热力性能比较

Table 3 Comparison of thermal performance under 2 working condition

制冷剂	p_e/MPa	p_c/MPa	Q_h/kW	$C_{\mathrm{cop,h}}$	T_d/℃
R22	0.91	2.42	176.7	5.68	88.9
R32	1.47	3.93	265.4	5.35	99.1
R134a	0.57	1.68	163.8	5.75	71.9
R410A	1.44	3.83	170.6	5.12	85.6
R407C	0.87	2.52	169.2	5.53	80.3

表4 工况3 各工质热力性能比较

Table 4 Comparison of thermal performance under 3 working condition

制冷剂	p_e/MPa	p_c/MPa	Q_h/kW	$C_{\mathrm{cop,h}}$	T_d/℃
R22	0.42	2.41	194.0	3.37	108.4
R32	0.69	3.93	306.4	3.21	128.7
R134a	0.24	1.68	171.6	3.24	80.0
R410A	0.67	3.38	185.1	3.05	102.1
R407C	0.31	2.52	184.5	3.12	94.8

表2 ~4 中,p_e为蒸发压力,p_c为冷凝压力,Q_h为制冷剂单位制热量,T_d为排气温度。从表2 ~4 中可以看出,在3 种工况下,单位制热量均是 R32 最大,R134a 最小,并且在工况3(冬季)时有最大值 306.4 kW;对于制热性能系数,R410A 总是最小,而最大值对应的制冷剂不一定;对于排气温度,不同工况下总是 R32 最高,R134a 最低。

R22 在3 种工况下的制热性能系数都比较大,但考虑环保性,R22 被替代是不可避免的;R410A 的制热性能系数最低,这将提高系统初期及运行成本;R407C 制冷剂采用脂类润滑油,其制热性能系数稍高于 R410A,低于 R22 和 R134a,冷凝压力与 R22 相当;

R134a 制热性能系数较高,接近 R22,并且其排气温度和冷凝压力最低,保证了压缩机稳定安全的运行,但是其单位制热量最低,为了获取高制热量,需要充注更多的制冷剂,同样提高了成本;R32 的单位制热量最高,制热性能系数也较理想,但是其较高的排气温度会影响压缩机润滑油的稳定,导致机组运行不良。随着制造业的发展,有效降低排气温度方法的研究逐渐受到关注[8-10],使 R32 在保留其显著的优点情况下降低排气温度成为可能。

2.2　变工况计算结果分析

2.2.1　各工质在不同冷凝温度下的制热性能系数

从图 2 可以看出,5 种工质的制热性能系数随着冷凝温度的升高而降低,这是因为冷凝温度的提高导致了压缩机耗功的增加,而制热量变化不大,因此制热性能系数降低。在同样的冷凝温度变化区间,具有较高的制热性能系数显然更加节能。从图中还可以看出,在冷凝温度 45 ~ 70 ℃的范围内,R410A 的制热性能系数最小;R407C 的制热性能系数在冷凝温度低于 65 ℃时最高,并且在 45 ℃时明显优于其他工质;而当冷凝温度高于 65 ℃时,R22 和 R134a 的制热性能系数最大。由此可以看出,在冷凝温度较低时,使用 R407C 较为节能,而当冷凝温度较高时,在制热性能系数方面,使用 R22 和 R134a 较为合适。

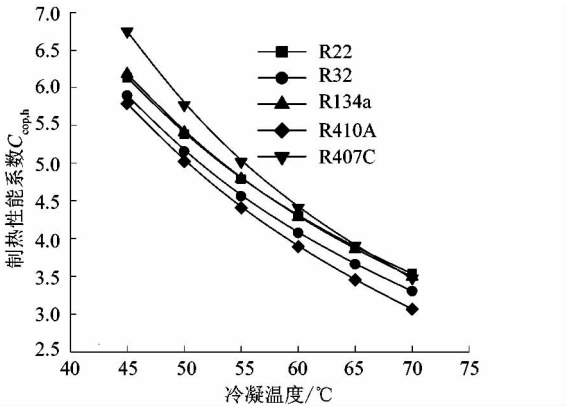

图 2　各工质在不同冷凝温度下的制热性能系数

Figure 2　$C_{COP,h}$ of working condition at different condensing temperatures

2.2.2　各工质在不同冷凝温度下单位容积制冷量

从图 3 可以看出,随着冷凝温度的上升,单位容积制冷量均成线性下降趋势,这是由于冷凝温度的增加导致冷凝压力的上升,而过冷度不变,因此图 1 中 5 点的焓值增大,单位容积制冷量减小。另外 R32 在冷凝温度变化范围内单位容积制冷量最大,而 R134a 最小。工质的单位容积制冷量高,空气源热泵热水器系统选型时可选用较小的设备,利于降低成本,因此在这一方面 R32 较为合适。从图中还可以看出,在冷凝温度变化范围内,R410A 的斜率最大,R22 和 R134a 的斜率最小。斜率的大小表示制冷剂在变工况下的稳定程度,斜率越大越不稳定,因此 R410A 在这方面较差,而 R22 和 R134a 较稳定。

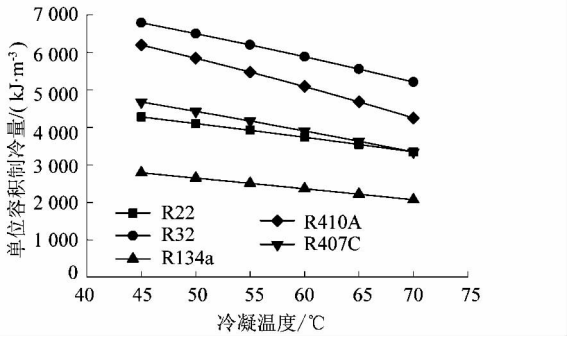

图 3　各工质在不同冷凝温度下单位容积制冷量

Figure 3　Cooling capacity per unit volume of working condition at different condensing temperatures

2.2.3　各工质在不同冷凝温度下压缩机压比

从图 4 可以看出,R22、R32 和 R410A 在不同冷凝温度下的压缩比非常相近,且随着冷凝温度的升高,每种工质的压缩比都有上升的趋势。在冷凝温度变化范围内,R134a 的压缩比最大,而 R407C 的最小。在空气源热泵热水系统循环时,过大的压缩比将导致容积系数的减小,不利于压缩机正常工作。因此,从压缩比的角度考虑,R407C 较为合适,而 R134a 并不理想。

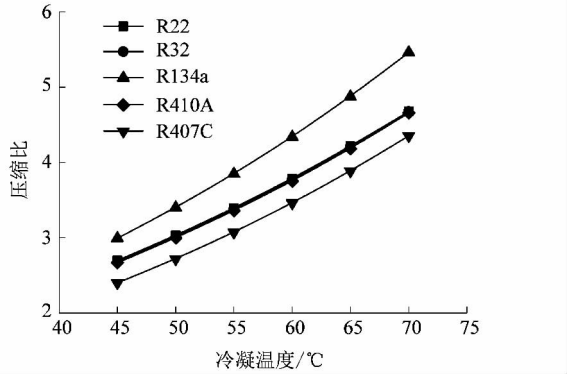

图 4　各工质在不同冷凝温度下压缩比

Figure 4　Compression ratio of working condition at different condensing temperatures

2.2.4　各工质在不同冷凝温度下压缩机排气温度

从图 5 可以看出,随着冷凝温度的上升,压缩机的排气温度逐渐升高。R32 的排气温度明显高于其他制

冷剂,且增长幅度也大于其他制冷剂。同时从图中可以看出,R134a 与 R407C 在冷凝温度较低时(小于 50 ℃),排气温度接近且最低;当冷凝温度较高时(大于 50 ℃),R134a 的排气温度最低。制冷压缩机的排气温度过高会引起压缩机的过热,压缩机的过热会降低其容积效率且增加能耗。同时可能导致润滑油黏度减小,使轴承产生异常摩擦,过高的排气温度还可能促使制冷剂和润滑油在金属的催化下出现热分解。在这一方面,R134a 和 R407C 的低排气温度有助于保证压缩机的安全运行和提高压缩机的压缩效率。

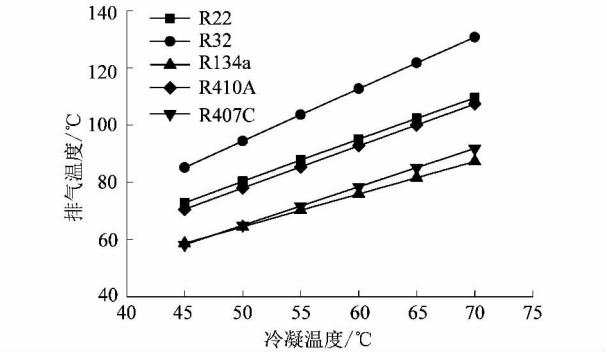

图 5 各工质在不同冷凝温度下压缩机排气温度

Figure 5 Compressor exhaust temperature of working condition at different condensing temperatures

3 结论

笔者对 R22 和其各替代物在空气源热泵中的工作性能进行了分析,并得出以下结论:

1) 在变工况条件下,R134a 在冷凝温度大于 65 ℃时的制热性能系数与其他制冷剂相比较高,排气温度也较低;同时,在低冷凝温度下就可以制取高温热水。

2) 在冷凝温度小于 65 ℃时,R407C 的制热性能系数最高,另外其排气温度与压缩机压比都是最低的。虽然 R134a 和 R407C 在空气源热泵热水器中的综合性能较佳,但是其全球变暖潜能值较高(分别为 1 300 和 1 700),并不适合作为长期使用的工质。

3) R32 在定工况下有着最高的制热量和较高的制热性能系数,与其他制冷剂相比综合性能最佳,并且在变工况条件下的单位容积制冷量也是最高的,但是其排气温度很高,对压缩机的性能影响较大。

如前所述,有效降低压缩机排气温度的技术已经逐渐成熟,对于控制热泵压缩机排气温度的研究也会受到关注。因此,在空气源热泵热水器中,R32 作为 R22 的替代制冷剂将具有很好的应用前景。

参考文献:

[1] 李素花,代宝民,马一太. 空气源热泵的发展及现状分析[J]. 制冷技术,2014,34(1):42 - 48.

[2] 周岳,赵晓玥,唐贝茗,等. 采用自然对流换热的空气源热泵热水器实验研究[J]. 制冷技术,2015,35(2):13 - 17.

[3] 李洪芳. R142b、R152a 等 64 种工质的热力性质的计算[J]. 上海水产大学学报,1996,5(2):83 - 89.

[4] 张太康,翁文兵,喻晶. R134a、R417a 和 R22 用于空气源热泵热水器的性能研究[J]. 流体机械,2010,39(5):72 - 76.

[5] 苗文凭,吴永明,张建成. 空气源热泵热水器的可靠性研究[J]. 流体机械,2011,39(12):74 - 79.

[6] 李翔,倪龙,江辉民,等. 空气源热泵热水器能效评价指标研究[J]. 流体机械,2009,37(11):69 - 73.

[7] 丁国良.《制冷空调新工质:热物理性质的计算方法与实用图表》出版[J]. 制冷技术,2003(3):64.

[8] 王国金,程真. 空气源热泵的热力学分析[J]. 电子制作,2015,10(6):182.

[9] 矢岛龙三郎,吉见敦史,朴春成. 降低 R32 压缩机排气温度的方法[J]. 制冷与空调,2011,11(2):60 - 64.

[10] 黄理浩,陶乐仁,陶宏,等. 电子膨胀阀对变频压缩机排气温度控制的实验研究[J]. 热科学与技术,2009,8(4):361 - 365.

[信息 · 简讯]

· 行业简讯 ·

西门子助中国选手冲冠世界技能大赛

当地时间 2017 年 10 月 19 日晚,第 44 届世界技能大赛在阿联酋阿布扎比闭幕,中国代表团继 2015 年在 43 届世界技能大赛实现金牌零的突破后,在本次大赛中共获得了 15 枚金牌,7 枚银牌,8 枚铜牌和 12 个优胜奖。其中,来自中国山东的选手袁强在工业控制赛项的角逐中一举获得金牌。西门子(中国)有限公司数字化工厂集团工业控制专家袁海峰作为工业控制项目中国首席专家深度参与竞赛执裁等工作。

世界技能大赛有"技能奥林匹克"之称,已有 60 余年历史,是全球公认的职业技能竞技平台。西门子股份公司于 2010 年 10 月起正式成为其工业合作伙伴。作为工业控制项目和综合机械与自动化项目的赞助商,西门子为竞赛项目提供了自动化和驱动技术领域的现代工业组件。

针对中国选手参与的工业控制赛项,西门子与世界技能大赛中国研究中心一起在第 43、44 两届赛事的准备过程中给予了全面的支持。

(供稿:朱建芸)