

R32 多联机可行性分析

刘合心 宋培刚 黄浪彬
(珠海格力电器股份有限公司 珠海 519070)

摘要：本文分析了 R32 制冷剂热物理和循环特性，论述了 R32 有利于多联机系统能效的提高。从泄露量和最大充注量限定等安全方面，评估了 R32 制冷工质可使用在制冷量在 18KW 以下的家用多联机系统上。并提出了 R32 多联机开发过程中可能存在的系统问题。

关键词：R32；多联机；系统能效；安全性

Abstract: In this paper, the thermal physical property and cycling characteristic of R32 were analyzed. The benefit of using R32 for improving COP of multi-split air conditioning system was dissertated. The feasibility of using R32 for the VRF system less than 18KW was evaluated according to the leak and charging amount. The potential problems in developing process of multi-split air conditioning system using R32 were also present.

Key words: R32; multi-split air conditioning system; COP of system; security

前言

目前，新一代零消耗臭氧潜能值（ODP），低全球变暖潜能值（GWP）环保制冷剂的研究非常紧迫。而用于空调系统的 R22 的替代制冷剂，如 R410A 和 R407C 则有高 GWP 值缺点，只能成为 R22 的过渡替代制冷剂。由于 R32 具有低 GWP 值环保性高，同时其可燃性低于其他可燃性制冷工质，相对较安全，近年来 R32 再次成为 R22 替代物热点^[1]。

朱明善等对 R32 制冷工质分别从环保性，热物性，安全性，制冷性能等方面进行分析，结果指出：对比 R410A 等冷媒，R32 的热工性质较好，COP 值较高，认为 R32 是一种兼顾减排、安全、节能和市场诸方面要求的、很有前景替代制冷剂^[2]。张倩等针对 R32 压缩空调器系统问题进行了分析，并提出了解决思路^[3]。但是，目前有关于 R32 多联机的研究资料还是较少。然而，在空调市场上多联机占据的份额越来越大，可见 R32 多联机是替代工作研究中的重要课题之一。

1 R32 特性

1.1 物性参数

R32 的摩尔质量最小，对于机组内体积相同的系统，R32 的充注量最小，节约成本及更加环保。R32 的临界温度高于 R410A，但低于 R22，制冷剂临界温度高，便于进行冷凝，制冷循环越接近逆卡诺循环，节流损失小，制冷系数越高。表 1 为 R32、R22、R410A 制冷工质的基本物性。

R32 的饱和蒸发压力和 R410A 的差不多，略微大约 R410A，比相同温度下 R22 的蒸发压力高出约 40%。目前，R410A 制冷装置的相关技术和产品相当成熟，而 R32 是 R410A 制冷工作的主要成分之一，现有 R410A 多联机系

表 1 R32、R22、R410A 制冷工质的基本物性

物理性质	单位	R22	R410A	R32
分子式	-	CHCLF ₂	R32/R125	CH ₂ F ₂
分子量	g/mol	86.47	72.58	52.02
沸点(1atm)		-40.8	-51.4	-51.7
临界温度		96.1	72.13	78.1
临界压力	Mpa	4.98	4.926	5.78

统的承压能力可以满足 R32 制冷工质。图 1 为三种制冷工质在不同温度下的饱和蒸汽压力。

运动黏度低的制冷剂不但有利于降低制冷剂流体与管壁及流体内部的摩擦阻力，减小系统运行费用，而且可以减小流体在管壁的附着厚度，增大传热系数，有利于换热器换热面积的充分利用。从图 2 中可以看出 R32 和 R410A 的运动粘度小于 R22，其中 R32 略小于 R410A，R32 制冷工质的换热性能较优。

制冷剂的比热容及潜热越大，在相同冷量条件下需要工质的循环流量越小，从而有利于降低系统的运行费用。从表中可以看出，R32 的比热容和汽化潜热均低于 R22 和 R410A，而过热损失和节流损失相对值较小，有利于系统效率的提高。

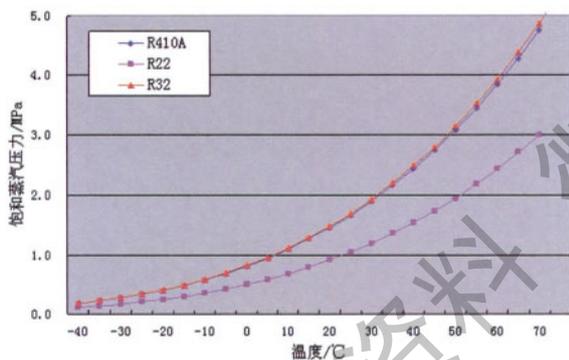


图 1 制冷工质的饱和蒸汽压力

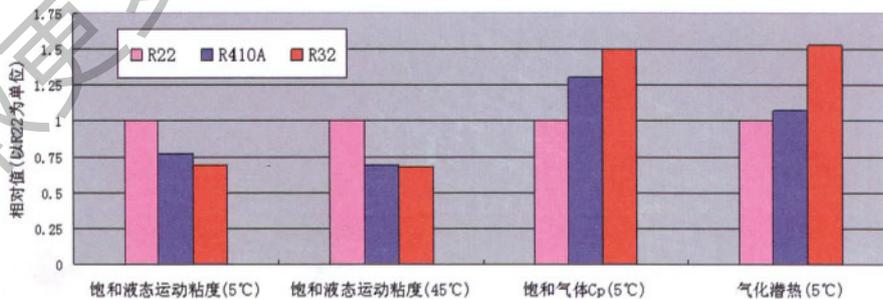


图 2 三种制冷工质的热物性

表 2 标准工况下 R22/R410A/R32 的制冷理论循环参数

制冷剂	蒸发压力 Mpa	冷凝压力 Mpa	压力比	压缩功 kJ/kg	质量制冷量 kJ/kg	COP	容积制冷量 kJ/m ³	排气温度
R22	0.625	2.145	3.43	35.56	170.7	4.8	3940.9	101.9
R410A	0.958	3.351	3.5	39.12	169.3	4.33	5446.9	102.8
R32	1.018	3.473	3.412	53.68	257.4	4.79	6176.9	117

1.2 热力学性质

在理论循环计算中分析对比 COP 值，容积制冷量，压缩比，绝热压缩指数等各项指标参数。

对不同制冷工质进行理论循环计算前，忽略具体设备之间的差异和工质在传热、流动和溶油性等方面的差异，并对所有工质采取相同的内循环参数以及电机效率等。采用以下假设进行简化循环计算：(1) 忽略冷凝器和蒸发器中的微小压力降，即以压缩机的出口压力作为冷凝压力，以压缩机进口压力为蒸发压力；(2) 忽略节流阀的散热，即节流前后焓值相等；(3) 压缩机内部的压缩过程看作为无损失的等熵压缩过程。

在制冷工况下（蒸发温度 7.2℃，吸气温度 35℃，冷凝温度 54.4℃，过冷温度 46.1℃）下，三种制冷工质的理论循环参数如下：

从表 2 中可以看出：(1)R32 的质量制冷量比 R22 和 R410A 分别高出 50% 和 52%，容积制冷量比 R22 和 R410A 分别高出 56.7% 和 13.4%，因此对相同制冷量的空调来说，R32 制冷剂的填充量要小于 R410A 和 R22，大约为 R410A 的 72%，为 R32 的 60%，R32 制冷剂循环流量要小于 R410A 和 R22，可以采用小排量的压缩机和减小换热器的换热面积和管径优化系统。(2)R32 的等

熵压缩功比 R22 和 R410A 高出 50.9% 和 37.2%，压缩机输入功率增大，导致 R32 的排气温度升高，高于 R410A 和 R22 近 20℃，系统需要考虑排气温度过高的问题。(3) R32 的压机功率最大，但单位制冷量也最大，COP 略小于 R22，高于 R410A，考虑到 R32 的物性特性，在实际换热过程中 R32 的换热性能高于 R410A。

1.3 其他特性

从生产工艺路线看，R22 以工业无水氟化氢和氯仿为原料，在一定温度和压力的条件下，通过催化剂的作用进行液相反应，制得 R22 粗品；经水洗、碱洗除去氯化氢气体、氟化氢后，再经脱水、液化、脱气、精馏等过程，最后制得纯净品 R22。

R32 和 R22 的生产工艺路线相同，只是原料分别为工业无水氟化氢和 R30；副产品也不同，分别为 HCl、R31 和少量 R30，它们均可回收利用。但设备和管道的压力较高，好在 R22 的生产设备一般都能满足要求，只需略经改动就能转产 R32。

2 R32 多联机安全性分析

安全性对操作人员和用户非常重要，尤其是在制冷机组长期连续运行的过程中，制冷剂的毒性、燃烧性和爆炸性都是评价制冷剂安全程度的性质。而此点对多联机而言更为重要，因为多联机较多应用于长连管使用场合，加上匹配室内机数量大，所以整个系统内的 R32 灌注量较大。

2.1 泄露量估算

多联机具有一拖多的特点，一个室外机可匹配多台室内机，对多个房间进行空气调节。那么，如果某一个房间出现制冷剂泄露，就会出现整个多联机系统的制冷剂进入该房间。针对此点问题，可以从毒性、可燃性两个方面进行 R32 多联机可行性的评估。

毒性通常是通过对动物的试验和对人的影响来确定的，美国工业与环境卫生专家大会用 TLVs 指标作为毒性标准。如果指标的数值为 1000 或以上，则认可这种制冷剂是无毒的。不同制冷剂的燃烧性和爆炸性差别很大，易燃的制冷剂在空气中的含量达到一定范围时，遇明火会产生爆炸。表 3 为几种制冷剂的毒性和易燃易爆特性。

可以看出，这四种制冷工质均无毒，R22 和 R410A 不可燃，而 R32 是低度可燃，安全等级 A2，R290 是高度可燃，安全等级 A3。从安全性上考虑，R22 和 R410A 的安全性最好，R32 次之，R290 最差。

由于环保潜力较好的制冷工质均具有可燃性，表 4 列出几种可燃性制冷的相关可燃爆炸参数。

从表 4 中的各项燃烧爆炸参数中，和其他可燃性的制冷工质对比，R32 的爆炸体积分数，RF 值，燃烧速度，燃烧热均处于最小（最不利于燃烧）。ASHRAE 34-2010 中将 R32 的安全等级分类到 A2L，按美国交通部运输标准 DO T173.115 和联合国 (UN) 危险货物运输规定，在运输过程中认为是“不可燃”的。R32 处于弱可燃和不可燃的范围，其安全性相对较高。

表 3 几种制冷剂的毒性和易燃易爆特性

制冷剂	毒性 (TLVs)	可燃性	爆炸极限体积	安全等级
R22	1000	不可燃	-	A1
R410A	1000	不可燃	-	A1
R32	1000	低度可燃	14-31	A2
R290	1000	高度可燃	2.3-7.3	A3

表 4 几种可燃性制冷的相关可燃爆炸参数

制冷工质	爆炸极限体积分数 (%)	RF 值 (kJ/mol)	燃烧速度 (cm/s)	最小点火能 (mJ)	燃烧热 HOC (MJ/kg)
R290	2.5-10	56.7	46	0.25	46.3
R32	14.4-29.3	4.6	6.7	30	9.4
R717	15-18	6.82	7.2	100	18.6

制冷剂泄露后发生燃烧爆炸需要两个条件：可燃性制冷剂在空气中的体积分数在爆炸极限范围之类和可燃性制冷剂达到了燃烧的最低温度。使用 R32 工质的系统中一般最高温度不超过 150℃，远低于 R32 的燃点。相比大型商用制冷机组，家用多联机系列的制冷量需求不高，其冷媒的充注量不多，安全性较高。

在某系列现有多联机 R410A 系统的冷媒填充量上，乘以 0.72 折算为 R32 的填充量，当最小房间（面积为 10m²，高为 2.7m，安装 20 的内机）的室内机发生泄漏时，R32 全部泄漏入该房间（假设房间完全密闭，R32 在 0.1MPa，20℃ 下，密度为 2.1626kg/m³），计算 R32 的体积浓度，数据如表 5 所示。

从表 5 中可以看出，对于家用多联机系统中的 18KW 的多联机使用 R32，即使全部泄漏到一个房间，平均体积分数达不到 R32 的爆炸下限（14.4%-29.3%），系统很安全。

2.2 最大充注量的限定

由于 R32 是一种可燃性制冷工质，安全等级属于 A2L 类，相比 A2 类制冷剂较为安全，在使用限制上会有较宽松的安全要求。按照 IEC 60335-2-40:2005 和 EN

378-1:2008 标准中规定，可燃性制冷剂的充注量和房间通风情况及机组形式有关，对于舒适空调/热泵机组室内运行最大充注量为：

$$M_{max} = 2.5 \# LFL^{1-2.5} \# h_0 \# A^{0.5}$$

其中，A 为房屋面积 (m²)；h₀ 为电器安装的高度 (m)，地面安装 h₀=0.6m，墙面安装 h₀=1.8m，窗式安装 h₀=1.0m，天花板安装 h₀=2.2m。

在假设 1KW 冷量可提供 7.5m²的前提下，计算 R32 等机组安全标准所允许的最大制冷剂充注量，如下图所示。由图可得出，R32 要比后两者大了很多，比 R290 约大 10 倍多，比 R161 约大 5 倍多。按上述假设，30m² 房间面积约需配冷量为 4KW 的机组。按 UNEPTOC 报告，冷量为 2~20KW 的分体式空调，R22 充注量约为 0.32~0.34kg/KW，若取平均值 0.33kg/kW，则该机组 R22 充注量约 1.32kg，而 R32 充注量约为 0.6 × 1.32=0.8kg，比图中所允许的 R32 最大充注量（约 2.4kg）小很多，表明尚留有很多余量。

按照 200W/m² 的冷量来需求来计算设计空调，对于需求制冷量为 16KW，14KW，12KW，10KW 的房间，其最大制冷工质的填充计算如表 6。

表 5

	额定制冷量 (KW)	最大长连管 (m)	液管管径 (mm)	R410A 充注量 (Kg)	R410 充注量 (长管) (m)	R32 充注量 (Kg)	R32 充注量 (长管) (Kg)	R32 体积分数	R32 体积分数 (长管)
某系列现有多联机	10	70	9.52	5	7.4	3.6	5.3	5.8	8.4
	12	70	9.53	5	7.4	3.6	5.3	5.8	8.4
	14	70	9.54	7	9.4	5.0	6.8	7.9	10.4
	16	70	9.55	7	9.4	5.0	6.8	7.9	10.4
	18	70	9.56	7.5	9.9	5.4	7.1	8.5	10.9

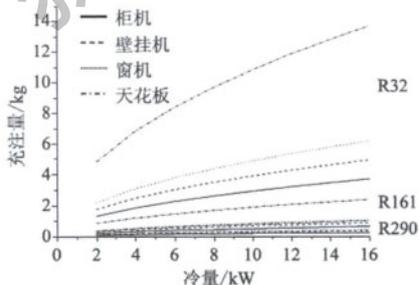


图 3 最大充注量与冷量的关系

表 6 实验所得最大制冷工质的填充计算

额定制冷量 (KW)	制冷面积	最大填充量				R32 实际最大充注量
		落地式	窗机	风管机	天井机	
18	100	3.4	5.7	10.2	12.5	7.1
16	80	3.1	5.1	9.2	11.2	6.8
14	70	2.9	4.8	8.6	10.5	6.8
12	60	2.6	4.4	7.9	9.7	5.3
10	50	2.4	4.0	7.2	8.9	5.3

在除舒适空调/热泵外的其他制冷系统中,应按 ISO 5149 或 EN 378-1:2008 标准计算。表 7 以普通用房(直接系统)为例,表明 R32、R161 和 R290 最大充注量的情况,可见 R32 的允许最大充注量比 R290 和 R161 也约大 10 倍。

由此可见,按目前可燃性安全标准,不管舒适空调或其他制冷/热泵系统,R32 的适用范围比 R290 和 R161 宽得多,R32 的充注量在相关规定和标准的安全限定以内,可以安全使用于家用多联机中。

3 R32 多联机关键问题

和现 R410A 系统相比,使用 R32 于多联机系统中,需考虑一下问题:

(1) 由 R32 的热物特性,R32 多联机系统排气温度会较高,严重影响压缩机的运行,需从系统和压缩机方面来考虑。多联系统设计上可考虑喷液、中间补气和双级压缩等方案,后两者需要重新选择压缩机(要求中间补气口和双气缸进出口),压缩机相关要求对电机和润滑油的散热性和热稳定性。

(2) 由于 R32 的单位容积制冷量远大于 R410A,系统需要重新设计冷媒的填充量和制冷循环工况,使得系统的能效最佳,同时换热器的换热面积和管径改小,需研究微细管换热相关机理,两器构型匹配,压缩机采用小排量选型。

(3) 在生产工艺上,由于 R32 的微可燃性,空调生产线需注意防火防爆的措施,同时空调的系统需减少活动的连接、进行密封件的严格选配等。

(4) R32 用在家用多联机系统中,在安全性上需对系

统上增加相关的安全装置。同时需进行室内侧泄露 R32 的泄漏分析、风险概率事故树分析、微燃破坏性模拟和试验。

(5) 市场上用户对微可燃制冷工质空调器的接受能力也需要考虑。

4 结论

1) R32 的比热容和汽化潜热均低于 R22 和 R410A,而过热损失和节流损失相对值较小;R32 制冷剂循环流量要小,换热过程中性能高,有利于多联机系统效率的提高。

2) 从泄露量和最大充注量限定等安全方面评估,R32 制冷工质可使用在制冷量在 18KW 以下的家用多联机系统上。

3) 在 R32 多联机系统开发过程中,可能存在排气温 度较高、换热器特殊设计、生产工艺安全措施等问题。

表 7

制冷系统的位置	房屋使用情况(普通用房)	
	R32(A2)	R290、R161(A3)
在机房外的有人空间	11.6kg	1.5kg(仅密闭系统)
压缩机和储液器在机房或露天	11.6kg	1.5kg(仅密闭系统)
涉及制冷剂的部分在机房或露天	40.4kg	1kg(地面以下,仅密闭系统)或 5kg(地面上,仅密闭系统)

参考文献

- [1] DOMANSKI A, DAVID Y S, KIM M S. Performance of a finned-tube evaporator optimized for different refrigerants and its effect on system efficiency [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(6):820-827.
- [2] 朱明善,史琳.在家用/商用空调中用 R32 替代 R22 的探索 [J]. 制冷与空调,2009,9(6):31-34.
- [3] 韩晓红,徐英杰,仇宇等.制冷剂 R32 的循环性能实验研究 [J]. 制冷与空调,2010,4(2):68-70.