

空调用制冷剂选用的探讨

余跃进¹, 吴雁²

(1. 南京师范大学动力工程学院, 210042, 南京; 2. 南京东南大学建筑系, 210096, 南京)

[摘要] 论述了目前国际上空调用替代冷媒的最新发展动态, 分析了目前市场上几种常见空调用替代冷媒的特性, 并就几种替代冷媒与制冷效率的关系进行了对比. 在对比分析基础上对未来几年的空调用替代冷媒选用战略提出了建议.

[关键词] 替代冷媒, 制冷效率, 温室气体

[中图分类号] TB61⁺2, [文献标识码] A, [文章编号] 1672-1292-(2004)01-0012-04

1 国际限制用制冷剂近况

科学家发现含氯的 CFCs 与 HCFCs 物质是破坏臭氧层的元凶, 臭氧层在被破坏的情形下, 大量的紫外线将直接照射到地球表面, 造成皮肤癌、白内障发病率的增加及免疫系统的破坏; 植物生态遭受改变, 其中光合作用的机能受到影响, 将延迟农作物生长; 海洋生物的食物链亦遭受破坏; 热带雨林平衡失调; 全球气候产生变迁.

另外, 由于 CFCs、HCFCs 非常稳定, 当其上升至大气层后不易分解消失, 故易造成地球的温室效应. 而温室效应将导致全球气候的反常、两极冰山的融化及海平面的上升等异常现象, 威胁到人类的生存环境.

京都议定书将 HFCs 与 CO₂、CH₄、N₂O、PFCs、SF₆ 并列为温室气体, 并要求发达国家将温室气体的排放量降低至 1990 年的水准. 此决议已对蒙特利尔议定书造成不小的冲击, 在 1998 年 11 月举行的蒙特利尔议定书第十次会议中引起热烈的讨论, 与会国担心一旦京都议定书开始对 HFCs 的使用设限, 其作为 CFCs 与 HCFCs 长期替代品的地位势必受到挑战. 由于 HFCs 目前是 CFCs 与 HCFCs 的主要替代品, 其应用范围包括冷媒、清洗溶剂、发泡剂、喷雾剂及灭火剂等, 对我们生活的影响甚大, 因此, 必须更仔细探讨 HFCs 的能源效率、环境冲击、安全性与经济性等问题.

根据蒙特利尔议定书对 CFCs 与 HCFCs 限用日程表, 自 2004 年 1 月 1 日起, HCFCs 的消费量要比目前减少 35%. 为符合蒙特利尔议定书的要求, 已有部分国家针对 HCFCs 不同用途分别订立禁用时间表. 在发泡领域中, 基于 HCFC-141b 的 ODP

值 0.11 为所有 HCFCs 中最高, 美国环保署规定 2003 年 1 月 1 日起禁止生产及进口 HCFC-141b; 欧洲共同体已于 2003 年 1 月 1 日起禁止使用 HCFCs 于 PU 发泡, 2004 年起全面禁用 HCFCs; 而日本政府规定 2004 年 1 月 1 日起全面废除 HCFC-141b 发泡剂.

在冷媒部份, 美国环保署规定从 2010 年 1 月 1 日起禁止生产及进口含 HCFC-22 的设备, 但 2010 年 1 月 1 日前制造的设备不受此限; 欧洲共同体也在 2001 年 1 月 1 日起禁止冷冻设备使用 HCFCs, 2004 年起全面禁用 HCFCs; 而日本政府规定从 2010 年 1 月 1 日起全面废除 HCFC-22 冷媒.

2 替代冷媒特性

在空调应用中, HFC-134a 自 1992 年起已应用于离心式冷水机组中, 目前更将用来取代其它的 R-22 空调设备, 但必须对系统进行重新设计, 例如加大热交换器与压缩机排气量等. 目前, 使用 HFC-134a 的螺杆式压缩机最小制冷能力约为 80 kW, 未来将有更小的 HFC-134a 螺杆制冷机出现. R-407C (混合冷媒 HFC-32/HFC-125/HFC-134a, 23%: 25%: 52% 配比) 的热力性质与 R-22 相近, 可直接更换现有的 HCFC-22 系统. 尽管如此, 要使 R-407C 的性能超越 HCFC-22, 还必须克服其非共沸的特性. R-407C 在绝对压力 1 bar 时, 有 7.2 K 的滑落温差, 因此无法应用于满液式蒸发器或低压贮液器中, 但可以采用逆流热交换器以增加传热效率. 如今欧洲已在各式空调设备上大量使用 R-407C, 制冷范围由 2 kW 至 250~300 kW, 主要搭配回转式、涡旋式与往复式压缩机. 近两年来, 一些制造厂也供应 R-404A 的冷水机组, 性能亦与 R-22 系统相

收稿日期: 2003-12-04.

作者简介: 余跃进, 1958-, 硕士, 副教授, 主要从事暖通空调专业的教学、设计与研究工作. E-mail: dlkj@njnu.edu.cn.

近, 其低临界点特性(72℃)较适合水冷式系统。

美国与日本开发中的 R-410A 冷媒(混合冷媒 HFC-32/HFC-125, 1:1 配比), 其高压比 R-22 高出约 50%, 系统必须经过较大的修改, 无法直接更换原有的 R-22 系统。预计 R-410A 将跟随美日的脚步, 应用于小型家用空调机与多联机系统中。

由于部分欧洲国家已于 1998 年 1 月 1 日起禁止新设备使用 HCFCs, 使得 1998 年的 HFCs 空调设备增加 10%~15%, 1999 年亦明显增加占有比例。一些主要制造商已正式宣布选用 HFC-134a 与 R-407C 作为新产品的冷媒, 根据 IIR(国际冷冻学会)1998 年的调查结果, 欧洲已有超过 50 家以上的公司可提供技术成熟的 HFCs 系统, 特别是 HFC-134a 与 R-407C 冷媒系统。R-407C(混合冷媒 HFC-32/HFC-125/HFC-134a, 23%:25%:52% 配比)热力性质与 R-22 相近, 可直接更换现有的 HCFC-22 系统, 适合于中大型空调设备, 制冷范围由 5 kW 至 300 kW, 世界各国已有许多全新的 R-407C 系统上市, 并已运转 5 年以上。另外还有许多旧系统换装 R-407C 也相当成功。在欧洲, R-407C 几乎已全面替代 R-22 用于中大型空调机, 风冷热泵系统主要搭配回转式、涡旋式与往复压缩机, 或水冷系统搭配螺杆式压缩机。例如 1994 瑞典易利信公司开发大楼采用 230 kW R-407C 水冷式冷水机组、意大利电信公司新建大楼使用 226 kW R-407C 水冷式冷水机组、开利欧洲公司自 1993 年起即开发新型 R-407C 冷水机组。不可否认, 比起 R-134a 与 R-404A, R-407C 有更多值得深入研究的课题。原则上, 利用其较大滑移温差的特性, 并避免不适当的安装, 应该可以得到很好的效果。在使用板式热交换器时, 可利用其逆向流的优点, 使其性能与 R-22 接近, 若对系统进行最优化设计, 性能将可再提升。要计算直接膨胀的空气热交换器一向要比液体热交换器来得困难, 对于较大滑移温差冷媒而言, 更需考虑一些其它的因素。例如空气冷凝器(大部分为冷凝机组)冷媒分布的平均与否热负荷的分布均匀度, 这些都会影响主机性能。壳管式冷凝器要注意的问题更多。由文献资料显示, R-407C 的冷凝温度会增加 3~5 K, 对温带地区而言, 并不会造成高压过高的危险, 但一定会使电费成本增加。目前有许多方法可改善冷凝压力的上升问题, 例如同时加快冷媒排出冷凝器的速度, 使用过冷器造成更多的过冷度, 或者用其它方法使冷凝器上方的气体能更快冷凝下来。壳管式蒸发器如同板式热交换器一样, 可算是良好的逆

向流热交换器, 一般而言, 比较适用于 R-407C, 但必须注意防冻保护问题, 因为在蒸发器入口处的温度会比 R-22 低, 可能会导致冷水结冰的现象发生, 而影响冷水机组的性能。当液管窗口呈现完全无泡时, 其实已有相当大的过冷度产生, 也就是说冷凝器中单相的过冷热交换面积增加, 而双相的冷凝面积减少, 如此必定会造成冷凝温度升高。某些系统在长时间停止而再次启动时, 冷凝器压力会异常升高, 造成压力开关动作而停机, 这是由于长时间停机造成冷凝器与蒸发器中的气体成份变化, 需要更高的压力来冷凝。此问题最常发生在小型水冷式冷水机组中。这种冷水机组在启动时, 为了要迅速建立正常高压, 通常会暂时关闭冷却水阀门, 因此提升操作压力的动作在平时并无不妥, 但对长时间停机的主机而言, 会使压力上升问题更加恶化。为避免此现象, 可以在压缩机启动时, 由操作人员强制冷却水进入冷凝器, 使冷凝压力不致过高。有时此问题可通过 MOP 阀(最大操作压力阀)或吸气压力控制阀来降低蒸发压力, 以减少压缩机启动后进入冷凝器的冷媒量。要减少系统的故障, 最重要的是要了解非共沸冷媒滑移温差的特性, 以便分析制冷循环以及调整膨胀阀与冷媒充填量。同时必须以液态充填系统, 否则系统将无法正常运转。主机上必须安装含有温度滑差刻度的 R-407C 专用压力表。

3 制冷效率与冷媒的关系

3.1 温室气体的分析工具 —— TEWI 与 LCCP

TEWI (Total Equivalent Warming Impact) 总等价暖化效应, 是大家较为熟悉的名词, 它是一个衡量温室效应的指标。它将整个系统的运转年限内, 化学品的直接泄漏量, 加上能源使用间接造成的二氧化碳排放量, 换算成 CO₂ 等价量, 作为该系统对温室效应影响程度的指标。TEWI 愈大表示对温室效应影响程度愈大。

由于冷媒的生产过程与其它的工业过程一样都需要消耗能源, 冷媒制造过程中也或多或少要排放一些副产品到大气中, 为了能更彻底的分析该化学物对环境的影响, 于是有所谓的 LCCP(Life Cycle Climate Performance) 生命周期气候性能分析, 它除了将 TEWI 中的直接泄漏量与能源使用的间接排放量列入计算外, 该化学品生产过程所耗费的能源(间接), 与副产品排放至大气中(直接)所造成的温室效应, 也一并换算成 CO₂ 的等价量。表 1 为一些 HCFCs 与 HFCs 冷媒考虑 LCCP 之后的 GWP 值。

表 1 HCFC 与 HFC 冷媒考虑 LCCP 之后的 GWP 值

化学品名称	每 kg 化学品制造过程中 CO ₂ 的等价量(100 年)/kg			化学品排放到大气中的 CO ₂ 等价量(100 年)/kg	考虑 LCCP 之后的 GWP 值
	制程耗能	副产品排放	小计		
HCFC-22	3	390	393	1500	1893
HCFC-123	3	6	9	90	99
HFC-134a	9	4	13	1300	1313
HFC-152a	9	1	10	140	150
HFC-32	9	2	11	650	661
HFC-125	9	8	17	2800	2817
HFC-143a	9	11	20	3800	3820
HFC-245fa	9	3	12	820	832

3.2 冷水机组的替代冷媒

表 2 为蒸汽压缩式冷水机组的替代冷媒一览表. 蒸汽压缩式可控制冷能力与压缩机型式进一步分类. 主要的替代冷媒为 HFC-134a、R-407C、R-410A 及 HFC-245fa. HFC-245fa 原来是用来替代 HCFC-141b 作为发泡剂之用, 但由于 HCFC-123 仍具有臭氧层破坏能力, 且被 ASHRAE 标准 34 分类在具有毒性的 B 级, 因此性质与其相近的 HFC-245fa 在未来很有可能会用来替代 HCFC-123.

表 2 蒸汽压缩式冷水机组替代冷媒一览表

压缩机	典型的制冷范围	替代冷媒
离心式	> 700kW (200 RT)	HCFC-123
		HFC-245fa
		HFC-134a
		HCFC-22
		R-410A
螺杆式	200-1500 kW (50-400 RT)	HFC-134a
		HCFC-22
		R-410A
涡旋式	75-300 kW (20-80 RT)	HFC-134a
		HCFC-22
		R-410A
往复式	75-500 kW (20-150 RT)	HCFC-22
		R-407C
		R-410A

表 3 为上述替代冷媒应用于冷水机组的理想效率值, 此结果是使用 REFPROP 冷媒热力性质软件计算得出的结果. 其中 HFC-245fa 比 HCFC-123 低了 2% ~ 3%, 由于目前无实验验证, 估计 HFC-245fa 的部分负荷时的效率(Integrated Part Load Value, IPLV) 将比 HCFC-123 低 3%. 另外由表中可发现 R-410A 的理论效率值比 HCFC-22 低了 6%, 但是由小型空调机的开发经验得知, R-410A 的实际效率比 HCFC-22 高 5%, 造成如此两极化结论的原因在于 R-410A 的压力与密度皆比 HCFC-22 高出很多, 且热传特性较佳, 提升了冷媒侧的传热系数. 因此在大型冷水机组上运用 R-410A 的效率应可与 HCFC-22 相当.

表 3 替代冷媒应用于冷水机组的理想效率值

冷媒	理想 COP @ 过冷度/过热度 (冷凝温度 40.6℃, 蒸发温度 4.4℃)		
	0/0	2.8℃/2.8℃	5.6℃/5.6℃
HCFC-123	6.78	6.92	7.05
HFC-245fa	6.58	6.76	6.92
HFC-134a	6.27	6.47	6.66
HCFC-22	6.35	6.48	6.66
Ammonia	6.66	6.69	6.72
R-410A	5.95	6.11	6.26

图 1 为美国亚特兰大市不同效率的冷水机组 (IPLV: 0.45~ 0.60 kW/ton) 每冷吨每年运转所需耗电的电力与 CO₂ 排放量, 其计算基础为:

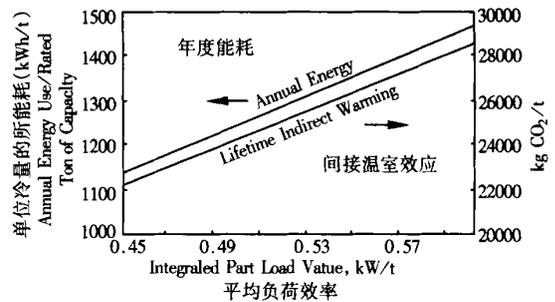


图 1 亚特兰大市不同效率冷水机组的耗电与 CO₂ 排放量对比图

每年操作 2 125 h; 设备寿命 30 年; 发电厂发电每 kWh 的 CO₂ 排放量为 0.65 kg.

表 4 为根据图 3 中每冷吨的计算基础, 推算 1999 年所能取得效率最高的 350RT 与 1000RT 冷水机组的年平均运转耗能比较.

表 4 1999 年 350 RT 与 1000 RT 冷水机组的效率水准与年平均运转耗能

主机型式	冷媒种类	350RT (1200 kW)		1000 RT (3500 kW)	
		IPLV, kW/t	年度耗能 kWh	IPLV, kW/t	年度耗能 kWh
离心式	HCFC-123	0.47	414 800	0.40	1 015 000
	HFC-245fa	0.485	426 300	0.465	1 174 000
	HFC-134a	0.52	452 700	0.48	1 207 000
	HCFC-22	0.53	460 300	0.48	1 207 000
螺杆式	HCFC-22	0.47	414 800	—	—
	HFC-134a	0.50	437 500	—	—
	R-410A	0.47	414 800	—	—
	R-717	0.54	468 000	0.57	1 402 000

3.3 LCCP 分析

上述的效率分析可用来作为 LCCP 分析中的间接排放的计算基础. 直接排放的部分则以表 5 来表示. 表 5 为冷水机组每年的冷媒泄漏量, 根据美国目前的工业水平, 每年的冷媒泄漏量应可控制在 0.5% 以下, 但下文的 LCCP 分析仍然以 1% 泄漏作为计算基础.

表5 冷水机组每年的冷媒泄漏量

冰水机	冷媒充 填量(kg)	每年泄漏率		
		0.5% (kg/y)	1.0% (kg/y)	4.0% (kg/y)
350 RT(1200 kW) 螺杆 式离心式 HCFC-123	480	2.4	4.8	19.2
HFC-134a	432	2.2	4.3	17.2
HCFC-22	432	2.2	4.3	17.2
R-717	240	1.2	2.4	9.6
1000 RT(3500 kW) 螺 杆式离心式	1225	6.1	12.3	49.0
HCFC-123	1120	5.9	11.2	44.8
HFC-134a	1120	5.9	11.2	44.8
HCFC-22	630	3.2	6.3	25.2
R-717				

经过上述一连串的计算分析,可以得到最后结

表6 亚特兰大市办公大楼使用 350 RT(1999 年效率)冷水机组之 LCCP 分析

压缩机/冷媒		间接(耗能) CO ₂ /kg	运转期间冷媒 排放 CO ₂ /kg	考虑 LCCP 之后的 GWP kg CO ₂ /kg	直接(排放) CO ₂ /kg	LCCP 等价 CO ₂ /kg
离心式	HCFC-123	8088600	144	100	14400	8103000
	HFC-245fa	8312800	144	832	119800	8432600
	HFC-134a	8827600	129	1313	169380	8997000
	HCFC-22	8975800	129	1890	243800	9219600
螺杆式	HCFC-22	8088600	129	1890	243800	8232400
	HFC-134a	8535000	129	1313	169380	8704400
	R-410A	8088600	129	1739	224330	8312900
	R-717	9126000	72	2	144	9126100

果,即为 1999 年效率水准的 350 RT 与 1000 RT 冷水机组,在美国亚特兰大市办公大楼运转 30 年后,直接与间接排放至大气中等价的 CO₂ 量.由于计算方式相同,表 6 仅列出 350RT 的分析结果.

由表 6 可以看出,LCCP 等价 CO₂ 排放量中,占大多数比例的为间接的二氧化碳排放量,直接排放的部分仅占 3% 以下.若离开亚特兰大市到较冷或较热的城市情况也差不多,因为对大型建筑物而言,室外气候变化,并不是只影响空调负荷,照明、办公设备及电梯等机电设备、人员多寡等也占有相当大的比例.

4 结束语

(1) 制冷系统的选择主要以选择系统工作冷媒及能源效率作为指标.冷媒的选择则一定要注意蒙特利尔议定书及未来温室效应对冷媒的限制.

(2) 使用 HCFC 做为 CFC 替代的制造商,应密切注意国际对 HCFC 限制的动向,以利于及早采取应对措施.替代品 HFC 属温室气体,其 GWP 值高,未来是否会限制使用,也值得密切关注.

(3) R-407C 风冷热泵系统性能较佳,许多旧风冷热泵系统换装 R-407C 也相当成功.水冷式

系统若善用非共沸冷媒滑移温差的特性,加以最优化设计,也可以得到很好的结果.

[参考文献]

- [1] Replacing R22 in existing air conditioning and heat pump systems[J]. AC&R NEWS, 1999, 15(8): 53~ 54.
- [2] Arthur D Little. "Global Comparative Analysis of HFC Alternative Technologies for Refrigeration, Air Conditioning, Foam, Solvent, Aerosol Propellant, and Fire Protection Applications"[C]. Final Report to the Alliance for Responsible Atmospheric Policy, August 23, 1999.

Selection of Refrigerant in Air Conditioning System

Yu Yuejin¹, Wu Yan²

(1. College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, PRC)

(2. Department of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, PRC)

Abstract: The paper presents the up-to-date improvement on the refrigerants in the air conditioning system. The characters of several refrigerants in common use are analyzed, with the refrigeration efficiency of the refrigerants compared. The proposals for selecting the refrigerants in the coming years are put forward based on the comparison.

Key words: refrigerant, refrigerating efficiency, greenhouse gases

[责任编辑:刘健]