

R-22 的替代现状

James M. Calm, P.E., 工程技术顾问, 美国采暖制冷与空调工程师学会 资深会员
Piotr A. Domanski, PhD, 国家标准和技术研究所, 美国采暖制冷与空调工程师学会 会员

R-22 于 1928 年最初被人们所认可, 并于 1936 年开始商业化生产使用。迄今为止, R-22 已经在很多系统中得到应用, 从最小型的窗式空调到最大型的冷水机组和热泵, 也包括那些区域性的冷却和加热系统。使用这种通用型制冷剂的单个设备的制冷功率在 2 kW 与 30 MW 之间 (0.5 冷吨到 9,500 冷吨)。R-22 的使用装置包括: 旋转式活塞, 往复式活塞, 卷轴, 螺杆和离心式压缩机, 在实验中还包括吸收循环装置。没有一种制冷剂能够像 R-22 这样有如此大的产量和如此广的应用范围。

然而, R-22 是 HCFCs 类物质, 根据《关于破坏臭氧层物质的蒙特利尔议定书》规定, R-22 将会被淘汰。蒙特利尔议定书的控制规定将消耗量定义为生产量加上进口量减去出口量和核实的销毁量。该议定书没有限制将来使用的制冷剂是已生产的或是进口的, 也就是不限制制冷剂在淘汰之前是否已经在使用、回收利用还是储存。该议定书也同样不限制将制冷剂用作原料 (用作生产其它化学品的中间体)。

表 1 表述了按照《蒙特利尔议定书》以及加拿大和美国要求规定的生产和进口 R-22 的最后期限。表中的期限是完全淘汰的期限, 一些国家特别是许多欧洲国家已经将淘汰日期提前了。

表 1: R-22 生产逐步淘汰 (到指定年的 1 月 1 号)

(这些数据影响 R-22 的生产和进口, 但不影响继续使用现存和回收的 R-22)

| | 新设备 | 现有设备 |
|----------------------|-------------------|------|
| 蒙特利尔议定书 | | |
| 发达国家 | 2020 ^a | 2030 |
| 第 5(1) 条款国家 | 2040 ^a | 2040 |
| 美国 ^b 和加拿大 | 2010 | 2020 |

备注:

a 蒙特利尔议定书旨在逐步减少 (第 5(1) 条款国家于 2015 年冻结) HCFC 的总消耗量, 但允许各国家根据各物质 (按其臭氧层消耗潜值计算, ODPs) 及其使用之间的配额自行决定如何满足该项限制措施。

b 依据是 1990 年的清洁空气条例修正案 (CAAA) 和 40 CFR 82 的实施方案。

由于此前广泛的使用, 大量设计使用 R-22 的设备在今后的数十年中还将继续使用, 远远长于 R-22 生产淘汰日期。为维持这些设备运行所需要的 R-22 将主要来自以下三个渠道, 即限定的生产配额、在生产淘汰前的库存及改造或废弃设备中的回收量。也可以选择通过设备改造来是使用替代制冷剂, 其中有部分就是为简化销售后 (不用作原用途) 的改造而专门开发的。

有少数国家特别是欧洲国家已采取更严格的限制措施。有的国家已经根据设备的类型和大小规定了禁止使用 R-22 或与之相关的设备的时间，也有一些国家正准备采取类似措施。相反地，《蒙特利尔议定书》允许发展中国家（根据使用受控物质的水平在第 5（1）条中定义）继续消费 R-22（生产量加上进口量减去出口量和销毁量）直至 2040 年。

R-22 替代的选择

现在还没有哪个单工质制冷剂能够直接用来替代 R-22，但是至少已经有 8 种商业化的混合物工质可应用于当前设备（通过适当的改造），另外还有几种混合工质可应用于新的设备之中。如果将 R-502（一种使用较广的含 R-22 的混合工质，可用于低温商业制冷设备）也考虑进去，那么是用于改造后的设备的将增加到 20 多种，是用于新设备的增加到 10 多种。这些混合工质详见表 2。本文后续部分将讨论几种能够替代 R-22 的单工质制冷剂，但是其应用有所不同。

表 2：替代 R-22 的混合工质

| | 现有设备 (可能要求转换) | 新设备 |
|-------|---|---|
| R-22 | R-407C R-411A R-417A R-419A R-421A R-421B | R-407C R-407E R-410A R-410B HCs |
| R-502 | R-402A R-402B R-403A R-403B R-404A R-407A R-407B R-408A R-409A R-411B R-422A R-507A | R-404A R-407A R-507A R-509A HCs |

注：尚有许多制冷剂（大多数为混合工质）正在使用，但其总的市场占有率很小，表中仅列出已得到标准编号的混合工质。

化工生产厂家和设备制造商、大学和其它研究机构或政府资助的实验室开展了大量研究开发工作，在此基础上，空调和制冷工业组织了一个合作计划旨在加快 R-22 替代品的筛选。这个国际计划被称作“R-22 替代制冷剂评估计划”（AREP），它包括日本的 JAREP。在 90 年代初期，该试验计划的目标是为了在评估替代品的选择中避免重复工作和浪费有限的资源。

共有 39 家欧洲、日本和北美的公司参加了该项计划。他们不仅共享分析结果，也共享了量热计和设备测试所得的测试结果，这些数据不仅可以用来作直接注入（最小的转换），也能够用于制冷剂优化设计。

AREP 测试了 14 种候选制冷剂作为 R-22 的潜在替代品。包括：R-134a、R-32/125 (60.0/40.0)、R-32/134a (20.0/80.0, 25.0/75.0, 30.0/70.0 和 40.0/60.0)、R-32/227ea (35.0/65.0)、R-125/143a (45.0/55.0)、R-32/125/134a (10.0/70.0/20.0 [R-407B]，24.0/16.0/60.0 和 30.0/10.0/60.0) 以及 R-32/125/290/134a (20.0/55.0/5.0/20.0)，也包括 R-290（丙烷）和 R-717（氨），尽管对这两种制冷剂进行了有限的实际测试。其它的候选品包括 4 种 R-502 的替代品，即 R-125/143a (45.0/55.0)、R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0) [R-407A]、R-125/143a/134a (10.0/45.0/45.0)和 R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0) [R-404A]。

根据研究发现，大多数小型压缩机和单元式设备的制造商大都选用 R-32/125 二元混合工质，后来调整配方为 R-32/125(50.0/50.0) [R-410A]，以最大限度地提高制冷性能，消除制

制冷剂的可燃烧性。这种接近共沸的混合工质在较高的冷凝压力下工作，在风冷系统中比 R-22 高大约 60%，但可望缩减制冷设备的尺寸。三元混合工质 R-32/125/134a 是另一个突出的制冷工质候选品，它可以通过不同的组分配比得到与 R-22 和 R-502 的接近压力-温度性质。人们对 R-32/125/134a (30.0/10.0/60.0) 选作短期替代品和作为长期的制冷工质很感兴趣。制造商后来将组分配比调整为 R-32/125/134a (23.0/25.0/52.0) [R-407C]，以此来降低非共沸馏物所可能带来的可燃性。

AREP 的工作只是非竞争性的评估，而制造商们则开发了各自的竞争性方法指导实际设备的设计和优化。Minor³对有关现行设备测试和需要改进方面的大量文献进行了总结，这些包括对压缩机、热交换器和控制设备的改进，另外还包括润滑油（见下文）。所列举的大部分文献报道说明，R-410 的能效与 R-22 相当或有所提高，特别地，在制冷时上升了 1%-7%，而在制热时则-3%到+7%之间。

对一些家用和商业用设备的压缩机和控制设备，虽然其服务设施和通用性在实际中需要统一选择，但对大型设备就不一定了。在 175 至 1500 kW (50 至 450 冷吨) 螺杆压缩式的冷水机组（包括风冷和水冷）中，R-134a 是使用最为广泛的一种替代品。其它的可供选择的替代品包括 R-410A、早期在欧洲有一定使用的 R-717(氨)和 R-1270(丙烯)。早先对用 R-407C 和 R-404A（不常用）来加快市场进入的热情已逐渐退却。一种新的也是使用 R-134a 的产品，使用紧凑型的、变频器驱动离心式压缩机来替代往复活塞和螺杆压缩机，可以在相同的制冷量下显著地提高制冷效率。

尤其在欧洲，人们仍然对在水源性的冷水机组中使用 R-407C 感兴趣。尽管按常规设计 R-407C 的能效会比 R-22 低 7%，但人们正在考虑从两个方面进行改进。使用真空液体热交换器也许能提高能效 2%。另一个可能的重大改进是利用 R-407C 具有高达 4 至 5 °C (7 至 9 °F) 温度滑移。通过使用逆流式热交换器使其接近热力学劳伦兹循环，可能可以提高能效 5%。

环保性能

虽然淘汰 R-22 的决定是由于 R-22 可能破坏平流层的臭氧制定的，在使用其替代品时还必须考虑到其他的环保性能。表 3 比较了 R-22 及其替代品的大气寿命 (τ_{atm})，臭氧层消耗潜值(ODP)和全球气候变暖潜值(GWP)。

τ_{atm} 表示制冷剂释放入大气直至分解、与其它化学物质反应、被冲刷或消除的平均保留时间。 τ_{atm} 也显示了平均大气停留时间，因此也就是可能的积累量。长的大气寿命意味着环境事故后环境恢复较慢。无论是已为人所知的还是新的环境顾虑都将会在未来被确认，因此人们期望使用大气寿命短的制冷剂。

表中给出的制冷剂寿命值是综合大气寿命。因为每一层中基本的消解机理有所不同，寿命也可以按对流层（人类生活的大气低层）、平流层（与全球臭氧消耗相关的一层）及更高层来划。

ODP 值是一个相对于 R-11 的标准指示值，它代表制冷剂（或其它的化学物质）破坏平流层臭氧分子的能力。表 3 所示的数据是被国际科学评估所采纳的模拟数值。表中混合工质的 ODP 值为质量平均值。

表3. R-22 及其替代品的环境性能

根据 Calm and Hourahan (2001), IPCC (2001), and WMO (2003)

| 制冷剂 | 大气寿命(年) | ODP | GWP(100年) |
|--|---------|-------|-----------|
| R-22 | 12.0 | 0.034 | 1780 |
| R-134a | 14.0 | ~ 0.0 | 1320 |
| R-407C | a | ~ 0.0 | 1700 |
| R-407E | a | ~ 0.0 | 1400 |
| R-410A | a | ~ 0.0 | 2000 |
| R-32 | 4.9 | ~ 0.0 | 543 |
| R-32/600 (95.0/5.0) | a | ~ 0.0 | 520 |
| R-32/600a (90.0/10.0) | a | ~ 0.0 | 490 |
| R-290 (propane) | b | 0.0 | ~ 20 |
| R-717 (ammonia) | b | 0.0 | < 1 |
| R-744 (carbon dioxide) | > 50 | 0.0 | ≡ 1 |
| R-1270 (propylene) | b | 0.0 | ~ 20 |
| <p>^a 由于混合工质的组分在大气中分离, 表中没有给出混合工质的大气寿命</p> <p>^b 未知.</p> | | | |

ODP值和GWP值都是根据 τ_{atm} 、定量的化学性能值和其他的大气数值推算得到的。对一个理想的制冷剂, τ_{atm} 值、ODP值和GWP值越低越好。但制冷剂的评估还必须考虑使用中也必须考虑制冷性能、安全性、使用时的化学稳定性和热稳定性。Calm和Hourahan⁴对这些参数、其它确定ODP值的方法及其意义作了讨论。

比较效率

制冷剂的比较效率主要取决于以下 5 个因素:

热力学性能

1. 制冷循环运行温度低于临界温度的程度, 这将影响蒸发潜热与液体定压比热的比值。
2. 饱和吸气线及饱和液相线的斜率, 这影响到过热、过冷以及节流的相对效果。该斜率主要受分子热容的影响。

传递性质

3. 热导率和粘度, 这将影响传热和流动摩擦力。

应用性能

4. 受制冷剂温度滑移及热交换器结构影响的热传递性能。
5. 流动的循环优化, 可以通过控制过热、过冷、效率增高器的分级, 以及热交换器液相线/吸气线的特征来实现。

图 1 表示了 R-22 及所选替代物的 T-S 关系, 该图可以定性地评价热力学性质对性能系

数 (COP) 的影响。图中熵为无量纲量, 并归一到两相区的宽度 (如, 饱和液体=0, 饱和气体=1)。注意 R134a 的临界温度 (也就是两相区的最高点处) 高于 R-22。同样, R-410A 和 R125 (R410A 中质量含量为 50%的一种组分) 的临界温度低于 R-22。在同样的蒸发和冷凝温度下, R134a 循环运行温度偏离临界温度的程度大于 R-22, R410A 和 R125 则偏离更大。

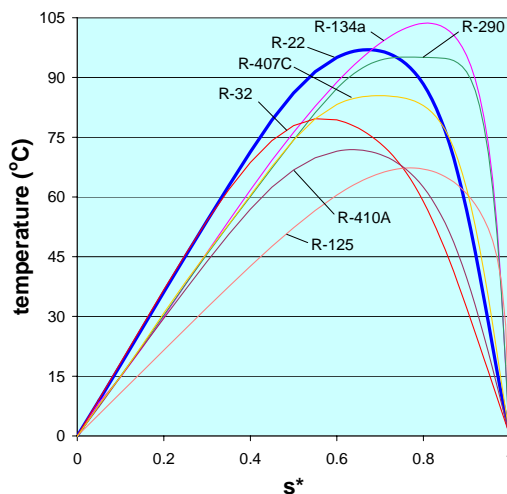


图1: R-22 及其替代品的温-熵曲线图
(为便于比较图中的标准熵为无量纲值)

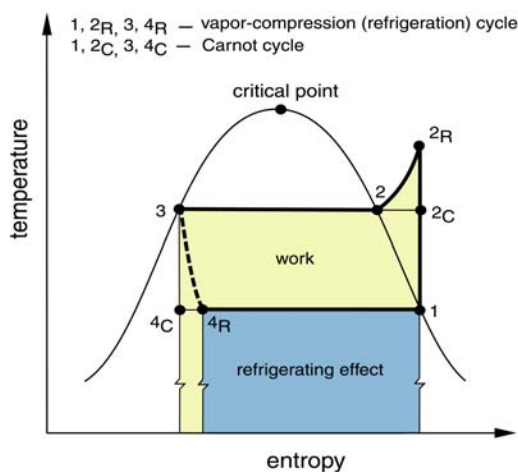


图2: 由温-熵 (T-S) 图表示的蒸汽-压缩 (制冷) 循环

图 2 用简单的温-熵 (T-S) 图表示了基本的蒸汽-压缩 (制冷) 循环。单位质量的制冷效果等于蒸发线下的面积, 驱动该循环所需的功为冷凝及过热气体降温线下的面积减制冷效果面积。根据卡诺循环, 4C-4R 线下的面积表示不可逆节流减少的制冷效果; 这个面积也代表节流 (损失的膨胀功) 引起的额外耗功。过热蒸汽角上的额外耗功用面积 2-2C-2R 表示。节流及过热蒸汽角的不可逆性受饱和线的影响。临界点处饱和线逐渐平坦并接近两相区, 该处不可逆损失较大。

R-410A 的临界温度低于 R-22, 由于该原因, 其过热蒸汽及节流的不可逆性要大于 R-22。R-410A 两种组分中, 尽管 R-125 抑制了 R-32 的可燃性, 但在感兴趣的情况下, R-32 的热力学性能优于 R-125。组分 R-125 还增加了混合物的 GWP 值。因此, 人们对 R-32 的其他混

合物可能更有兴趣。表 3 和表 4 列出并比较了两个例子，R32-600(95.0/5.0) and R-32/600a (90.0/10.0)。R-32 与丁烷、异丁烷的共沸混合物具有性能上的优势(Yoshida et al., 1999)，并且可以与矿物润滑油一同使用，但是，这两种混合物均有一定的可燃性。

热力学模型能够说明理论循环在不考虑传递性质、特定循环及润滑油影响时，可达到的效率。表 4 和表 5 给出了简单循环（单级且不考虑制冷剂的特殊性质）下，所选 R-22 替代物在单元式空调器及水冷制冷机中的计算制冷效率。表中给出了 COP 及单位功率（效率的倒数）值，其中单位功率在水冷制冷机中更常用。

表 4：单元式空调机制冷效率的比较

| 条件 | 理想循环 ^{a,b} | | | 典型条件 ^{b,c} | | |
|------------------------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------|---------|
| | (°C) | (%) | (°F) | (°C) | (%) | (°F) |
| 平均蒸发温度 | 10.0 | | 50.0 | 10.0 | | 50.0 |
| 过热 ^d | 0.0 | | 0.0 | 5.0 | | 9.0 |
| 平均冷凝温度 | 35.0 | | 95.0 | 46.1 | | 115.0 |
| 过冷 ^d | 0.0 | | 0.0 | 5.0 | | 9.0 |
| 等熵压缩效率 | | 100 | | | 70 | |
| 电机效率 | | 100 | | | 90 | |
| 控制和其他功率消耗 | | 0 | | | 0 | |
| | | COP | 单位功率 | | COP | 单位功率 |
| 制冷剂 | | (kW/kW) | (kW/RT) | | (kW/kW) | (kW/RT) |
| R-22 | | 9.85 | 0.36 | | 4.06 | 0.87 |
| R-32 ^e | | 9.55 | 0.37 | | 3.84 | 0.92 |
| R-134a | | 9.86 | 0.36 | | 4.13 | 0.85 |
| R-290 (丙烷) ^e | | 9.68 | 0.36 | | 4.05 | 0.87 |
| R-407C | | 9.60 | 0.37 | | 3.97 | 0.89 |
| R-407E | | 9.67 | 0.36 | | 4.00 | 0.88 |
| R-410A | | 9.29 | 0.38 | | 3.77 | 0.93 |
| R-32/600 (95.0/5.0) ^e | | 9.54 | 0.37 | | 3.85 | 0.91 |
| R-32/600a (90.0/10.0) ^e | | 9.43 | 0.37 | | 3.81 | 0.92 |

^a 上述条件是单元式空调器和热泵 “A” 条件下的标准参数 (ARI, 2003)。标准参数仅特指室内(26.7 °C, 80.0 °F) 和室外 (35.0 °C, 95.0 °F)的空气温度，但为了除湿在实际操作中将蒸发温度限制在 10 °C (50.0 °F)。

^b 计算参考CYCLE_D 3.0 (Domanski et al., 2003)。

^c 近似循环中制冷剂一侧所碰到的典型条件。通过优化过冷和过热、采用多段或修改类似的循环，能够达到高于所示“典型”效率的效果。同样地，差的设计可能导致低的能效。

^d 具代表性的过热和过冷随制冷剂的不同而不同；为了便于比较，表 4 选择几种代表性的物质。

^e 易燃。

传热效果差的制冷剂尽管可能有热力学上的优势，但其运行效果可能达不到传热效果好的制冷剂，补偿性设计可以弥补这个差异。同样，温度滑移大的混合物，如 R-407C 采用交叉流热交换器（空气或水与制冷剂交叉流动，其中，水较少见）可能达不到指示性能，但采用逆流式热交换器时却可能超过该性能。

一些替代物，如制冷机中的 R-134a，其效率大于 R-22。对于其他制冷剂，制造商已改

进了设备的设计以弥补理论效率损失。Domanski (1995)、Calm 和 Didion (1997)研究了理论效率较低的原因及调节方法。Domanski 和 Payne (2002)认为, R-410A 在典型运行工况下性能与 R-22 相当, 但是在高冷凝温度时, 其相对效率衰减较大。Spatz 及 Yana Motta (2003)讨论了压降及热交换器因素对效率提高的影响。Yoshida et al. (1999)认为 R-32 与碳氢化合物的共沸或近共沸混合物虽然可燃, 但可获得较高的效率, 并且可重新使用矿物润滑油,

关于二氧化碳(R-744, CO₂)的效率争议很多, 原因之一是其许多应用中需要采用跨临界循环而非传统的蒸汽压缩循环。这种古老的制冷剂在某些领域有重要的应用潜力。一个例子是用于工业复叠制冷系统低压段, 但是它更常用的是替代氨。Brown 等人 (2002) 详细分析了民用系统中采用传统蒸汽压缩循环和跨临界循环的模型。他们的结论是, 采用相同的热交换器时二氧化碳效率显著降低。他们认为较好的传递性质和压缩机等熵效率不同程度的提高并不能弥补其热力学缺陷。从效率这个方面讲, 这个缺点明显超过目前常用替代品。

表 5. 水冷式冷水机组的效率比较

| 条件 | 理想循环 ^{a,b} | | | 典型条件 ^{b,c} | | |
|--------------------------|---------------------|-----------------|----------------|---------------------|-----|------|
| | (°C) | (%) | (°F) | (°C) | (%) | (°F) |
| 平均蒸发温度 | 6.7 | | 44.0 | 5.0 | | 41.0 |
| 过热 ^d | 0.0 | | 0.0 | 1.0 | | 1.8 |
| 平均冷凝温度 | 29.4 | | 85.0 | 35.0 | | 95.0 |
| 过冷 ^d | 0.0 | | 0.0 | 5.0 | | 9.0 |
| 等熵压缩效率 | | 100 | | | 80 | |
| 电机效率 | | 100 | | | 95 | |
| 控制和其他功率消耗 | | 0 | | | 0 | |
| 制冷剂 | COP (kW/kW) | 单位功率 (kW/RT) | COP (kW/kW) | 单位功率 (kW/RT) | | |
| R-22 | 10.92 | 0.32 | 6.18 | 0.57 | | |
| R-32 ^e | 10.64 | 0.33 | 5.97 | 0.59 | | |
| R-123 | 11.42 | 0.31 | 6.52 | 0.54 | | |
| R-134a | 10.93 | 0.32 | 6.24 | 0.56 | | |
| R-407C | 10.69 | 0.33 | 6.09 | 0.58 | | |
| R-410A | 10.42 | 0.34 | 5.90 | 0.60 | | |
| R-717 (氨) ^e | 11.21 | 0.31 | 6.24 | 0.56 | | |
| R-1270 (丙烯) ^e | 10.72 | 0.33 | 6.10 | 0.58 | | |

^a 条件是水冷式冷水机组的标准参数。

^b 计算参考CYCLE_D 3.0 (Domanski et al., 2003)。

^c 近似循环中制冷剂一侧所碰到的典型条件。通过优化过冷和过热、采用多段或修改类似的循环, 能够达到高于所示“典型”效率的效果。同样地, 差的设计可能导致低的能效。

^d 具代表性的过热和过冷随制冷剂的不同而不同; 为了便于比较, 表 4 选择几种代表性的物质。

^e 易燃。

与表 3 所示的环保优势相比, 表 4 所示的丙烷(R-290)的效率和表 5 所示的丙稀(R-1270)效率说明了碳氢化合物的性能。他们的关键性的限制因素不是性能而是下文中讨论的安全性。

强调效率有两个原因，第一，全球气候变暖需要显著地提高性能，以降低与能源相关的温室效应气体排放。第二，将 R-22 应用于新设备的过程中，美国单元式设备（R-22 应用最多）的最低要求效率将提高 30%。

Kul et al. (Kul 2004) 总结了一系列氢氟醚 (HFE) 物质，包括 HFEs 与 HFCs 混合物作为 R-22 替代物的预计性能。得到的结论是其性能系数 (COPs) 是 R-22 的 80%~90%。他们指出 R-E125 (CHF_2OCF_3) 及 R-32 与 R-134a 或者 R-152a 的三元混合物是最有希望的候选物，尽管其 COPs 仅达到 R-22 的 90%~93%。

安全性考虑

引入含氟制冷剂是为了提高安全性。随着包括 R-22 在内的一些关键制冷剂的淘汰，一些支持者声称要回到被称作“天然制冷剂”的时代。这些天然制冷剂包括氨、二氧化碳和碳氢化合物。从表 5 中可以看出，氨 (R-717) 的效率和低成本很有诱惑力。氨在食品和饮料加工及冷库中使用最为广泛，但由于人们开始对其毒性（尤其对皮肤腐蚀）和可燃性的关注，阻碍了氨在追求舒适的一类系统中的应用。二氧化碳 (R-744) 是最早的制冷剂之一，现在仍然在工业系统中使用。但二氧化碳的操作压力要比 R-22 高得多，并且因为常规的冷凝温度超过其临界温度，需要采用跨临界循环。碳氢化合物，主要有乙烷 (R-170)、丙烷 (R-290)、正丁烷 (R-600)、异丁烷 (R-600a)、乙烯 (R-1150) 和丙烯 (R-1270)，具有较高制冷效率和一些含氟化合物类似的性能。碳氢化合物成本相对较低，环保性也被认为可以接受，但却极易燃烧，有很大的安全顾虑，使用时需要特别注意。

无论是在小型系统（例如在家用制冷和商用冷饮水机中替代 R-12）还是在封闭的大型系统中，欧洲国家对碳氢化合物的使用已普遍接受，氨和丙烯的市场相对较小，被允许在冷水机组中使用，但机房需要有保护设施。对可靠性的关注以及安全代码制度使北美和亚洲的发达国家失去了使用这些制冷剂的兴趣。ANSI/ASHRAE 15 号标准，即制冷系统的安全标准，规定了大型系统可燃性制冷剂的使用限量。制造商主要集中生产按 ANSI/ASHRAE 34 号标准（即制冷剂名称和安全分类）分类定为 A1 的制冷剂（按规定试验认为低毒性和没有出现火势蔓延），尤其对居民系统和小型商业系统。

材料相容性

引入 R-22 替代品后最大的变化是相关润滑油的选择。R-22 系统通常使用环烃矿物油，而氢氟烃 (HFC) 类替代品则需要合成的润滑油以便使互混的润滑油带回到压缩机。基本的新的润滑油是一系列粘度适当的聚酯 (POEs)，在特定场合也选用烷基苯 (AB) 和聚乙烯醚 (PVE)。虽然聚二醇润滑油在 R-134a 的汽车空调和运输制冷中普遍使用，但在固定系统并不常用。

润滑油选择非常复杂，使用者应当遵照设备制造商推荐，或者遵照压缩机制造商的推荐进行设备设计。对大多数合成润滑油而言，在家用制冷中使用时更需要除去制冷回路中的水分和污染物。

当从 R-22 转换为替代品时，在重新冲注时通常需要专门的处理程序将润滑油清除。一些制冷剂制造商可提供特殊配方的 R-22 替代品以便在转换制冷剂时不需要更换润滑油。由于 R-22 再现在或可预见的将来都容易获得，大多数使用者认为没有必要对现有的 R-22 设备作制冷剂更换。甚至在未来几年内生产的设备也是如此，只要设备在正常的寿命期内，同时维修时小心处理避免制冷剂的泄漏。

与其他材料的相容性非常复杂。空调和制冷剂工业发起了一项范围广泛、历经数年的称之为“物质相容性和润滑油研究计划 (MCLR)”的研究，以此来评定替代品与制冷回路所用材料的相容性。设备和零件生产商以及制冷剂和润滑油的生产商共同发起了另一项大范围的研究，寻找合格与替代品相容的材料。R-22 替代品的材料相容性问题已基本解决，但零件和设备设计者在选用合适的材料时必须小心从事。

氨是一种独特的 R-22 替代品。因为氨系统是针对非互容润滑油设计的，使用氨的设备与其他替代品有很大的不同。氨本身能与铜相容，但是当有水分存在时就情况就不同了。因此氨一般不能用于金属铜作成的热交换器、车辆排气管和管道。将 R-22 的设备改为氨通常是不可行的。

碳氢化合物制冷剂通常能与制造 R-22 设备的材料相容，能够使用与 R-22 相同或类似的润滑油。然而，他们的替代需要在安全方面引起高度重视，包括应用方面的特殊考虑。

表 6: 按设备类型分类的 R-22 的主要替代品

| 设备分类 | 典型应用 | 主要替代物 |
|-----------------------------|------------|--------------------------------|
| 窗式空调 | 家用 | R-410A |
| 单元式和分离式空调, 热泵 (空气对空气) | 家用, 商用 | R-410A |
| 应用系统: 集合终端空调, 地热、水源型热泵, 分体式 | 商业, 机关 | R-410A |
| 应用系统: 分体式 | 家用, 商业, 机关 | R-410A, R-407C |
| 大型弹体空调 | 商业, 机关 | R-134a, R-410A |
| 冷水机组 | | |
| 风冷 | 中央系统 | R-134a, R-410A, R-123 |
| 水冷 | 中央系统 | R-123, R-134a |
| 商业制冷 | 商业 | R-134a, R-404A, R-410A, R-507A |
| 工业制冷 | 工业 | R-134a, 氨 |
| 运输制冷 | 运输 | R-134a |

主要的 R-22 替代品

在 R-22 用量最大的单元式空调和加热泵中，R-410A 是其首要替代品，虽然由于 R-22 和 R-410A 由于性能不同需要不同的设计而不能直接替代。大多数大的设备制造商已经生产出通用规格的 R-410A 产品。大约 10% 的单元式产品现在已经使用 R-410A，但是在美国这一比例有望在 2007 年底超过 80%，并在 2009 年底接近 100%。

在重新设计的窗式空调机、成套终端空调机、地热、水源型热泵和小型冷水机组中，R-410A也是首要的替代品。当设备的容量增大了，对替代品的选择也会改变，尤其是对螺杆式压缩机的冷水机组。在这些中型的冷水机组中R-134a取代R-410A成为使用最广的制冷剂，尽管也有些制造商使用R-410A和其他制冷剂。R-134a操作压力低而R-410A的操作压力高，因此设备也有所不同。在那些离心式压缩机的超大型冷水机组中，制造商已经终止使用大部分的R-22，转而选择使用R-123和R-134a，但目前R-123的接受程度要高一些。作为HCFC，R-123也被指定生产淘汰，但由于其较低的ODP值以及其他一些已知的重要的益处，R-123的淘汰时间要比R-22迟。^[12,17,18]

表6按设备类型和应用情况的分类对主要的R-22替代品作了归纳。

当前R-22的生产要少于规定的生产份额。但由于对使用替代产品的津贴，对未来用量的潜在储备，替代品存在和大量回收利用已在使用的R-22，将来不可能会出现R-22短缺。任何预期未来产量不足的念头都会导致价格上升，这反过来会加速替代、更替替代品和回收，所以基本上并不存在短缺问题。

结论

种种迹象表明：R-22替代品将会有规律地替代R-22。对绝大多数用途而言，还没有合适的单工质制冷剂，混合工质还是较好的选择。空调和制冷剂工业已经研制出能够匹配或提高替代品效率的设备。前期产品最好的成果和淘汰CFC_s制冷剂的经验告诉我们：淘汰R-22不仅是可行的，而且能够加速技术进步。正如CFC的淘汰历程，除了结束生产，没有迹象表明将来会出现R-22供给短缺。

参考文献

1. ARI. 1998. *Standard for Water Chilling Packages Using the Vapor-Compression Cycle* (Standard 550/590-1998). Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
2. ARI. 2003. *Standard for Unitary Air-Conditioning And Air-Source Heat Pump Equipment* (Standard 210/240-2003). Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
3. Brown, J. S., Y. Kim, and P. A. Domanski. 2002. "Evaluation of Carbon Dioxide as R-22 Substitute for Residential Air Conditioning." *ASHRAE Transactions* 108(2).
4. Calm, J. M., and D. A. Didion. 1997. "Trade-Offs in Refrigerant Selections: Past, Present, and Future." *Refrigerants for the 21st Century* (proceedings of the ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, Gaithersburg, MD, 6-7 October 1997) 6-19. Atlanta, GA: ASHRAE.
5. Calm, J. M. 2000. "Options and Outlook for Chiller Refrigerants," *Proceedings of the Earth Technologies Forum* pp. 239-248. Arlington, VA: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
6. Calm, J. M., and G. C. Hourahan. 2001. "Refrigerant Data Summary." *Engineered Systems* 18(11):74-88.
7. Domanski, P. A., 1995. "Minimizing Throttling Losses in the Refrigeration Cycle." *Proceedings of the International Congress of Refrigeration* pp. 766-773. Paris, France: International Institute of Refrigeration.
8. Domanski, P. A., D. A. Didion, and J. S. W. Chi. 2003. *CYCLE_D: NIST Vapor-Compression Design Program* (version 3.0), Standard reference database 49. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (NIST).
9. IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis — Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations

- Environment Programme (UNEP). Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
10. Kul I., D. D. DesMarteau, and A. L. Beyerlein. 2004. "Coefficient of performance of fluorinated ether and fluorinated ether mixtures," paper 4711, *ASHRAE Transactions* 110(2)
 11. Minor, B. H. 2004. "R410A and R407C Design and Performance – A Literature Review," *Proceedings of the Earth Technologies Forum*. Arlington, VA: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
 12. Payne, W. V., and Domanski, P.A. 2002. "A Comparison of an R22 and an R410A Air Conditioner Operating at High Ambient Temperatures." *Proceedings of the 9th International Refrigeration Conference at Purdue*, paper R2-1. West Lafayette, IN: Purdue University.
 13. Spatz, M. W., and S. F. Yana Motta. 2003. "An Evaluation of Options for Replacing HCFC-22 in Commercial Refrigeration Systems." *Proceedings of the International Congress of Refrigeration* paper ICR0510. Paris, France: International Institute of Refrigeration.
 14. WMO. 2003. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*, report 47. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone and Research Monitoring Project. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP). Washington, DC, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Science. Brussels, Belgium: European Commission, Research Directorate General. Chaired by A-L. N. Ajavon, D. L. Albritton, G. Mégie, and R. T. Watson.
 15. UNEP. 1987 with subsequent amendments. *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP).
 16. UNEP. 2003a. *Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer* (sixth edition). Nairobi, Kenya: UNEP Ozone Secretariat
 17. UNEP. 2003b. *2003 Report of the Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee – 2002 Assessment*, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, January 2003
 18. Yoshida Y., M. Funakura, N. Okaza, and M. Matsuo. 1999. "Residential Use Air Conditioner for Advanced COP: Acceptability of HFC-32/Hydrocarbon Mixtures." Heat Pumps — a Benefit for the Environment (proceedings of the Sixth IEA Heat Pump Conference). Frankfurt am Main, Germany: VWEW-Verlag.

注：有些制冷剂或特殊生产过程或相关应用是受第三方专利的保护，因此这里所提及的参考资料并不表明其生产和使用不受限制。

R-22 Replacement Status

James M. Calm, P.E., Engineering Consultant, Fellow ASHRAE

Piotr A. Domanski, PhD, National Institute of Standards and Technology, Member ASHRAE

Abstract: The next step in the transition to environmentally safer refrigerants is phaseout of R-22. It is the most widely used refrigerant, both in the United States and on a global basis. Its application range in residential, commercial, industrial, and transport systems is broader than for any other refrigerant and spans cooling capacities from 2 kW to 33 MW ($\frac{1}{2}$ to 9,500 refrigeration tons, RT). The specific replacements depend on the applications.

This article was originally published in English as J. M. Calm and P. A. Domanski, "R-22 Replacement Status," *ASHRAE Journal*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), USA, 46(8):29-39, August 2004. 这篇作者为 J. M. Calm 和 P. A. Domanski 的英文原文 "R-22 Replacement Status" 刊登于 ASHRAE 杂志，美国采暖制冷与空调工程师学会 (ASHRAE)，46(8):29-39, 2004 年八月。