

汽车空调替代制冷剂的比较

孙西峰 韩杨

(东风汽车公司技术中心)

摘 要 目前在全球范围内对汽车空调系统替代制冷剂的研究主要集中在 CO₂ 和 R1234yf 两种制冷剂上,而国内还没有明确汽车空调替代制冷剂的研究的方向。本文详细介绍了两种潜在的替代制冷剂在环保性能、空调性能、安全问题、使用成本、可持续发展等方面的比较情况,为各相关单位选择替代制冷剂提供参考,并建议国内企业以 CO₂ 为主开展汽车空调替代制冷剂的研究。

关键词 汽车空调;制冷剂;替代;R1234yf;CO₂

Comparison of automotive air conditioning alternative refrigerants

Sun Xifeng Han Yang

(Dongfeng Motor Corporation Technical Center)

ABSTRACT The worldwide research on alternative refrigerants of automotive air conditioning focused on CO₂ and R1234yf, and domestic enterprises have no clear direction of this research. This article describes the comparison of two potential alternative refrigerants in terms of environmental performance, the air conditioning performance, security, cost, and sustainable development, it can provide reference to the relevant units of selection of alternative refrigerants, and suggested that domestic enterprises should carry out Research on alternative automotive air conditioning refrigerant based on CO₂.

KEY WORDS automotive air conditioning; refrigerant; alternative; R1234yf; CO₂

1 汽车空调替代制冷剂的现状

目前我国采用的汽车空调制冷剂主要是 R134a。但由于 R134a 具有很高的温室效应,根据 IPCC 的评估报告,其 GWP 值高达 1 430。并且 HFC 类物质的大量排放可能导致全球温度的升高,因此在全世界范围内已经有强烈的呼声要求限制其大规模使用。具体表现为在每年举行的联合国气候变化大会和蒙特利尔议定书缔约国大会上都有有关限制 HFC 类物质使用的议案提出。

在环保方面,欧盟在 2006 年 7 月 4 日颁布了关于汽车空调系统排放物的法规 DIRECTIVE 2006/ 40/ EC,规定从 2011 年 1 月 1 日起,禁止新设计的车型采用 GWP 值高于 150 的制冷剂,从 2017 年 1 月 1 日起,所有新生产的汽车禁止采用 GWP 值高于 150 的制冷剂。但由于受到欧洲金融危机的影响,欧洲各汽车生产主机厂未能在

2011 年 1 月 1 日完成所选择替代制冷剂的商业化投放工作,该法规被迫延迟到了 2013 年 1 月 1 日才正式实施,即新设计车型不允许采用 GWP 值高于 150 的制冷剂。2017 年以后在欧盟生产和销售的所有汽车都不能再使用 GWP 值高于 150 的制冷剂,包括 R134a。

在美国,相关环保法规的制定由美国环保部(EPA)负责。美国环保部通过其 SNAP(重大新替代物政策表)在 2011 年接受 R1234yf 为汽车空调制冷剂;在 2012 年接受 CO₂ 为汽车空调制冷剂;美国环保部已经收到将 R134a 从其 SNAP 汽车空调制冷剂清单中去除的申请,并准备在 2021 年开始实施。

在企业方面,美国杜邦公司和霍尼韦尔公司联合开发出了与 R134a 热物理性质类似的 R1234yf^[1],以替代 R134a 在汽车空调制冷剂方面

收稿日期:2015-05-10

作者简介:孙西峰,男,1993 年毕业于北京航空航天大学,现工作于东风汽车公司技术中心车身部,任产品开发主任工程师,东风汽车公司一级专家,主要研究方向为汽车空调系统。

的应用,并得到了美国通用汽车公司的积极响应。目前在欧盟销售的新设计车型大部分都采用了R1234yf为制冷剂。但戴姆勒-奔驰汽车公司公开质疑了R1234yf的安全性,包括其可燃性和燃烧后生成物的毒性,并宣布不会采用R1234yf为制冷剂,将以CO₂为制冷剂开发汽车空调系统。根据戴姆勒公司的预计,该公司将在2016年实现CO₂汽车空调系统的批量投产。德国的宝马汽车公司和大众汽车公司也分别宣布将开发并采用以CO₂为制冷剂的汽车空调系统。同时雷诺-日产联盟则选择混合制冷剂AC-6为空调系统的发展方向。

目前在世界范围内已经形成逐步限制并禁止R134a用作汽车空调制冷剂的趋势,但还没有统一的汽车空调替代制冷剂发展方向。由于中国已经是全球最大的汽车生产国和销售国,因此中国对汽车空调替代制冷剂的选择将在很大程度上影响到全球的汽车空调制冷剂发展方向。

2 汽车空调替代制冷剂的比较内容

目前,世界范围内的替代制冷剂方案有CO₂、R1234yf、R152a和AC6等。为减少对比工作量,聚焦主要问题,本文选择在所有制冷剂方案中最有影响力的两种方案进行对比,即CO₂方案和R1234yf方案。

根据东风汽车公司提出的替代制冷剂评价原则^[2],本文主要从环保指标、空调性能、安全因素、成本、可持续发展几个方面对上述两种制冷剂进行对比,并分别给出评价结果。

3 环保指标的对比

众所周知,制冷剂的环保性能主要从臭氧消耗潜能值ODP和全球变暖潜能值GWP两个指标进行比较。而CO₂和R1234yf都不会破坏臭氧层,ODP值均为零,因此本文主要从GWP值上进行比较。

3.1 全球变暖潜值GWP的比较

全球变暖潜值GWP表示相应的气体在不同时间内在大气中保持综合影响并吸收外逸热红外辐射的相对作用,也就是说GWP是对应物质产生温室效应的一个指数。我们通常提及的GWP指在100年的时间周期内,相应温室气体的温室效应对应于相同效应的CO₂的质量,所以CO₂的GWP值理所当然地为1。

尽管CO₂的GWP很低,但由于其在全球范围

内排放量巨大,因此总体来讲CO₂还是导致气候变暖的主要因素。为减少CO₂的排放,现在已经开发出了专门用于捕捉封存CO₂的技术,用于有大量CO₂排放的地方。

根据杜邦和霍尼韦尔公司确认的R1234yf的相关参数^[1],其GWP值为4,大气生命周期为11天。因此R1234yf的GWP值远低于欧盟规定的用于汽车空调制冷剂的上限值150。

按照欧盟在2006年7月4日颁布的关于汽车空调系统排放物的法规DIRECTIVE 2006/40/EC的规定,禁止采用GWP值高于150的汽车空调制冷剂。美国的EPA将入选SNAP的汽车空调制冷剂的标准也确定为GWP值要低于150。预计其他后续可能颁布的汽车空调制冷剂相关法规也会将GWP值低于150做为标准。

基于以上的判断,CO₂和R1234yf都远远低于GWP值为150的要求,应该都可以满足全球各地有关制冷剂的环保法规的要求。

3.2 制冷剂制造过程的环保问题

上节比较的是制冷剂生成后物质本身的GWP值问题,在这一点上两种制冷剂几乎分不出优劣。但在制冷剂的制造过程中的环保问题还是需要斟酌。

目前在工业上获取CO₂的方法^[3]主要是收集在生产其他工业产品过程中产生的CO₂副产品。例如在生产生石灰的工艺流程中,是通过加热大理石(CaCO₃)将其分解成生石灰(CaO)和CO₂。另外在酒精酿造、氨和氢气制取的过程中也会产生CO₂,矿物燃烧后的烟道气中也可分离出CO₂。混合在工业副产品中的CO₂还需要提纯。CO₂的提纯可以采用物理吸附的方法^[4],其中的变压吸附法具有工艺过程简单、能耗低、适应能力强、自动化程度高、技术先进、经济合理等优点,具有广阔的发展前景。

综上所述,工业生产不会为了获得CO₂制冷剂而专门进行生产,甚至从某种程度上讲,将CO₂用作制冷剂是减少了CO₂的排放,更加符合环保理念的要求。

而R1234yf的生产则复杂的多,目前这方面有商业价值的生产工艺均已被杜邦和霍尼韦尔申请了专利,我们也可以从这些已经公开的专利中了解其生产工艺。国内的氟化工行业^[5]也对R1234yf的合成进行了研究。综合以上信息可以

得出结论,无论采用何种工艺生产 R1234yf,都需要以 CFC、HCFC 或者 HFC 类物质为原料,并利用高温和催化剂进行化学合成和分解,生成 R1234yf 和其他副产物。预测在副产物中应有 HF_s、CFC_s 类物质生成。通常 CFC_s、HCFC_s 和 HFC_s 类物质都会破坏臭氧层,并存在严重温室效应等环保问题,因此需要严格控制这些副产品在生产过程中的排放,并对这些副产品进行无害化处理。但从公开的信息里还没有查找到对副产品进行无害化处理的相关介绍。

因此,我们可以认为在制冷剂的生产环节, R1234yf 还有很多环保方面的问题需要认真考虑并妥善处理;而 CO₂ 则不存在这些问题,甚至可以说使用 CO₂ 做为制冷剂是有利于环保的,可以减少 CO₂ 的排放。在环保方面进行对比的结果是采用 CO₂ 制冷剂更值得信赖。

4 空调性能的比较

空调的性能应该包括两个方面:制冷性能和制热性能。在常规动力车辆上,制热功能主要依赖发动机余热实现,不需要制冷剂的参与。但在新能源车辆上,尤其是在纯电动车辆上,没有余热可以利用,总体的发展趋势将会采用热泵制热,这就必须考虑制冷剂的制热性能。制冷剂的制冷制热性能与他们的热物理特性有直接关系,下面分别结合 CO₂ 和 R1234yf 的热物性参数对他们的空调性能从制冷、制热两个方面进行对比。为使对比具有参考性,以 R134a 的性能为基准分别与他们进行比较。

4.1 制冷性能的比较

文献^[6-7]从理论上对 R1234yf 的热物性进行了分析,文献^[8]给出了实际测试的 R1234yf 热物性参数,杜邦公司也给出了 R1234yf 的压焓图,如图 1 所示。国内一汽技术中心、上海三电贝洱汽车空调有限公司、上海交通大学制冷及低温工程研究所进行了试验台架和实车 R1234yf 空调系统性能测试。

根据以上文献和相关单位做的工作,可以知道 R1234yf 的饱和蒸发压力与温度的曲线与 R134a 非常接近(图 2),两者在 330K(57℃)以下时基本重合,在 330 K 以上, R134a 的饱和压力稍微偏高;并且 R1234yf 在各种换热表面上的换热系数基本与 R134a 类似。基于以上原因,在 R134a 空调系统中可以不做任何更改,直接换用

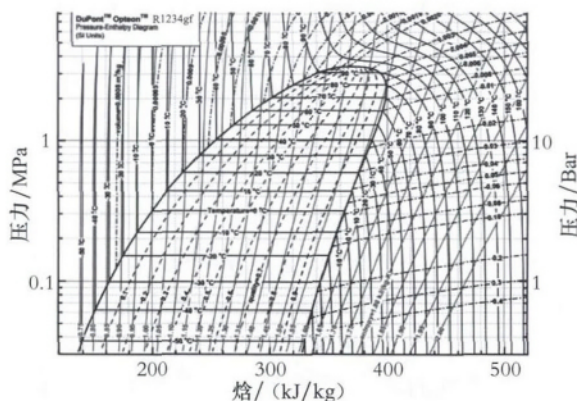


图 1 R1234yf 压焓图

R1234yf 制冷剂。在文献^[7]给出试验结果,在 R134a 空调系统上直接更换制冷剂,采用 R1234yf 在同等工况条件下制冷量下降 10%, COP 下降 5%。是由于以下两个原因:1. R134a 的饱和密度大于 R1234yf 的值,并随着温度的升高两者的差值变大(图 3)。这导致使用同样的压缩机,输送 R1234yf 的质量流量要小于 R134a;2. 从两种制冷剂的压焓图比较可以看出, R1234yf 的单位质量制冷量要小于 R134a,因此即使在质量流量相同的情况下, R1234yf 的制冷量也要小一些。

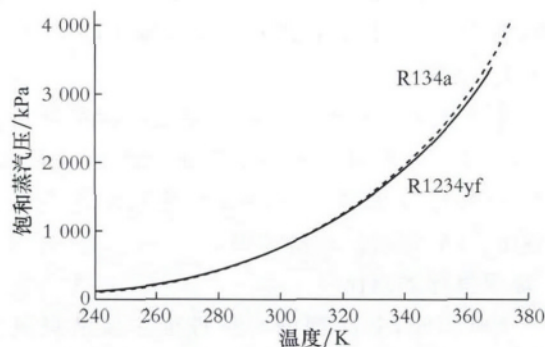


图 2 R1234yf 与 R134a 饱和蒸汽压与温度的曲线

为解决采用 R1234yf 后制冷量偏小的问题,可以对空调系统的设计方案做适当改进,例如可以增大压缩机排量、加大压缩机皮带轮的传动比,使用回热管技术等,都可以缓解采用 R1234yf 后制冷性能下降的问题。

在文献^[9]中,对 CO₂ 的热物性参数进行了详细介绍,总结起来 CO₂ 有如下几个显著特点:1. 临界点温度比较低, $T_c = 304.1282\text{K}$ (31℃左右), 临界压力比较高, $P_c = 7.3773\text{MPa}$, 即 CO₂ 空调系统需在压力很高的跨临界区域运行;2. 与其他制冷剂相比 CO₂ 黏度低, 因此流动性更好, 流动阻力低,

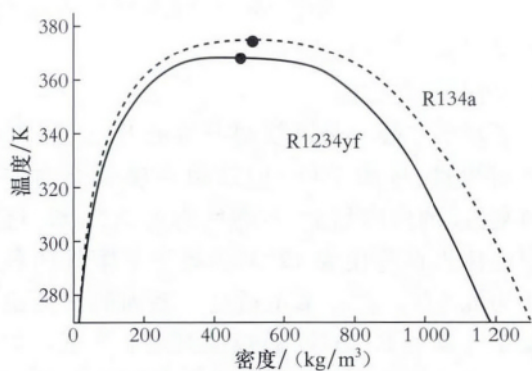


图3 R1234yf与R-134a饱和态密度曲线

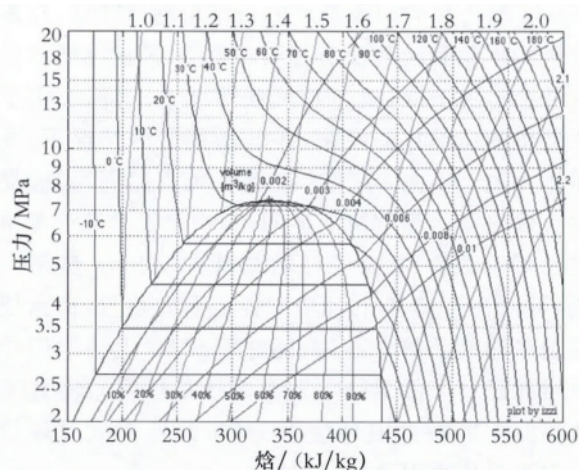
可以采用小管径和微通道换热器;3. 与其他制冷剂相比,CO₂换热系数高,因此可以用更少的制冷剂侧换热面积达到同等的换热量,有利于减少换热器的体积和重量;4. 饱和蒸汽密度大并且单位质量制冷量大,所以单位容积制冷量非常大,在0℃时几乎为R134a的8倍,可以使用排量非常小的压缩机实现同等的制冷量。以上特性使得汽车空调厂家必须为CO₂系统重新设计空调系统,不可能沿用原R134a系统的部件。

CO₂虽然有上述优点,但从图2所示的CO₂压焓图可以看出,如果仅采用简单蒸汽压缩制冷循环,系统运行的COP值随着工况的变化非常明显。尤其是随着冷却温度的升高,COP值会迅速下降。根据戴姆勒公司的统计结果,当环境温度为35℃时,CO₂与R134a系统的COP相当;环境温度低于35℃时,CO₂系统的COP值甚至更高一些;但是,一旦温度高于35℃,CO₂系统的COP值就会低于R134a系统。而35℃以上的温度对于中国大部分地区的夏季来讲是非常普遍的,因此要大面积推广CO₂系统就必须解决高温区域COP值低于R134a系统的问题。

仔细分析CO₂的压焓图,可以发现其等熵线的斜率比较大,这也就意味着CO₂在高压状态下膨胀功占总体内能的比例较高,如果只用膨胀阀或者节流管这种等熵膨胀装置,势必会损失掉这部分膨胀功。而如果能回收并利用这部分膨胀功,必将大大提高系统的COP值,因为除了回收的膨胀功可以抵消一部分压缩功以外,还额外增加了单位质量的制冷量。回收膨胀功的方法包括采用膨胀机节流、采用喷射器节流和采用涡流管节流等多种方式。其中采用膨胀机的方式虽然效率提升最好,但膨胀机结构复杂、精密,势必带来成

本的明显上升。比较可行的方法是采用喷射器或者涡流管进行节流,这两种机构都没有运动部件,可靠性好而且成本低廉。另外,采用双极压缩制冷循环和回热器循环也能起到提升CO₂系统COP的目的。上述提升CO₂空调系统COP值的方法值得认真研究。

通过以上制冷性能的对比,可以总结出以下结论:R1234yf不需要对原R134a系统做改动就可以正常工作,但制冷性能略低,如果对系统设计方案做适当改进提升,可以达到R134a系统的制冷性能和COP值。而CO₂空调系统则必须进行全新的设计,并且仅采用简单的跨临界蒸汽压缩制冷循环的COP值与R134a系统比并没有优势,只有采用改进后的制冷循环技术的系统才能超越R134a系统的COP值。

图4 CO₂压焓图

4.2 制热性能的比较

汽车行业的发展趋势之一是沿着常规动力汽车到混合动力汽车再到电动汽车的方向进行,这意味着整车的能源使用效率会越来越高,导致目前用于汽车空调制热的发动机余热会越来越少,甚至没有余热可以利用。在这种情况下,还要保证乘员舱的热舒适性,就必须配备专门的热源。目前,某些新能源汽车已经配备了PTC电加热器,以解决低温制热问题。但PTC的加热效率只会小于1,因此能源消耗巨大,将严重影响到整车的能源分配和续航里程。长远来看,采用PTC加热器的方案并不是长久之计。为提高空调系统制热的能源使用效率,采用热泵加热方案是汽车空调系统必然的发展趋势。因此,有必要对两种制冷剂的热泵制热性能进行对比分析。

由于 R1234yf 尚未得到普遍应用,因此国内缺乏将其应用于热泵系统的试验研究报告。对比 R1234yf 与 R134a 的饱和蒸发压力与温度的关系、饱和蒸汽密度、压焓图等信息,我们可以得出结论,R1234yf 的热泵性能应该与 R134a 接近,不会超过 R134a 系统。而采用 R134a 为制冷剂的热泵在国内已经有很多试验研究成果,因此本文直接进行对比的是 R134a 的热泵加热性能和 CO₂ 的热泵制热性能。

目前 R134a 热泵系统遇到的主要问题是在低温环境下系统的制热能力和性能系数迅速下降。在 -5℃ 以上的环境中,R134a 热泵系统的制热性能较好,基本能满足整车加热的需求;但在 -10℃ 以下的环境温度中,该系统基本无法获得有效的热量。其主要原因在于:1. 随着温度的降低,R134a 制冷剂的饱和蒸汽的密度也迅速降低,在压缩机的排量和转速没有提升的情况下制冷剂质量流量会迅速下降,致使系统制热能力下降;2. 由于压缩机的压缩比的限制,在低压很低的情况下,高压压力也上不去,导致冷凝温度无法提高,无法提供有效热量。为解决上述问题,中原工学院^[9]等单位已经开发了带吸气补焓功能的 R134a 热泵系统,可以在 -15℃ 的环境中提供有效热量,但系统的制热性能系数并不高,能达到 1.4。上述原因导致目前已装车的 R134a 热泵系统都必须加装 PTC 加热器才能在低温环境下工作,并且在低温环境下主要是依靠 PTC 进行加热。

目前空调制冷行业公认,CO₂ 是最适宜用于热泵制热的制冷剂。CO₂ 用于热泵系统就没有上述问题的困扰,这是由 CO₂ 的自身物理特性决定的。首先 CO₂ 是一种高压制冷剂,-20℃ 对应的蒸发压力为 2 MPa,-10℃ 对应的蒸发压力为 2.7 MPa,0℃ 对应的蒸发压力是 3.5 MPa,因此相对于 R134a,制冷和制热工况的压缩比变化相对要小一些,而且饱和蒸汽的密度也高一些,所以在以制冷工况为基础设计的压缩机,无需更改压缩机的结构就可以实现热泵工况的正常运行。根据文献^[10]给出的数据,在环境温度 -20℃,车内温度 20℃ 的工况下,CO₂ 热泵系统制热 COP 值可以达到 2。

综合以上情况,CO₂ 的热泵制热性能明显优于 R1234yf。

5 安全问题的比较

安全问题向来是替代制冷剂选择要考虑的重

点问题。本文从可燃性、毒性、制冷剂高压问题 3 方面进行安全问题的对比。

5.1 可燃性的比较

霍尼韦尔公司公开资料^[1]显示 R1234yf 具有中度可燃性,按照 ISO—817《制冷剂命名与安全等级划分》的规则划分,可燃性为 A2L 级,燃烧上限的体积百分比为 12.3%,燃烧下限的体积百分比为 6.5%。霍尼韦尔通过一系列的试验论证在整车上发生 R1234yf 燃烧的概率非常低。但戴姆勒公司公开质疑其结论,并公布了他们的测试中发生的 R1234yf 燃烧的具体细节。

从整车的观点看,车上有很多产品不可避免地要采用可燃甚至是易燃物质,例如各种润滑油、燃油等,但这并不可怕,关键是要从设计上尽量避免可燃、易燃物质的燃烧,尤其是在发生碰撞等极端情况下也要尽可能防止可燃物燃烧或者降低其燃烧速度。在我国的安全碰撞法规中对燃油泄漏有明确要求:燃油等可燃物在发生碰撞后的最初 5 分钟内泄漏的速率不能超过 30 g/min。通常,空调系统需要在车头部位设置散热器,以便与环境空气进行热交换。在发生碰撞时,安装在车头部位的散热器最容易损毁并引发制冷剂泄漏,因此如果采用 R1234yf 为制冷剂,空调系统设计时应考虑采取哪些具体措施防止碰撞时制冷剂泄漏并燃烧。

众所周知,CO₂ 为不可燃的物质,甚至可以用来做灭火剂。车辆碰撞引发的制冷剂泄漏不会导致燃烧等更进一步的危险出现。因此从可燃性上来讲,CO₂ 的安全性明显优于 R1234yf。

5.2 毒性的比较

CO₂ 和 R1234yf 本身都没有毒性。但在封闭空间内,当 CO₂ 的体积浓度高于 5% 时,容易引起窒息等危害人体健康的危险,因此 CO₂ 空调系统的设计应避免 CO₂ 气体泄漏至乘员舱。笔者认为虽然这方面的风险并不大,但在空调系统的设计上也应规范具体应对措施。首先应确保乘员舱内只有空调系统的低压部件,并在系统的高压区域设置泄压阀等装置,尽可能使 CO₂ 的泄露只发生在乘员舱以外的高压区域;其次要保证乘员舱的通风良好,空调系统优先处于外循环状态,经常补充外界新鲜空气,使乘员舱内即使发生了泄漏,CO₂ 的浓度也不要超过 5%。上述应对措施应该是空调系统的常规做法,并不仅针对 CO₂ 空调

系统。

另外,如果 R1234yf 发生燃烧,其生成物包含氟化氢等一系列物质,而氟化氢具有强烈的腐蚀性和毒性,即使只以气体状态接触人体也会带来严重的伤害,主要作用在皮肤、眼睛和呼吸道。这就要求空调系统设计人员在进行 R1234yf 系统设计时必须采取相关防范措施。由此也可见防止 R1234yf 燃烧的重要性,因为不燃烧就不会生成氟化氢。

5.3 高压带来的安全问题

与 R134a 空调系统比较,CO₂ 空调系统的运行压力要高出 7 倍,正常运行高压达到 14MPa,因此也有人提出是否存在高压容器爆炸的危险。笔者认为这种风险基本处于可控的状态。首先 CO₂ 空调系统基本都采用微通道换热器和小直径管路连接,并将气液分离器设置在低压侧,使得 CO₂ 的充注量大大减少,限制了其爆炸能量的范围;其次空调系统都设置有高压报警装置和泄压阀,当压力异常升高并超过其限值时就会切断压缩机的运行甚至主动排放减压,阻止了爆炸能量的进一步蓄积。

另外,汽车上运行压力高于 CO₂ 空调系统的设备,例如 ABS 刹车系统、高压燃油喷射系统和 LPG 高压气瓶等,但几乎没有看到相关部件因高压而导致爆炸的报导,这也从侧面说明高压爆炸的风险通过采取相关的措施是可控的。

6 应用成本的比较

6.1 制冷剂成本的比较

目前 R134a 在国内属于充分竞争的商品,有巨化、中化、东岳化工等众多生产厂家,因此其价格主要根据市场供求关系决定。据估算 R134a 制造成本大概在每吨两万元左右,其市场销售价在每吨 4 万元左右浮动,每辆车使用制冷剂的成本在 20 元左右。这样的价格还是比较合理的,既保证了生产厂家合理的利润,也不会出现高的离谱的价格。

CO₂ 通常是其他工业产品的副产品,因此价格非常低廉,其价格主要由包装、运输的成本决定,不同地区会有一些差别,通常在每吨 600 元左右。按此计算,每辆车的制冷剂成本约为 0.3 元,几乎可以忽略不计。

由于 R1234yf 有商业价值的生产工艺方法都被杜邦和霍尼韦尔公司申请了专利保护,因此

目前只能从这两家公司的销售渠道采购 R1234yf 制冷剂。由于缺少市场竞争,导致其价格异常偏高,达到每公斤 700 元,折合到每辆车使用的制冷剂,价格约为 400 元左右。

通过对比,可以看出 R1234yf 的价格异常偏高,与 CO₂ 不在同一个数量级上,相差 3 个数量级。

6.2 系统零部件制造成本的比较

两种制冷剂都有许多改进方案以提高系统的性能,并且这些改进方案都会增加成本,但如果按照各自改进方案分别进行详细成本分析,则不利于对比。为此,本文暂不考虑各种改进方案,而是以基本蒸汽压缩循环系统为基础进行对比。对比的部件包括压缩机、蒸发器、冷凝器和制冷连接管路。如前文所述,R1234yf 基本可以沿用 R134a 系统,所以各总成的生产工艺没有发生变化,因此各总成成本变化不明显,下面主要针对 CO₂ 系统进行分析。

CO₂ 压缩机与其他制冷剂压缩机相比,最主要的特点有两个:一是运行压力高,二是排量小,仅为 R134a 压缩机的 1/5 左右。而这两个因素对成本的影响是相反的。排量小可以缩小压缩机的体积,减少材料用量,而压力高又导致要增加高压区域的材料厚度以提升耐压能力。从批量生产压缩机的角度来看,排量减小带来的成本降低应该更加明显一些,例如铝压铸材料可以更改为铸铁材料、活塞压缩机的汽缸数量可以减少、旋叶和涡旋压缩机可以减少汽缸高度和面积,有利于提升耐压强度和加工精度。因此从压缩机生产的角度考虑,除了需要新投入加工工装和模具,不会增加初期投资,压缩机批量生产的成本还有可能降低。

最适宜 CO₂ 系统的两器就是现在已经普遍采用的微通道平行流换热器,该技术最初就是为 CO₂ 系统开发的。微通道的小管径带来的耐压性好、制冷剂侧换热面积大的特点非常适合 CO₂ 的特点。由于微通道换热器具有众多的优势,反过来又被应用到现生产的 R134a 系统中。因此对于蒸发器和冷凝器生产来讲,CO₂ 系统的两器生产可以保留目前大部分的生产工艺和生产设备,仅需更改扁管和集流管生产的工装即可。适合 CO₂ 制冷剂的扁管厚度大约在 1.5 mm 左右,制冷剂通道需要根据 CO₂ 的特性由目前常用的方形带内肋形式更改为直径为 0.8 mm 的圆形,这样减少了制冷剂换热面积但增大了耐压能力;集流管尤其是气

冷器的集流管也需要变更为更耐压的双圆管形式。由于仅仅是扁管和集管的形式变化,因此两器的成本可以说基本不变。

CO₂的制冷管应该与 R134a 制冷管有很大的区别,包括管接头、硬管和软管部分。根据康迪泰克公司公布的信息,CO₂的低压软管部分仍然可以采用带尼龙层的多层橡胶管,但高压软管部分与 R134a 系统有很大区别,应该采用金属波纹管。至于硬管部分,则可以采用不锈钢管或者双层卷焊管,以保证耐压 30 MPa 以上。预计管路系统在硬管上的成本可以降低,但在软管,尤其是高压软管部分,有可能使成本上升,总体来说 CO₂的管路的成本应该可以与 R134a 持平。

综上所述,批量生产后的 CO₂空调系统的成本应该与 R134a 和 R1234yf 系统差别不大,甚至有降低成本的空间。

6.3 系统开发成本的比较

CO₂和 R1234yf 的系统开发成本有比较大的差异。R1234yf 可以完全采用 R134a 已经成熟的技术,因此在系统开发上不应该产生太多的费用。而 CO₂系统则完全不一样,所有工况都与已经熟悉的 R134a 不一样,尤其是耐压性的要求更加严格,导致每一个部件都需要重新开发,包括压缩机、两器、节流装置和连接管路。另外,为提高 CO₂系统的性能还需要采用二次压缩、膨胀功回收等系统改进方案,前期系统开发工作量应该非常大。另外,为支撑上述开发工作,还必须投入相应的试验设备和试制手段,在量产阶段还需要为新部件准备生产设备、工装模具等。综合以上情况,CO₂系统的前期开发成本应该比 R1234yf 高出很多。

7 可持续发展应用的比较

每次制冷剂替换都会给空调行业的平稳发展带来冲击。这对行业里占有优势的老企业而言是一次危机,因为之前已建立起来的行业优势可能因此而不复存在;但对弱势企业和新加入到行业里的企业来讲,这则是一个机遇,因为可以和行业里的优势企业站在同一起跑线上开始竞争了。但无论哪种企业此时一定都想选择一种后续不会再更改的制冷剂,因为他们都希望今后努力建立起来的竞争优势不要再次因为制冷剂的替代而被抹平。

目前看来 R12 和 R134a 这类化学合成制冷剂

都是可持续发展的制冷剂,由于不同的环保原因已经或将要被禁止使用。那么新的化学合成制冷剂 R1234yf 是否还会由于类似的问题被禁止使用?我们现在很难回答这个问题。但对于天然制冷剂 CO₂来讲,可以说基本不存在这样的风险,因为 CO₂长期存在于自然界中,并且汽车空调行业的用量相对于 CO₂总体排放量来讲所占的比例非常少,其排放量对环境不会造成明显影响,自然也就不可能被禁止使用。

另外,汽车空调技术的发展也要紧跟整车的技术发展趋势。前文已经提及由于整车是按照常规动力车辆→混合动力汽车→电动汽车的方向发展,所以热泵系统必将是汽车空调系统长期发展的方向。对比 CO₂和 R1234yf 应用于热泵系统的性能比较,CO₂空调系统在这方面占有明显优势。

因此,从可持续发展应用的角度考虑,CO₂空调系统明显优于 R1234yf 空调系统。

8 结论

根据以上对比分析,可以得到以下结论:1) CO₂和 R1234yf 的 GWP 值都非常低,都能满足欧盟法规的要求,但 R1234yf 制造过程中的环保问题还需进一步落实;2)采用针对 CO₂特性优化后的空调系统的制冷 COP 值高于 R1234yf 空调系统,并且 R1234yf 不适合用于低温环境下的热泵系统;3)CO₂和 R1234yf 两种空调系统发生安全事故的概率都较小,但都应在系统设计上采取相应的预防措施;4)由于存在专利垄断,R1234yf 制冷剂价格异常偏高,批量生产的 CO₂和 R1234yf 系统零部件成本基本相当,但 CO₂系统的前期开发成本要明显高于 R1234yf 系统;5)从可持续发展应用的角度考虑,CO₂是汽车空调系统最终必然采用的制冷剂。

在此,笔者建议国内的汽车生产厂家联合起来,明确以 CO₂为汽车空调替代制冷剂的工作方向;各汽车空调零部件厂家积极响应尽早投入到 CO₂空调系统的开发工作中,在制冷剂替代的过程中掌握先机,获得技术优势和市场优势。

参考文献

- [1] 曹霞. HFO1234yf——新一代汽车空调制冷剂[J]. 制冷与空调, 2008(06):55-61.
- [2] 孙西峰. 汽车制造企业选择汽车空调制冷剂的原则[J]. 制冷与空调, 2014(01):38-41.
- [3] 韩美. 二氧化碳的生产、应用及市场分析[J]. 低温与

- 特气,2004(03):3-5.
- [4] 陈进,兰治淮.工业废气二氧化碳的回收利用[J].化工科技市场,2006(11):28-30.
- [5] 杨刚,杨会娥,樊建平 等. R1234yf 合成的研究进展[J].有机氟工业,2009(3):12-15.
- [6] 汪训昌.低 GWP 不饱和氟化烯烃替代 HFC 的前景预测[J].暖通空调,2010(5):47-56.
- [7] 朱正园,柳建华,张良,等. R1234yf 与 R134a 比较分析[J].低温与超导,2012(4):66-69.
- [8] 汪训昌. R1234yf 与 R1234ze(E) 热物性参数测试结果综述[J].暖通空调,2010(7):29-39.
- [9] 周光辉,陈杰,陈通,等.电动汽车热泵空调系统低温供热实验研究[J].低温与超导,2015(03):42-45.
- [10] Andrew Musser and Predrag S. Hrnjak. Mobile Heat Pump Exploration Using R445A and R744[J]. International Refrigeration and Air Conditioning Conference,2014:1514.

(上接第 4 页)

(2) 增强知识产权保护意识,加强企业专利和知识产权制度建设工作,一方面需要积极采取措施申请专利,在产品投入市场前专利先行;另一方面需要注意竞争对手的市场行为,加强专利预警。

(3) 高效、节能、环保是世界发展的潮流,作为当今世界上最先进的能源利用产品之一,应进一步加大对热泵热水机投入及研发力度。

参 考 文 献

- [1] 王博. CN1084266A[P/OL],1994 年
- [2] 空气能热泵热水机[J],机电信息,2011(28):2.
- [3] 西安交通大学, CN102506465A[P/OL],2012 年.
- [4] 东南大学, CN101644483A[P/OL],2010 年.
- [5] 华北电力大学(保定), CN101852490A[P/OL],2010 年.
- [6] 三洋电机株式会社, CN1403746A[P/OL],2003 年.
- [7] 量子能技术股份有限公司, CN1568417A[P/OL],2005 年.
- [8] 日立家用电器公司, CN1459607A[P/OL],2003 年.
- [9] 日立空调·家用电器株式会社, CN102348938A[P/OL],2012 年.