

文章编号:0253-4339(2021)02-0045-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.02.045

我国空调用制冷剂回收再生的机遇与挑战

宓宏¹ 王双双¹ 江天乐¹ 王月² 邬昕² 王海鹰²

(1 浙江衢州联州致冷剂有限公司 衢州 324000; 2 同济大学机械与能源工程学院 制冷与低温工程研究所 上海 201804)

摘 要 中国是全世界最大的制冷设备与制冷剂生产国和消费国,全球制冷剂超过 1/3 的需求量来自中国。预计至 2030 年,我国制冷空调行业制冷剂消费总量将达 15.4~17.8 万吨。本文介绍了国内外制冷剂回收再生技术及设备现状;调研了国内外对于制冷剂回收、净化再利用的相关标准,以及制冷剂中不同污染物含量的检测方法;分析了常用的传统制冷剂碳排放评价指标及优缺点,探讨了一种适合制冷剂回收再生过程的制冷剂气候性能评估指标;提出制冷剂回收、净化再利用的机遇与挑战。

关键词 制冷剂回收;制冷剂检测;R134a;R407C

中图分类号:TB61⁺2; TB64 **文献标识码**: A

Opportunities and Challenges of Recycling Refrigerant for Air Conditioning in China

Mi Hong¹ Wang Shuangshuang¹ Jiang Tianle¹ Wang Yue² Wu Xin² Wang Haiying²

(1. Quzhou Lianzhou Refrigerant Co., Ltd., Quzhou, 324000, China; 2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract China is the world's largest producer and consumer of refrigeration equipment and refrigerants. More than one-third of the global demand for refrigerants originates from China. It is estimated that, by 2030, the total refrigerant consumption in the refrigeration and air-conditioning industry will reach 154 000 t to 178 000 t in China. In this study, the current status of domestic and foreign refrigerant recovery and regeneration technologies and equipment has been presented. Moreover, the domestic and foreign standards for refrigerant recovery, purification, and reuse and detection methods of different contaminant contents in refrigerants were investigated and the carbon emission evaluation indicators and advantages and disadvantages of commonly used traditional refrigerants were analyzed. A type of refrigerant climate performance evaluation index suitable for the process of refrigerant recovery and regeneration has also been discussed. Finally, the opportunities and challenges of refrigerant recovery, purification, and reuse were discussed.

Keywords refrigerant recovery; refrigerant detection; R134a; R407C

《蒙特利尔议定书基加利修正案》规定,包括中国在内的大多数发展中国家制冷剂削减时间表为:2024 年开始冻结在基线以下,2029 年削减基线年的 10%,2035 年削减 30%,2040 年削减 50%,2045 年削减 80%。其中,基线值为以 CO₂ 当量为单位的 100% 的 HFC 基线年(2020—2022 年)3 年均值加 65% HCFC 基线年值^[1]。目前,我国针对 R22 制冷剂采用生产和使用配额制政策^[2],2019 年 R22 的产量为 26.68 吨,相比 2018 年削减 3%。HCFCs 类制冷剂主要采用 R134a、R407C、R410A 等 HFCs 进行替代^[3]。对已使用过的制冷剂进行回收再生处理,可以减少削减制冷剂生产配额产生的影响^[4]。在家用、商用和车用空调领域,欧洲、北美、日本于 20 世纪已经出台了制冷剂回收、净化的标准及政策^[5],制冷剂年回收

量均超过 1 000 吨^[6]。我国先后在 2008 年和 2010 年,出台了对家电和汽车空调领域制冷剂回收、净化的政策。截至 2017 年,我国家电行业制冷剂年回收量已超过 300 吨。2019 年,方文敏等^[7]对上海地区制冷空调行业的调研显示,上海 200 余家企业中,有 91 家对生产及使用过程中的制冷剂进行了回收,制定了回收制冷剂相关规定的有 70 家,但对回收后制冷剂进行登记的仅有 48 家。我国制冷剂回收、再生的比例还很低。

本文基于对国内外空调用制冷剂回收、净化的发展现状,回收、净化原理与设备,以及再生制冷剂相关杂质含量测定方法与标准的调研分析,提出我国制冷剂回收、再生所面临的机遇与挑战,并尝试探讨一种适合制冷剂回收再生过程的制冷剂气候性能评估指标。

表 1 国外制冷剂回收、再利用相关标准

Tab.1 Relevant standards of refrigerant recovery, recycling and reclaiming abroad

标准类型	标准号	标准名
SAE	J1657_201104	Selection criteria for retrofit refrigerants to replace CFC-12 (R-12) in mobile air-conditioning systems
	J1657_199902	
	J1658_201501	Alternate refrigerant consistency criteria for use in mobile air-conditioning systems
	J1658_199902	
	J1659_201111	Vehicle testing requirements for replacement refrigerants for CFC-12 (R-12) mobile air-conditioning systems
	J1659_199902	
	J1660_201104	Fittings and labels for retrofit of CFC-12 (R-12) mobile air-conditioning systems to HFC-134a (R-134a)
	J1660_199811	
	J1661_201104	Procedure retrofitting CFC-12 (R-12) mobile air-conditioning systems to HFC-134a (R-134a)
	J1661_199811	
	J1662_201111	Compatibility of retrofit refrigerants with air-conditioning system materials
	J1662_199811	
	J1991_201108	Standard of purity for use in mobile air-conditioning systems
	J1991_199902	
	J1991_198910	
	J2064_201508	R134a refrigerant automotive air-conditioned hose
	J2064_201102	
	J2064_200512	
	J2064_199906	
	J2064_199808	
	J2064_199306	
	J1989_199811	Recommended service procedure for the containment of CFC-12 (R-12)
	J1989_198910	
	J2211_201111	Recommended service procedure for the containment of HFC-134a (R-134a)
	J2211_199811	
	J2296_201206	Retest of refrigerant container
	J2296_199811	
	J2296_199609	
	J1732_201111	HFC-134a (R-134a) refrigerant recovery equipment for mobile automotive air-conditioning systems
	J1732_199811	
	J1770_201011	Automotive refrigerant recovery/recycling equipment intended for use with both R12 and R134a
	J1770_199510	
	J1990_201105	Recovery and recycle equipment for mobile automotive air-conditioning systems
	J1990_199902	
	J1990_199203	
	J1990_198910	CFC-12 (R-12) refrigerant recovery equipment for mobile automotive air-conditioning systems
	J2209_201108	
	J2209_199902	
	J2209_199206	HFC-134a (R-134a) recovery/recycling equipment for mobile air-conditioning systems
	J2210_201011	
	J2210_199902	
	J2210_199112	Ultraviolet leak detection; stability and compatibility criteria of fluorescent refrigerant leak detection dyes for mobile R-134a and R-1234yf (HFO-1234yf) air-conditioning systems
	J2297_201301	
	J2297_201102	
	J2297_199609	Ultraviolet Leak detection; procedure for use of refrigerant leak detection dyes for service of mobile air-conditioning systems
	J2298_201108	
	J2298_199609	Ultraviolet leak detection; performance requirements for fluorescent refrigerant leak detection dye injection equipment for aftermarket service of mobile air-conditioning systems
	J2299_201201	
	J2299_199609	

续表 1

标准类型	标准号	标准名
AHRI	AHRI Standard 700-2017	Specifications for refrigerants
	AHRI Standard 700-2011	Specifications for fluorocarbon refrigerants
	AHRI Standard 700-2006	Specifications for fluorocarbon refrigerants
	Appendix C to AHRI Standard 700-2014	Analytical procedures for AHRI Standard 700-2014-Normative
	Appendix D to AHRI Standard 700-2014	Gas chromatograms for AHRI Standard 700-2014-Informative
	Appendix D to AHRI Standard 700-2006	Gas Chromatograms for AHRI Standard 700-2006-Informative
	AHRI Guideline-N-2017	Assignment of refrigerant container colors
	AHRI Guideline-K-2015	Containers for recovered non-flammable fluorocarbon refrigerants
	AHRI Standard 740-2016	Performance rating of refrigerant recovery equipment and recovery/recycling equipment
	AHRI Standard 740-1998	Refrigerant recover/recycling equipment
ASHRAE	AHRI Guideline-Q-2016	Content recovery & proper recycling of refrigerant cylinders
	ASHRAE 34-2016	Designation and safety classification of refrigerants
	ASHRAE 34-2010	
BS	BS 5598-1 : 1978	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 1: Sampling of liquid products
	BS 5598-2 : 1979	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 2: Sampling of liquefied gases
	BS 5598-6 : 1979	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 6: Determination of acidity of fluorochlorinated hydrocarbons
	BS 5598-7 : 1980	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 7: Methods of test for methyl chloride and ethyl chloride
	BS 5598-8 : 1980	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 8: Determination of non-volatile residue in fluorinated hydrocarbons
	BS 5598-9 : 1981	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 9: Determination of boiling range of chlorofluorinated hydrocarbons
	BS 5598-11 : 1983	Methods of sampling and test for halogenated hydrocarbons — Part 11: Determination of “inert” gas content of chlorofluorohydrocarbons, gas chromatographic method, general principles
ISO	ISO 817 : 2014	Refrigerants-designation and safety classification
	ISO 817 : 2009	
	ISO 817 : 2005	
	ISO 17584 : 2005	Refrigerant properties
	ISO 917 : 1989	Testing of refrigerant compressors
	ISO/FDIS 20854 : 2018	Thermal containers-safety standard for refrigerating systems using flammable refrigerants-requirements for design and operation
	ISO 11650 : 1999	Performance of refrigerant recovery and/or recycling equipment
	ISO 5149-1 : 2014	Refrigerating systems and heat pumps-safety and environmental requirements — Part 1: Definitions, classification and selection criteria
	ISO 5149-2 : 2014	Refrigerating systems and heat pumps-safety and environmental requirements — Part 2: Design, construction, testing, marking and documentation
	ISO 5149-3 : 2014	Refrigerating systems and heat pumps-safety and environmental requirements — Part 3: Installation site
	ISO 5149-4 : 2014	Refrigerating systems and heat pumps-safety and environmental requirements — Part 4: Operation, maintenance, repair and recovery

续表 1

标准类型	标准号	标准名
	UL 2182-2006	Standard for refrigerants (Ed. 2)
UL	UL 207	Standard for refrigerant-containing components and accessories, nonelectrical (Ed. 8)
	UL 1963-2013	Standard for refrigerant recovery/recycling equipment (Ed. 4)

1 制冷剂回收再生国外标准

欧洲及北美的一些发达国家,在 1990 年就制定了车用、家用及商用空调设备及所用制冷剂的回收、净化和再生相关标准;韩国、日本等亚洲国家也有相关标准。标准最为齐全的是美国机动车工程师学会 (Society of Automotive Engineers, SAE),共制定了 49 项相关标准,美国空调、采暖和制冷学会 (The Air-conditioning, Heating, and Refrigeration Institute, AHRI) 标准较新,涉及制冷剂回收规范、制冷剂容器规范等。主要相关标准如表 1 所示。

最新修订的标准,大多发布在 2016 年之后,标准

细则及附录定期更新。英国标准学会 (British Standards Institution, BSI) 在 1980 年就对卤代烃的取样和测定制定了 11 项标准。美国保险商实验所 (Underwriters Laboratories, UL)、国际标准组织 (International Organization for Standardization, ISO)、日本制冷剂回收促进与技术中心 (Refrigerant Recycling Technology Promotion Center, RRC),也分别对制冷剂回收、再循环的设备元件以及净化后的制冷剂制定相关的标准。国外制冷剂回收净化检测标准示意图如图 1 所示,括号内数字表示制冷剂回收相关标准制定数量。图 2 所示为国外制冷剂回收相关标准制定机构分布情况。

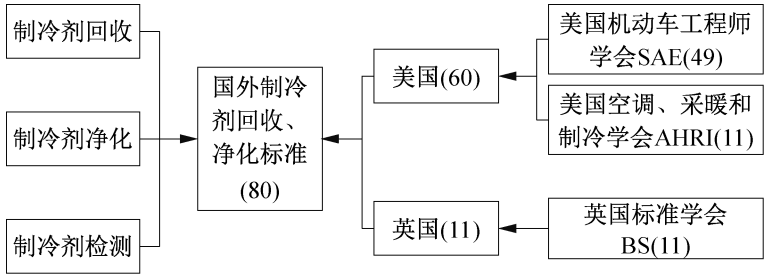


Fig.1 Schematic diagram of foreign refrigerant recovery and purification testing standards

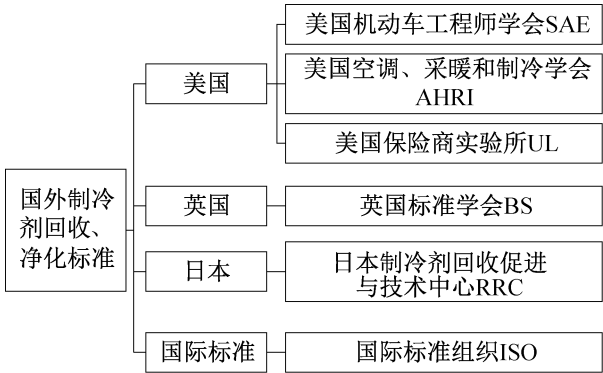


Fig.2 Foreign refrigerant recovery and purification standard setting institutions

2 制冷剂回收装置

2.1 标准对回收装置性能的要求

AHRI、SAE、ISO 均设有针对制冷剂回收装置的

标准。各标准分别规定了设备的泄漏损失、回收罐容积,以及系统中的干燥过滤器、油分离器、除杂损失、初净化结果等。SAE 标准还对制冷剂回收装置的回收速率、回收工作温度等提出了要求。对比上述 4 个机构的不同标准可知:

- 1) 制冷剂存储罐中,制冷剂的量应该超过体积的 60%,但不得超过 80%。
- 2) 环境温度为 21~24 ℃ 时,制冷剂回收装置需要能够在 30 min 内从制冷机组中抽取至少 95% 的制冷剂。
- 3) 净化过程中损失的制冷剂不得超过 3%。
- 4) 回收装置需要在 10~49 ℃ 内可以连续工作。
- 5) 若系统中有干燥过滤器,则需要定期更换。
- 6) 若系统中有油分离系统,需要能分离出 20~30 mL 油。

2.2 回收装置现状

目前回收装置分为 3 类:回收加注一体机、带净

化功能的回收机和不带净化功能的回收机。回收加注一体机中,新制冷剂可以通过该设备加注到系统中,也可以把系统的制冷剂抽至回收罐;带净化功能的回收机,能粗略地去除制冷剂中的油污、杂质等,并把制冷剂集中回收在回收罐内,但无法达到提纯后再生的 SAE J2099_201201^[8] 或 AHRI Standard 700-2011^[9] 指标要求。

回收速率与回收装置所采用的技术方法、制冷机组规模均相关。根据本文调研,国内已有的回收装置中,液态推拉法速度最快为 12.44 kg/min。美国的 Robinair 公司供应多款制冷剂回收机、净化一体机,主要回收制冷剂 R12、R134a 和 HFO-1234yf,其装置能快速准确地回收 95% 以上的制冷剂,达到 SAE 的初始净化标准,充注误差也在±14 g。

3 制冷剂净化及检测

在制冷机组中,经长时间使用的制冷剂纯度将下降。制冷剂中的杂质主要有水、润滑油、不凝性气体及固体颗粒。为便于对制冷剂回收净化装置性能做出评估,SAE J1770_199510^[10]、SAE J2788_202001^[11] 等标准中对标准污染制冷剂进行了定义。

SAE J1770_199510^[10]、SAE J2788_202001^[11] 标准规定样本制冷剂为 R134a,样本质量为 1.13 kg,含水量为 1 300 mg/kg,含油量(与 R134a 互溶的乙二醇)为 45 000 mg/kg,不凝性气体含量为 1 000 mg/kg。

3.1 净化后制冷剂标准

SAE、AHRI 标准中对净化后制冷剂的各项指标进行了规定,以 SAE J2099_201201^[8]、AHRI Standard 700-2011^[9] 列表进行对比,如表 2 所示。

表 2 不同标准净化后产品对比

Tab.2 Comparison of products after purification by different standards		
标准制定机构	SAE	AHRI
水/(mg/kg)	50	10
蒸发残渣/(质量百分比%)		0.01
不凝性气体/%	1.5	1.5
油/(mg/kg)	500	
酸分/(HCl 质量分数%)		0.000 1

ISO 5149-4 : 2014^[12] 标准指出,并非所有的制冷剂都可以用来再生。对于污染特别严重的制冷剂,需要在再生前进行评估其是否需直接丢弃。经评估确定可再生的制冷剂,可进行除水、除油、除颗粒、抽不

凝性气体的净化过程。

制冷剂简易再生方法如图 3 所示,该方法适合现场回收再生,但净化纯度不高,净化制冷剂量也较少。制冷剂循环再生方法如图 4 所示,该方法虽能够提高纯度,除水性能好,但净化后的制冷剂仍只能用于原设备,耗能也更大。

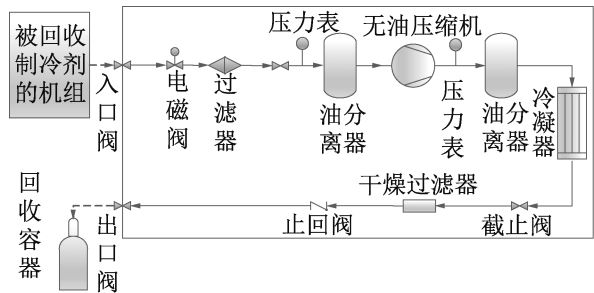


图 3 制冷剂简易再生方法

Fig.3 Simple refrigerant regeneration method

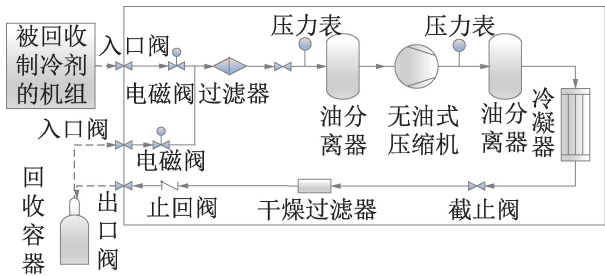


图 4 制冷剂循环再生方法

Fig.4 Refrigerant cycle regeneration method

3.2 杂质去除方法

ISO 11650 : 1999^[13] 标准中,要求每隔 30 天或完成 200 kg 制冷剂净化需要更换干燥过滤器,SAE J2788_202001^[11] 中也要求干燥过滤器需要在失效前进行更换。不同的制冷剂,需要的分子筛孔径不同,分子筛的型号也不同,如表 3 所示。干燥过滤器主要起到杂质过滤和干燥作用,且不与制冷剂发生反应^[14]。一般,过滤器外壳是用紫铜管收口成型,两端进出接口有同径和异径两种,进端为粗金属网,出端为细金属网,可以有效过滤杂质,经轧压工艺成型,但只装有金属网,没有干燥剂^[15]。而干燥过滤器内装吸湿特性优良的分子筛作为干燥剂,以吸收制冷剂中的水分,保证毛细管畅通和制冷系统正常工作。

表 3 制冷剂选择的分子筛型号

Tab.3 Model of molecular sieve for refrigerants			
制冷剂	分子筛型号	制冷剂	分子筛型号
R22	XH-7	R410A	XH-9
R134a	XH-9	R507	XH-9
R407C	XH-9	R12	XH-5

SAE J2210_201011^[16] 规定设备应该带有内嵌式过滤器,可以直接过滤 $\geq 15\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒。

SAE J2099_201201^[8] 标准规定:净化后制冷剂中润滑油的含量不得超过 500 mg/kg。油分离器去除润滑油^[17]。从压缩机排出的高温高压的制冷剂气体进入油分离器进气管,经滤网减速过滤后,洁净的制冷剂从上方排气管排出^[18],而润滑油则在过滤网处经流向改变、降速和过滤的作用被分离出来,聚积在油分离器的底部。采用抽气的方式去除不凝性气体,对经回收的制冷剂进行降温,制冷剂冷却为液体,由于重力作用流出管道,不凝性气体浮于上方,因此,在系统储罐上方加入放气装置,用于排出不凝性气体。

目前,我国当前较为常见的便携式回收净化一体机,回收净化能力可达到原机充注的标准,但仍缺乏低成本的,以制冷剂再生、可再销售为目标的专用净化装置,限制了制冷剂回收再生的行业应用与发展。

3.3 制冷剂检测方法

SAE J2210 _ 201011^[16]、AHRI Standard 700-2017^[19]、Appendix C to AHRI Standard 700-2014^[20] 等标准中,水分检测采用 karlfischer(卡氏库仑)法,根据 SAE J2210_201011^[16],制冷剂的样本检测大小为 30~130 g,国内的众多 karlfischer 水分检测仪均能满足

足标准对精度和测量范围的要求。此外,水分检测时可配备:通风橱,用来排出检测水分时产生的废气;天平,用来称量制冷剂样本的质量;取样钢瓶及钢瓶架。

BS 5598-10 : 1983^[21]、BS 5598-11 : 1983^[22]、GB/T 18826—2006^[23]、SAE J1770 _ 199510^[10] 等标准,均采用气相色谱法检测制冷剂中的不凝性气体和制冷剂纯度。测量不凝性气体采用“外圈法”,计算机自动生成两个较大的峰,其中,小峰即空气峰的面积反映不凝性气体的量。测量纯度采用“积分法”,当对混合制冷剂进行测试时,会有多个主峰,需对杂质峰面积积分进行求和。

SAE J2788_202001^[11]采用重量法测定制冷剂中润滑油的含量,制冷剂的样本检测量为 175~225 g。在室温下蒸发样本,制冷剂因受热溢出,测量加热前后取样瓶的质量,即可由原始样本质量和制冷剂蒸发后样品质量计算出制冷剂中所含润滑油的百分比。润滑油含量检测系统还需要配置恒温水浴、电子天平、烘干设备(如电吹风)等,避免取样瓶外表面润湿水分带来的质量误差。水浴温度控制在润滑油的挥发温度以下。

AHRI Standard 700-2017^[19] 标准采用的各杂质检测方法如表 4 所示。

表 4 AHRI 标准采用的检测方法
Tab.4 Testing method stipulated by AHRI standard

检测污染物类型	检测方法
水分	库仑卡尔费瑟滴定法,无论何种制冷剂,必须使其处于液体状态时方可进行水分含量测定。
氯离子	对制冷剂进行传导性测试,该测试主要适用于新的制冷剂或可回收再利用的制冷剂。
氯化物	进行氯化物含量测定,测试方法使用新的或可回收再利用的卤代制冷剂。
酸度	使用滴定法来探测溶解于水中的化合物及酸性的电离子。此项测试可能不适合用于测定高分子量的有机酸。
高沸点残渣	经体积及质量值判定。体积测量法通过测量蒸发后残渣在制冷剂标准体积中的值来确定。
固体颗粒	在可控温度的条件下,取适量样品放置于泡状试管内。微粒的判定必须在制冷剂蒸发前通过肉眼判定。如发现有灰尘、铁锈或其他特殊污染物的,判定为“不合格”。
不凝性气体	气态样品需要进行不凝物测定。不凝性气体主要由气态制冷剂内不断累积的空气组成,采用导热检测器来进行色谱分析。

4 制冷剂碳排放评价指标

随着车载与居住环境中空调的大量使用,各类制冷剂的年生产量及年排放量逐渐上升。为降低环境污染,减少能源消耗,各国均对制冷剂的生产量及排放量设定了限制指标。国内对于制冷剂的环境友好特性及碳排放量评价指标当前注重对制冷剂本身物

质特性的评价,而对于整个制冷系统运行过程中的碳排放量关注较为缺失。国内评价制冷剂温室效应性能的主要评价指标是全球变暖潜能(global warming potentials,GWP),即各类温室气体相比于 CO₂ 的制冷剂本身对于温室效应的影响,而未考虑整个制冷系统相比于 CO₂ 对于温室效应的影响。

国外有学者提出总当量变暖潜能(total

equivalent warming impact, TEWI) 气候评估指标, TEWI 指标不仅考虑了制冷剂本身泄漏量对于环境温室效应的影响(即制冷剂 GWP 的影响),同时还考虑了制冷系统在运行过程中的能源消耗以及在制冷系统及制冷剂运输过程中造成的能源消耗所导致的碳排放对温室效应的影响,能够较完整的评估制冷剂在制冷系统中运行一定年限造成的温室效应的影响,综合评价制冷剂本身物质特性和制冷系统的功能转化率以及化石燃料等转变为电能和机械能的效率。C. Petitjean 等^[24]结合全生命周期变暖影响(life cycle warming impact, LCWI)和全生命周期,对评价指标 TEWI 进行补充,提出了一种对制冷剂及制冷系统运行生命周期内的温室效应影响进行综合评价的指标——生命周期气候性能指标(life cycle climate performance, LCCP),该评价指标除了包含 TEWI 中的考虑外,还包括了制冷剂与制冷系统生产及回收过程中的温室效应影响,是目前最为全面的制冷系统温室效应评价指标^[25-26]。

虽然 LCCP 已经较为全面地评价了制冷剂及制冷系统在一定年限内从生产、运输、系统运行及回收过程中的碳排放量温室效应,但对于制冷剂净化、再利用过程,使用完整的 LCCP 来评估制冷剂及制冷系统,可能并不能较为合适的评价对于制冷剂进行回收净化再利用过程与否的不同制冷剂的碳排放量及温室效应影响。因此,迫切需要提出一种针对于制冷剂回收净化再利用过程的制冷剂温室效应碳排放量评估指标模型。该评估指标应当包括制冷剂的生产、运输、回收、净化、再利用等过程中的碳排放量及能源消耗所导致的间接碳排放量。评估指标旨在评价制冷剂回收净化再利用的全生命周期中制冷剂的相对碳排放量特性。

对于制冷剂回收净化再利用过程的制冷剂温室效应碳排放量评估指标还需解决的问题是,相比于 GWP、TEWI 和 LCCP 使用 CO₂ 作为温室效应影响的参照物,全生命周期制冷剂碳排放量指标应当选取合适的参数作为相对参照。若仅将制冷剂生产、运输、回收、净化、再利用等过程中的直接和间接碳排放量简单相加,必然会导致对于同等质量的制冷剂,多次净化循环使用的制冷剂的碳排放量高于一次性使用的同等质量的制冷剂,相对于制冷剂全生命周期而言显然不合理。因此,对于全生命周期制冷剂碳排放量指标应当引入制冷剂一般使用年限作为参数值的一部分,评估相同的使用年限内对于制冷剂进行回收净化再利用过程与否的碳排放量的差异。全生命周期制冷剂碳排放量指标不

仅包括制冷剂从生产到最终被处理的生命周期内全部的直接和间接碳排放量,还包括制冷剂在运行使用年限中的时间平均碳排放量指标,以该指标来针对性的评估制冷剂回收、净化、再利用系统的合理性与必要性是较为客观的。

5 小结

目前,在制冷剂回收、净化及再利用方面,我国机遇与挑战并存。在机遇方面,我国制冷剂回收、净化受政策鼓励,市场巨大;欧美、英国等国家在制冷剂回收、净化方面,有诸多标准供我国参考;制冷剂回收机虽然大量采用进口设备,但国产设备已投入应用;制冷剂净化实施企业较少,但净化设备广泛易得,且净化成本较低;国产制冷剂检测设备已被广泛使用。

在挑战方面,我国相比于欧美起步较晚,回收技术还不成熟,从事该行业的企业较少,回收力度需要加大。在净化技术方面的发展更为缓慢,相对于回收,从事制冷剂净化的企业更少,尚处于科研阶段;我国制冷剂使用量巨大,涉及工业、商业、民用等多个方面,从政策和标准的制定到落实见效,需要相当长的过渡期;我国回收机设备的各项参数,多由国外设计厂家提供,或依照经验值进行设置,缺乏基于热力学性能的优化设计方法,进行成本较低和效率较高的设计;国产检测设备造价较低,存在精确性及设备稳定性等方面的缺陷。对于制冷剂回收、净化再利用过程的制冷剂温室效应碳排放量评估指标需结合制冷剂在运行使用年限中的时间平均碳排放量,该参数需结合制冷剂回收净化实际数据来确定。

参考文献

- [1] 景玲玲, 冯卉, 郭晓林. 基加利修正案情况介绍[J]. 聚氨酯工业, 2017, 32(增刊 1): 17-18. (JING Lingling, FENG Hui, GUO Xiaolin. Introduction of Kigali amendment [J]. Polyurethane Industry, 32(Suppl. 1): 17-18.)
- [2] 滑雪, 李雄亚, 韩美顺. 2019 年度中国制冷剂产品市场分析[J]. 制冷技术, 2020, 40(增刊 1): 51-59. (HUA Xue, LI Xiongya, HAN Meishun. 2019 China market analysis of the refrigerant products [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(Suppl. 1): 51-59.)
- [3] 张朝晖, 陈敬良, 高钰, 等. 制冷空调行业制冷剂替代进程解析[J]. 制冷与空调(北京), 2015, 15(1): 1-8, 12. (ZHANG Zhaohui, CHEN Jingliang, GAO Yu, et al. Progress of refrigerant substitution in R & AC industry [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2015, 15(1): 1 -

- 8,12.)
- [4] 佰世越管理咨询(北京)有限公司(BSRIA 亚太区总部). 环境保护与制冷剂的发展[J]. 家电科技, 2014(3):16-17. (Baishiyue Management Consulting (Beijing) Co., Ltd. (BSRIA Asia Pacific Headquarters). Environmental protection and the development of refrigerants[J]. China Appliance Technology, 2014(3):16-17.)
- [5] 张贺然, 于可利, 邱金凤, 等. 美国、欧盟、日本的制冷剂回收处置现状[J]. 资源再生, 2018(11):48-51. (ZHANG Heran, YU Keli, QIU Jinfeng, et al. Current status of refrigerant recovery and disposal in the United States, the European Union, and Japan[J]. Resource Recycling, 2018(11):48-51.)
- [6] 王海涛, 孙姣, 王星, 等. 制冷剂排放回收现状分析[J]. 家电科技, 2014(10):85-87. (WANG Haitao, SUN Jiao, WANG Xing, et al. Current situation analysis of the emission and recovery of refrigerant[J]. China Appliance Technology, 2014(10):85-87.)
- [7] 方文敏, 余晓明, 邵乃宇. 制冷剂回收技术研究及经济性分析[J]. 能源工程, 2019(3):82-86. (FANG Wenmin, YU Xiaoming, SHAO Naiyu. Refrigerant recovery technology and economic analysis[J]. Energy Engineering, 2019(3):82-86.)
- [8] Standard of purity for recycled HFC-134a (R-134a) for use in mobile air-conditioning systems; SAE J2099_201201 [S]. New York: Society of Automotive Engineers, 2012.
- [9] Specifications for fluorocarbon refrigerants; AHRI Standard 700-2011[S]. New York: Air-conditioning, Heating and Refrigeration Institute, 2011.
- [10] Automotive refrigerant recovery/recycling equipment intended for use with both R12 and R134a; SAE J1770_199510 [S]. New York: Society of Automotive Engineers, 1995.
- [11] HFC-134a (R-134a) recovery/recycle/recharging equipment for mobile air-conditioning systems; SAE J2788_202001 [S]. New York: Society of Automotive Engineers, 2020.
- [12] Refrigerating systems and heat pumps—safety and environmental requirements—part 4: operation, maintenance, repair and recovery; ISO 5149-4:2014[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [13] Performance of refrigerant recovery and/or recycling equipment; ISO 11650:1999[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.
- [14] 陈光明, 何坚峰. 干燥过滤器新冲压工艺的设计[J]. 机械制造, 2017, 55(7):72-73. (CHEN Guangming, HE Jianfeng. Design of new stamping process for dry filter[J]. Machinery, 2017, 55(7):72-73.)
- [15] 张浩. 空调器制冷剂水分超标处理方法[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(12):89-92, 56. (ZHANG Hao. Disposal method of high water content of air-conditioner's refrigerant[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014, 14(12):89-92, 56.)
- [16] HFC-134a (R-134a) recovery/recycle/equipment for mobile air-conditioning systems; SAE J2210_201011 [S]. New York: Society of Automotive Engineers, 2010.
- [17] 周威, 潘李奎, 肖芳斌. 空调用高效旋流油分离器仿真优化与实验[J]. 制冷学报, 2016, 37(6):35-42. (ZHOU Wei, PAN Likui, XIAO Fangbin. Simulation optimization and experiment on high-efficiency cyclone oil separator for air-conditioner[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(6):35-42.)
- [18] 冯健美, 畅云峰, 屈宗长, 等. 油气分离器内油滴运动轨迹的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7):771-775. (FENG Jianmei, CHANG Yunfeng, QU Zongchang, et al. Numerical simulation of oil droplets traces in oil-gas separator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(7):771-775.)
- [19] Specifications for fluorocarbon refrigerants; AHRI Standard 700-2017[S]. New York: Air-conditioning, Heating and Refrigeration Institute, 2017.
- [20] Appendix C for 700-2014 gas chromatograms for AHRI standard; appendix C to AHRI Standard 700-2014 [S]. New York: Air-conditioning, Heating and Refrigeration Institute, 2014.
- [21] Determination of impurities in methyl chloride; gas chromatography; BS 5598-10:1983[S]. London: Britain Standard Institute, 1983.
- [22] Determination of “inert” gas content of chlorofluoro hydrocarbons gas chromatographic method general principles; BS 5598-11: 1983 [S]. London: Britain Standard Institute, 1983.
- [23] 工业用 1,1,1,2-四氟乙烷(HFC-134a); GB/T 18826—2016[S]. 北京: 中国石油和化学工业学会, 2016. (Industrial 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a): GB/T 18826—2016[S]. Beijing: China Petroleum and Chemical Industry Society, 2016.)
- [24] PETITJEAN C, GUYONVARCH G, BENYAHIA M, et al. TEWI analysis for different automotive air conditioning systems[J]. SAE Transactions, 2000, 109: 1989-1993.
- [25] 王子伟, 梁媛媛, 赵宇, 等. 汽车空调技术的生命周期气候性能评估[J]. 制冷技术, 2014, 34(4):1-7. (WANG Ziwei, LIANG Yuanyuan, ZHAO Yu, et al. Life-cycle climate performance assessment of mobile air conditioning technology [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(4):1-7.)

terfaces, 2012, 4(1): 273–279.

[17] YAO Xi, XU Liang, JIANG Lei. Fabrication and characterization of superhydrophobic surfaces with dynamic stability [J]. Advanced Functional Materials, 2010, 20(19):3343–3349.

[18] LIU Zhongliang, GOU Yunjun, WANG Jieteng, et al. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25/26):5975–5982.

[19] 徐文骥, 宋金龙, 孙晶, 等. 铝基体超疏水表面结冰结霜特性研究 [J]. 制冷学报, 2011, 32(4):9–13. (XU Wenji, SONG Jinlong, SUN Jing, et al. Study on the characteristics of icing and frosting on the superhydrophobic surface of aluminum substrate [J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(4):9–13.)

[20] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S A. Anti-icing performance of superhydrophobic surface [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(14): 6264–6269.

[21] 郑海坤, 常士楠, 赵媛媛. 超疏水/超润滑表面的防疏冰机理及其应用 [J]. 化学进展, 2017, 29(1):102–118. (ZHENG Haikun, CHANG Shinan, ZHAO Yuanyuan. Anti-icing mechanism and application of superhydrophobic/super-lubricated surface [J]. Chemical Progress, 2017, 29(1):102–118.)

通信作者简介
赵彦杰,男,讲师,天津大学机械工程学院,18202270267, E-mail:yj_zhao@tju.edu.cn。研究方向:热能储存和相变换热。

About the corresponding author
Zhao Yanjie, male, lecturer, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, +86 18202270267, E-mail: yj_zhao@tju.edu.cn. Research fields: thermal energy storage and phase change heat.

(上接第 52 页)

[26] 赵宇. R1234yf 汽车空调系统性能研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2013. (ZHAO Yu. Study on the performance of automotive air conditioning systems with R1234yf [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.)

[27] 陈晨铭, 段化银, 季盼杰, 等. 制冷空调工作介质回收与处理的行业技术调研及改进分析 [J]. 化工管理, 2019(34):178–180. (CHEN Chenming, DUAN Huayin, JI Panjie, et al. Technical investigation and improvement analysis of refrigeration and airconditioning working media recovery and treatment [J]. Chemical Enterprise Management, 2019(34):178–180.)

通信作者简介
王海鹰,女,讲师,同济大学机械与能源工程学院,13816226303, E-mail: haiyingw@tongji.edu.cn。研究方向:智慧能源系统,智慧供热供冷网络系统。

About the corresponding author
Wang Haiying, female, lecturer, School of Mechanical Engineering, Tongji University, +86 13816226303, E-mail: haiyingw@tongji.edu.cn. Research fields: intelligent energy system and intelligent heating and cooling network system.