

文章编号: 0253-4339(2021)05-0048-08
doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2021.05.048

制冷剂回收再生的碳排放评估及经济性分析

王月¹ 宓宏² 徐宏³ 臧建彬¹ 王海鹰¹

(1 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; 2 浙江衢州联州致冷剂有限公司 衢州 324000; 3 浙江衢化氟化学有限公司 衢州 324004)

摘 要 我国已进入 HCFCs 制冷剂淘汰末期,并即将于 2024 年启动 HFCs 的产量和消费量削减。本文以制冷剂的回收再生过程为主要研究对象,基于 LCCP 气候性能模型,构建了制冷剂回收再生过程的碳排放量评估模型;分析了制冷剂回收再生的经济性;并对所构建模型,以汽车空调制冷剂 R134a 的回收再生为案例,计算其碳排放量及回收再生经济性。结果表明:本案例中,对制冷剂进行回收再生处理可以减少当量 CO₂ 排放约 42%,制冷剂回收再生的经济性能主要与再生后制冷剂单价及工人工资成本有关,工人工资按月最低工资标准时净化后制冷剂售价在 11 元/kg(新制冷剂售价的 50%)以上可在 2 年内开始盈利。

关键词 全球变暖潜值;制冷剂回收;温室效应;制冷剂;R134a

中图分类号: TB61⁺2; TB64

文献标识码: A

Carbon Emission Assessment and Economic Analysis of Refrigerant Recycling

Wang Yue¹ Mi Hong² Xu Hong³ Zang Jianbin¹ Wang Haiying¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Quzhou Lianzhou Refrigerant Co. LTD, Quzhou, 324000, China; 3. Zhejiang Quhua Fluorine Chemical Co., LTD, Quzhou, 324004, China.)

Abstract China has entered the end of the hydrochlorofluorocarbon (HCFCs) refrigerant phase out, and will soon start to reduce its production and consumption of HFCs simultaneously in 2024. In this study the process of refrigerant recovery and regeneration is investigated. The carbon emission evaluation model for the process of refrigerant recovery and regeneration is constructed based on the life cycle climate performance model LCCP. The economy of the regeneration of refrigerant is analyzed, and the carbon emission and regeneration economy of the automobile air-conditioning refrigerant R134a is calculated using the evaluation model. The results show that the equivalent CO₂ emissions can be reduced by approximately 42% by recycling the R134a refrigerant. The economic performance of refrigerant recycling is mainly dependent on the unit price of the refrigerant after regeneration and the wage cost of workers. When the monthly minimum wage standard is used, the price of the refrigerant after purification is more than 11 yuan/kg (50% of the price of new refrigerant), and the process is profitable within two years.

Keywords global warming potential; refrigerant recovery; greenhouse effect; refrigerant; R134a

我国是全球最大的制冷设备与制冷剂生产国和消费国。2020 年,工商制冷空调行业预计实现利润 165 亿元^[1]。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^[2],进入 HCFCs 制冷剂淘汰末期,我国将于 2024 年启动 HFCs 的产量和消费量削减^[3]。以建筑空调和冷冻冷藏领域长期使用的制冷剂 R22 为例,其产能配额从 2013 年的 30.8 万吨削减至 2020 年的 22.5 万吨^[4],2030—2040 年除保留少量(约 2.5%)维修用途外将实现全面淘汰。对制冷系统内原有的制冷剂进行回收再生处理,是应对制冷剂产能配额削减压力和减少制冷剂

排放的有效方法^[5]。

20 世纪 80 年代末我国开始对 CFC 制冷剂回收净化开展应用研究,制造了样机^[6]。目前我国对制冷剂的回收再生处理依然落后于欧美国家,维修及报废制冷机组时大量废制冷剂直接排放,污染大气环境,加重节能减排负担。中国制冷空调工业协会制定的制冷空调行业“十三五”规划提出,配合行业 HCFCs 制冷剂淘汰工作,建立健全环境友好性评价技术,重点突破制冷空调产品全生命周期的能效评价、环境友好性评价等关键技术,建立完备的评价体系^[1]。

当前碳排放评价方法主要有 3 种。全球变暖潜能 (global warming potentials, GWP), 评价制冷剂的温室效应, 受制冷剂吸收红外辐射能力、大气寿命及与 CO_2 相比使用的时间^[7]; 总当量变暖影响 (total equivalent warming impact, TEWI), 由《京都议定书》提出, 评估制冷剂在制冷系统中运行一定年限的气候性能^[8], 计算制冷剂直接/间接排放量、制冷系统运行能耗、制冷系统及制冷剂运输能耗, 过程中总碳排放对温室效应的影响; 全生命周期气候性能指标 (life cycle climate performance, LCCP), 由美国 Arthur D Little 公司^[7] 于 1999 年提出, 对制冷剂及制冷系统运行生命周期内的温室效应进行综合评价^[9]。在 TEWI 基础上, LCCP 评价指标加入了制冷剂与制冷系统生产和回收过程以及制冷剂分解产物对温室效应的影响^[10]。

制冷剂碳排放评估方面, 赵宇^[9] 使用 GREEN-MAC-LCCP 模型计算工具, 对比了汽车空调系统使用 R1234yf 和 R134a 的 LCCP 值; 王子伟等^[10] 使用 Visual Studio 软件建立了部分城市汽车空调适用的 LCCP 模型; 史琳等^[7] 基于 LCCP 评价方法和 CO_2 减排率 (CO_2 emissions reduction rate, ERR), 研究了拓展 CO_2 减排率的评价方法; P. Jihwan 等^[11] 基于韩国某废弃电器设备回收工厂分析了制冷剂回收对温室气体排放的抵消效应。当前, 制冷剂碳排放评估研究大多基于考虑因素全面的 LCCP 指标。同时, 气候环境及行业数据需求量大、计算过程繁琐、参数、选取差异对结果影响较大^[7]。经济性能评估方面, 方文敏等^[12] 对上海地区 200 余家制冷相关企业的调研显示空调行业对于制冷剂的回收比例较低。对制冷剂进行回收可以较好地维护制冷空调企业的利益, 经济性显著。

随着全球环保要求升级、环保工作深入开展, 制冷剂再生过程成为制冷剂生命周期中不可或缺的一环。制冷剂再生过程的能源消耗及对应碳排放, 以及再生制冷剂替代新生产制冷剂的碳减排量评估等有待探讨。本文基于制冷剂回收再生技术方法及处置流程, 构建制冷剂回收再生过程的碳排放评估模型; 分析制冷剂再生处理的经济效益, 包括制冷剂处理过程中资源、能源的消耗、环境保护效益等。

1 制冷剂回收再生过程

“冷却法”、“压缩冷凝法”和“推拉法”是目前进行制冷剂回收的 3 种主要方法^[13], 常用压缩冷凝法、压缩冷凝法与推拉法的复合方法, 其中, 制冷压缩机是主要耗能设备。制冷剂回收过程中或回收后需要

进行净化并去除其中的水、润滑油、颗粒物和不可凝性气体等。制冷剂净化前需进行纯度检测, 纯度大于 96% 直接利用; 纯度在 75% ~ 95% 选择性净化; 纯度小于 75% 需进行制冷剂净化^[14]。回收后的制冷剂分为可再生制冷剂和不可再生制冷剂。氧化程度高再生困难的制冷剂及难以分离的制冷剂混合物都属于不可再生制冷剂, 必须破坏处理^[15]。使用简易再生方法, 制冷剂一次或多次通过过滤器、油分离器和干燥器除杂, 制冷剂简易再生装置体积小, 适用于现场少量再生。再生后制冷剂纯度不高, 只能在原设备中再利用, 不能用于其它设备。蒸馏再生方法能获得纯度高、可用于其它设备的制冷剂。蒸馏精制装置庞大、运行能耗高, 适合集中处理制冷剂。从回收容器中对制冷剂取样进行光谱分析确认成分, 然后进行蒸馏精制, 经过滤器、油分离器、在分馏塔内分馏, 再经脱酸、脱水工序后进入压力容器贮藏^[15]。在日本, 蒸馏再生的制冷剂产品才能根据标准进行分级管理。

2 制冷剂回收再生过程的碳排放模型

将制冷剂的生产、运输、回收、再生等过程的碳排放及能源消耗所导致的间接碳排放纳入全生命周期模型, 如图 1 所示, 以评价包含制冷剂回收再生过程的全生命周期相对碳排放特性。

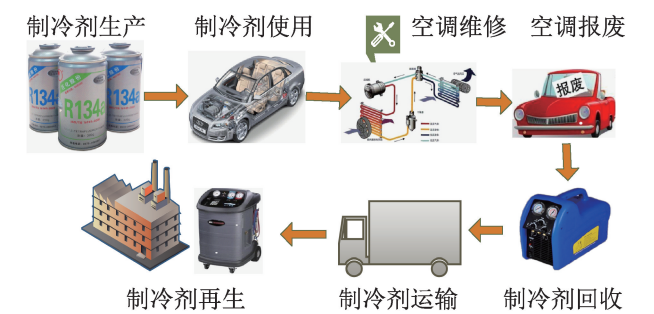


图 1 制冷剂全生命周期
Fig.1 The whole life cycle of refrigerant

传统碳排放评价方法 LCCP 模型的计算流程如图 2 所示^[8], 计算过程中的主要数据输入包括制冷剂泄漏量、系统各部件材料等的生产能耗、系统制冷量、能源转换效率之比 (额定制冷量/制热量与额定功率的比值, 简称能效比) 及全年系统运行气象参数等。该模型中并未包括制冷剂的回收、再生环节的碳排放计算。制冷剂行业中, 为促进碳中和目标的达成, 对待维修或拆解机组内的制冷剂进行回收再生是重要的碳减排途径之一。因此, 本文尝试在传统 LCCP 模型补充制冷剂回收净化环节的碳排放模型, 分别对制冷剂回收并再生、制冷剂不回收两种情况进行建模。其中, 制冷剂回收并再生情况下, 又对不同制冷剂回

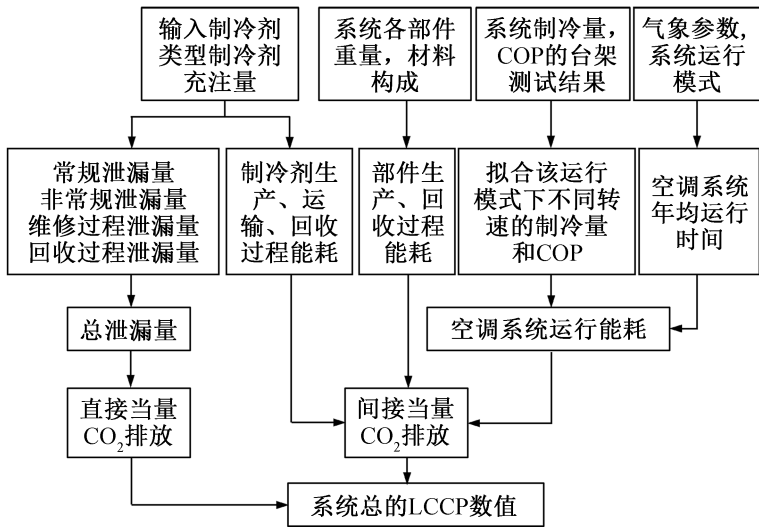


图 2 LCCP 模型构成^[8]
Fig.2 LCCP model composition^[8]

收再生处置方式进行建模。

制冷剂回收再生需要用到回收/净化再生设备、运输设备等耗能设备,同时,过程中不可避免地会发生部分制冷剂的泄漏,各设备能耗和泄漏损失的质量等数据是模型求解的重要输入数据。

在运输、使用等过程中,制冷剂直接泄漏、排放进入大气造成直接排放,制冷剂生产、运输、回收、净化再生等过程中的能源消耗造成间接排放。依据美国汽车工程学会标准 SAE J2766-2019^[16] 制冷剂生命周期气候性能评估指标,其所包含的引起温室效应的直接排放和间接排放如表 1 所示。直接排放量以 CO₂ 当量排放表示,其值根据每种化学物质的全球变暖潜能值(GWP)和释放到大气中的制冷剂量来评估。间接排放计算与制造、使用、处理制冷系统相关的能源消耗,求取该能耗对应 CO₂ 当量总和。

制冷剂总当量 CO₂ 排放=直接排放当量 CO₂ 排放+间接排放当量 CO₂ 排放

(1)

制冷剂造成温室效应的直接排放和间接排放如表 1 所示。在制冷剂回收净化再生环节,部分制冷剂在回收净化过程中直接泄漏至外部环境,且回收后系统内仍有少量残余制冷剂在维修过程中泄漏至环境中,这两部分共同构成影响温室效应的直接排放;回收净化设备的运行能耗构成影响温室效应的间接排放。将该拓展环节列入表 1。建立制冷系统中制冷剂生命周期碳排放评估模型的计算过程为:(1)获取制冷机组充注制冷剂类型及充注量;(2)查阅文献、行业资料,获取制冷剂的常规泄漏量、非常规泄漏量、维修过程泄漏量、回收过程泄漏量等数据,以制冷剂的总泄漏量计算直接排放的当量 CO₂ 排放量;(3)获

取制冷剂的生产、运输、回收、净化、再生等过程的能源消耗,并计算间接排放的当量 CO₂ 排放量;(4)计算得到制冷剂生命周期中总当量 CO₂ 排放量。经拓展的制冷剂生命周期碳排放计算流程如图 3 所示。

表 1 制冷剂造成温室效应的直接排放和间接排放
Tab.1 Direct and indirect emissions of the greenhouse effect caused by refrigerants

气候性能 评估指标	直接排放来源	间接排放 来源
美国汽车工程 学会标准 SAE J2766-2019	定期排放——运行中的常规泄漏	制冷剂生产 能耗,制冷剂 运输能耗,制 冷剂回收能耗
	不定期排放——非常规泄漏、维修泄漏	
	汽车使用寿命结束——回收或完全释放制冷剂所产生的排放	
拓展环节	制冷剂生产、运输过程泄漏	制冷剂净化、再生所产 生的排放
	制冷剂净化、再生所产 生的排放	

3 案例计算

3.1 碳排放评估模型参数

1) 制冷剂泄漏引起的直接碳排放

本文以汽车空调用制冷剂 R134a 为研究对象,分析其全生命周期碳排放量。普通轿车空调的制冷剂充注量约为 600~900 g,汽车空调每年正常损失

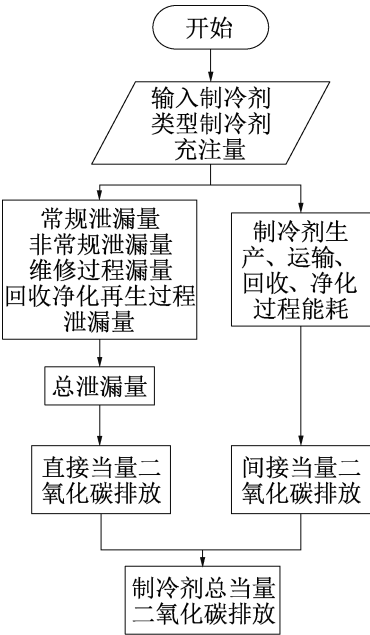


图 3 制冷剂全生命周期模型计算流程图

Fig.3 Flow chart of calculation of refrigerant life cycle model

10%~15%的制冷剂。每年每台汽车空调维修补充约 250 g 制冷剂。

制冷剂的泄漏量由直接排放至大气中的制冷剂量构成,包括常规泄漏量、非常规泄漏量、维修过程泄漏量和回收再生过程泄漏量等。参考汽车空调系统制冷剂 R134a 排放评级相关泄漏数据^[17],估计 R134a 常规泄漏量均值为 11.5 g/a,制冷剂非常规泄漏取 17 g/a^[16],专业维修造成的泄漏量约为 35 g^[18],用户自行维修造成的泄漏量约为 52 g^[18]。每台报废汽车回收过程制冷剂泄漏量为 100~450 g,实际泄漏量取决于其中制冷剂回收处理的程度^[8]。

假定制冷剂回收的两个极端情况分别进行计算: 1)汽车空调中的残余制冷剂尽最大可能回收,制冷剂的回收率取 90%,只有 10%排放至大气中;2)制冷剂没有进行回收,全部直接排放至大气中,即制冷剂泄漏率为 100%。汽车空调的使用时长与汽车的使用寿命一致。据调查数据^[19],如表 2 所示,汽车使用寿命随着技术进步逐年增加。本文计算取汽车平均使用寿命为 10 年。

表 2 汽车寿命调查估计^[19]

Tab.2 Estimated vehicle life survey^[19]

汽车寿命调查估计	全类型汽车百分比/%
1~5 年	12.0
6~10 年	42.0
11~15 年	34.0

制冷剂的直接泄漏量可采用式(2)估算 CO₂ 当量排放量^[16]:

$$RefrigLeakage = (M_r + M_{ir})vLife + M_x + M_e + M_a \tag{2}$$

$$M_r = \frac{2.837 \exp(0.063 \ 9 AvgTemp) leakRate}{8.8} \tag{3}$$

$$M_x = (1 - percentDiy) M_{px} + percentDiy M_{dx} \tag{4}$$

$$M_{px} = n (profServLoss + M_{pr}) \tag{5}$$

$$M_{dx} = n (diyServLoss + M_{dr}) \tag{6}$$

当汽车达到使用寿命,如进行制冷剂回收,生命周期结束后的泄漏量表示为:

$$M_e = 0.1 \left[RefMass - (M_r + M_{ir})vLife \left(1 - \frac{n}{n_r} \right) \right] \tag{7}$$

当汽车达到使用寿命,如不进行制冷剂回收,生命周期结束后的泄漏量表示为:

$$M_e = RefMass - BeforeServLoss (n_r - n) \tag{8}$$

制冷剂因泄漏造成的当量 CO₂ 排放量(kg)为:

$$RefrigLeakageEq = \frac{RefrigLeakageGWP}{1 \ 000} \tag{9}$$

2)制冷剂 R134a 的大气分解产物引起的碳排放排放至大气中的制冷剂不仅本身会对温室效应造成影响,其在大气中的分解产物包含的温室气体也会对环境造成影响。制冷剂 R134a 主要大气分解产物如表 3 所示。

表 3 制冷剂 R134a 主要大气分解产物^[8]

Tab.3 Main atmospheric decomposition products of refrigerant R134a^[8]

制冷剂	每千克制冷剂的大气分解产物/kg			总 GWP 值
	HCF	C(O)F ₂	CF ₃ -C(O)F	
R134a	0.065	0.032 5	0.13	1.592 5

制冷剂因其大气分解产物造成的当量 CO₂ 排放量(kg)可计算为:

$$AtmoBreak = (AtmoBreakManu + AtmoBreakLeak) GWP_{dp} \tag{10}$$

3)制冷剂相关的间接当量碳排放

制冷剂相关的间接当量碳排放量,由制冷剂生产、运输、回收、净化等过程中消耗的化石能源及电能等能源能耗导致。本文取生产 R134a 造成的间接当量 CO₂ 排放量为 8 kg^[20]。制冷剂生产过程中其他副产品所造成的间接当量 CO₂ 排放量为 1.59 kg。

(1)制冷剂运输过程的间接排放

在将废弃的残余制冷剂进行收集并回收处理的

过程中,残余制冷剂首先随废旧汽车空调一同送至汽车空调装配处理厂,集中收集之后再送往制冷剂回收处理厂,假设制冷剂的运输距离为位于上海市的某汽车空调公司和位于浙江省某地区的制冷剂生产公司之间,公路交通距离取 385 km。制冷剂罐运输汽车选择 2.5 吨厢式物流货车,尺寸为 4.2 m×1.9 m×1.8 m(长×宽×高)。根据卡车的运输排放因子,如表 4 所示,计算制冷剂运输过程对应卡车化石能源消耗造成的间接当量 CO₂ 排放量。

(2) 制冷剂回收再生过程的间接排放

制冷剂回收、再生处理设备的运行需要消耗电能等资源,压缩机为主要耗能设备。由于缺乏相关实验数据,参考 Robinair R690 全自动制冷剂回收净化充注一体机铭牌,取功率值为 700 W,制冷剂回收速率为 5 kg/h,回收单台汽车空调系统中的制冷剂耗电 0.062 kWh。

参考美国环境保护署(US Environmental Protection Agency,EPA)发布的《美国温室气体排放清单》计算排放因子,如表 5 所示。基于各种能源(燃料)来源的排放因子计算因电力消耗造成的间接当量 CO₂ 排放量,温室气体计算包括 CO₂、CH₄、N₂O)。该计算方法由 EPA 温室气体当量计算和澳大利亚国家温室气体计算推荐。

表 4 卡车的运输排放因子

Tab.4 Truck transportation emission factors			
排放因子/ (kg/(t·km))	11.0 吨(卡车)	5.0 吨(卡车)	2.5 吨(卡车)
CO ₂	0.063 019	0.091 553	0.145 62
CH ₄	0.000 057 42	0.000 081 59	0.000 129 94
N ₂ O	0.000 000 19	0.000 000 26	0.000 000 42
CO ₂ eq	0.064 282	0.100 115	0.148 479

注:表中数据由 3 种主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的 GWP 指数计算得出。

表 5 基于各种能源(燃料)来源的排放因子
Tab.5 Emission factors based on various energy
(fuel) sources

能源(燃料)来源	排放因子(EC×GWP)	单位
柴油	2.68	kg CO ₂ eq/L
汽油	2.31	kg CO ₂ eq/L
润滑油	2.81	kg CO ₂ eq/L
电力	1.35	kg CO ₂ eq/kWh

注:包括分别考虑 100 年全球升温潜能值的 CO₂(1)、CH₄(25)和 N₂O(298)的净效应。

3.2 碳排放估算

根据 3.1 节所述模型,进行 R134a 制冷剂回收净化过程的气候性能评估,计算结果如图 4 所示。当对汽车空调中的残余制冷剂进行回收时,R134a 的直接泄漏量为 535 g;当对制冷剂不进行回收处理时,R134a 的直接泄漏量为 935 g。R134a 的总当量 CO₂ 排放量,以是否对汽车空调中的残余制冷剂进行回收处理分别计算得 704.6 kg、1 224.8 kg。对制冷剂进行回收净化处理可减少当量 CO₂ 排放约 42%。

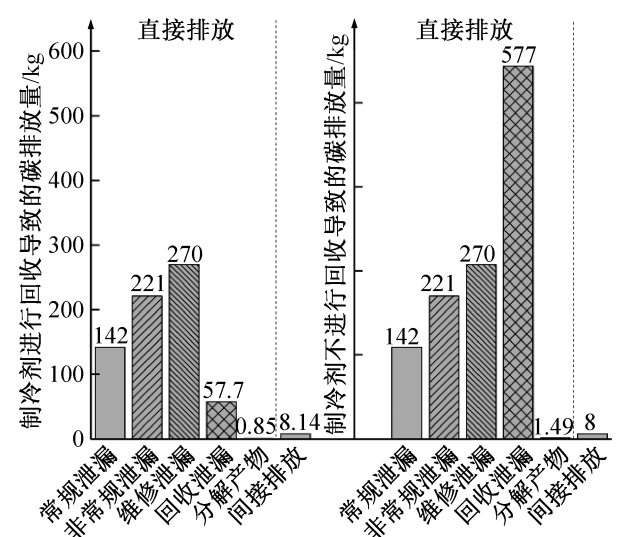


图 4 制冷剂不同处理方式导致的碳排放量
Fig.4 Carbon emissions caused by different refrigerant treatment methods

4 制冷剂回收再生的经济性分析

以回收再生汽车空调系统 R134a 为例,简要分析设备投资回收期 and 回收净化制冷剂售价的关系,计算结果如图 5 所示。当工厂达到 20 年的使用年限和 10 000 t 的年产量时^[20],每吨产品的建筑能源成本可以忽略。本文假设长期运营或年产量不少于 1 000 t,暂不考虑建筑成本。首先,购买制冷剂回收再生处理设备,初投资为单台全自动制冷剂回收净化再充注一体机价格约 72 000 元。设备按每日工作时长 6 h,每小时处理回收制冷剂 5 kg,年工作时长按 300 d 计。则单台制冷剂回收处理设备年处理量为 9 000 kg。设备使用年限设为 5 年。

参照 ISO 11650 : 1999^[21],每隔 30 d 或净化 200 kg 制冷剂就需要更换干燥过滤器。取分子筛干燥剂单价约为 15.4 元/kg,机器年维护费用为 762 元,2.5 吨货车每百公里交通运输费用为 460 元。按货车每月运输一次,年运输 12 次计(运输距离按上文估算

为 385 km), 制冷剂年交通运输费用约为 21 252 元。回收设备的功率取 700 W, 年耗电量为 1 260 kWh, 电费单价取上海市一般工商业用电价格为 0.72 元/kWh, 年设备耗电费用为 907 元。以每台一体机配一名工人计, 人工费用分别按 2019 年上海市月最低工资标准或年平均工资计, 则年人工成本约为 29 760 元或 78 045 元, 每年运行成本为 52 681 元或 100 966 元。

以 R134a 制冷剂售卖单价为 22 元/kg 计, 单台制冷剂回收净化设备年处理量为 9 000 kg, 回收净化率按 90% 计, 净化后制冷剂年产量为 8 100 kg。工人工资若按 2019 年上海市月最低工资标准, 则回收净化生产制冷剂售价低于 6.6 元/kg 时(新制冷剂市场价的 30%)投资成本回收期过长; 工人工资若按 2018 年上海市年平均工资计, 则回收净化生产制冷剂售价低于 14 元/kg 时(新制冷剂市场价的 64%)投资成本回收期过长。

工人工资若按月最低工资标准, 则净化后制冷剂售价应在 11 元/kg 以上可在 2 年内回收制冷剂回收净化设备的初投资; 工人工资若按年平均工资计, 则净化后制冷剂售价应在 16.9 元/kg 以上可在 2 年内回收制冷剂回收再生设备的初投资。

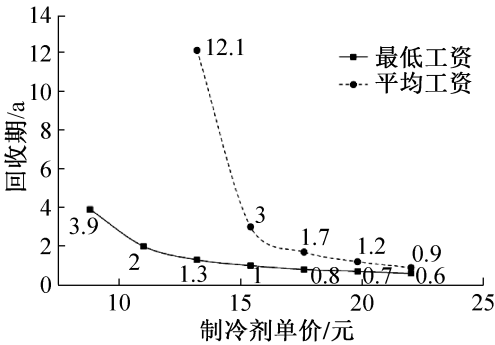


图 5 制冷剂单价与回收成本所需时间关系
Fig.5 The relationship between the unit price of refrigerant and the time required for recovery cost

5 小结

本文以制冷剂的回收再生过程为研究对象, 基于 LCCP 气候性能模型, 构建了制冷剂回收再生过程的碳排放量评估模型, 并对所构建模型, 以汽车空调制冷剂 R134a 的回收再生为案例, 计算其碳排放量及回收再生经济性, 得到如下结论:

1) 制冷剂的再生主要分为简易再生和蒸馏再生两种方法, 其中简易再生装置小、能耗低, 但再生后制冷剂纯度低只能在原设备中使用, 而蒸馏再生装置复杂、能耗高, 但再生后制冷剂纯度高。

2) 制冷剂回收再生过程的碳排放模型基于 LCCP 气候性能模型构建, 本文补充了制冷剂净化再生环节的碳排放模型, 包括制冷剂净化、再生过程的制冷剂泄漏和净化、再生过程能耗。

3) 以汽车空调用制冷剂 R134a 为例进行碳排放评估, 计算结果表明, 对汽车空调废旧制冷剂进行回收净化可减少约 42% 的当量 CO₂ 排放。

4) 对上述算例进行经济性分析表明, 若以月最低工资为工人工资标准, 则净化后制冷剂售价为 11 元/kg 时可在 2 年内收回设备初投资成本。

符号说明

- RefrigLeakage——制冷剂的直接泄漏量, g
- M_t ——每个城市汽车空调系统制冷剂的平均定期泄漏量, g/a
- leakRate——制冷剂年泄漏量, 取 SAE J2727 计算出的估计制冷系统年泄漏量, g/a
- AugTemp——各城市平均加权环境温度, °C。取上海市平均温度 17.35°C^[22]
- M_{ir} ——因汽车事故导致系统不定期平均制冷剂泄漏, g/a。取 17 g/a
- vLife——汽车使用寿命, 年。取 10 年
- M_x ——汽车空调系统使用期间维修造成的泄漏, g
- M_e ——制冷剂在汽车使用寿命结束时的损失, g
- M_a ——汽车装配过程中损失的制冷剂, g。取 3.5 g
- percentDiy——由未经培训的技术人员维修的百分比, %
- M_{px} ——因专业服务人员维修而造成的服务泄漏损失, g
- M_{dx} ——因非专业服务人员维修而造成的服务泄漏损失, g
- n ——汽车使用寿命内维修服务的次数, 次。按两年一次共计需要 5 次, n 为实际维修次数取 4 次, n_r 为实际需要次数取 5 次
- profServLoss——每次专业维修造成的泄漏, g
- M_{pr} ——每次专业维修时制冷剂罐内残余制冷剂损耗, g。取 5 g
- diyServLoss——每次自主维修造成的泄漏, g
- M_{dr} ——每次自主维修时制冷剂罐内残余制冷剂损耗, g。取 108 g
- Refmass——制冷剂初始充注量, g
- BeforeServLoss——维修前的泄漏量, g
- RefrigLeakageEq——制冷剂因泄漏造成的当量 CO₂ 排放量, kg

GWP_{dp} ——制冷剂大气分解产物的全球变暖潜能

$AtmoBreakManu$ ——制冷剂生产过程的分解产物, kg

$AtmoBreakLeak$ ——制冷剂泄漏导致的分解产物, kg

参考文献

- [1] 中国制冷空调工业协会. 制冷空调行业“十三五”规划[J]. 制冷与空调(北京), 2016, 16(7):4-13. (China Refrigeration and Air-Conditioning Industry Association. The 13th five-year plan of refrigeration and air-conditioning industry[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2016, 16(7):4-13.)
- [2] 中国制冷空调工业协会. 中国工商制冷空调行业 HFCs 制冷剂使用趋势研究报告[EB/OL]. (2014-12-01) [2021-01-08]. <http://www.epa.gov/cppd/mac/compare.htm>. (China Refrigeration and Air-Conditioning Industry Association. Research report on trends of HFCs refrigerant usage in China's industrial and commercial refrigeration and air-conditioning industry[EB/OL]. (2014-12-01) [2021-01-08]. <http://www.epa.gov/cppd/mac/compare.htm>.)
- [3] 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, 2017, 32(Suppl. 1):17-18.)
- [4] 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.)
- [5] 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.)
- [6] 上海第二军医大学制冷技术中心. 便携式制冷剂回收净化装置的开发与应用[J]. 上海环境科学, 1995, 6(14):37-41. (Shanghai Second Military Medical University Refrigeration Technology Center. Development and application of portable refrigerant recovery and purification equipment[J]. Shanghai Environmental Sciences, 1995, 6(14):37-41.)
- [7] 史琳, 安青松. 基于 LCCP 的制冷工质温室效应评价方法新拓展[J]. 制冷与空调(北京), 2015, 15(11):64-69. (SHI Lin, AN Qingsong. Evaluation of refrigerant environmental effect based on LCCP[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2015, 15(11):64-69.)
- [8] 王子伟. 汽车空调生命周期气候性能评估模型[D]. 上海:上海交通大学, 2014. (WANG Ziwei. Life cycle climate performance evaluation model for mobile air conditioning system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.)
- [9] 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.)
- [10] 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.)
- [11] JIHWAN P, INSANG J, WONHEE C, et al. Greenhouse gas emission offsetting by refrigerant recovery from WEEE: a case study on a WEEE recycling plant in Korea[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142:167-176.
- [12] 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.)
- [13] 梁志礼, 袁俊魁, 李杨. 汽车空调系统冷媒的回收研究[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2018(6):158, 160. (LIANG Zhili, YUAN Junkui, LI Yang. Research on recycling of refrigerant in automobile air conditioning system[J]. Auto Driving & Service, 2018(6):158, 160.)
- [14] 颜华平. 汽车空调制冷剂回收工艺的研究[J]. 中国新技术新产品, 2011(23):6-7. (YAN Huaping. Research on refrigerant recovery technology of automobile air conditioning[J]. New Technology and Products, 2011(23):6-7.)
- [15] 俞炳丰, 彭伯彦. CFCs 制冷剂的回收与再利用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. (YU Bingfeng, PENG Boyan. Recovery and reuse of CFCs refrigerant[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.)
- [16] Life cycle analysis to estimate the CO₂-equivalent emissions from MAC operation: SAE J2766-2019[S]. New York: Society of Automotive Engineers, 2019.
- [17] Mobile air conditioning system refrigerant emission charts for R-134a and R-1234yf: SAE J2727-2013[S]. New York: Society of Automotive Engineers, 2013.
- [18] ATKINSON W, HOFFPAUIR E. Mobile air conditioning society worldwide (MAC) survey 2005[EB/OL]. (2005-12-01) [2021-01-08]. <http://www.macsw.org>.
- [19] ATKINSON W. Mobile air conditioning society worldwide (MAC) 2016 field survey[EB/OL]. (2016-12-01) [2021-01-08]. <http://www.macsw.org>.
- [20] MCCULLOCH A, LINDLEY A. From mine to refrigeration:

a life cycle inventory analysis of the production of HFC-134a[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26 (8):865-872.

[21] Performance of refrigerant recovery and/or recycling equipment; ISO 11650:1999[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1999.

[22] 刘昕. 以上海市温度指数为基础的中国天气衍生产品设计 [D]. 上海:上海师范大学, 2020. (LIU Xin. China weather derivative product design based on shanghai temperature index [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020.)

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.