doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.012

工商业用低环境温度空气源热泵(冷水)机组碳足迹分析

屈博艺[1,2],吴俊峰[1,2],孙　云[1,2],赵盼盼[1,2],戴　琳[1,2],王寿川[1,2],宋　哲[1,2]
(1. 合肥通用机械研究院有限公司,合肥 230031;2. 国机通用机械科技股份有限公司,合肥 230031)

摘　要:为辨识工商业用低环境温度空气源热泵(冷水)机组碳足迹分析的关键阶段和主要影响因素,指导机组低碳设计,基于生命周期评价理论,对工商业用低环境温度空气源热泵(冷水)机组的原材料获取、加工装配、运行、运输、回收与处置5个阶段的主要碳排放分别进行了计算及敏感度分析。结果显示,在机组的整个生命周期中,碳排放的主要来源是运行阶段的电力消耗以及制冷剂的泄漏,占比超98%,其他阶段基本可以忽略;机组使用更低全球变暖潜值(*GWP*)的R454B制冷剂替换R410A制冷剂时,生命周期总碳排放量降低15.14%;机组的能效水平由2级提升为1级时,生命周期总碳排放量降低2.56%;能源结构变化带来的生命周期总碳排放量降低超过6.77%。工商业用低环境温度空气源热泵(冷水)机组生命周期的减碳应重点关注运行阶段,采用更低*GWP*的制冷剂、提升机组能效水平及国家能源结构中新能源比例是机组生命周期减碳的重要途径。

关键词:低环境温度空气源热泵(冷水)机组;生命周期;碳足迹;减碳策略
中图分类号:TH45　　**文献标志码:**A

Carbon footprint analysis on low ambient temperature air source heat pump (chiller) units for industrial and commercial use

QU Boyi[1,2], WU Junfeng[1,2], SUN Yun[1,2], ZHAO Panpan[1,2], DAI Lin[1,2], WANG Shouchuan[1,2], SONG Zhe[1,2]
(1.Hefei General Machinery Research Institute Co., Ltd., Hefei 230031, China;
2. Sinomach General Machinery Science & Technology Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: To identify the key stages and main influencing factors of carbon emissions during the lifecycle of low ambient temperature air source heat pump (chiller) units for industrial and commercial use, and to guide low-carbon design of the units, based on the theory of life cycle assessment, the main greenhouse gas emissions of low ambient temperature air source heat pump (chiller) units for industrial and commercial use were calculated and sensitivity analyzed in five stages: raw material acquisition, processing and assembly, operation, transportation, recovery and disposal. The results show that the main contributions of greenhouse gas emissions during the life cycle of the unit come from the electricity consumption and refrigerant emissions during the operating stage, accounting for over 98%, while other stages can be basically ignored. After replacing R410A with R454B, which has a lower global warming potential (*GWP*), the total greenhouse gas emissions decreased by 15.14%. When the energy efficiency level of the unit is increased from level 2 to level 1, the total greenhouse gas emissions are reduced by 3.03%. In addition, the change in energy structure has resulted in a reduction of over 6.77% in total greenhouse gas emissions. Therefore, the carbon reduction in the life cycle of low ambient temperature air source heat pump (chiller) units for industrial and commercial use should focus on the operating stage. Using refrigerants with low *GWP*, improving energy efficiency, and increasing the proportion of new energy in the national energy structure are important ways to reduce carbon emissions throughout the life cycle of the unit.

Key words:low ambient temperature air source heat pump (chiller) unit; life cycle; carbon footprint; carbon reduction strategy

收稿日期: 2024－05－11　**修回日期:** 2024－11－08
基金项目: 安徽省重点研发计划(2022f04020001);合肥通用机械研究院有限公司青年基金项目(2023010786)

0 引言

近年来，随着“煤改电”行动计划的推广及国家“双碳”目标的提出，空气源热泵（冷水）机组凭借其优越的节能减排特征，呈现出快速发展的态势。低环境温度空气源热泵（冷水）机组（以下简称机组）作为一种可以在室外温度为 –30 ℃、冷凝温度为 60 ℃的工况下稳定运行，且兼顾冬季制热和夏季制冷的机组，在我国北方地区建筑供暖、空调制冷领域备受青睐，且因为其灵活组合、易于部署等特点，广泛应用于写字楼、商场、宾馆等工商业场所。为顺应国家制冷行业绿色低碳发展需求，达到冷冻空调产品尤其是工商业用低环境温度空气源热泵（冷水）机组低碳发展的目的，有必要开展机组的碳足迹分析工作。开展机组的碳足迹分析可识别出生命周期碳排放的关键影响因素，寻求机组生命周期的减碳途径，评估减碳措施的有效性及效率，指导机组的优化设计，助力行业节能减排和碳达峰目标的实现。

对于空气源热泵机组的碳足迹核算和评价，国内外学者已经做了一些研究。吕凤等[1]对空气源热泵热水器进行了全生命周期的碳排放评价，对产品的生产、使用和报废处理 3 个阶段的碳排放进行了计算；ZHANG 等[2]采用模拟方法，对华北地区低温空气源热泵与其他传统供暖方式在一次能源消耗、二氧化碳排放、初始投资和运行成本等方面的差异进行了研究和比较；MATTINEN 等[3]采用生命周期方法，比较了直接电加热、传统空气源热泵和新型地源空气热泵进行住宅建筑空间供暖的能源使用和碳排放分析；YU 等[4]建立了包括太阳能、空气源热泵和燃气锅炉在内的新型热水系统，并根据实测的水、电和天然气消耗量，分析了新旧系统的综合能耗、碳排放和运行成本；LIU 等[5]建立了一个数学模型，与燃煤锅炉、壁挂式燃气锅炉、直接电采暖进行比较，综合评价空气源跨临界 CO_2 热泵系统的能源、经济和环境性能。杨远程等[6]对北京农村地区燃煤锅炉、两种不同末端形式的空气源热泵和燃气锅炉供暖的各个阶段的碳排放比例进行了对比分析。赵振生等[7]比较了地源热泵、污水源热泵、空气源热泵与 VRV 多联机系统供暖的额定能效比与碳排放量。郭扬等[8]提出一种低温空气源热泵减碳量的评估方法，对样机进行了减碳量评估。王宇等[9-12]对空气源热泵及太阳能复合热水系统、燃煤锅炉等的系统特性、环境影响进行了比较评价。

现有的机组碳足迹核算和评价工作侧重于机组应用于家用供暖领域的分析以及与传统化石能源供暖方式的减碳量比较，相关研究都没有考虑能效提升以及能源结构变化对机组生命周期碳排放的影响。与传统的家用供暖场景不同，机组近年来广泛应用于写字楼、商场、宾馆等工商业场所，除了满足冬季供暖需求外，还需满足建筑空调制冷的需求。因此，机组应用于家用建筑供暖碳足迹核算的研究结论并不完全适用于工商业用低环境温度空气源热泵（冷水）机组。

鉴于此，本文基于生命周期评价理念，旨在量化分析应用于工商业建筑供暖和空调制冷的机组的生命周期碳足迹。通过实例分析，识别出该机组在工商业不同应用场景下的关键碳排放环节及其主导影响要素，提出减碳优化策略与实施路径，以支持冷冻空调行业的低碳设计理念，并为其实践提供科学依据。

1 研究方法

生命周期评价（LCA）是目前国际上应用最广泛和被普遍接受的产品环境影响评价方法，应用 LCA 方法可以评估产品生命周期内各阶段的能源消耗、资源消耗和污染物排放带来的环境效应。GB/T 33224—2016《制冷和供热用机械制冷系统 环境影响评价方法》是基于 LCA 评价框架而制定，其中碳排放被作为相应的全球环境影响类别之一。本文使用 GB/T 33224—2016 给出的评价方法对机组的碳足迹进行定量评价。

1.1 研究目标

评估机组从原材料获取、加工装配、运输、运行、回收与处置等各个阶段的碳足迹，识别出碳排放的重点环节，从而为减碳策略提供指导，以降低产品的碳排放。

1.2 分析对象

选取某型机组为研究对象，功能单位选取 1 台机组。该机组的选取基于清单数据的可获得性，能够代表目标总体的特征和行为。本文评价的是该型机组生命周期的碳排放和减排效益。该型机组的主要技术参数见表 1。

表 1 机组主要技术参数和性能指标

Tab.1 Main technical parameters and performance indicators of the unit

名义制冷量 /kW	名义制热量 /kW	名义制冷性能系数 /（kW·kW^{-1}）	设计使用寿命 /a	制冷剂类型	设计充注量 /kg	制冷剂年泄漏率	制冷剂回收率
264	200	2.87	10	R410A	70	0.2%	0

表中制冷剂年泄漏率及制冷剂回收率均根据对工商用空气源热泵（冷水）机组的市场调研所得。

1.3 系统边界

碳足迹核算的系统边界包括：原材料获取、加工装配、运输、运行、回收与处置共 5 个阶段，核算过程中温室气体包括《京都议定书》规定的 CO_2，CH_4，N_2O，SF_6，HFCs 和 PFCs 共 6 类温室气体和机组使用的 HCFCs，HFOs，HCs 等制冷剂。系统边界如图 1 所示。

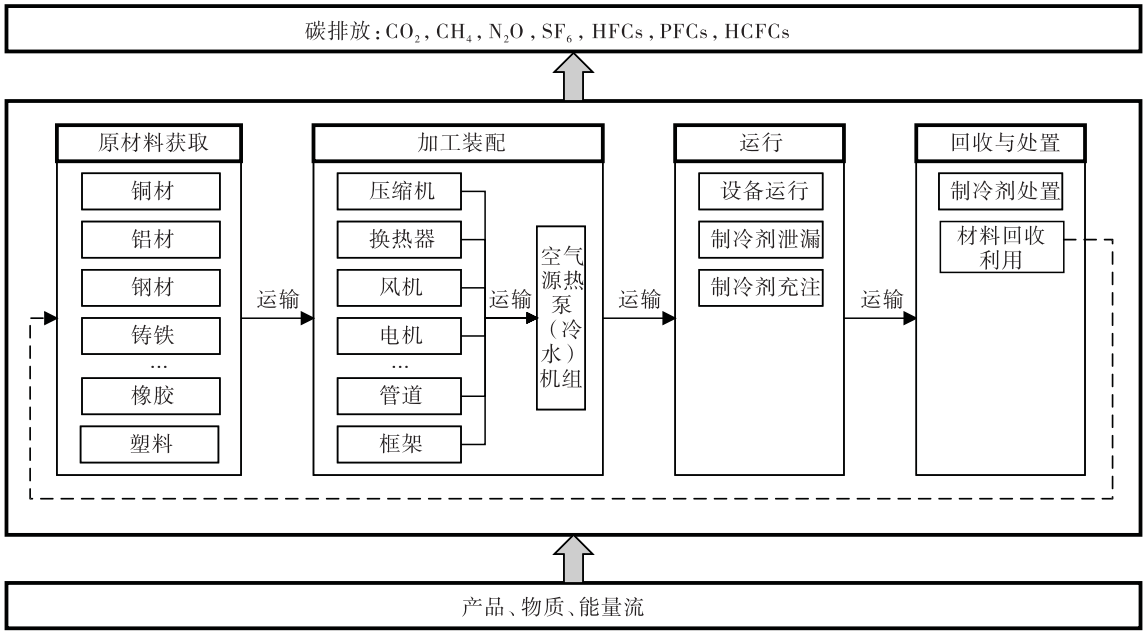


图 1 机组碳排放量计算的系统边界

Fig.1 System boundary for calculating unit carbon emissions

1.4 数据获取

在进行机组碳足迹的评估时，采用了 2 种类型的数据：基础数据和企业实际操作数据。基础数据主要包括材料、能源及碳排放系数，这些数据主要来源于中国产品全生命周期碳排放系数公开数据库[13]。企业实际操作数据涵盖了机组从原材料生产到报废全过程中对材料和能源的消耗情况。这些数据的获取基于机组的组装关系及其生产工艺流程等信息。

进行碳足迹分析时，限于某些过程数据收集困难，忽略了数据难以获得的过程，后续通过敏感度分析来明确上述忽略过程对整个生命周期碳排放的影响。

2 清单分析

依据 GB/T 33224—2016，机组生命周期总的碳排放量应按式（1）计算：

$$C_{LF}=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}m_{i,j}F_{i,j} \tag{1}$$

式中，C_{LF} 为产品生命周期总的碳排放量；$m_{i,j}$ 为机组第 i 阶段第 j 种投入物质、能量的用量；$F_{i,j}$ 为机组第 i 阶段第 j 种投入物质、能量的碳排放因子。

2.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段的碳排放主要来自于机组采用的原材料的生产过程。

本文研究过程中主要分析机组使用的铜、铝、铸铁等主要原材料，忽略重量占比小于 0.5% 的材料，但所选原材料的总重量超过机组总重量的 94%。

获得的机组原材料清单及碳排放因子见表 2。

表 2 原材料清单及碳排放因子

Tab.2 List of raw materials and carbon emission factors

名称	重量 /kg	排放因子[12]/（kg·kg^{-1}）
铸铁	79.33	2.280
钢	1 660.87	2.050
铜	415.81	5.795
铝	202.22	20.300
塑料	9.69	3.102
橡胶	13.25	3.080

2.2 加工装配阶段

加工装配阶段的碳排放主要来自于机组加工装配过程中所投入的物质与能量流，包括直接和间接的碳排放。本研究未考虑难以获取物质及能量数据的零部件生产过程以及装配过程中使用量较小的辅助材料所涉及的碳排放。机组在加工装配阶段的投入及排放物质清单详见表 3。

表 3 加工装配阶段清单及碳排放因子

Tab.3 List of processing and assembly stages and carbon emission factors

投入及排放物质类型	数量	碳排放因子[13]
电能	5 280 kW·h	0.570 3 kg·kW^{-1}·h^{-1}
CO_2	30.22 m^3	1.0 kg·kg^{-1}
氮气	40.94 m^3	90.8 kg·m^{-3}

2.3 运行阶段

运行阶段的碳排放量主要来自机组运行阶段的电力消耗以及制冷剂的泄漏。机组的电能消耗主要与建筑环境的房间冷 / 热负荷、机组制冷 / 热消耗功率和运行小时数相关。本文依据 GB/T 25127.1—2020 规定的方法进行生命周期电能消耗的估算。

制热季节耗电量 E_{HSTE} 按下式进行计算：

$$E_{\mathrm{HSTE}}=\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{L_h\left(t_j\right)-P_{RH}\left(t_j\right)}{COP_{\mathrm{bin}}\left(t_j\right)}+P_{RH}\left(t_j\right)\right]n_j \quad (2)$$

式中，$L_h(t_j)$ 为温度 t_j 时的房间热负荷，W；$P_{Rh}(t_j)$ 为机组在温度 t_j 时所投入辅助电加热的功率，W；$COP_{\mathrm{bin}}(t_j)$ 为各工作温度下的制热性能系数；n_j 为制热季节中制热的各温度下工作时间，s。

制冷季节耗电量 E_{CSTE} 按下式进行计算：

$$E_{\mathrm{CSTE}}=\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{Q_c\left(t_j\right)}{COP_{\mathrm{bin}}\left(t_j\right)}\right]n_j \quad (3)$$

式中，$Q_c(t_j)$ 为温度 t_j 时的房间冷负荷，W；$COP_{\mathrm{bin}}(t_j)$ 为各工作温度下的制冷性能系数；n_j 为制冷季节中制冷的各温度下工作时间。

依据 GB/T 25127.1—2020，以北京作为基准城市，酒店建筑作为基准应用场景，机组不同环境工况条件的实测性能数据见表 4。计算获得机组运行阶段在北京（酒店建筑）的总耗电量为 1.79×10^6 kW·h。

表 4 机组制热 / 冷实测性能

Tab.4 Heating/cooling performance of the unit

工况	部分负载率（%）	室外工况		室内工况	制热量 /W	输入功率 /W	*COP*
		干球温度 /℃	湿球温度 /℃	干球温度 /℃			
			制热条件				
A	132	−20	—	20	162 804	80 137	2.03
B	100	−12	−13.5	20	198 474	81 672	2.43
C	80	−7	−8	20	165 020	60 927	2.71
D	44	2	1	20	136 457	39 311	3.32
E	24	7	6	20	67 850	19 437	3.36
			制冷条件				
A	157	43	—	7	220 281	106 722	2.06
B	100	35	—	7	262 938	92 353	2.85
C	57	29	—	11	145 583	38 648	3.77
D	29	25	—	13	76 497	19 605	3.90

由于制冷剂回收率为 0，因此机组生命周期制冷剂所导致的碳排放量仅考虑运行阶段的制冷剂泄漏，公式如下：

$$C_{U,R}=m\left(1+LN\right)GWP \quad (4)$$

式中，$C_{U,R}$ 为机组使用制冷剂导致的碳排放量，kg；m 为机组充注量，kg；L 为制冷剂年泄漏率；N 为机组的运行寿命，a，按表 1 取值；GWP 为全球变暖潜值。

根据企业给出的相关数据计算得到使用制冷剂导致的碳排放量为 71.4 kg。

2.4 运输阶段

在运输阶段，温室气体的排放主要来源于运输工具的能源使用和排出的废气。考虑到原材料、外购件在运输过程中的复杂性，以及机组报废过

程、生产过程物料搬运的距离和能源消耗量难以精确统计和分配，本研究忽略了这些过程中的运输碳排放，选择了机组从生产商到使用场所的运输距离进行分析。

根据调研获得的运输过程和碳排放因子见表 5。

表 5 运输过程清单及碳排放因子

Tab.5 List of transportation processes and carbon emission factors

外购件运输过程	车辆类型	碳排放因子[13]/(kg·kg^{-1}·km^{-1})	运输距离 /km	重量 /kg
压缩机到生产商	柴油货车运输（8 t）	0.179	700	364
室外风机到生产商	柴油货车运输（8 t）	0.179	1100	138
铜管到生产商	柴油货车运输（8 t）	0.179	600	163.05
制冷剂到生产商	柴油货车运输（10 t）	0.129	150	70
钣金材料到生产商	汽油货车运输（18 t）	0.104	300	920
控制器到生产商	汽油货车运输（8 t）	0.115	1904	13.33
生产商到使用场所	柴油货车运输（10 t）	0.129	750	2540

2.5 回收与处置阶段

在该阶段，碳排放主要来自于原材料的回收再利用。限于数据的可获得性以及行业实际情况，假设机组寿命期后制冷剂全部排放不做额外处理。产品回收与处置阶段的碳排放应按下式计算：

$$C_R = -\sum_{i=1}^{n} m_i F_{C,i} \varphi_{r,i} A_{r,i} \quad (5)$$

式中，C_R 为机组回收与处置阶段的碳排放量，kg；n 为机组可回收的原材料总数；m_i 为第 i 种原材料的耗量，kg；$\varphi_{r,i}$ 为第 i 种原材料的回收率；$A_{r,i}$ 为第 i 种原材料的分配系数。

机组主要用材的材料回收率和分配系数根据资料调研选取，结果见表 6[15]。

表 6 材料回收率和分配系数

Tab.6 Material recovery rate and distribution coefficient

材料	回收率	分配系数	材料	回收率	分配系数
铸铁	0.6	0.5	铝材	0.4	0.5
钢材	0.6	0.5	橡胶	0.5	0.5
铜材	0.6	0.5	塑料	0.3	0.5

3 结果分析

3.1 碳足迹计算结果及贡献分析

对机组的生命周期碳排放进行量化计算，结果见表 7。

表 7 机组碳排放量计算结果

Tab.7 Calculation results of carbon emissions from unit

阶段	原材料获取	加工装配	运行		运输	回收与处置	全生命周期
			电力消耗	制冷剂泄漏			
CO_2 当量 /kg	1.02×10^4	3.07×10^3	1.02×10^6	1.49×10^5	4.33×10^2	-2.63×10^3	1.18×10^6
占比	0.86%	0.57%	86.14%	12.61%	0.04%	−0.22%	100%

从表 7 中可以看出，该机组碳排放主要来自于机组运行阶段，占比为 98.75%。其中，电力消耗和制冷剂泄漏分别占比 86.14% 和 12.61%。相比之下，其他各个阶段的碳排放占比都非常小，因此可以不予考虑。

3.2 敏感度分析

3.2.1 机组应用于不同区域

为了分析不同区域对碳足迹的影响，选取了 GB/T 25127.1—2020 规定的酒店建筑，以典型城市北京、济南、兰州、太原和西安为例，进行了不同温区的碳排放量计算，结果如图 2 所示。从图可见，无论机组运行在何区域，电力消耗带来的碳排放均是主要排放源，占比在 83.17% 以上；且机组制热运行带来的碳排放明显高于制冷运行，制热运行时运行能耗最大的环境条件集中于 −7~2 ℃。

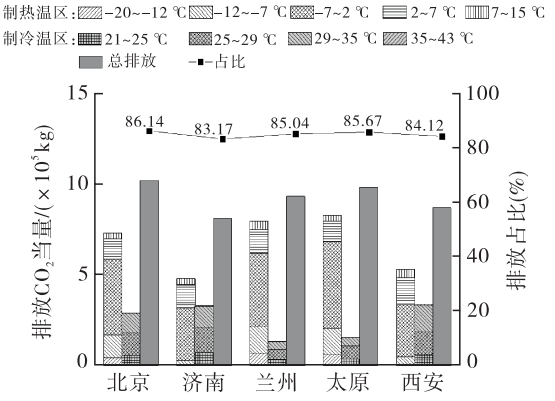


图 2 机组运行在不同地区的碳排放量对比

Fig.2 Comparison of carbon emissions during unit operation in different regions

因此，为了降低机组的碳排放，应重点优化机组制热工况下的性能参数，尤其是 –7~2℃环境温度运行工况条件下性能的优化。

3.2.2 机组应用于不同场景

选取 GB/T 25127.1—2020 规定的机组运行在典型城市北京的酒店建筑、办公建筑和租赁商铺的各温度发生时间，经计算，不同运用场景的耗能量对碳足迹的影响如图 3 所示。从图中可以看出，由于机组在不同场景下运行时间的不同，机组运行阶段电能消耗带来的碳排放量不同，但机组制热运行带来的碳排放均高于制冷运行，制热运行时运行能耗最大的环境条件集中于 –7~2 ℃。

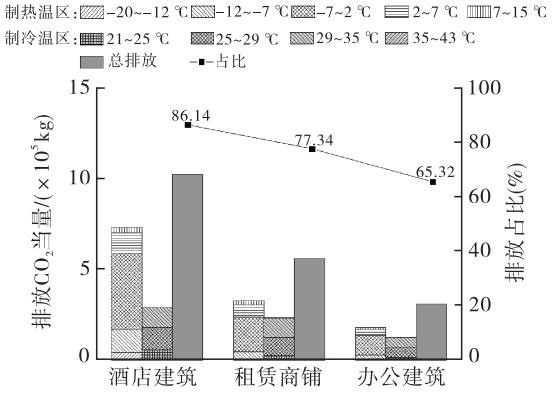


图 3 不同场景机组运行阶段电能消耗对碳排放的影响

Fig.3 The impact of electricity consumption on greenhouse gas emissions during the operation stages of units in different scenarios

3.3.3 制冷剂替代后的减碳量分析

R454B 作为一种新型替代工质，可以直接用于替代 R410A 制冷剂。在研究过程中，将机组的制冷剂由 R410A 直接替换为 R454B 时，经实测，相较于 R410A 机组，R454B 充注量减少 17%，制冷性能系数 *COP* 提高 4.1%，制热性能系数 *COP* 提高 3.4%，通过计算确定，相较于 R410A，R454B 机组生命周期总的减碳量为 1.79×10^5 kg，降低了 15.14%，因此，采用更低 *GWP*、性能良好的制冷剂，对机组减碳具有重要意义。

3.2.4 制冷剂回收的减碳量分析

由于空气源热泵寿命期后制冷剂回收再处理的成本高，因此，目前该部分制冷剂基本是直接排放。但在未来严格控制非二氧化碳碳排放的形势下，制冷剂回收率将会上升。因此本文对不同制冷剂回收率下的机组碳排放进行分析，结果见表 8。表中减碳率是不同制冷剂回收率下的机组碳排放与制冷剂零回收率下的机组碳排放相比较的结果。由于制冷剂回收过程的电耗等资源消耗数据较难获得，本文对此进行了忽略。

表 8 不同制冷剂回收率下的机组碳排放

Tab.8 Carbon emissions of the unit under different refrigerant recovery rates

制冷剂回收率	全生命周期碳排放量 /（$\times10^6$ kg）	减碳率
20%	1.15	2.47%
40%	1.12	4.95%
60%	1.10	7.42%
80%	1.07	9.89%
100%	1.04	12.36%

从表中可以看出，当制冷剂回收率每升高 20%，生命周期总碳排放量就会降低 2.47%。当制冷剂全部回收处理时，生命周期总碳排放量降低了 12.36%。这说明制冷剂的回收对于减少碳排放、保护环境具有重要意义。

3.2.5 加工装配与运输过程的影响

上述分析过程中忽略了机组外协件和部分零部件加工装配过程以及用量较少的辅材的碳排放，为了更精确地评估其影响程度，本文采用了敏感度分析的方法。假设将加工装配和运输阶段的碳排放量分别放大到原来的 10 倍，保持其它因素不变。分析结果显示，生命周期总碳排放量增幅仅为 5.16% 和 0.33%，说明加工装配阶段和运输阶段的碳排放占整个生命周期的排放量基本可以忽略。

3.2.6 能效水平提升后的减碳量分析

根据文献[14]规定可知，本研究机组属于 2 级能效，选取 1 级能效产品与原机组进行减碳量的比较分析。根据企业调研和分析可知，相比于 2 级能效产品，原材料增加 8.72%，制冷剂增加 11.36%，机组综合性能系数提高 4.70%。生命周期总碳排放量降幅为 2.56%。这说明能效水平的提升可以对机组的减碳具有积极意义。

3.2.7 不同能源结构的影响

在本文前述研究中，机组运行寿命的十年期碳排放量计算使用的全国电网碳排放因子为固定值，但随着能源结构的不断优化，以及可再生能源比例的不断提升，电网碳排放在逐年递减，其对机组运行阶段造成的碳排放量影响明显，因此应根据逐年变化的电网碳排放因子预测机组寿命期运行阶段的碳排放量。

根据 2015~2022 年官方公布的全国电网碳排放因子[15]以及文献[16]给定的强化情景下 2035 年的电网碳排放因子预测方法，本文预估了 2023~2032 十年的碳排放因子和机组运行的年碳排放量，如表 9 所示。

表 9 2023~2032 预测全国电网碳排放因子

Tab.9 Predicting National Grid Carbon Emission Factors from 2023 to 2032

年份	碳排放因子 /（$kg \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$）	年运行电能消耗碳排放 /kg
2023	0.565 05	2 153.98
2024	0.557 47	2 125.09
2025	0.549 43	2 094.44
2026	0.540 94	2 062.07
2027	0.531 99	2 027.96
2028	0.522 58	1 992.09
2029	0.512 71	1 954.46
2030	0.502 39	1 915.12
2031	0.491 60	1 873.99
2032	0.480 34	1 831.07

经对比分析，能源结构变化带来的运行阶段电能消耗碳排放量降低 7.86%，生命周期总碳排放量降低 6.77%。说明国家能源结构中可再生能源比例的不同提升，也可以有效降低机组生命后期的碳排放。

4 结论

（1）低温环境温度空气源热泵（冷水）机组碳排放主要来自机组运行阶段的电力消耗和制冷剂的泄漏。其它阶段的碳排放经 10 倍率分析后认为可以忽略。

（2）机组若能针对不同的运行地区和场景进行优化设计，特别是提高在 -7~2 ℃环境条件下制热运行的效率，则能够显著减少机组的碳排放；

（3）制冷剂由 R410A 更换 R454B 后，由于全球变暖潜能降低，机组生命周期总碳排放量可减少 15.14%，说明更换绿色型制冷剂能有效降低机组碳排放；当制冷剂全部回收处理时，生命周期总碳排放量降低了 12.36%。说明制冷剂的回收对于减少碳排放、保护环境具有重要意义。

（4）能效水平从 2 级提升至 1 级后，总碳排放量降幅为 2.56%；当能源结构提升，电能消耗碳排放因子逐年降低导致的生命周期总碳排放量降低超 6.77%。说明机组低碳评价限定值的设定应充分考虑工业发展水平提升后的能源结构变化及机组能效水平的逐步提升。

参考文献：

[1] 吕凤，赖丽娟，饶国燃 . 空气源热泵热水器全生命周期碳排放研究 [J]. 节能，2015，34（4）：23 – 25.
LYU F，LAI L J，RAO G R.Life cycle carbon emissions research of air source heat pump [J].Energy Conservation，2015，34（4）：23 – 25.

[2] ZHANG Q L，ZHANG L，LIU Y L.Suitability analysis of the heating method of low temperature air source heat pump applied in north china [J].Energy Procedia，2017，105：2569 – 2574.

[3] MATTINEN M K，NISSINEN A，HYYSALO S，et al. Energy use and greenhouse gas emissions of air-source heat pump and innovative ground–source air heat pump in a cold climate [J].Journal of Industrial Ecology，2015，19（1）：61 – 70.

[4] YU Y，YU K Z，ZHANG H.The energy-saving and carbon emission analysis of solar-assisted air source heat pump system for hot water supply [J].Applied Mechanics and Materials，2015，42（799/800）：1440 – 1444.

[5] LIU S C，LI Z，DAI B M，et al.Energetic，economic and environmental analysis of air source transcritical CO_2 heat pump system for residential heating in China [J]. Applied Thermal Engineering，2019（148）：1425 – 1439.

[6] 杨远程，路宾，何涛，等 . 北京农村地区冬季供暖系统碳排放研究 [J]. 建筑科学，2018，34（12）：87 – 91.
YANG Y C，LU B，HE T，et al.Investigation on carbon emission of heating system in beijing rural regions [J]. Building Science，2018，34（12）：87 – 91.

[7] 赵振生，王美，刘晓敏，等 . 武汉地区热泵模式能效与碳排放分析 [J]. 施工技术，2023，52（10）：130 – 134.
ZHAO Z S，WANG M，LIU X M，et al.Analysis of energy efficiency and carbon emission of heat pump modes in Wuhan [J].Construction Thechnology，2023，52（10）：130 – 134.

[8] 郭扬，刘骏亚，包继虎，等 . 地域与建筑类型对低环温空气源热泵减碳量定量评估的影响分析 [J]. 流体机械，2024，52（2）：67 – 74.
GUO Y，LIU J Y，BAO J H，et al.Analysis of the influence of region and building type on the quantitative evaluation of carbon reduction of low ambient temperature air source heat pump [J].Fluid Machinery，2024，52（2）：67 – 74.

[9] 王宇，由世俊，孙颖楷，等 . 夏热冬暖地区空气源热泵与太阳能复合热水系统试验研究 [J]. 流体机械，2017，45（12）：58 – 62.

WANG Y, YOU S J, SUN Y K, et al. Experimental investigations on air source heat pump and solar composite water heating system in hot summer and warm winter area [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(12): 58 – 62.

[10] 胡文举，张帅，李德英，等 . 北京地区空气源热泵供暖系统的应用研究 [J]. 流体机械，2017，45(7)：58 – 61.
HU W J, ZHANG S, LI D Y, et al. Study on the application of air source heat pump heating system in beijing area [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(7): 58 – 61.

[11] 乔桂楠，王宇，李艳菊，等 . 基于空气源热泵与新型通水地板的辐射供暖系统应用分析 [J]. 流体机械，2022，50(3)：88 – 95.
QIAO G N, WANG Y, LI Y J, et al. Application analysis of radiant heating system based on air source heat pump and the new type of water-passing floor [J]. Fluid Machinery, 2022, 50(3): 88 – 95.

[12] 黄凯良，侯旭，冯国会 . 基于 TRNSYS 的严寒地区地热辅助的空气源热泵系统研究 [J]. 流体机械，2023，51(7)：83 – 90.
HUANG K L, HOU X, FENG G H. Study on geothermal-assisted air source heat pump system in cold region based on TRNSYS [J]. Fluid Machinery, 2023, 51(7): 83 – 90.

[13] 中国产品全生命周期碳排放系数库 [EB/OL]. 中国城市温室气体工作组，2024–04–26. https://lca.cityghg.com.
China Products Carbon Footprint Factors Database [EB/OL]. China Ciy Greenhouse Gas Working Croup, 2024–04–26. https://lca.cityghg.com.

[14] BENJAMIN G, ADISA A. Domestic heat pumps: Lifecycle environmental impacts and potential implications for the UK [J]. Energy, 2012, 39(1): 205 – 217.

[15] 魏夕凯，谭效时，林明，等 .2005—2035 年全国电网碳排放因子的计算与预测 [J]. 综合智慧能源，2024，46(3)：72 – 78.
WEI X K, TAN X S, LIN M, et al. Calculation and prediction of carbon emission factors for the national power grid from 2005 to 2035 [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(3): 72 – 78.

[16] 李萍，杨红义，刘琳，等 . “碳中和” 目标下中国核电发展 [J]. 节能技术，2023，41(1)：10 – 15.
LI P, YANG H Y, LIU L, et al. Development of nuclear power in China under carbon neutrality target [J]. Energy Conservation Technology, 2023, 41(1): 10 – 15.

作者简介：屈博艺（1993），女，工程师，硕士，主要从事绿色高效制冷空调技术研究工作，通信地址：230031 安徽省合肥市长江西路 888 号合肥通用机械研究院有限公司，E – mail：56798970@qq.com。

本文引用格式：
屈博艺，吴俊峰，孙云，等 . 工商业用低环境温度空气源热泵（冷水）机组碳足迹分析 [J]. 流体机械，2025，53(2)：94 – 101.
QU B Y, WU J F, SUN Y, et al. Carbon footprint analysis on low ambient temperature air source heat pump (chiller) units for industrial and commercial use [J]. Fluid Machinery, 2025, 53(2): 94 – 101.

（上接第 40 页）

[21] 于晓慧，王甜，高志 . 真空管直膨式太阳能热泵系统性能分析 [J]. 太阳能学报，2023，44(11)：166 – 173.
YU X H, WANG T, GAO Z. Performance analysis of evacuated tube direct-expansion solar-assisted heat pump systems [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 166 – 173.

[22] 宁旭丹 . 乙醇分割式 MVR 热泵精馏系统设计及其优化研究 [D]. 北京：北京石油化工学院，2020.
NING X D. Design and optimization of etnanol separate heat pump distillation system [D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2020.

作者简介：廉文韬（1999），男，硕士研究生，主要从事机械蒸汽再压缩（MVR）技术及其应用研究，E – mail：13485491386@163.com。

通信作者：宁旭丹（1994），女，博士研究生，主要从事热力系统节能优化研究，通信地址：710049 陕西省西安市中国西部科技创新港西安交通大学能源与动力工程学院，E – mail：xdning@stu.xjtu.edu.cn。

本文引用格式：
廉文韬，吴小华，杨鲁伟，等 . 乙醇分割式机械蒸汽再压缩热泵精馏系统开发及性能研究 [J]. 流体机械，2025，53(2)：33 – 40.
LIAN W T, WU X H, YANG L W, et al. Development and performance study of ethanol external separate mechanical vapor recompression heat pump distillation system [J]. Fluid Machinery, 2024, 53(2): 33 – 40.