doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.01.011

冷冻空调设备生命周期碳排放评价方法

张秀平[1,2],屈博艺[1,2],吴俊峰[1,2],胡一清[1],周　全[1,2],葛　坦[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 230601）

摘　要:我国冷冻空调设备碳排放评价、认证认可技术方面的研究基础较薄弱,为了给研究冷冻空调设备生命周期碳排放评价方法提供思路,本文对国内外碳排放计算及评价的相关标准和文献进行了详细综述和分析。结果表明,对于冷冻空调设备,国内外缺失碳排放核算的技术标准,需针对冷冻空调设备的特点,制定其生命周期的碳排放计算方法;不同产品的生命周期各阶段碳排放核算方法具有一定的相似性,但又具有一定的差异性,需根据数据的可获得性和方法的可操作性来确定;建立通用的生命周期碳排放评价方法是必要的,随着新材料新技术应用,以及产品能效提升和地区能效差异,技术评价方法需具有包容性和开放性。研究结果可为我国制定冷冻空调设备的碳排放计算方法提供参考。

关键词:冷冻空调;碳排放;生命周期;评价方法
中图分类号:TH45;TB65　　**文献标志码:**A

The evaluation method of carbon emissions during the life cycle of refrigeration and air conditioning equipment

ZHANG Xiuping[1,2],QU Boyi[1,2],WU Junfeng[1,2],HU Yiqing[1],ZHOU Quan[1,2],GE Tan[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 230601,China）

Abstract: The research foundation for carbon emission evaluation,certification and accreditation technology of refrigeration and air conditioning equipment in China is relatively weak. In order to provide ideas for the study of life cycle carbon emission evaluation methods for refrigeration and air conditioning equipment,this article provides a detailed review and analysis of relevant standards and literature on carbon emission accounting and evaluation at home and abroad. The results show that for refrigeration and air conditioning equipment,there is a lack of technical standards for carbon emission accounting at home and abroad,and it is necessary to develop a life cycle carbon emission accounting method based on the characteristics of refrigeration and air conditioning equipment;the calculation methods for carbon emissions at different stages of the lifecycle of different products have certain similarities and differences,mainly determined by the availability of data and the operability of the methods;it is necessary to establish a universal lifecycle carbon emission assessment method. With the application of new materials and technologies,the improvement of product energy efficiency,and regional energy efficiency differences,the technical assessment method should have a certain degree of inclusiveness and openness. The research results can provide reference for China to formulate carbon emission accounting methods for refrigeration and air conditioning equipment.

Key words:refrigeration and air conditioning;carbon emission;life cycle;evaluation method

0　引言

冷冻空调设备的碳排放涉及生命周期的各个阶段,开展冷冻空调行业的节能减排和高全球变暖潜能值(Global Warming Potential,GWP)制冷剂淘汰行动,预计每年可直接减少碳排放超过3亿吨,因此,冷冻空调设备的节能减排效果将直接影响“双碳战略”的实施。

目前,我国冷冻空调设备碳排放评价、认证认可技术方面的研究基础薄弱,主要体现在以下几

收稿日期: 2024－04－16　**修回日期:** 2024－08－23
基金项目: 安徽省重点研发计划项目(2022f04020001);合肥通用机械研究院青年基金项目(2023010786)

个方面：（1）行业缺乏统一基准的冷冻空调设备碳排放计算和评价方法，评价边界、核算模型和评价准则的不统一，无法实现低碳产品碳排放的有效量化评定；（2）行业低碳评价数据库亟待建立，目前已建立和实施产品碳排放评价的国家均构建了基础评价数据库，而我国缺乏相关数据库，数据获取渠道不统一，低碳评价的过程数据计量和监测手段缺失，导致数据搜集难度大、可信度低；（3）如何保证低碳评价结果的准确性、一致性和可信性，低碳认证过程评价报告、认证机构能力、数据质量及现场核验方法的不统一，导致低碳评价公信力差。

因此，冷冻空调设备的节能减排离不开碳排放量化评价工作的支持，通过碳排放量化评价可以进行低碳产品的认定和生命周期碳排放量评估，有助于企业管理自身产品和服务的碳排放，协助产品生命周期内寻找降低碳排放的机会，追踪评估低碳措施的有效性及效率，可以加快低碳技术和产品推广目录的制定，引导低碳生产和消费，促进我国冷冻空调产品减排降耗。基于此，本文对国内外碳排放计算及评价的相关标准和文献进行详细综述和分析，并指出我国制定冷冻空调设备的碳排放计算方法的思路。

1 相关标准现状

由于涉及冷冻空调设备的碳排放核算和评价相对应的标准较少，以下调研主要针对国内外已制定的碳排放计算与评价相关标准进行分析。

对碳排放量的核算，至今仍没有形成统一的标准。国际碳排放计算体系主要由自上而下的宏观层面计算和自下而上的微观层面计算两部分构成。前者以联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）的《国家温室气体清单指南》为代表，它通过对国家主要的碳排放源进行分类，在部门分类下再构建子目录，直到将排放源都包括进来，它本质上是通过自上而下层层分解来进行计算的。而自下而上的碳核算通过对企业和产品碳足迹的核算，了解各类微观主体（包括企业、组织和消费者）在生产过程或消费过程中的温室气体排放情况，理论上可以汇总得到关于一定区域内的碳排放总量。该种计算方式主要包括 3 种方法：（1）基于产品的核算，主要是基于产品生命周期“碳足迹”，以 PAS 2050 标准为代表；（2）基于企业 / 组织的计算，通过排放因子法来计算碳排放；（3）基于项目的计算，重点确定基准线排放。

本文旨在探讨冷冻空调设备的碳排放评价方法，基于冷冻空调设备的产品属性，主要对产品的碳排放核算和评价方法开展调研、分析。

1.1 国外标准和国际标准

1.1.1 PAS 2050：2008

英国标准协会发布的 PAS 2050：2008 *Guide to PAS 2050 How to Assess the Carbon Footprint of Goods and Services* 是全球首个产品碳足迹标准，其主要针对产品和服务进行碳足迹评价。对产品碳排放的评价涵盖了产品的整个生命周期，包括原材料获取、生产、销售、使用和废弃处理。

企业可利用该标准对其产品 / 服务在整个生命周期内的碳足迹进行评价，并在评价后加贴碳标识。该标准的宗旨是帮助企业在管理自身生产过程中所形成的温室气体排放的同时，寻找在产品设计、生产和供应等过程中降低温室气体排放的可能，以帮助企业降低产品或服务的碳排放，最终开发出更低碳足迹的新产品。

该标准是一个通用性的产品碳足迹评价标准，对产品碳排放评价如何确定系统边界、该系统边界内与产品有关的温室效应气体（Greenhouse Gas，GHG）排放源、完成分析所需的数据要求及核算方法作了明确规定。各产品可以参照该标准的计算方法，选用合适的方法进行评价。

1.1.2 ISO 14067—2018

国际标准化组织制定的 ISO 14067—2018 *Greenhouse Gases—Carbon Footprint of Products—Requirements and Guidelines for Quantificatio*n 主要为量化商品或服务（统称为产品）在其整个生命周期中，由于直接和间接活动所产生的温室气体排放总量。基于 ISO 14040/44 *Environmental Management–Life Cycle Assessment–Principles and Frameworks* 中方法，评估产品生命周期内各阶段的温室气体排放量。

该标准与 PAS 2050：2008 类似，是一个通用性的产品碳足迹评价标准，规定了与产品相关的生命周期阶段应该包括原材料采购、生产、销售、使用和报废处理整个生命周期，并给出了产品碳排放所需的流程等。

1.1.3 ISO 16759—2013

ISO 16759—2013 *Graphic Technology—Quantification and Communication for Calculating*

the Carbon Footprint of Print Media Products 规定了量化使用各种印刷技术制造印刷媒体产品过程中产生的碳足迹的要求，涵盖在用户认知和控制范围内的所有相关过程、材料和技术。该标准基于生命周期评估（LCA）方法，通过设定系统边界和确定功能单位，为进行全面或部分的碳足迹研究提供了基础。这些信息旨在为整个印刷媒体产品供应链提供参考。

该标准为组织可遵循的碳核算提供了框架，可作为市场或行业特定碳足迹工具的结构。在此框架方法中构建的研究和工具提供了可验证和验证的印刷媒体产品的碳足迹量化。

该标准为印刷媒体行业提供了一个可遵循的碳核算框架，可以作为构建市场或行业特定碳足迹工具的基础结构。在这个框架方法下开发的研究和工具，能够提供可信度高的印刷媒体产品碳足迹量化结果。

该标准给出了印刷媒体产品碳排放核算的系统边界、生命周期阶段、各阶段核算方法、数据获取与分配方法，并给出了评估案例。冷冻空调设备的生命周期碳排放的核算可以参考本标准的思路。

上述国外及国际标准中，PAS 2050:2008，ISO 14067—2018 仅规定了产品碳排放评价的通用原则和要求，国际标准 ISO 16759—2013 针对于印刷媒体产品。然而不同的产品具有不同的特点，对于冷冻空调设备而言，应该建立一套适合我国国情及行业发展水平的生命周期碳排放评价标准。

1.2 国内标准

1.2.1 GB/T 33224—2016

GB/T 33224—2016《制冷和供热用机械制冷系统环境影响评价方法》规定了基于生命周期评价的机械制冷系统环境影响评价的基本原则与框架、评价方法及报告的一般要求。该标准基于生命周期评价方法，核算制冷系统的生命周期环境负荷，评价分析了制冷系统生命周期中或具体单元过程潜在的环境影响。该标准中界定的制冷系统生命周期的系统边界包括：原材料生产（钢、铜、铝等主要金属材料等）及能源生产（电力、天然气等）、零部件生产、制冷系统装配、制冷系统运输、制冷系统使用及维护、制冷系统回收及处置等阶段。制冷系统生命周期选取了不可再生资源消耗、全球气候变暖、同温层臭氧减少、酸化、富营养化、光化学剂形成、人体毒性和生态毒性共 8 类环境影响类型。

生命周期清单因子 q（如碳排放）的生命周期清单结果核算公式为：

$$Q_q = \sum_i m_i q_i + Z_q \tag{1}$$

式中，Q_q 为制冷系统生命周期清单因子 q 的清单结果；m_i 为制冷系统生命周期内第 i 种原材料、能源的直接消耗量；q_i 为第 i 种原材料、能源单位消耗量的生命周期清单因子 q 的流量；Z_q 为制冷系统生命周期内清单因子 q 的直接消耗量。

1.2.2 RB/T 016—2019

RB/T 016—2019《低碳产品评价方法与要求 复印机、打印机和速印机》适用于复印机、打印机和速印机生产企业内部或对外公开的产品生命周期的关键阶段碳排放评价，也适用于第三方机构评价产品生命周期的关键阶段碳排放结果和评价低碳产品。该标准根据产品的特点，选取原材料获取阶段和产品使用 2 个阶段，作为产品碳排放评价的生命周期关键阶段。

原材料获取阶段的碳排放定义为：

$$G_m = \sum_{i=1}^{n} M_i \times EF_i \tag{2}$$

式中，G_m 为原材料获取阶段的碳排放，kg；M_i 为原材料获取阶段的第 i 类物质（零件、材料）实物量，kg；EF_i 为第 i 类物质排放因子，kg/kg。

产品使用阶段的碳排放定义为：

$$G_u = P_w T_w EF_{电} \tag{3}$$

式中，G_u 为产品使用阶段的碳排放，kg；P_w 为静电成像产品使用时的典型能耗（kW·h/ 周）或模板成像产品生命周期内的能源消耗量（kW）；T_w 为静电成像产品生命周期内的运行时间（周）或模板成像产品生命周期内的运行时间（T_w=1 周）；$EF_{电}$ 为某年度中国区域电网平均 CO_2 排放因子。

1.2.3 RB/T 017—2019

RB/T 017—2019《低碳产品评价方法与要求 三相配电变压器》用于额定容量 30~2 500 kVA、额定频率 50 Hz 和电压等级为 10 kV、三相、无励磁调压的油浸式配电变压器、油浸式非晶合金铁心配电变压器、干式配电变压器和干式非晶合金铁心配电变压器的生命周期关键阶段的碳排放评价，也适用于第三方机构评价产品生命周期的关键阶段碳排放结果和评价低碳产品。基于对三相配电变压器产品的全生命周期碳排放分析，选取

原材料获取和产品使用两个阶段，作为产品碳排放量评价的生命周期关键阶段。

原材料获取阶段的碳排放核算公式为：

$$E_i = \sum_{i=1}^{n} M_i \times EF_i / C \tag{4}$$

式中，E_i 为原材料获取阶段的碳排放；i 为材料种类；M_i 为单台产品的材料用量；C 为变压器的额定容量。

使用阶段的碳排放不作核算，但应按标准 GB/T 1094.1—2013《电力变压器 第 1 部分：总则》对产品进行测量，考核产品能效值。

1.2.4 QB/T 5500—2020

QB/T 5500—2020《绿色设计产品评价技术规范 家用电冰箱》适用于电机驱动压缩式、家用的电冰箱（含 500 L 及以上）、葡萄酒储藏柜、嵌入式制冷器具。该标准不适用于其他专用于透明门展示用或其他特殊用途的电冰箱产品。

该标准从资源属性、能源属性、环境属性、品质属性共 4 个方面，评价电冰箱产品的绿色设计品质。该标准该标准提出要依据 GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》、GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》开展产品生命周期评价，但未给出具体要求。

1.2.5 DB11/T 1418—2017

DB11/T 1418—2017《低碳产品评价技术通则》适用于指导低碳产品评价技术规范的编制。该标准中规定产品碳排放计算分为制造过程和使用过程，公式分别为：

$$G_{\text{制造过程}} = G_{\text{能源}} + G_{\text{工艺过程}} \tag{5}$$

$$G_{\text{使用}} = \sum_i E_i \times EF_i \tag{6}$$

式中，$G_{\text{制造过程}}$ 为制造过程碳排放，kg；$G_{\text{能源}}$ 为制造过程能源消耗产生的碳排放，kg；能源种类包括化石能源、电力和热力；$G_{\text{工艺过程}}$ 为制造过程中生产工艺过程产生的碳排放，kg；$G_{\text{使用}}$ 为使用过程碳排放总量，kg；E_i 为产品使用过程中第 i 类能源（包括化石能源和电力）消耗量，kg 或 kW·h；EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子，kg/kg 或 kg/（kW·h）。

该标准属于通用型标准，标准中对生命周期的碳排放核算仅包括制造和使用过程。

1.2.6 DB44/T 1941—2016

DB44/T 1941—2016《产品碳排放评价技术通则》规定了产品碳排放评价的通用原则和要求，为具体产品碳排放评价技术规范的制定提供指南。该标准将产品的全生命周期分为原材料获取与加工、生产制造、仓储分销及零售、使用、废弃与处置阶段，对产品的碳排放核算定义为：

$$C = \sum_{i,j}^{n} \left(EF_{ij} \times M_i \right) GWP \tag{7}$$

式中，C 为产品生命周期总的碳排放；i，j 分别为不同生命周期阶段及该阶段对应的不同温室气体种类；M_i 为不同生命周期阶段的活动数据；GWP 为全球变暖潜能值。

1.2.7 DB44/T 1942—2016

DB44/T 1942—2016《小功率电动机产品碳排放基础数据采集技术规范》规定了小功率电动机碳排放基础数据采集及质量控制的要求。该标准规定了功能单位、系统边界、数据来源及采集频次、数据采集优先顺序、基础数据采集与核算方法、数据质量控制的要求。该标准适用于折算至 1 500 r/min 时，最大连续额定功率不超过 1.1 kW 的电动机；对小功率电动机产品的碳排放进行了原材料获取与加工阶段、生产制造阶段、材料、仓储、分销及零售阶段、使用阶段、废弃与处置阶段的核算。具体计算公式如下：

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = \sum_{i,j} \left(EF_{ij} \times M_i \right) GWP \tag{8}$$

式中，C_1 为小功率电动机原材料获取与加工阶段的碳排放，kg；C_2 为小功率电动机生产制造阶段的碳排放，kg；C_3 为小功率电动机材料仓储、分销及零售阶段的碳排放，kg；C_4 为小功率电动机使用阶段的碳排放，kg；C_5 为小功率电动机废弃与处置阶段的碳排放，kg；M_i 为不同生命周期阶段的活动数据。

从上式可以看出，该标准中的碳排放核算公式与通用型标准 DB44/T 1941—2016 通则中公式相同。

1.2.8 GB/T 51366—2019

GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》适用于新建、扩建和改建的民用建筑的运行、建造及拆除、建材生产及运输阶段的碳排放核算。

该标准将核算边界定为与建筑物建材生产及运输、建造及拆除、运行等活动相关的温室气体排放范围；对建筑生命周期的不同阶段碳排放进行了定义，由于建筑不同于普通的产品，其碳排放核算结果基本为建筑单位面积的碳排放，不能在普通产品上直接套用，但具有可借鉴性。

从上述国内已制定的碳排放计算与评价相关

标准分析来看，GB/T 33224—2016 虽然针对于冷冻空调设备，但主要对不可再生资源消耗、全球气候变暖等 8 类环境影响类型进行分析，该标准中对于碳排放的生命周期清单结果计算方法可以借鉴。QB/T 5500—2020 虽然针对冷冻空调设备中的电冰箱，但该标准仅从资源属性、能源属性、环境属性、品质属性 4 个方面来进行绿色设计品质评价，且均为符合性评价，并未给出针对于生命周期碳排放评价的具体要求。DB11/T 1418—2017 和 DB44/T 1941—2016 中规定了产品碳排放评价的通用原则和要求。RB/T 016—2019 介绍了针对于速印机、打印机、复印机的碳排放计算方法，RB/T 017—2019，DB44/T1942—2016 分别针对于三相配电变压器和小功率电动机，GB/T 51366—2019 针对于建筑。

综上所述，国内外标准均缺乏针对于冷冻空调设备的碳排放评价技术标准，目前，构建可操作、简便的冷冻空调设备生命周期碳排放评价方法，是冷冻空调行业在节能降碳领域亟需解决的问题。

2 国内外研究现状

2.1 碳排放核算

产品碳排放的核算涉及到产品的整个生命周期各阶段，根据生命周期评价方法，一般将产品的生命周期分为原材料获取阶段、加工装配阶段、运输阶段、使用与维护阶段和回收再处置阶段，本节主要对各阶段的碳排放计算方法进行总结分析。

2.1.1 原材料获取阶段

原材料获取阶段是指产品制造的原材料获取阶段，该阶段处于产品制造之前，在产品供应链的供应商和制造商直接控制范围之外，一般通过公共数据库的形式获得该阶段的相关信息。

李新航[1]对原材料获取阶段的碳排放核算公式为：

$$E_{设备}=\sum Q_i g_i \tag{9}$$

式中，$E_{设备}$为原材料获取阶段的碳排放，kg；Q_i 为第 i 种材料的消耗量，kg；g_i 为第 i 种材料的碳排放系数，kg/kg。

PENG[2]对建筑材料生产产生的碳排放核算公式如下：

$$C_{be}=\sum_i Q_{be,i}\times EF_{be,i} \tag{10}$$

式中，C_{be} 为建筑材料生产产生的碳排放，t；$Q_{be,i}$ 为项目中使用的第 i 种建筑材料的数量，t；$EF_{be,i}$ 为第 i 种建筑材料的碳排放系数，t/t。

陈坤阳等[3]对城市轨道交通的碳排放进行了计算，其中原材料获取阶段的碳排放核算公式为：

$$C_e M_y=\sum_{i=1}^{a}U_i\left(1+\varphi_i\right)F_i \tag{11}$$

式中，C_eM_y 为原材料获取阶段的碳排放，kg；a 为建筑材料类型；U_i 为第 i 种建筑材料的消耗量，kg 或 m^3；φ_i 为第 i 种建筑材料的损耗率；F_i 为第 i 种建筑材料的碳排放因子，kg/ 单位建筑材料数量。

吴凡[4]对风电项目的碳排放进行了核算，其中原材料获取阶段的碳排放核算公式为：

$$CE_p=CE_{p1}+CE_{p2} \tag{12}$$

其中：

$$CE_{p1}=\sum_{i=1}^{n}\frac{w_i}{1-\beta_i}\eta_{ij}I_j \tag{13}$$

$$CE_{p2}=\sum_{i=1}^{n}\frac{w_i}{1-\beta_i}\eta_{ij}I_j \tag{14}$$

式中，CE_p 为原材料获取阶段的碳排放，kg；CE_{p1} 为风电项目涉及的各构件物料生产环节产生的碳排放，kg；CE_{p2} 为配套的联网工程项目中涉及的各构件物料生产环节产生的碳排放，kg；i 为第 i 项设备或构件；j 为第 j 类组成要素；w_i 为第 i 类设备或构件的质量，kg；β_i 为第 i 类设备或构件的损耗率；η_{ij} 为在第 i 项设备中第 j 类要素的占比；I_j 为第 j 项要素的碳排放因子，kg/ 单位要素。

上述计算方法考虑了建材的损耗率，此外，在项目本身的碳排放基础上，还增加了配套工程项目的碳排放。

HE 等[5-6]将原材料获取阶段的碳排放定义为：

$$E_i=\sum_{j=1}^{M_i}M_{ij}C_{ij}+\sum_{k=1}^{N_i}G_{ik}GWP \tag{15}$$

式中，E_i 为原材料获取阶段的碳排放；i 为生命周期的阶段；M_{ij} 为第 j 种原材料的消耗量；C_{ij} 为第 j 项要素的碳排放因子；G_{ik} 为第 k 类温室气体的直接排放。此公式除了考虑原材料消耗所带来的间接碳排放之外，增加了温室气体的直接碳排放。

综合上述分析，对于原材料获取阶段的碳排放计算，均考虑了产品材料消耗带来的间接碳排放，如李新航[1]考虑了材料的碳排放系数，PENG[2]

考虑了建筑材料的碳排放系数；部分考虑了材料的损耗率和温室气体的直接碳排放，如陈坤阳等[3]考虑了建筑材料的损耗率，吴凡[4]考虑了设备或构件的损耗率，HE 等[5-6]考虑了温室气体的直接碳排放。对于冷冻空调设备，原材料主要为金属钢材，钢材的损耗率一般为 4%[7]，由于材料的损耗率较小，且温室气体的直接碳排放较难获得，因此，原材料获取阶段的碳排放核算可以忽略材料的损耗率及温室气体的直接碳排放，仅考虑产品材料消耗带来的间接碳排放。

2.1.2 加工装配阶段

加工装配阶段是指从原材料运进工厂门到最终产品运出工厂门。加工装配阶段的碳排放计算公式[8-9]如下：

$$C_p = \sum_{i=1}^{n} E_i \times EF_i \tag{16}$$

式中，C_p 为加工装配阶段的碳排放，kg；E_i 为生产活动中消耗的第 i 类能源实物量，kg。

张涛等[10-11]对双冷源空调系统和集中式空调系统做了全生命周期碳排放评价，其中，加工装配阶段的碳排放核算公式：

$$C_p = \sum M_{pi} W_i + \sum E_{pj} U_j \tag{17}$$

式中，M_{pi} 为生产活动中消耗的第 i 类材料的消耗量，kg；W_i 为第 i 种材料的碳排放因子，kg/kg；E_{pj} 为空调系统生产阶段第 j 种能源（主要是电力）消耗量，kW·h；U_j 为第 j 种能源的碳排放因子，kg/（kW·h）。

马艳[12]对机床产品做了全生命周期的碳排放评价，其中，加工装配阶段的碳排放核算公式：

$$CE_{\text{manuf}} = \left(PC_{\text{process}} + PC_{\text{assemble}}\right) EF_{\text{elec}} + \sum_{i=1}^{n} M_i \times EF_i + \sum_{i=1}^{m} G_j GWP \tag{18}$$

式中，CE_{manuf} 为加工装配阶段的碳排放；PC_{process} 为加工装配阶段的耗电量，kW·h；PC_{assemble} 为加工装配阶段的耗电量，kW·h；EF_{elec} 为电能的碳排放因子，kg/（kW·h）；M_i 为加工装配阶段第 i 类材料的消耗量，kg；n 为加工装配阶段消耗的材料种类；G_j 为第 j 种温室气体的直接碳排放；m 为该阶段直接排放的温室气体种类。

上述公式在材料和能效消耗的基础上，还额外考虑了加工装配阶段直接排放温室气体带来的碳排放。

由上述分析可知，对于加工装配阶段的碳排放计算，均考虑了资源和能源消耗带来的间接排放，如 SONG 等[8-9]考虑了能源的碳排放因子，张涛等[10]考虑了材料的碳排放因子；部分考虑了温室气体的直接碳排放，如文献[12]。对于冷冻空调设备，加工装配阶段的检测过程也会直接排放部分制冷剂、N_2 等气体，因此，应综合考虑考核资源和能源消耗带来的间接碳排放，以及温室气体的直接碳排放。

2.1.3 运输阶段

运输阶段包括产品生命周期过程中的整个运输过程。运输阶段的碳排放核算公式[2,9,13-16]如下：

$$C_T = \sum_{i=1}^{n} M_i D_i T_i \tag{19}$$

式中，C_T 为运输阶段的碳排放，kg；M_i 为第 i 类交通工具平均每公里消耗的能源量，kg/km；D_i 为第 i 种材料的运输距离，km；T_i 为第 i 类能源的碳排放因子，kg/kg。

陈坤阳等[3]对城市轨道交通做了生命周期的碳排放计算，其对运输阶段的碳排放核算公式：

$$CeT_y = \sum_{i=1,j=1}^{a,b} U_i \left(1+\varphi_i\right) D_{i,j} E_j \tag{20}$$

式中，CeT_y 为建筑材料运输阶段的碳排放，kg；U_i 为第 i 种建筑材料的消耗量，kg 或 m^3；φ_i 为第 i 种建筑材料的损耗率；$D_{i,j}$ 为第 i 种建筑材料使用第 j 种运输方式的运输距离，km；E_j 为第 j 种运输方式下，单位重量运输距离的碳排放因子，kg/（t·km）；a 为建筑材料类型；b 为运输方式（交通工具）种类。

吴凡[4]对风电项目的碳排放进行了核算，其中，运输阶段的碳排放核算公式：

$$CE_T = \sum_{i=1}^{n} \frac{w_i}{1-\beta_i} D_i \lambda_k \tag{21}$$

式中，CE_T 为风电项目物料运输阶段产生的碳排放，kg；i 为风电项目的第 i 项设备或构件，i=1，2，…，n；k 为第 k 类运输方式，k=1，2，…，r；w_i 为第 i 项设备或材料的质量，t；β_i 为第 i 项设备或材料的损耗率；D_i 为第 i 项设备或材料的运输距离，km；λ_k 为采用第 k 种运输方式的碳排放因子。

HE 等[5-6]对产品生命周期中运输阶段的碳排放核算公式：

$$E_t = \sum_{j=1}^{M_t} T_{tj} L_{tj} \times EI_{tj} C_{tj} + \sum_{k=1}^{N_t} T_{tk} GWP \tag{22}$$

式中，E_t 为运输阶段的碳排放；M_t 为运输阶段（包括公路、铁路、水路等）的数量；T_{tj} 为第 j 个阶段运输对象（包括材料、零件、产品、废物等）的数量；L_{tj} 为第 j 次运输的运输距离；EI_{tj} 为第 j 种运输方式的能源强度；C_{tj} 为第 j 种运输方式能源消耗的碳排放因子；N_t 为该阶段直接排放的第 N 种温室气体；T_{tk} 为第 k 种温室气体的直接排放量。

褚雅君等[17]对医院建筑的运输阶段碳排放核算公式：

$$C_3 = \sum_{i=1}^{n} S_i L_i \varphi / A \tag{23}$$

式中，C_3 为单位面积的采购运输碳排放，kg/m^2；S_i 为第 i 种采购物品的质量，t；L_i 为第 i 种采购物品的运输距离，km；φ 为运输工具的碳排放系数，kg/（t·km）；A 为建筑面积，m^2。

上述计算求得的为单位建筑面积的运输阶段的碳排放。

由上述分析可知，对于运输阶段的碳排放计算，均考虑了产品运输质量、距离和运输方式带来的间接排放，如文献[4]；部分考虑了运输过程材料的损耗率和温室气体的直接排放，如文献[5-6]。对于冷冻空调设备，运输阶段材料的损耗量较小，损耗率一般为 0.5%~3% 之间[18]，温室气体的直接排放量较难获得，因此，运输阶段仅考虑产品的运输质量、距离和运输方式带来的间接排放。

2.1.4 使用与维护阶段

使用与维护阶段是指产品的使用或消耗阶段。由于产品的使用阶段时间跨度最长，故一般认为该阶段是产品环境影响最主要的阶段。使用与维护阶段的碳排放核算公式[6,19]如下：

$$C_U = nE_U \times EF_{电} \tag{24}$$

式中，C_U 为使用与维护阶段电能消耗带来的碳排放，kg；n 为产品设计使用寿命，a；E_U 为运行阶段每年消耗的电能，kW·h/a。

孔繁艺等[13,20-21]给出建筑使用与维护阶段的碳排放核算公式：

$$C_M = \left(\sum_{i=1}^{n} nE_i \times EF_i - C_p \right) y \tag{25}$$

式中，C_M 为建筑使用与维护阶段的碳排放，kg；n 为建筑设计使用寿命，a；i 为建筑消耗终端能源类型（包括电力、燃气、石油、市政热力等）；E_i 为建筑第 i 种能源年消耗量，kW·h/a 或 kg/a；C_p 为建筑绿地碳汇系统年减碳量，kg/a；y 为建筑的设计寿命。

上述针对建筑进行碳排放的核算，考虑了所有能源类型，且增加了建筑绿地带来的减碳。

江凤等[22-23]选用碳排放因子的计算方法，得出建筑运行阶段碳排放核算公式：

$$C_M = \left(\sum_{i=1}^{n} E_i \times EF_i - C_p \right) y \tag{26}$$

式中，C_M 为暖通空调在运行期间的碳排放，t；E_i 为第 i 类能源平均年消耗；i 为系统消耗的能源类型。

李小燕等[24]对空调使用阶段的碳排放核算公式：

$$C_U = C_{U,\mathrm{ele}} + C_{U,\mathrm{leak}} \tag{27}$$

式中，C_U 为空调生命周期使用阶段的碳排放，kg；$C_{U,\mathrm{ele}}$ 为空调使用阶段由于耗电而产生的碳排放，kg；$C_{U,\mathrm{leak}}$ 为空调使用阶段由于制冷剂泄漏而导致的碳排放，kg。

周能等[25]对运行阶段的碳排放核算公式：

$$E_{LC} = E_1 + E_2 \tag{28}$$

式中，E_{LC} 为运行阶段的碳排放；E_1 为生命周期运行阶段的直接能耗碳排放当量；E_2 为生命周期运行阶段的制冷剂泄漏及排放的间接碳排放当量。

由上述分析可知，对于使用与维护阶段的碳排放核算，均考虑了产品运行过程能源的消耗，如文献[6,19,24]考虑了运行阶段每年消耗的电能；对于建筑，综合考虑了建筑运行阶段各类能源的消耗和建筑绿地的碳汇，如文献[13]考虑了建筑消耗终端各种能源，包括电力、燃气、石油、市政热力等。由于不同类型的产品运行与维护阶段的碳排放不尽相同，对于冷冻空调设备，其运行时间较长，一般为 10~15 年，应重点考虑能源消耗带来的碳排放。鉴于运行过程还会消耗一定的制冷剂，也应综合考虑制冷剂直接碳排放。冷冻空调设备维护时间较少，基本每年只有 1 次，因此，维护阶段的碳排放可以基本忽略。

2.1.5 回收再处置阶段

回收再处置阶段即产品回收处理阶段。产品报废后，通过对产品零部件或者材料的回收利用、焚烧、填埋等方式进行生命周期末端的处理。由于零部件和材料的回收再利用可以减少产品生命周期内的环境影响，故该阶段也开始被考虑到。

回收再处置阶段的碳排放核算公式[8-9]

如下：

$$C_R=\sum_{i=1}^{n}E_{i2}\times EF_i-\sum_{j=1}^{n}M_j\times EF_j \quad (29)$$

式中，C_R 为回收再处置阶段的碳排放，kg；E_{i2} 为回收生产活动中（如拆除）消耗的第 i 类能源实物量，kg；M_j 为可回收利用的第 j 种材料实物量，kg。

HE 等[5-6]对产品的回收再处置阶段的碳排放核算公式：

$$E_r=\sum_{i=1}^{N_5}Q_iC_{qi}+\sum_{j=1}^{S_3}\left(R_jC_{rj}-G_j\right)+\sum_{k=1}^{D_5}G_{rk}GWP \quad (30)$$

式中，E_r 为产品回收再处置阶段的碳排放；N_5 为产品拆解和废弃物处理所消耗能源的总种类；Q_i 为产品拆解和废弃处理过程中消耗的第 i 种能源量；C_{qi} 为第 i 种能源的碳排放因子；S_3 为零部件再利用过程中零件和材料的数量；R_j 为第 j 种零部件或材料再利用过程中消耗的能源量；C_{rj} 为第 j 种零部件或材料再利用过程中所消耗能源的碳排放因子；G_j 为第 j 种零部件或材料再利用过程中减少的碳排放，可用回收材料与原始材料的比值估算；D_5 为回收再处置阶段直接温室气体排放类型的数量；G_{rk} 为第 k 种温室气体的直接碳排放。

上述公式还考虑了直接碳排放。

咎世超等[26]在对磁悬浮离心冷水机组全生命周期评价中，回收再处置阶段的碳排放核算公式：

$$C_{R,M}=-\sum_{i=1}^{n}m_iF_{C,i}\varphi_{r,i}A_{r,i} \quad (31)$$

式中，$C_{R,M}$ 为原材料回收再利用的碳排放，kg；n 为机组可回收材料数量；m_i 为机组第 i 种材料的用量，kg；$F_{C,i}$ 为第 i 种材料的碳排放因子；$\varphi_{r,i}$ 为产品第 i 种材料的回收率；$A_{r,i}$ 为机组第 i 种材料的分配系数。

上述内容忽略了产品拆解所消耗的能量，仅使用原材料的回收来评价回收再处置阶段的碳排放。

由上述分析可知，对于回收阶段的碳排放核算，应考虑产品拆解、销毁和再回收利用的排放，如 HE 等[5-6]考虑了产品拆解和废弃处理过程及零件或材料再利用过程。但由于对于各材料拆解和销毁方法的不统一，且受到地区因素（如当地法规、基础建设、民众意识）的严重影响，材料的回收率在各地区并不统一。对于冷冻空调设备，产品原材料多为金属材料，回收率较高，因此可以仅考虑原材料回收再利用带来的碳排放效应，忽略产品拆解和销毁过程的相关数据。

从国内外文献调研分析来看，国内外相关学者针对于产品的碳排放计算和评价方法做了大量研究，不同产品的生命周期各阶段碳排放核算方法具有一定的相似性，同时，根据产品类型的不同，又具有一定的差异性，主要根据数据的可获得性和方法的可操作性来确定。但现有研究主要针对电冰箱绿色设计品质符合性评价、制冷系统 8 类环境影响进行评价，缺乏专门针对冷冻空调设备生命周期碳排放评价方法的系统研究，缺乏相关的技术标准和规范，冷冻空调行业亟需制定出适合于冷冻空调设备使用的生命周期各阶段碳排放的评价方法。

2.2 低碳评价

低碳产品评价认证制度是由政府授权的权威机构依据一定的碳排放标准，利用规定的碳核查技术或手段，对生产者所提供的产品进行全生命周期的碳检验、监测、管理、评估，对符合标准的产品颁发低碳标志或证书，以证明其符合低碳排放标准要求[27]。为了履行相应的国际责任，应对气候变化和绿色贸易措施给我国的经济和贸易带来的冲击和影响，2013 年 2 月，国家发改委和认监委联合发布《低碳产品认证管理暂行办法》，标志着我国的低碳产品认证制进入推进实施阶段。《低碳产品认证管理办法》将“低碳产品”界定为与同类产品或相同功能的产品相比，碳排放值应符合相关低碳产品评价标准或者技术规范要求的产品。目前，我国已公布两批低碳产品认证目录，但仅包括硅酸盐水泥、平板玻璃、中小型三相异步电动机等 7 种产品，国内外针对冷冻空调产品低碳认证还缺失。

童俊军等[28]以陶瓷产业为例，计算的碳排放范围包含化石燃料燃烧碳排放、陶瓷烧制工序中碳酸盐分解产生的碳排放和净购入生产用电蕴含的碳排放，按照各领域碳排放核算方法，分别核算碳排放，最后计算出单位陶瓷碳排放，与标准值对比后，评价该产品是否符合低碳产品要求。

文献[29]对高强钢筋的碳排放核算边界进行了讨论，并将碳排放以 CO_2 计，高强钢筋生产的总碳排放等于企业计算边界内燃料燃烧排放、生产过程排放、购入电力和热力所对应的排放量

之和，同时扣除输出电力和热力，以及固碳产品隐含的排放。同时，文献[29]中认为高强钢筋生产过程中排放的碳，一部分来源于能源消耗、一部分来源于含碳物料消耗，而能源消耗排放占绝对量。先根据GB 50632—2010《钢铁企业节能设计规范》中的能耗设计指标（含炼钢、轧钢工序）合计值计算其碳排放系数，再计算炼钢生产过程中主要含碳原辅料消耗的碳排放系数，将其合计作为高强钢筋低碳产品认证基准值；高强钢筋生产中碳排放系数小于等于基准值的产品为低碳产品，并评定为三级低碳产品。

姚芩等[30]从“产品生命周期”角度评估轮胎的碳排放，但由于国内企业并未建立起从原材料、中间品、制成品、销售商、消费者的一整套碳排放数据统计、监测和计算体系，故选取碳排放最大、最重要的环节——生产过程对轮胎进行低碳产品评价。

廖洪波等[31]围绕重庆市摩托车产业，开展摩托车低碳产品评价标准的研究。在参考国内外相关标准及充分考虑我国国情的基础上，将普通两轮摩托车产品的评价范围界定为制造阶段和使用阶段。制造阶段的碳排放使用制造1台普通两轮摩托车的不同能源消耗量，分别乘以对应能源的碳排放因子，然后逐项相加。低碳评价值根据十余家摩托车生产企业制造阶段能耗数据进行统计分析来确定。使用阶段的碳排放（百公里）根据GB 15744–2019《摩托车和轻便摩托车燃油消耗量限值及测量方法》的规定计算出普通两轮摩托车百公里汽油消耗量，乘以汽油的碳排放因子。根据统计分析，得到8家摩托车公司每百公里燃油消耗平均值作为低碳评价值。

胡志强[32]对家用电器绿色产品标准中评价体系的构建进行了研究，认为从总体评价思路上，绿色家电产品评价将最终实现侧重全生命周期阶段的评价，即从产品零件及材料供应、生产过程、使用过程，以及产品回收处理等生命周期各个阶段内，分析家电产品在各个阶段对资源利用、能源消耗、生态环境及人身健康、安全造成的影响因素和影响程度，选取对产品主要绿色特性影响明显的指标，通过明确量化指标和测试方法，建立绿色产品评价指标体系。

由上述文献可知，产品的低碳评价多采用生命周期法评估计算，而不同产品的评价方法不尽相同，主要根据数据的可获得性和方法的可操作性进行针对性地制定评价规则。

2.3 碳排放影响因素

冷冻空调设备的碳排放涉及全生命周期的各个阶段，影响因素众多，国内外学者对此进行了研究。MAKHNATCH等[33]针对30 kW的空气/水热泵系统，研究了不同制冷剂的环境影响；HU等[34]研究表明，地源热泵空调系统的运行阶段碳排放占比最大，变频技术可以有效降低碳排放；程浩等[35]研究表明，地源热泵、水源热泵、变频技术、储能技术、热回收技术在空调系统中的应用，可有效降低碳排放。周孟怡等[36]基于生命周期气候性能（LCCP）方法，分析了使用城市、能耗、制冷剂、电网电力排放因子、回收比例等因素对房间空调器全寿命周期CO_2排放的影响；崔志恒等[37]研究了空调温度设定值、制冷剂泄漏率和制冷剂*GWP*等参数对空调寿命周期碳排放的影响。

综合上述文献可知，影响冷冻空调设备碳排放的因素有多种，如不同使用地区、不同回收比例、新材料新技术应用、能效提升等，应综合考虑各类影响因素，建立通用的生命周期碳排放评价方法。

3 结论

（1）从国内外碳排放计算和评价标准体系调研来看，国内外相关标准化组织基于生命周期的理念制定了产品碳排放核算和评价的通用性规范，如PAS 2050:2008，ISO 14067—2018等；并根据各类产品的特点、参照上述通用性要求，制定其碳排放核算方法，如ISO 16759—2013，GB/T 51366—2019，RB/T 016—2019等。对于冷冻空调设备而言，国内外缺失碳排放计算的技术标准，需针对冷冻空调设备在原材料获取阶段和运输阶段材料的损耗率较小、加工装配阶段会直接排放部分制冷剂和N_2等气体、使用运行时间长、维护时间少、回收再处置阶段产品金属材料的回收率较高等特点，制定其生命周期的碳排放计算方法。

（2）从国内外碳排放计算和评价文献调研分析来看，国内外相关学者针对于产品的碳排放计算和评价方法做了大量研究，不同产品的生命周期各阶段碳排放量计算方法具有一定的相似性，但根据产品类型的不同又具有一定的差异性，主要根据数据的可获得性和方法的可操作性来确定。

（3）建立通用的生命周期碳排放评价方法是必要的，随着新技术新材料应用、产品能效提升和地区能效差异，技术评价方法要有一定的包容性和开放性。

参考文献：

[1] 李新航 . 基于全生命周期的风电系统碳排放核算与分析[J]. 环境保护与循环经济，2021，41（6）：5 – 8.
LI X H.Carbon emission accounting and analysis of wind power systems based on the entire lifecycle[J]. Environmental Protection and Circular Economy，2021，41（6）：5 – 8.

[2] PENG C H.Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling[J].Journal of Cleaner Production，2016，112：453 – 465.

[3] 陈坤阳，周鼎，粟月欢，等 . 城市轨道交通生命周期碳排放强度与碳减排潜力研究[J]. 铁道标准设计，2022，66（5）：1 – 7.
CHEN K Y，ZHOU D，SU Y H，et al.Research on carbon emission intensity and reduction potentials of urban rail transit life cycle[J].Railway Standard Design，2022，66（5）：1 – 7.

[4] 吴凡 . 基于 LCA 理论的风电项目碳减排效果分析[D]. 保定：华北电力大学，2019.
WU F.Research on the carbon emission reduction benefi!of wind power project based on LCA theory[D]. Baoding：North China Electric Power University，2019.

[5] HE B，WANG J，HUANG S，et al.Low-carbon product design for product life cycle[J].Journal of Engineering Design，2015，26（10/11/12）：10 – 339.

[6] HE B，TANG W，WANG J，et al.Low-carbon conceptual design based on product life cycle assessment[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2015，81（5/6/7/8）：863 – 874.

[7] 通风空调工程主要材料损耗率表[EB/OL]. 百度文库，2020–11–28[2024–04–11].https://wenku.baidu.com/view/92c2741680c758f5f61fb7360b4c2e3f56272542.html?_wkts_=1711335940064.
Main material loss rate table for ventilation and air conditioning engineering[EB/OL].Baidu Wenku，2020–11–28[2024–04–11]. https://wenku.baidu.com/view/92c2741680c758f5f61fb7360b4c2e3f56272542.html?_wkts_=1711335940064.

[8] SONG J S，LEE K M.Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions[J].Resources，Conservation and Recycling，2010，54（9）：547 – 556.

[9] 游一民，彭振搏，戴冬云，等 .40.5 kV C-GIS 全生命周期内碳排放计算与分析[J]. 高压电器，2022，58（9）：13 – 19.
YOU Y M，PENG Z B，DAI D Y，et al. Calculation and analysis of carbon emission in the whole life cycle of 40.5 kV C-GIS[J].High Voltage Apparatus，2022，58（9）：13 – 19.

[10] 张涛，蔡亮，张建忠，等 . 双冷源空调系统生命周期内碳排放研究[J]. 建筑热能通风空调，2016，35（2）：9 – 12.
ZHANG T，CAI L，ZHANG J Z，et al.Life cycle carbon emissions research of double cold source air conditioning system[J].Building Energy & Environment，2016，35（2）：9 – 12.

[11] 姜文秀，蔡亮，蔡君魏，等 . 集中式空调系统生命周期碳排放评估[J]. 建筑科学，2014，30（4）：31 – 35.
JIANG W X，CAI L，CAI J W，et al.Assessment on life-cycle carbon emission of centralized air conditioning system[J].Buiilding Science，2014，30（4）：31 – 35.

[12] 马艳 . 机床产品生命周期碳排放计算与碳效益评估[D]. 济南：山东大学，2020.
MA Y.Life cycle carbon emission calculation and carbon efficiency assessment of machine tool[D]. Jinan：Shandong University，2020.

[13] 孔繁艺，熊海亭，严欢 . 基于节能设计的建筑全生命周期碳排放分析[J]. 四川建筑，2022，42（3）：59 – 61.
KONG F Y，XIONG H T，YAN H.Analysis of carbon emissions throughout the entire lifecycle of buildings based on energy-saving design[J].Sichuan Architecture，2022，42（3）：59 – 61.

[14] 贾铖修 . 基于生命周期评价的 3D 打印建筑结构碳排放量化分析[D]. 杭州：浙江大学，2021.
JIA C X.Quantitative analysis of carbon emission of 3D printing building structure based on life cycle assessment[D].Hangzhou：Zhejiang University，2021.

[15] 钱生泽 . 基于 LCA 的轨道交通车站碳排放分析[J]. 都市快轨交通，2022，35（5）：16 – 21.
QIAN S Z.Carbon emission of rail transit station based on life cycle assessment[J].Urban Rapid Rail Transit，2022，35（5）：16 – 21.

[16] LI D Z，CUI P，LU Y J.Development of an automated estimator of life-cycle carbon emissions for residential buildings：A case study in Nanjing，China[J].Habitat International，2016，57：154 – 163.

[17] 褚雅君，牛住元．医疗建筑全生命周期碳排放量计算模型研究[J]．中国医院建筑与装备，2022，23(5)：93－96.
CHU Y J，NIU Z Y.Study on the whole life-cycle carbon emission model of medical buildings[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment，2022，23(5)：93－96.

[18] 大宗原材料运输损耗标准[EB/OL]．百度文库，2024-01-10[2024-04-11]．https://wenku.baidu.com/view/770d47e3aa8271fe910ef12d2af90242a895abc2.html?_wkts_=1711336524221.
Standard for transportation loss of bulk raw materials[EB/OL].Baidu Wenku，2024-01-10[2024-04-11]. https://wenku.baidu.com/view/770d47e3aa8271fe910ef12d2af90242a895abc2.html?_wkts_=1711336524221.

[19] 王吉凯．基于产品生命周期的碳排放计算方法研究[D]．合肥：合肥工业大学，2012.
WANG J K.Research on the method of calculation for carbon emissions based on life cycle assessment[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2012.

[20] 孙晓涵，吴杰．建筑全生命周期碳排放核算模型和减碳措施[J]．四川水泥，2022(4)：100－101.
SUN X H，WU J. Carbon emission accounting model and carbon reduction measures for the entire life cycle of buildings[J].Sichuan Cement，2022(4)：100－101.

[21] YANG X Y，ZHANG S C，WANG K.Quantitative study of life cycle carbon emissions from 7 timber buildings in China[J].Building Components and Buildings，2021，26：1721－1734.

[22] 江凤．建筑设计阶段暖通空调系统运行碳排放预算研究[J]．江西建材，2022(5)：179－181.
JIANG F.Research on carbon emission budget of HVAC syste min building design stage[J].Jiangxi Building Materials，2022(5)：179－181.

[23] 唐新邵．设计阶段暖通空调系统运行碳排放预算分析[J]．智能城市，2020，6(11)：11－14.
TANG X S.Budget analysis on carbon emission of building HVAC system in design stage[J].Intelligent City，2020，6(11)：11－14.

[24] 李小燕，宁前，何国庚．采用R290和R32的家用空调器全生命周期碳排放研究[J]．低温工程，2021(2)：33－40.
LI X Y，NING Q，HE G G.Study on carbon emission of household air conditioners using R290 and R32 as refrigerants in whole life cycle[J].Cryogenics，2021(2)：33－40.

[25] 周能，丁汉新，苏秀平，等．冷水(热泵)机组的运行阶段碳排放研究[J]．制冷与空调，2022，22(3)：93－97.
ZHOU N，DING H X，SU X P，et al. Research on carbon emission of heat pump chiller[J].Refrigeration and Air-Conditioning，2022，22(3)：93－97.

[26] 咎世超，吴俊峰，屈博艺，等．磁悬浮离心式冷水机组应用于数据中心的碳足迹分析[J]．制冷技术，2022，42(1)：39－45.
ZAN S C，WU J F，QU B Y，et al.Carbon footprint analysis of magnetic levitation centrifugal chiller used in data center[J].Chinese Journal of Refrigeration Technology，2022，42(1)：39－45.

[27] 杨晓敏．低碳产品认证制度的国际比较分析[J]．中国商论，2015(16)：161－164.
YANG X M.International comparative analysis of low-carbon product certification systems[J].China Journal of Commerce，2015(16)：161－164.

[28] 童俊军，孟早明，张丽，等．我国低碳产品认证及其案例分析[J]．资源信息与工程，2020，35(3)：123－125.
TONG J J，MENG Z M，ZHANG L，et al.Analysis and case study of low carbon products certification in China[J].Resource Information and Engineering，2020，35(3)：123－125.

[29] 杜娟，张六零，魏有权．高强钢筋低碳产品认证的碳排放量核算方法研究[J]．环境工程，2016，34(增刊1)：957－960.
DU J，ZHANG L L，WEI Y Q. Study on carbon emissions calculation method of high strength reinforced low carbon product certification[J].Environmental Engineering，2016，34(Sup.1)：957－960.

[30] 姚芳，白卫国，王卫东．轮胎行业低碳产品认证关键技术与审核[J]．质量与认证，2017(2)：68－70.
YAO Q，BAI W G，WANG W D.Key technologies and audits for low-carbon product certification in the tire industry[J].China Quality Certification，2017(2)：68－70.

[31] 廖洪波，崔龙国，杨洋，等．普通两轮摩托车低碳产品评价标准的研制及启示[J]．大众标准化，2016(1)：56－59.
LIAO H B，CUI L G，YANG Y，et al.Development and inspiration of low carbon product evaluation standards for ordinary two wheeled motorcycles[J].Popular Standardization，2016(1)：56－59.

[32] 胡志强．家用电器绿色产品标准中评价体系的构建研究[J]．家电科技，2020(5)：32－36.

HU Z Q.Research on the construction of evaluation system in green product standard of household appliances [J].Journal of Appliance Science & Technology, 2020(5):32 – 36.

[33] MAKHNATCH P,KHODABANDEH R.The role of environmental metrics(GWP,TEWI,LCCP) in the selection of low GWP refrigerant[J].Energy Procedia, 2014,61:2460 – 2463.

[34] 胡玉坤,沈致和,慈超.地源热泵空调系统生命周期碳排放研究[J].制冷与空调,2017,31(2):140 – 144.
HU Y K,SHEN Z H,CI C,et al.Carbon emissions research in life cycle of ground source heat air conditioning system[J].Refrigeration & Air Conditioning,2017,31(2):140 – 144.

[35] 程浩,刘秋新.空调新技术对碳排放量影响的探讨[J].工业安全与环保,2012,38(9):66 – 70.
CHENG H LIU Q X.Discussion on impact of new air conditioning technologies on carbon emissions[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2012, 38(9):66 – 70.

[36] 周孟怡,张华,李芳.房间空调器的二氧化碳排放生命周期气候性能分析[J].制冷技术,2023,43(6):14 – 19.
ZHOU M Y,ZHANG H,LI F.Life cycle climate performance analysis of CO_2 emissions of room air conditioner[J].Chinese Journal of Refrigeration Technology,2023,43(6):14 – 19.

[37] 崔志恒,杨昌智.基于DLCA的家用空调器碳排放研究[J].制冷学报,2023,44(2):61 – 67.
CUI Z H,YANG C Z.Research on carbon emission of household air conditioners based on DLCA[J]. Journal of Refrigeration,2023,44(2):61 – 67.

作者简介:张秀平(1971),女,研究员,主要从事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:zhangxiuping@hgmri.com。

本文引用格式:
张秀平,屈博艺,吴俊峰,等.冷冻空调设备生命周期碳排放评价方法[J].流体机械,2025,53(1):85 – 96.
ZHANG X P,QU B Y,WU J F,et al.The evaluation method of carbon emissions during the life cycle of refrigeration and air conditioning equipment [J].Fluid Machinery,2025,53(1):85 – 96.

(上接第84页)

[57] 赵会宾,曹骞,康灿,等.结构形式对渣浆泵前腔密封面磨损特性的影响[J].排灌机械工程学报,2023,41(3):247 – 252.
ZHAO H B,CAO Q,KANG C,et al.Influence of structure on wear characteristics performance for sealing surface of front chamber of slurry pump [J].Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(3):247 – 252.

[58] 吕思妍,马挺军.苦荞多肽的制备、功能活性及其在食品中的应用[J].包装与食品机械,2023,41(4):69 – 75.
LYU S Y,MA T J.Preparation,functional activity of tartary buckwheat polypeptide and its application in food[J].Packaging and Food Machinery,2023,41(4): 69 – 75.

[59] 杨明,王磊,尚臣,等.OD1422 mm X80管道环焊接头拉伸应变行为研究[J].压力容器,2023,40(2):18 – 26.
YANG M,WANG L,SHANG C,et al.Study on deformation behavior of girth welded joint of OD1422 mm X80 pipe[J].Pressure Vessel Technology,2023, 40(2):18 – 26.

[60] 熊英华,刘影,李述林,等.基于替代燃料的航空燃油泵内部空化特性[J].航空动力学报,2015,30(11):2607–2615.
XIONG Y H,LIU Y,LI S L,et al.Cavitation characteristics of aviation fuel pump based on alternative fuels[J].AerodynamicsNewspaper,2015, 30(11):2607 – 2615.

作者简介:王永康(1999),男,硕士,主要研究方向为机械摩擦磨损,E–mail:2446176480@qq.com。

通信作者: Dongyang Li(1959),男,加拿大工程院院士,欧洲科学与艺术院院士,主要研究方向为计算材料科学和摩擦学,通信地址:650224 南省昆明市盘龙区青云街道白龙寺300号西南林业大学云南省DongYang Li院士工作站,E – mail:dongyang@ualberta.ca.

本文引用格式:
王永康,陈文刚,王海军,等.发动机燃油泵空化研究进展[J].流体机械,2025,53(1):76 – 84.
WANG Y K,CHEN W G,WANG H J,et al.Cavitation in engine fuel pumps and its research progress[J].Fluid Machinery,2024,53(1):76 – 84.