

doi: 10.3969/j.issn.2095-4468.2023.06.208

基于全生命周期分析的热泵水果干燥机的 R1234ze(E)型环保工质替代评价

吕笑冲¹, 袁俊^{2,3}, 霍天晴¹, 杨福胜^{*1}, 张伟^{2,3}, 张早校¹

(1-西安交通大学化学工程与技术学院, 陕西西安 710049; 2-西安近代化学研究所, 陕西西安 710065; 3-氟氮化工资源高效开发与利用国家重点实验室, 陕西西安 710065)

[摘要] 本文讨论了对原有制冷剂的替代品 R1234ze(E)在替代后的在热泵水果干燥机上应用的环保性能, 采用生命周期评价的方法, 从非生物资源消耗潜能 (ADP) 等 8 个环保指标进行评价, 并通过调研国家环保需求, 计算综合评价指标以进行新制冷剂的综合环境影响评价。结果表明: R1234ze(E)制冷剂机组在减碳性能方面突出, 较之 R134a 机组提升 16.97%, 但是其他指标的表现均不同程度的劣于 R134a 机组。综合评价各个环境指标, 两机组表现相近, 可以认为现阶段没有必要对原机组进行制冷剂替换, 但是未来可以考虑将其运用在新制造的机组中。

[关键词] 热泵水果干燥; 第四代制冷剂; 生命周期评价; 节能减碳分析

中图分类号: TB61⁺¹; TQ051.5

文献标识码: A

Evaluation of Substitution of Heat Pump Fruit Dryer Using R1234ze(E) as Environmental Protection Refrigerant Based on Life-cycle Assessment

LYU Xiaochong¹, YUAN Jun^{2,3}, HUO Tianqing¹, YANG Fusheng^{*1}, ZHANG Wei^{2,3}, ZHANG Zaoxiao¹

(1-School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; 2-Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3-State Key Laboratory of Fluorine and Nitrogen Chemicals, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

[Abstract] The environmental impact of replacing the original refrigerant is evaluated in this paper, with a new refrigerant R1234ze(E) in a heat pump fruit dryer using the life-cycle assessment methodology. The evaluation considers eight environmental indicators, including abiotic resource depletion potential (ADP), and calculates comprehensive evaluation indexes based on national environmental protection requirements. The aim is to provide a comprehensive environmental impact assessment of the new refrigerant. The results shows that R1234ze(E) refrigerant unit have outstanding carbon reduction performance, which is improved by 16.97% compared with R134a unit, but the performance of other indicators is worse than R134a unit. Comprehensive evaluation of various environmental indicators shows that the performance of the two units is similar. It can be considered that there is no need to replace the refrigerant in the original unit at the present stage, but it can be used in the new manufacturing unit in the future.

[Keywords] Heat pump fruit drying; Fourth generation refrigerant; Life cycle assessment; Energy saving and carbon reduction analysis

0 引言

热泵干燥技术作为高效、环保、自动化的干燥方式常用于干燥领域^[1-2]。但是热泵干燥机的制冷剂

泄漏会导致一定的污染物排放和环境影响, 需要对其进行环境评价。

目前制冷剂已发展至第四代^[3], 第一代制冷剂

*杨福胜 (1981—), 男, 教授, 博士。研究方向: 氢能的高效储存、转化及利用, 工业节能技术及装置。联系地址: 陕西省西安市咸宁西路 28 号, 邮编 710049。联系电话: 13072983810。E-mail: yang.fs@mail.xjtu.edu.cn。

基金项目: 西安近代化学研究所氟氮化工资源高效开发与利用国家重点实验室开放课题 (No. 204-J-2020-2245)。

主要成分为氯氟烃类，代表产品为 R11、R12 等；第二代制冷剂主要成分为氢氯氟烃，代表产品为 R22、R123 等；第三代制冷剂主要成分为氢氟烃类，代表产品为 R407c、R134a 等；第四代制冷剂主要成分为氢氟烯烃（HFOs）、自然工质，代表产品为 R1234ze(E)、CO₂ 等。第一代制冷由于在臭氧消耗潜能（Ozone Depletion Potential, ODP）以及全球变暖潜能（Global Warming Potential, GWP）方面破坏影响巨大，逐渐已退出历史舞台。第二代制冷剂由于其对臭氧层存在极大破坏，根据《蒙特利尔协定书》^[4]，世界各国应于 2040 年前全部淘汰。由于第三代制冷剂会造成温室气体的大量排放，根据《欧盟第 517/2014 号条例》^[5]、《蒙特利尔议定书》及其基加利修正案，在欧盟应在 2023 年前完成淘汰，其他国家也在逐步制定第三代制冷剂的淘汰时间表。第二代制冷剂 R22 和第三代制冷剂 R134a 是目前市场上应用于水果干燥的热泵机组比较常用的制冷剂。

第四代制冷剂替代的环保性能可以通过生命周期分析（Life Cycle Assessment, LCA）进行评价。其评价过程包含了原材料开采、各阶段产品的制造、运输、使用与维护以及报废的各个阶段的资源消耗与环境评估^[6-8]。本文使用国产生命周期软件 Ebalance 对热泵水果干燥机的制冷剂替代过程进行 LCA 评价。

目前对热泵系统的 LCA 过程主要集中在热水与供暖领域。GREENING 等^[9]使用家用热泵以替代传统燃气锅炉在英国进行住宅供暖的 LCA 研究。他们选用制冷剂为 R134a，评价了 11 个资源环境参数。结果表明：热泵供暖的各项数据评价均比燃气锅炉大，所以作者认为，使用热泵替代燃气锅炉无法实现英国气候变化的目标，同时作者也指出，如果英国电力系统结构充分脱碳，热泵系统的生命周期结果可能会有明显改善。

KORONEOS 等^[10]量化评估了希腊某市市政厅的地源热泵采暖系统的环境影响。作者对该热泵系统的进行全生命周期评价，考虑温室效应、酸化和富营养化等 7 项评价指标。系统分析表明：该地源热泵系统对环境影响最大的两项分别为酸化和温室效应，分别占总体环境影响的 73% 和 14.54%。

吕凤等^[11]应用 LCA 进行空气源热泵热水器的

碳排放评估，分别建立生产、使用和报废三个阶段的 LCA 模型。在计算评估后，作者发现在使用过程中，系统碳排量最大，约占整体的 97% 以上。而在资源消耗方面，铜的消耗是所有资源中比重最大的，约占系统总资源消耗的 30%。

上述研究更多的是针对热泵技术在热水、供暖等方面的 LCA 评价，但是水果干燥条件下与热水、供暖用热泵存在区别。第一，热泵的冷凝温度不同。供暖、热水等要求冷凝温度普遍在 70~90 °C，水果干燥要求的冷凝温度一般为 45~60 °C，这可能会导致系统性能系数的变化；第二，应用需求时间不同。供暖的应用需求一般为冬季连续几个月的持续运行，热水的应用需求一般为常年的每日几小时的点状运行，水果干燥则一般集中在夏秋季节，运行方式为半持续性运行（一般为工作每 1~2 d 间歇 0.5~1 d）。

本文建立第四代 R1234ze(E)型制冷剂与原有机组 R134a 制冷剂用于热泵水果干燥机的生命周期模型，分析第四代制冷剂作为第三代的替代品而应用在热泵水果干燥机组中的量化的节能减排性能，为评价其替代方案的可行性提供依据。

1 研究方法 with 过程

1.1 系统模型的建立与生命周期清单分析

热泵水果干燥机的全生命周期模型包括干燥机的建造、使用以及报废的全部流程的系统模型，包括材料使用、资源能源消耗及污染物排放得到。热泵水果干燥机的全生命周期模型如图 1 所示。

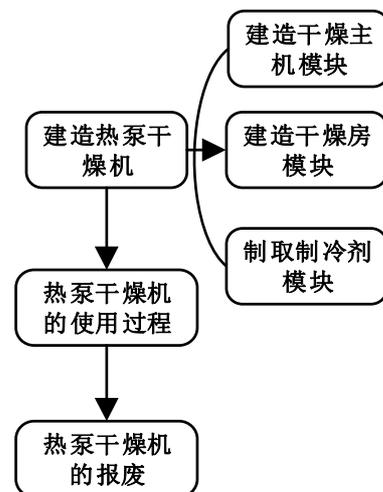


图 1 热泵水果干燥机系统 LCA 模型

热泵水果干燥机的建设过程包括主机、干燥房、制冷剂的建造或制取过程。基于热泵水果干燥机的相关模型，本文的计算依据如下假设：1) 热泵水果干燥机组每年运行 60 d，共运行 30 个干燥周期。每个周期机组运行 36 h，其他辅助工序 12 h，共计 48 h。热泵干燥机组使用寿命假定为 20 年；2) 干燥地点暂定为陕西省西安市，干燥时期为夏季 7 月至 8 月，平均环境温度为 26 °C、平均环境相对湿度为 70%；3) 干燥主机产地假定为江苏省常州市；制冷剂产地假定为浙江省；化工必备原材料就近采购；具体运输距离为产地到陕西省西安市的大概距离取整百，就近采购距离按照平均 100 km 计，厂内运输按照平均 10 km 计；4) 不对类似干燥房玻璃窗之类两种机组参数相同且质量较小的材料、部件进行生命周期建模。

1.1.1 干燥主机的制造模型

热泵水果干燥机的主体由压缩机、换热器（蒸发器和冷凝器）以及膨胀阀组成，主机模型根据调研数据设计得到，其中因膨胀阀及储液罐对生命周期模型影响较小，故不做考虑^[12-15]。由于 R134a 和 R1234ze(E)两种制冷剂的主机参数并不相同，具体如表 1 所示，故应该分别计算。两种主机结构组成和模型清单如图 2 所示。

表 1 R134a、R1234ze(E)两种制冷剂的主机参数

参数	数值	
	R134a 机组	R1234ze(E)机组
蒸发器质量/kg	365.9	555.2
冷凝器质量/kg	426.1	657.3
压缩机质量/kg	80.0	120.0

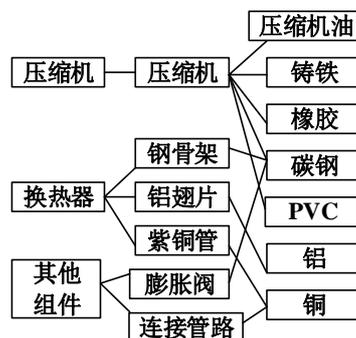


图 2 干燥主机建造过程模型清单

1.1.2 制冷剂的制取模型

目前 R1234ze(E)制冷剂的制备工艺为由制冷剂 1,1,3,3,3-五氟丙烷(R240fa)氟化生产 1-氯-3,3,3-三氟丙烯 (R1233zd) 后再制取 R1234ze(E)^[16-23]，其制备流程、过程生命周期清单如如图 3 所示。目前 R134a 制备工艺主要是通过乙炔和氯气加成得到三氯乙烯，再与 HF 发生反应合成 R134a^[16-17]。其生命周期模型在 Ebalance 软件数据库中可以找到，其制备流程和模型清单如图 4 所示。

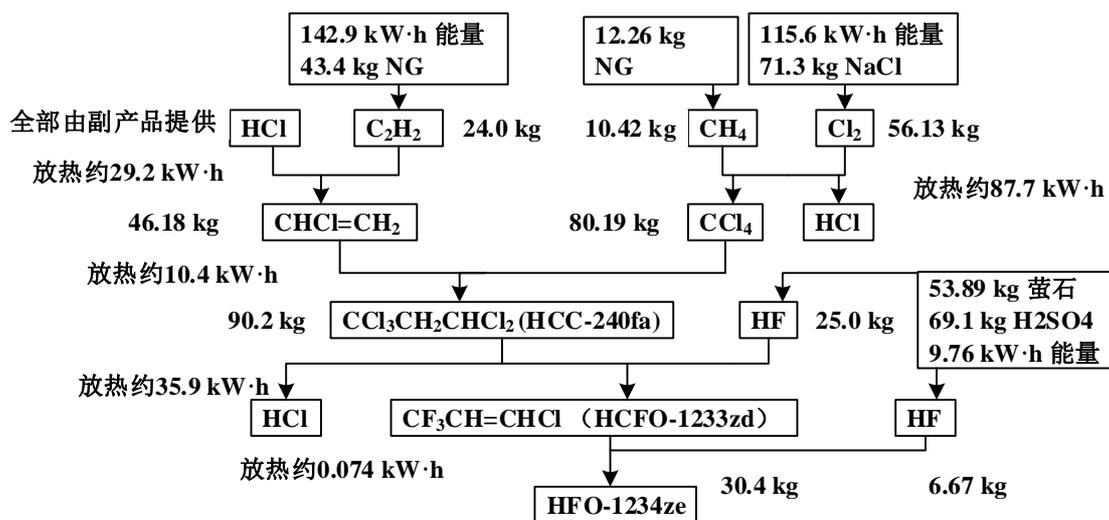


图 3 R1234ze(E)制备过程的模型清单

1.1.3 热泵水果干燥房的建设模型

采用文献[24]中的房式红枣干燥系统的结构。干燥房外墙采用彩钢保温板，厚度为 0.05 m，干燥房样式如图 5 所示。物料堆放采用钢制小推车与聚

氯乙烯塑料托盘装置，每车共可安置 38 个托盘，每盘可放置 3 kg 果品，共有 18 个小推车，干燥总质量为 2 000 kg。干燥房模型清单如图 6 所示。两种机组的使用同种干燥房，干燥房模型两者相同。

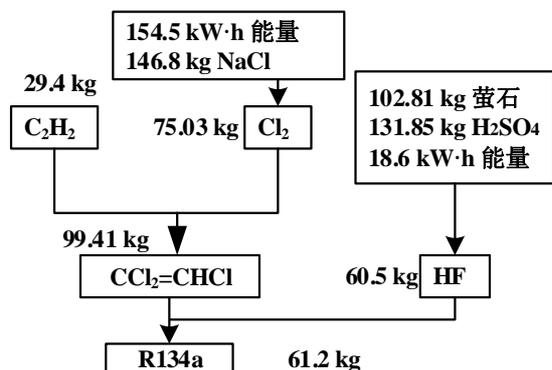


图4 R134a 制备过程的模型清单

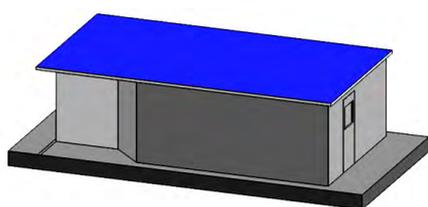


图5 干燥房样式

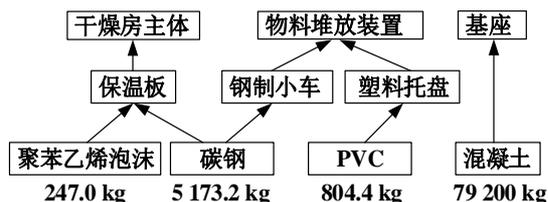


图6 干燥房建造过程的模型清单

1.1.4 运输过程

制冷剂制备单元：购置原材料，除天然气、萤石外均采用公路运输。天然气采用管道运输，萤石采用铁路运输。制冷剂从产地运输到干燥地点采用铁路运输。干燥房单元：采用就地建造的方法，原材料全部采用公路运输。干燥主机单元：原材料全部采用公路运输。干燥主机从产地运输到干燥地点采用铁路运输。

1.1.5 使用及报废过程

根据水果干燥机模型计算，R134a 热泵干燥机和 R1234ze(E)热泵干燥机在使用寿命内所需要的总能量分别为 1.88×10^5 kW·h 和 1.75×10^5 kW·h。

干燥机组报废时，由于使用时的磨损、老化及回收时的损耗，本文假定所需要的铸铁、碳钢、铜及铝材料按 60% 回收率回收，其他材料全部弃置，制冷剂全部逸散到空气中。

1.2 生命周期清单分析及影响评价指标

清单分析是对所研究系统中输入和输出数据

建立清单的过程。清单分析主要包括数据的收集和计算，以此来量化产品系统中的相关输入和输出。首先是根据目标与范围定义阶段所确定的研究范围建立生命周期模型，做好数据收集准备。然后进行单元过程数据收集，并根据数据收集进行计算汇总得到产品生命周期的清单结果^[7-8]。

生命周期评价指标是评价系统在整个生命周期中，对环境各种类型的影响进行的量化评价的过程。基于现有的环保需求，本文选取的生命周期评价指标：1) 非生物资源消耗潜能 (Abiotic Depletion Potential, ADP); 2) 化石能源消耗潜能 (Fossil Fuel ADP, ADP(ff)); 3) 酸化潜能 (Acidification Potential, AP); 4) 富营养化潜能 (Eutrophication Potential, EP); 5) 全球变暖潜能 (GWP); 6) 一次能源消耗 (Primary Energy Depletion, PED); 7) 化学需氧量 (Chemical Oxygen Depletion, COD); 8) 可吸入颗粒物 (Respirable, RI)。

1.3 生命周期综合指标计算

归一化指标虽然可以在同一层次比较不同指标之间优劣，但是并未减少指标数量，所以当存在相互冲突的不同指标时，需要引入综合加权指标进行评判。整合各个归一化指标，根据所在国情得到一个对环境影响的综合参数，定义为 A ，计算方法如式(1)所示：

$$A = w_1 G_{wp} N_1^{-1} + w_2 A_{dp} N_2^{-1} + \dots \quad (1)$$

式中， w_i 为权重因子，采用专家调查或基于经济发展指标进行评判； N_i 为归一化因子。

基于客观方法的客观权重方法指标 (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC)^[25] 确定方法，其计算方法如式(2)和式(3)所示：

$$P_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (2)$$

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^m P_j \quad (3)$$

式中， P_j 为代表信息量， P_j 越大，代表第 j 个评价指标在整个评价指标体系中的作用越大，应该给其分配更多的权重； σ_j 为第 j 个指标的标准差； r_{ij} 为第 i 行 j 列数据值； W_j 为第 j 个指标的客观权重。

主客观结合的最好-最差评价方法 (Best-Worst Method, BWM)^[26]，其指标优劣的评价数据来源

于近年相关 LCA 文献中提到该指标的比例^[27]。

基于相关国家政策的生命周期节能减排评价方法 (Energy Conservation and Emission Reduction, ECER) 方法^[28], 其计算方法如式(4):

$$E_{cer} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{T_i N_i} \quad (4)$$

式中, A_i 为各项生命周期指标, 包括 PED、GWP、COD、SO₂、NO_x 和 NH₃-N 等; T_i 为政策目标的可比值。计算方法为依据政策所列出的绝对削减量分别计算政策开始前后单位 GDP 目标参数的值, 最

终比上开始时的单位 GDP 目标参数, 得到单位 GDP 下的目标削减率; N_i 为 2020 年该政策目标的总量。

2 结果分析

2.1 生命周期指标计算结果

根据相关指标需求, 计算确定 R1234ze(E)制冷剂机组以及 R134a 制冷剂机组两种热泵水果干燥系统各指标的特征化环境指标参数, 选取前节所列举的 8 个指标进行计算, 并依据 Ebalance 软件数据库对其进行归一化评价, 其计算结果如表 2 所示。

表 2 两种机组的生命周期指标影响分析指标参数

项目	ADP/kg	ADP(ff)/kg	AP/kg	EP/kg	PED/MJ	GWP/kg	COD/kg	RI/kg
R1234ze(E)机组	3.167×10 ⁶	2.369×10 ⁵	1.343×10 ³	1.742×10 ²	3.693×10 ⁶	22.640×10 ⁵	7.331×10 ¹	4.239×10 ²
R134a 机组	2.238×10 ⁶	2.256×10 ⁵	1.350×10 ³	1.402×10 ²	3.496×10 ⁶	33.179×10 ⁵	6.595×10 ¹	4.032×10 ²
R _{re} /%	-41.50	-5.034	0.5364	-24.25	-5.593	16.97	-11.16	-5.12

为了对比新制冷剂 R1234ze(E)机组与原制冷剂 R134a 机组的性能差异, 引入相对改善率 R_{re} 对此进行评价。其计算方法如式(5)所示。当 R_{re} 为正时, 代表 R1234ze(E)机组环境性能优于 R134a, 反之则表明 R1234ze(E)机组环境性能劣于 R134a。

$$R_{re} = \left(1 - \frac{P_{R1234ze}}{P_{R134a}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中, p 代表不同生命周期评价指标; 下标代表两种制冷剂。

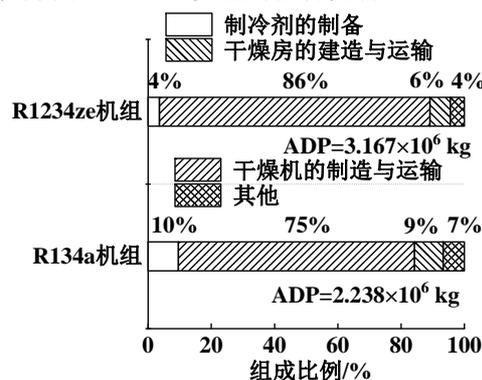
2.2 生命周期指标影响分析

2.2.1 非生物资源消耗潜能指标

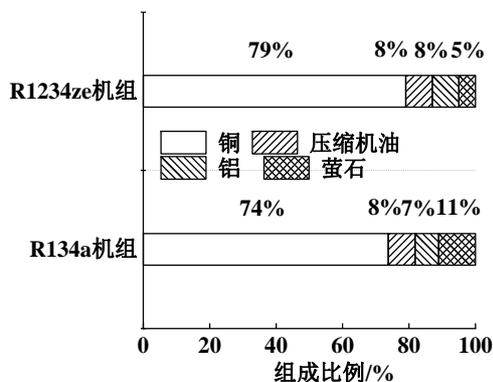
在两种制冷剂机组中, 假设使用相同的干燥房, 所以可以认为干燥房的制造运输过程所产生的 ADP 贡献在两个机组中没有差异性, 进而对 ADP 指标的贡献度最大的两项均为干燥主机的制造与运输过程以及制冷剂的制备过程, 如图 7(a)所示。在干燥主机模块中, 对 ADP 贡献度最高的三项分别为铜管的制造过程、铝翅片的制造过程以及压缩机油的制备。在制冷剂制备模块中, 萤石的开采对 ADP 的贡献度两种机组均为最高, 故将这四项目标进行进一步对比, 如图 7(b)所示。

两种机组中, 铜的开采制造过程仍为对 ADP 贡献度最大的一项, 由于 R1234ze(E)机组在换热器尺寸方面大概为 R134a 机组的两倍, 导致其重要组成部分铜使用量远大于 R134a 机组。所以在自然资

源消耗方面, R134a 机组的指标更低。



(a) 两种干燥机各部分对 ADP 指标的贡献度



(b) 对 ADP 指标影响最大的四个子模块对比分析

图 7 ADP 清单敏感度分析

2.2.2 富营养化潜能指标

如图 8 所示两种制冷剂机组中, 对 EP 指标的贡献度最大的均为干燥主机的制造与运输过程。其中, 干燥主机的建设中占比最高的部分两者均为紫

铜管路的开采、冶炼与制造，如表 3 所示。由于 R1234ze(E)机组的铜使用量远高于 R134a 机组，导致这部分对 EP 的贡献 R1234ze(E)机组比 R134a 机组升高。

而虽然 R1234ze(E)机组在系统运行的电力消耗（对 EP 第二大贡献模块）方面小于 R134a 机组，但是体现到在 EP 的贡献上无法抵消其因为铜耗导致的最大的 EP 贡献。因此，在对土地营养化的影响上，R134a 机组表现优于 R1234ze(E)机组。

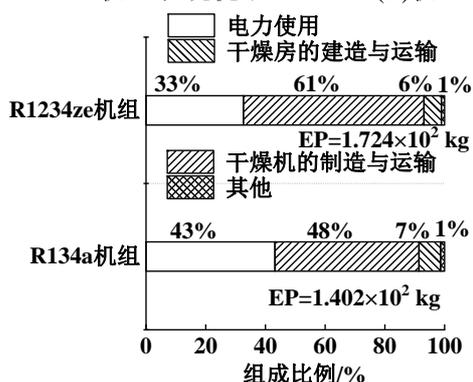


图 8 影响 EP 的主要流程

表 3 两种制冷剂干燥的主机贡献差异

制冷剂	主机贡献/%				
	铜	压缩机油	能源消耗电力	铝	其他
R134a	59.12	19.55	14.46	6.57	0.30
R1234ze(E)	60.5	18.67	13.81	6.73	0.22

2.2.3 酸化潜能指标

两种制冷剂机组对 AP 指标的贡献度最大的是系统运行所需的电力，其次为干燥主机的制造运输过程，如图 9 所示。虽然 R1234ze(E)机组运行耗电量低于 R134a 机组，但是由于 R1234ze(E)机组需要更大尺寸的换热器以及压缩机，其干燥主机制造中产生的酸化气体（SO₂、NO_x）加剧，两者基本可以相抵，故两种机组对环境酸化的影响基本相同。

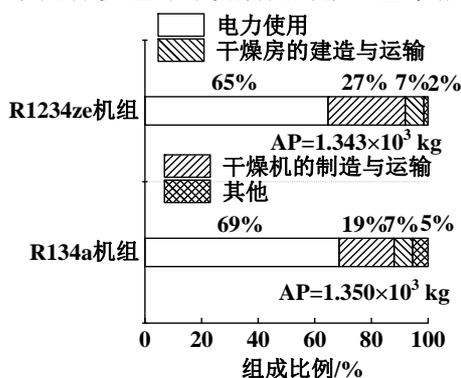


图 9 AP 指标清单敏感度分析

2.2.4 全球变暖潜能指标

两种制冷剂机组中，对 GWP 指标的贡献度最大的均为系统运行所需的电力，如图 10 所示。经过干燥机组的性能计算分析，可知 R1234ze(E)机组的运行整体电力消耗小于 R134a 机组。且由于 R134a 制冷剂为高 GWP 制冷剂，其在使用过程中的制冷剂逸散所造成的温室效应指标也不容小觑，而 R1234ze(E)因为逸散所导致的温室效应问题则几乎可以忽略不计。这两方面共同导致 R1234ze(E)机组在 GWP 指标上小于 R134a 机组。

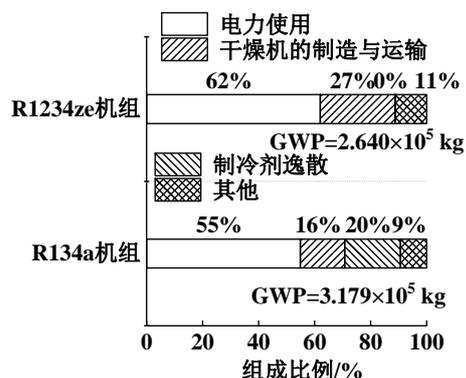


图 10 GWP 指标清单敏感度分析

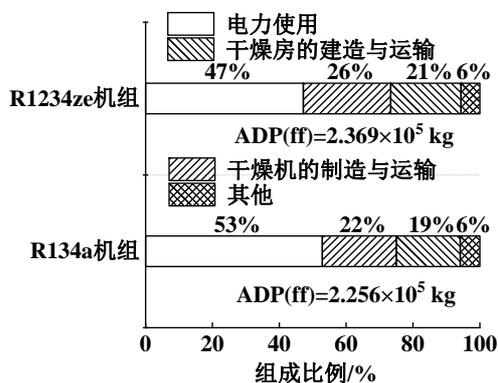
2.2.5 其他指标

ADP（化石燃料）、PED、COD 以及 RI 指标的影响因素大体相同，主要影响因素的前两名均为电力消耗以及干燥机的设计制造过程，如图 11 所示。虽然 R134a 机组耗电量高于 R1234ze(E)机组，但是由于其干燥主机部分质量远小于 R1234ze(E)机组，所以，这造成了上述四个指标整体上 R1234ze(E)机组的表现比 R134a 机组略差。

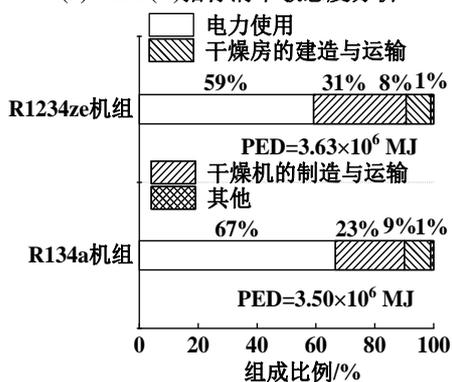
2.3 综合加权指标分析

根据前文的分析，本文选取 CRITIC、BWM 以及 ECER 三种权重确定方法进行综合加权指标分析。在计算方法上，CRITIC 方法使用在线统计产品与服务解决方案（Statistical Product and Service Solutions, SPSS）分析处理网站计算，BWM 使用 bestwrstmethod.com 网站及文献[19]的计算方法进行计算。ECER 方法使用 2.3 节所给出的计算方法进行计算，各种方法的指标计算结果及 R_{re} 如表 4 所示。

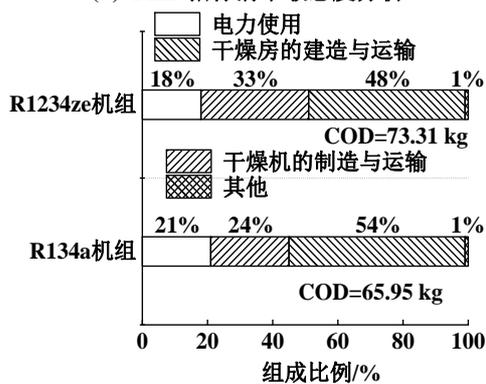
由于三种方法的评价方法和评价指标不同，故三种方法所得到的 AWI 值的绝对数值相差很大。故对这三种方法的绝对数值进行比较没有任何意义，所以本文仅对其相对优势度（R_{re}）进行比较。



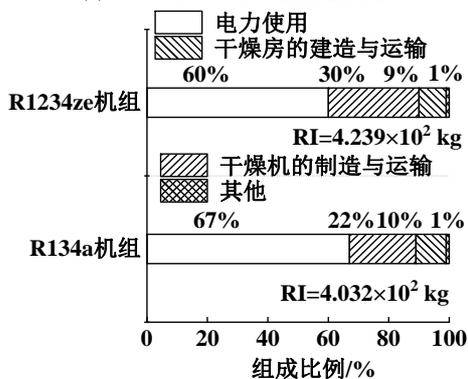
(a) ADP(ff)指标清单敏感度分析



(b) PED 指标清单敏感度分析



(c) COD 指标清单敏感度分析



(d) RI 指标清单敏感度分析

图 11 其他指标的生命周期清单

由表 4 可知, 运用上述三种方法所得到的两机

组的综合评价指标的 R_{re} 均不超过 $\pm 2\%$ 。使用客观确定的 CRITIC 方法所得到的两组综合指标几乎完全相同; BWM 方法所得出的结论为 R134a 机组略优, 而 ECER 方法所得到的结论则相反; 虽然这两组综合指标各有优劣, 但是两者相差不多, 可忽略不计。说明在现阶段的环保要求下, 使用 R1234ze(E) 制冷剂的热泵干燥机组与使用 R134a 干燥机组对环境造成的综合影响可以认为是基本相同的。

表 4 各种方法的指标结果及 R_{re} 值

权重确定方法	$A_{R1234ze(E)}$	A_{R134a}	$R_{re}\%$
CRITIC	3.223×10^{-8}	3.222×10^{-8}	-0.02
BWM	3.28×10^{-8}	3.24×10^{-8}	-1.19
ECER	6.49×10^{-7}	6.60×10^{-7}	1.69

但是考虑到我国进一步节能减碳的环保要求以及 2050 年碳中和的基本目标, GWP 项所占的权重将会逐步升高, 这将导致 R1234ze(E) 机组的综合环保性能逐步强于 R134a 机组。

3 结论

本文研究了对热泵水果干燥机进行新制冷剂 R1234ze(E) 替代后的环保性能以及使用 LCA 对其进行环保性能的评价过程, 分别建立了两种机组系统的 LCA 模型, 并选取 8 个生命周期评价指标进行生命周期指标影响分析, 得到如下结论:

1) 使用新制冷剂代替原有 R134a 制冷剂后, 其虽然在减碳方面的表现较之原机组提升 16.97%, 但是在资源消耗、富营养化等方面均有不同程度的降低;

2) 在对二者的综合评价中, 现阶段使用 R1234ze(E) 机组的综合性能与现有 R134a 机组可以认为是大体相同的, 三种评价方式是差距均不超过 2%; 但从长远的角度来看, R1234ze(E) 机组拥有极好的减碳性, 这可以使其可能会更好的满足未来的环保需求;

3) 如果现有 R134a 机组未到报废年限, 考虑到升级所需的经济、资源以及能源消耗, 没有必要立即升级为新型制冷剂机组; 但是当 R134a 机组报废后, 或寻求第二代制冷剂机组的替代品时, 可以一步到位直接升级到第四代制冷剂机组, 以求在未来拥有更好的环保性能。

