

家用空调全生命周期碳足迹分析

Analysis on Life Cycle Carbon Footprint of Household Air-conditioner

蒋诗新¹ 田晓飞² 王玲³ 万超³ 曹诺³

- (1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009;
2. 中国质量认证中心 北京 100000;
3. 中国电器科学研究院有限公司 广州 510300)

摘要：将家用空调作为研究对象，在清单分析的基础上运用 GaBi6 软件对其进行生命周期碳排放评估。结果表明：该款家用空调全生命周期碳排放总量为 5159.31 kg CO₂equiv，其中使用阶段排放最多（96.07%），原材料阶段次之，运输阶段最少。此外通过不确定性及敏感性分析得知影响空调碳排放的主要因素为使用阶段耗电量、制冷功率、制冷剂的泄漏率，材料环境属性。

关键词：家用空调；生命周期分析；碳足迹

Abstract : Regarding household air-conditioner as the research object, we use the software of GaBi6 to assess its life-cycle carbon emissions on the basis of the inventory analysis. The result shows that the total carbon emissions of household air conditioner during the whole life cycle is 5159.31 kg CO₂equiv, the emissions of using phase account for 96 %, the material production phase followed, and the transport phase is the least. In addition, according to the result of uncertainty and sensitivity analysis, electricity consumption in the use stage, environmental properties of materials and refrigerant leak rates are identified as the key driving forces for carbon footprint of air-conditioner.

Key words : household air-conditioner; life cycle analysis; carbon footprint

近年来，随着中国经济的快速发展，空调的普及程度越来越高。据统计，我国空调的年产量由 2000 年的 1 826.67 万台，增长到 2014 年的 15 563.27 万台，14 年间增长了将近 10 倍（国家统计局，2014），空调使用的迅猛增长背后必然带来家庭能源消费和温室气体排放的迅速增长。因此，有必要对其系统按照原材料获得直至废弃处理的整个过程各阶段的能耗以及温室气体的排放进行生命周期评价。

在国内先后有学者、专家做过这方面的研究。邵晓炜等^[1]以空调为研究对象，对其进行生命周期环境影响评价，并建立了环境影响指标体系，介绍了各环境影响指标的量化方法。孙铎等^[2]运用生命周期分析法对空调

进行全生命周期评价，识别出空调使用时间和制冷剂泄漏率是家用空调碳足迹的关键影响因素。但这些研究仅仅对家用空调的全生命周期作出评价，识别出影响因素，没有进行敏感性分析，对其研究数据的不确定性也没有作出说明，无法判断其分析结果的精确性。因此，本文运用生命周期方法，依据 ISO 14040 制定的生命周期评价理论框架，采用 CML 准则对家用空调的碳排放进行全生命周期评估，识别出碳排放主要阶段，并作出相应的敏感性及不确定性分析，识别出关键影响因素，最后，针对于评价结果对空调产品的低碳设计提出改进意见。

1 产品生命周期评价

基金项目：十二五科技支撑计划项目《低碳产品认证认可关键技术与示范》（项目编号：2013BAK15B07）
广东省科技计划项目《电器电子产品绿色制造共性技术创新平台》（项目编号：2013B090700006）

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是对产品或系统从原材料获取到报废回收整个过程的环境影响进行量化评价的过程。产品或系统的生命周期包括原材料的获取与加工、零部件制造及产品装配、销售、使用维护、回收处理以及期间的运输过程。根据 ISO 颁布的 14040 标准^[6], 生命周期评价步骤分为以下四步: 目标与范围的确定。明确研究的对象、功能单元、边界条件和假设。清单分析。收集所研究对象的全生命周期资源消耗、能量输入和输出排放的数据, 并对数据进行量化分析。影响评价。通过收集的数据清单, 对产品或系统的全生命周期对环境的影响进行量化的分析与描述。

结果解释。对评价结果进行分析, 对各种影响因素进行分析, 提出环保的建议。产品生命周期评价框架如图 1 所示。

2 目标与范围的确定

选择目前市场上的一款主流的分体壁挂式家用空调为研究对象, 其具体参数见表 1, 使用寿命为 10 年。目的是通过分析家用空调全生命周期过程中所涉及到的资源、能源利用及碳排放状况, 识别出其关键碳排放生命周期阶段和主要影响因素并建立家用空调低碳认证指标体系, 为家用空调产品设计人员进行低碳设计提供参考依据。

根据 ISO 14041 标准, 结合研究目标, 确定了研究范围主要包括五个阶段 (见图 2): 原材料获取阶段、生产制造阶段、运输阶段、使用阶段和回收阶段。其中, 忽略原材料供应商、空调零部件制造企业、空调制造企业相互间的运输过程。也不考虑空调回收过程中的运输过程。其他, 如场址的建筑、基础设施、制造设备的生产不纳入空调的全生命周期分析中。

3 清单分析

3.1 原材料获取阶段

家用空调的原材料清单 (见表 2) 是依据家用空调制造企业的物料清单 (Bill of Material, BOM) 及企业对材料损耗率的调研情况综合分析获得的。在清单输入过程

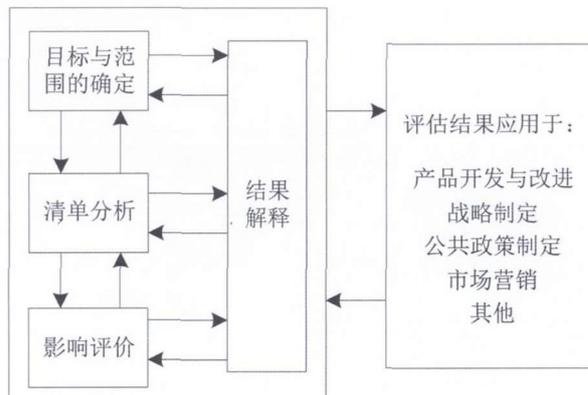


图1 生命周期评价框架

表1 空调的具体参数

参数名称	数值	单位	
制冷剂	1 100	g	
室内机重量	9.5	kg	
室外机重量	35	kg	
制冷量	3 500	W	
制热量	4 400	W	
额定功率	制冷	800	W
	制热	1 000	W
外形尺寸 (外 / 内)	宽	810/750	mm
	高	270/540	mm
	深	170/320	mm
使用面积	12-18	m ²	

表2 原材料清单

类型	材料	质量 /g
金属	铁	2 940
	钢板	6 270
	渗碳钢	1 320
	硅钢片	102
	热镀钢板	9 430
	铝板	3 180
	铜线	2 390
	铜管	8 980
	HIPS	3 824
	PVC	160.45
非金属	PP	2 551.2
	PCB	120
	ABS	2 670
	EPS	70
	瓦楞纸	3 132
	R600a	1 100
	橡胶	325
	环氧树脂	1 200

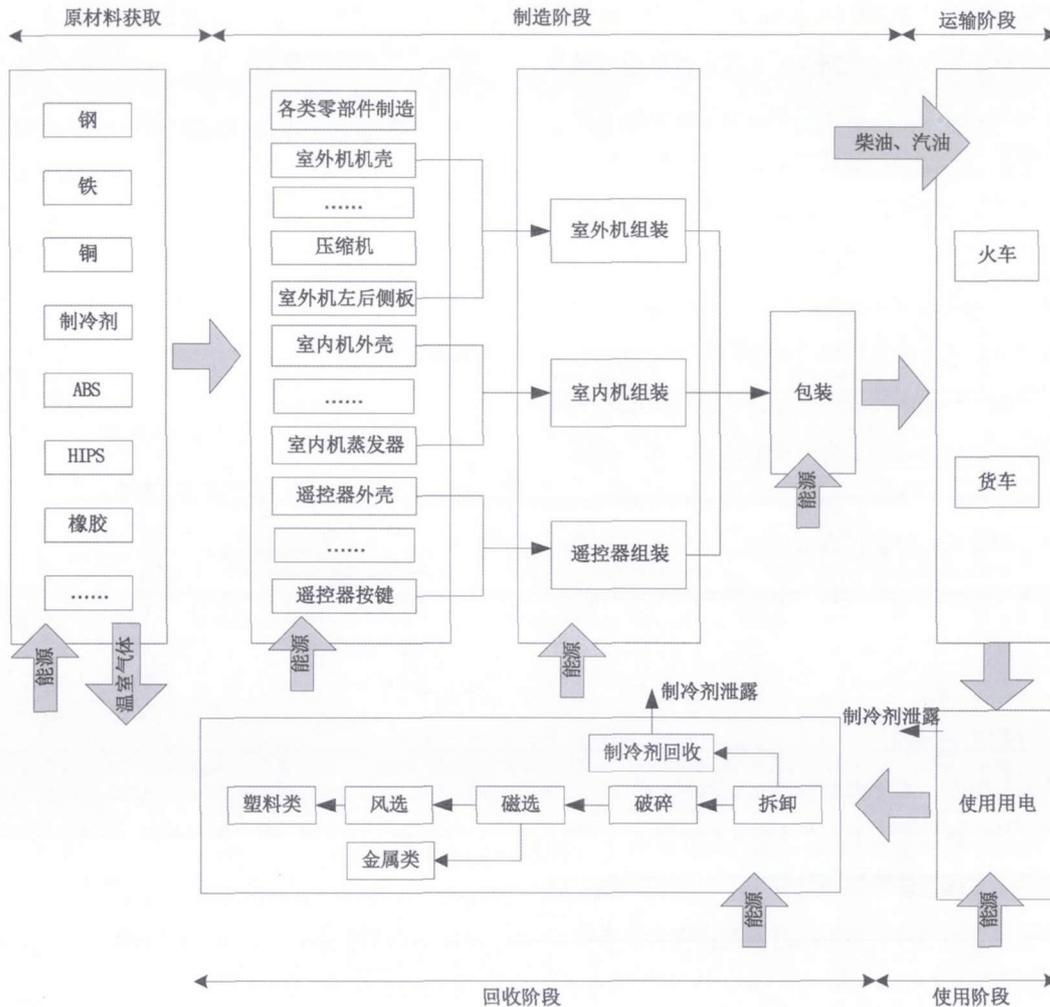


图2 系统边界

中,对于普通家用空调模型,由于钢、铁、铜、铝的使用量占据了所有使用金属材料的 90 % 以上,而镍、锌等金属的使用量过少,几乎不会对评价结果造成影响,因此金属材料仅将钢、铁、铜、铝列入清单。基于以上收集的数据及工艺分析,可运用 GaBi6 软件对家用空调的生产过程进行建模,如图 3 所示。

3.2 制造阶段

家用空调的基本生产流程如图 4 所示。通过分析其生产流程,把空调的制造分为零部件的生产和空调的组装。零件的生产环节涉及到的相关数据较多,针对不同的零件的

制造差异,将生产工艺相似的零件进行分类,进行统一分析。通过对生产企业的实地考察及科学的数据分析,统计出家用空调制造阶段的能耗情况见表 3。基于以上收集的数据及工艺分析,可运

表3 空调制造阶段的能耗

工艺名称	加工部件	材料名称	质量 / kg	能耗 /kwh
冲压、折边	室外机壳体、室外机隔板等	钢板	16.11	0.72
磷化	室外机壳体等	钢板	6.8	0.35
喷塑	室外机壳体等	钢板	6.8	0.32
注塑成型	室内机壳体及塑料件	HIPS、PP、ABS	9.16	9.71
机加工及焊接	热交换器	铜、铝	8	2.35
装配	空调零件	-	-	3.91

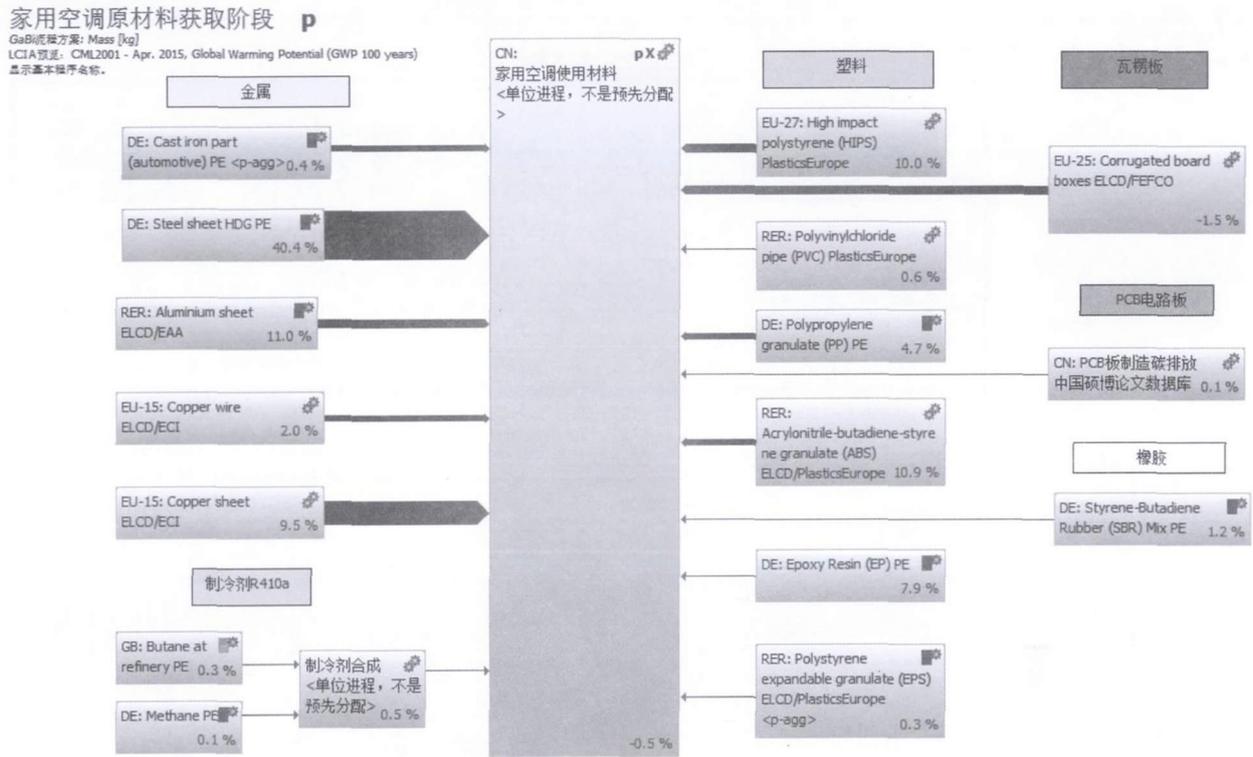


图3 家用空调原材料阶段GaBi6模型

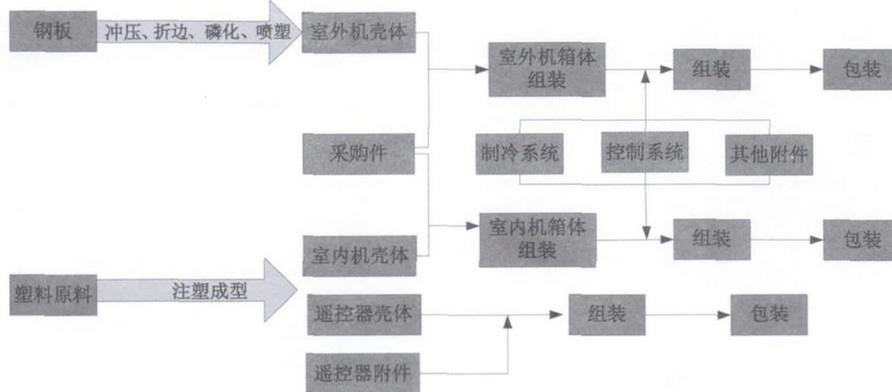


图4 家用空调的基本生产流程

用 GaBi6 软件对家用空调的生产过程进行建模，如图 5 所示。

3.3 运输阶段 (见图 6)

假设空调产品使用的是公路运输方式，选取的案例空调在广东省珠海市生产，产品在广州、深圳、东莞等周边城市使用，由谷歌地图可得到珠海到这些城市公路运输的平均距离是 126 km，可根据运输距离运用 GaBi

计算出运输碳排放。

3.4 使用阶段 (见图 7)

在空调的使用阶段，空调会消耗大量的电能，同时制冷剂也会发生泄漏，并且使用过程中可能要进行一些维修。由于空调的维修具有很大的随机性，难于统计，并且其碳排放影响很小，所以在空调的使用阶段的碳排放影响主要考虑电能的消耗和制冷剂的泄漏。本文假定

家用空调制造阶段 p

GaBi数据库: 参考量化范围
LCIA 设置: CN: 2001 - Apr. 2015, Global Warming Potential (GWP 100 years)
显示基本排序名称。

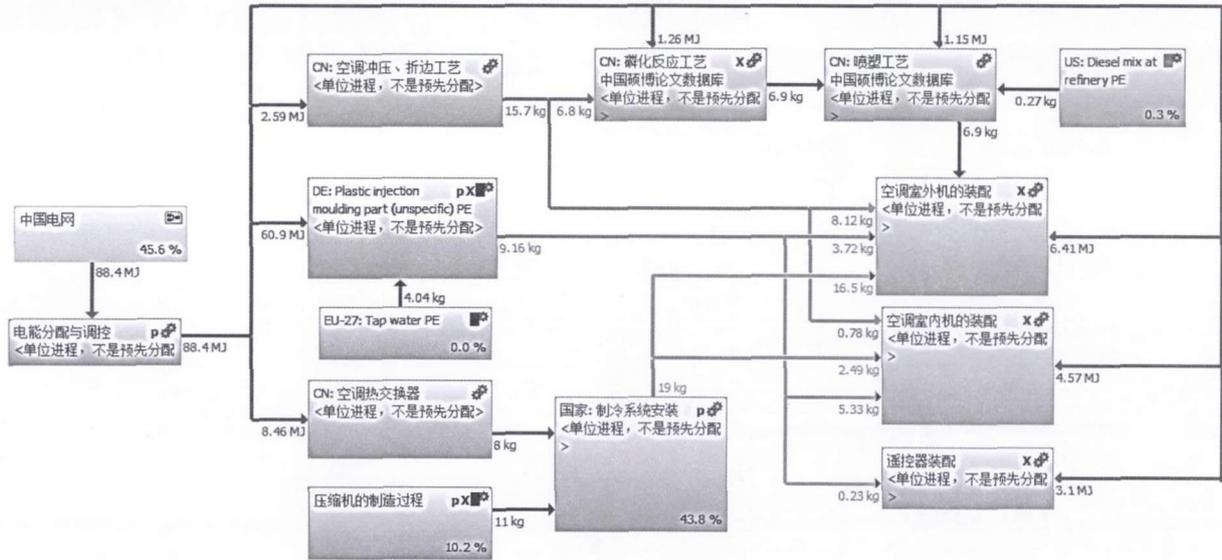


图5 家用空调制造阶段GaBi6模型

空调在夏天制冷 3 个月，在冬天制热 1 个月，并且空调在一般家庭中使用，工作日和双休日每天分别运行 6 h 和 8 h，一个月按 4 周计算^[1]，根据以上假定和空调的技术参数可计算出其使用阶段的耗电量：

$$650 \times [(6 \times 5 + 8 \times 2) \times 4] \times 10 + 1050 \times [(6 \times 5 + 8 \times 2) \times 4 \times 3] \times 10 = 5\,520 \text{ kWh.}$$

假设空调使用阶段每年制冷剂的泄漏量为 6%（包括制冷剂添加过程、空调运行过程和制冷剂回收过程）。制冷剂泄漏的总量平均到空调使用的每一年计算得到的。

3.5 回收阶段

回收阶段主要是对废旧空调进行拆解并通过一定的回收策略对拆卸零件进行材料回收，该阶段的碳排放主要来源于回收设备的耗电及回收废渣的掩埋或焚烧。建立回收阶段 GaBi 模型如图 8 所示。

4 影响评价及结果解释

通过上述家用空调碳排放的全生命周期分析，建立了其生命周期各个阶段的 GaBi 模型，再经过 Balance 计算，得空调不同阶段的碳排放数据。为了有针对性的找到排放较高的工艺或结构部件，列出了生命周期不同阶

家用空调运输阶段 p



图6 家用空调运输阶段GaBi6模型

家用空调使用阶段 p



图7 家用使用运输阶段GaBi6模型

段的碳排放、空调各种材料碳排放以及制造过程不同工艺碳排放的数据及饼状图如图 9 所示。

由分析数据可知：家用空调使用阶段碳排放量最多

家用空调回收阶段 P

Gabi数据库: 参考量化范围
LCIA过程: CML2001 - Apr. 2015, Global Warming Potential (GWP 100 years)
显示基本程序名称。

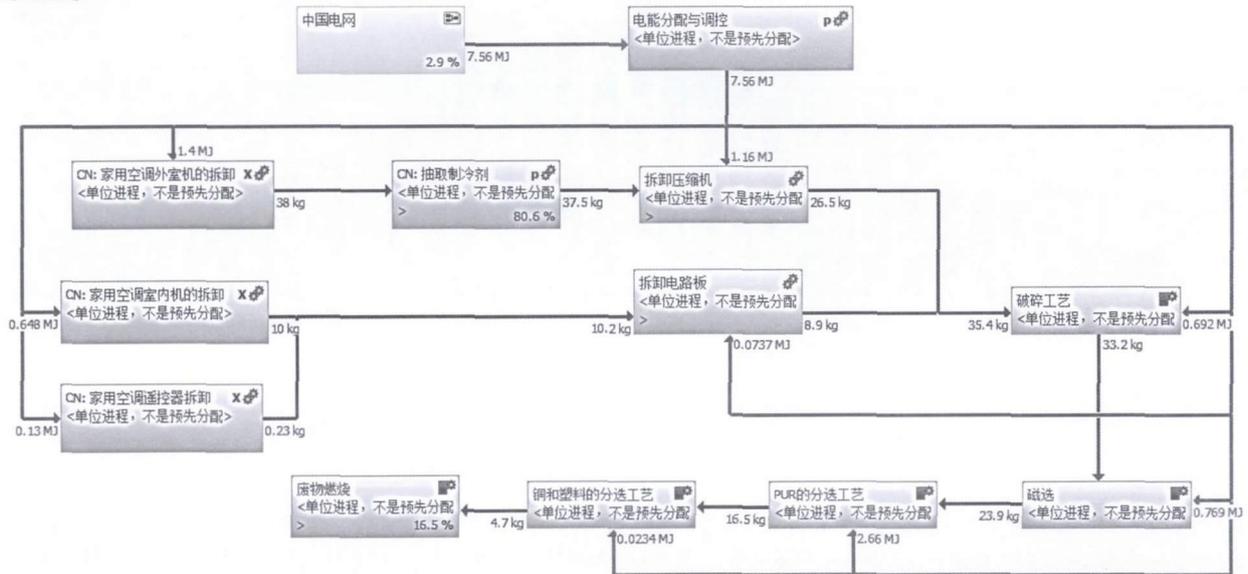


图8 回收阶段Gabi生命周期模型

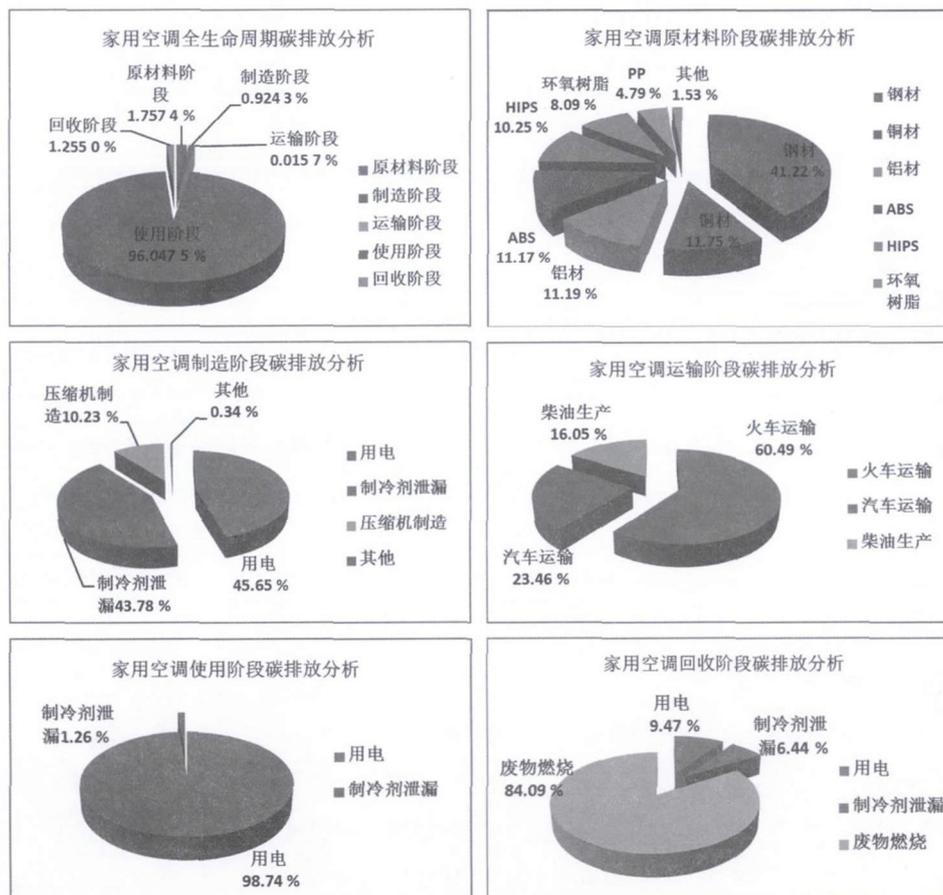


图9 空调生命周期碳排放分析

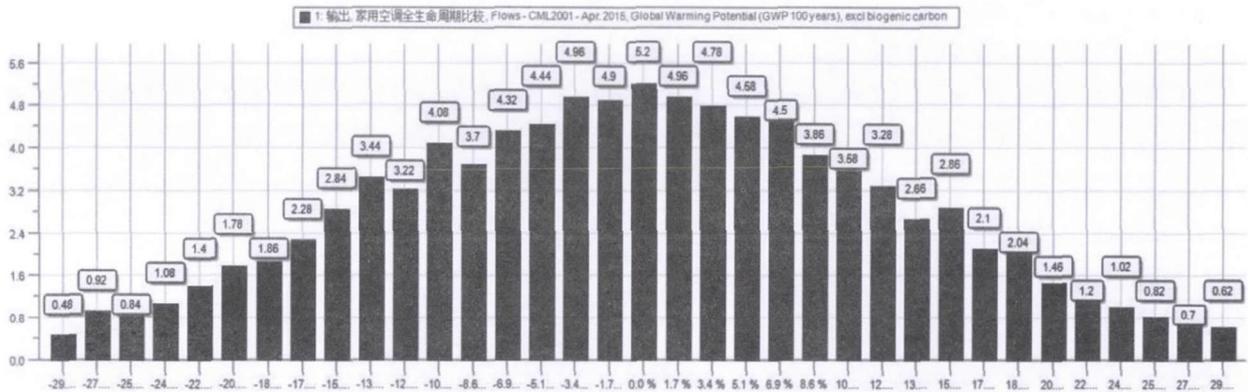


图10 碳排放概率分布

(96%)，原材料阶段次之，回收阶段最少，其中使用阶段碳排放70%以上是电能的消耗所引起的，制冷剂的泄漏也是影响其碳排放的关键因素；原材料阶段由于钢材使用较多，其产生碳排放占该阶段碳排放量的41.22%。制造阶段主要影响碳排放因素依此为设备耗电。回收阶段80%碳排放量由废物燃烧引起的。

表5 碳排放主要变化因素敏感性分析表

所属类别	碳排放主要变化因素	参考值	自变量变化量	碳排放变化量	
原材料	主要原材料种类	钢	17.122	10%	0.072 40%
		铝	3.18	10%	0.019 80%
		铜板	8.98	10%	0.017 00%
		ABS	2.67	10%	0.019 60%
能源	制造用电量	用电量波动系数	1	10%	0.042 20%
		平均年制冷时间	552	10%	6.160 00%
		空调制冷功率	0.65	10%	6.160 00%
		回收用电量	用电量波动系数	1	10%
制冷系统	制冷剂	制冷剂 GWP 值	2 088	10%	0.263 %
		制冷剂用量	0.5	10%	0.263 %
		制冷剂泄漏率	6 %	10%	0.121 %

5 不确定性及敏感性分析

空调全生命周期的能耗高低和碳排放量受众多因素影响，存在着一定的不确定性。本文通过对家用空调全生命周期数据质量的不确定性分析，确定各数据参数的概率分布近似为正态分布，并通过 GaBi6 软件运用蒙特卡罗仿真法将这些数据以概率分布的形式带入碳排放计算模型中进行仿真，模拟执行5 000次，结果为：全生命周期碳排放总量的均值为5 150 kg CO₂-Equiv.，标准差为715.85 kg CO₂-Equiv.，概率分布

如图 10 所示。取置信概率为 95%，家用空调全生命周期的碳排放总量的置信区间为(3 760, 6 463)。此外，再通过软件自动对不确定性参数的变动对目标变量的影响情况进行敏感性分析，其结果见表 5。经过不确定性及敏感性分析可知家用空调的关键碳排放因素是使用阶段平均年耗电量、制冷功率、制冷剂的泄漏率、制冷剂的 GWP 值。

6 结论

1) 由分析结果知：家用空调在其使用阶段碳排放最多(96.07%)，原材料阶段次之，运输阶段最少。

2) 家用空调的碳足迹主要集中在使用阶段，其中主要贡献因素为耗电量，可以通过使用清洁能源发电和提高能源利用率来减少用电产生的碳足迹。此外，消费者对空调的使用行为及维护行为严重影响着用户的用电量，可进一

(下转56页)

工艺上存在明显的不同，导致测试出来的热效率存在很大差别，严重影响厂家和检测机构的符合性判定。

5 总结

通过以上的各个比对测试的分析，不难发现在执行标准的过程中，各实验室对采购的标准锅不同，带来了试验数据的差异，容易导致评定结果的争议。

在全球能源形势非常紧张的情况下，人们对于能效的关注越来越高。为了更好地执行能效标准，做好电磁灶产品的市场监控，笔者认为新标准工艺锅具重复性和准确性都较高，更适合作为实验结果统一仲裁的标准物质。另外对标准进行适当修订，对标准锅的各项关键参数进行设定，以避免分歧，是很有必要的。

参考文献：

- [1] GB 21456-2014, 家用电磁灶能效限定值及能效等级 [S].
- [1] GB 21456-2008, 家用电磁灶能效限定值及能源效率等级 [S].

(上接52页)

步研究空调的使用行为及维护行为，规范行为，减少电能的用量。

3) 原材料阶段的碳排放量虽然在全生命周期排量所占比重较少，但还有降低空间。原材料中铜、钢的使用量较大，环境影响占原材料阶段比重大，可以在产品设计时在满足性能要求下选择环境影响小的替代材料，改善原材料阶段的碳排放性能。

4) 制造阶段和使用阶段制冷剂的泄漏造成了较大的碳排放，可以通过改善空调制冷管路密封性以及抽注制冷剂工艺降低制冷剂的泄漏率。

5) 制冷剂的回收率对减缓废物处理阶段碳足迹的作用最大，提高其回收利用率，可以进一步降低空调生命周期中对温室效应的影响。

参考文献：

- [1] 邵晓伟, 蔡亮, 张小松. 寿命期内家用空调的环境影响评价及量化方法 [J]. 制冷学报, 2012, 33(5):10-14.
- [2] 孙铨, 刘晶茹, 杨东. 家用空调碳足迹及其关键影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2014, 34(4):1054-1060.
- [3] 王吉凯, 刘志峰, 鲍宏. 基于生命周期的家电产品碳排放计算方法研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2012, 35(08):1043-1048.
- [4] 于随然, 陶璟. 产品全生命周期设计与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [5] 刘光复. 绿色设计与绿色制造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [6] GB 12021. 3-2010, 房间空气调节器能效限定值及能效等级 [S].
- [7] ISO 14040: 2006, Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework [S].
- [8] ISO 14044-2006, Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines [S].
- [9] PAS 2050: 2011, Specification for the assessment of the lifecycle greenhouse gas emissions of goods and services [S].