

溴化锂吸收式制冷系统的生命周期评价研究

杨岚翔, 向莉, 黄伟, 蔡玲玲, 徐爱祥

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于 Aspen Plus 软件建立溴化锂吸收式制冷系统模型, 采用 Eco-indicator16 评价指标, 综合 22 种环境影响类别, 对溴化锂吸收式制冷系统进行生命周期评价。结果表明: 溴化锂吸收式制冷系统在生命周期建造阶段、运输阶段、使用阶段和废弃阶段的 EI16 分别为 1.93×10^3 、 4.00×10^1 、 9.18×10^{-1} 和 1.18×10^2 ; 系统建造阶段对环境造成的负面影响最为严重, 其次为废弃阶段。

关键词: Aspen Plus; 吸收式制冷系统; Eco-indicator16; 生命周期评价

中图分类号: TB657

文献标识码: A

文章编号: 2096-2339(2022)06-00121-06

DOI:10.19534/j.cnki.zyxygc.2022.06.001

Life cycle assessment of lithium bromide absorption refrigeration system

YANG Lanxiang, XIANG Li, HUANG Wei, CAI Lingling, XU Aixiang

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, China)

Abstract: Based on Aspen Plus software, a model of lithium bromide absorption refrigeration system was established, and Eco-indicator16 evaluation index and 22 environmental impact categories were used to evaluate the life cycle of the lithium bromide absorption refrigeration system. The results showed that the EI16 values of the lithium bromide absorption refrigeration system in the construction, transportation, use and disposal phases of the life cycle are 1.93×10^3 , 4.00×10^1 , 9.18×10^{-1} and 1.18×10^2 , respectively. The manufacturing phase of the system causes the most serious negative impact on the environment, followed by the disposal phase.

Key words: Aspen Plus; absorption refrigeration system; Eco-indicator16; life cycle assessment

随着社会经济的发展, 人类面临的环境与气候问题日益突出, “双碳”目标的提出引起了社会的广泛关注^[1]。碳排放量的增加, 引发了全球变暖的环境问题, 导致对制冷需求的不断增加^[2]。吸收式制冷机因为其电耗较小、节能环保、运行平稳等优点已经被普遍使用^[3]。对制冷系统进行优化, 能够提高系统的效率, 节约能源, 降低排放, 促进可持续发展^[4]。

生命周期评价是量化产品生命周期每个阶段的环境流量来评估产品和工艺从始至终对环境影响的方法, 可以促进低碳模式的转型和可再生能源的发展^[5-6]。FU 等人对集成冷却系统进行了生命周期评价, 提升了该系统的节能效果, 降低了寿命周期成本^[7]; LONGO 等人对太阳能吸附式制冷系统进行生命周期评价, 表明了太阳能系统的环境效益能够抵

消生命周期步骤中产生的额外影响^[8]; KARIM 等人使用 Eco-indicator 99 评价指标, 对新型建筑集成集中光伏的方案和传统方案进行了生命周期评估并进行了比较, 得出结论: 新型方案具有显著的环境效益^[9]。最近, YANG 等人综合考虑了 17 种环境影响因素, 在对系统进行生命周期评价时采用了一种新型综合生态指标 Eco-indicator16。生命周期评价成为了能源系统分析中比较常见的评价方法^[10]。

本文基于 Aspen Plus 模拟软件建立溴化锂吸收式制冷系统模型, 采用 Eco-indicator16 (EI16) 评价指标, 综合 22 种环境影响类别, 对溴化锂吸收式制冷系统进行生命周期评价, 提高该系统对能源的利用率, 减少废弃物排放对环境的负面影响, 提高系统的环境效益, 促进可持续发展。

基金项目: 湖南省自然科学基金(2022JJ50079); 湖南省大学生创新创业计划(S202111535010); 湖南省教育厅科研项目(20C0651)

作者简介: 杨岚翔(1998—), 男, 湖南益阳人, 硕士研究生, 研究方向: 低碳能源系统优化设计与评价。

通信作者: 徐爱祥(1984—), 男, 湖南永州人, 博士, 副教授, 研究方向: 高效热力循环与低碳能源系统。

1 系统建模与验证

1.1 系统原理

溴化锂吸收式制冷系统原理如图 1。该系统由吸收器、冷凝器和蒸发器等主要组件所构成,制冷循环中溴化锂为吸收剂,水为制冷剂。在该系统中,发生器所需的热负荷由低温热源提供(H1—H2),由于沸点不同,溴化锂稀溶液会在发生器中分离出气态制冷剂,进入冷凝器进行冷凝(A1),通过冷却水的换热作用后(W1—W2),气态制冷剂转换为饱和水即液态制冷剂,在节流阀 1 中发生节流作用(A2),节流后的制冷剂进入蒸发器(A3),通过闪蒸作用产生制冷量。发生器中气态制冷剂分离后,剩下的溴化锂浓溶液先进入换热器(A8),与稀溶液进行间接换热后,再通过节流阀(A9)进入吸收器(A10)。进入吸收器的溴化锂浓溶液会吸收工作后的制冷剂,通过冷却水的换热作用后(W3—W4),产生再次循环的溴化锂稀溶液,经过泵(A5)加压后,进入换热器进行热交换(A6),最终进入发生器(A7),再次参与循环。

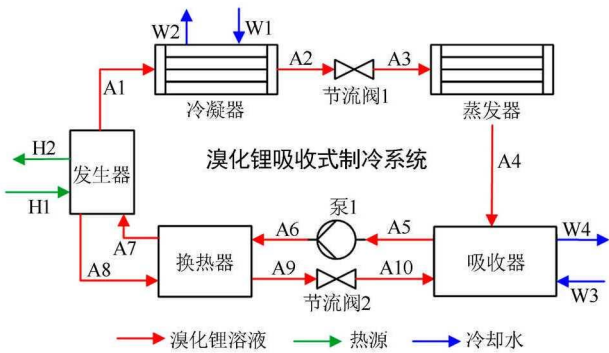


图 1 制冷系统原理图

1.2 模型设置与验证

1.2.1 模型设置

基于 Aspen Plus, 本文对溴化锂吸收式制冷系统进行了建模和计算。在模拟过程中,选择的基本物性方法为 ELECNRTL。为保证模拟的准确性,对制冷系统作出假设:1) 系统运行过程为稳态过程;2) 泵在运行过程中所消耗的功忽略不计;3) 运行过程中,动能与重力势能忽略不计;4) 系统运行过程中不考虑热损失和管道压降。表 1 列出了制冷系统的具体选型和参数设置。

1.2.2 系统模型验证

表 2 为本文吸收式制冷系统模型与文献[11]模型的对比结果。从表中可以看出,两个模型之间 COP(Coefficient of Performance, 性能系数)值的误差为 0.4%, 本文所提出的模型是可靠的。

表 1 制冷系统选型及设置

模块名称	模型	运行参数
泵	Pump	出口压力:根据工况设定;效率:0.97
节流阀	Valve	出口压力:根据工况设定
吸收器	Heater	水蒸气比:0; 降压:0 kPa
蒸发器	Heater	水蒸气比:1; 降压:0 kPa
冷凝器	Heater	水蒸气比:0; 压力:7.38 kPa
换热器	HeatX	换热器冷热进出口温差:10 °C
发生器	Heater	降压:0 kPa; 温度:80 °C
	Flash2	热负荷:0 kW; 降压:0 kPa

表 2 吸收式制冷系统模型对比结果

参数设置	文献[11]数据	本文数据	数据类型	误差/%
发生器温度/°C	84.8	84.8	输入	—
冷凝温度/°C	39.8	39.8	输入	—
吸收器温度/°C	35.5	35.5	输入	—
蒸发温度/°C	8.6	8.6	输入	—
COP	0.7701	0.7734	输出	0.4

2 基于生命周期评价的 EI16 分析

2.1 系统的边界划分

制冷系统的边界划分如图 2。本文考虑的是该系统的生命周期全过程,其输入能量是各种原材料和电能,输出能量分为两个方面:一是对环境有益的部分——清洁空气,二是对环境的各种污染和损失。

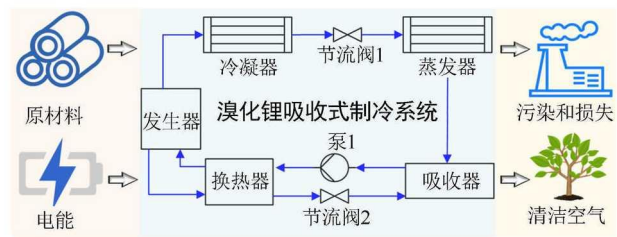


图 2 系统的边界划分

2.2 生命周期材料清单

建立材料清单是生命周期评价中最重要的一环,包括能源和资源的使用以及排放。根据 Aspen Plus 的计算结果,确定了制冷系统各设备的规格。对于用量相对较少的材料本文选择忽略以简化模型。

本文主要研究溴化锂吸收式制冷系统在生命周期四个阶段对环境的影响。该系统设计寿命为 10 年。根据经济分析数据,表 3 列出了各设备的材料明细。在建造阶段,系统使用的材料主要是不锈钢、铜等金属材料以及 PVC、PP 等塑料。由于该系统中作为吸收剂的溴化锂溶液具有腐蚀性,而不锈钢

表 3 制冷系统材料明细表

材料和能量投入	GaBi 过程中的基础流	数量
不锈钢(304)/kg	不锈钢 (304) (金属)	1 026.60
碳钢/kg	薄板热轧钢 (金属)	26.00
铸铁/kg	铸铁 (金属)	343.90
橡胶/kg	聚丁二烯橡胶 (涂料)	116.69
铝合金/kg	铝压铸合金 (金属)	16.00
铜管/kg	铜管 (金属)	180.60
塑料/kg	聚丙烯 (PP) (塑料)	83.64
聚氯乙烯管/kg	聚氯乙烯 (PVC) (塑料)	2.16
柴油/kg	柴油 (炼油产品)	28.01
电/MJ	电力 (电力)	35.70

有耐腐蚀、耐高温的特点,故系统的材料以不锈钢为主;吸收式制冷设备中,除冷凝器外,其他设备主要材料也是不锈钢;水冷式冷凝器主要材料是碳钢。建造阶段会消耗一定数量的电力。该系统的主要设

备是常规热力设备。假设主要运输工具为卡车,运输距离为 200 km,分析卡车燃料消耗对环境的影响。使用阶段,系统的主要输入能源是溶液泵等设备所消耗的电能。当系统寿命结束时,系统的每一部分都会以不同的方式拆卸和回收。溴化锂溶液的泄漏在计算中被忽略,工质在系统中连续循环使用,因此本文没有考虑工质对环境的影响。

2.3 生命周期综合指标

为了更全面地评价制冷系统在全生命周期过程中对环境产生的影响,本文采用 EI16 指标作为综合指标。在进行综合指标计算之前,本文利用 GaBi 软件中的 Recipe2016 对溴化锂吸收式制冷系统的环境影响类别进行量化和标准化,如图 3,主要包含了 22 个影响类别。

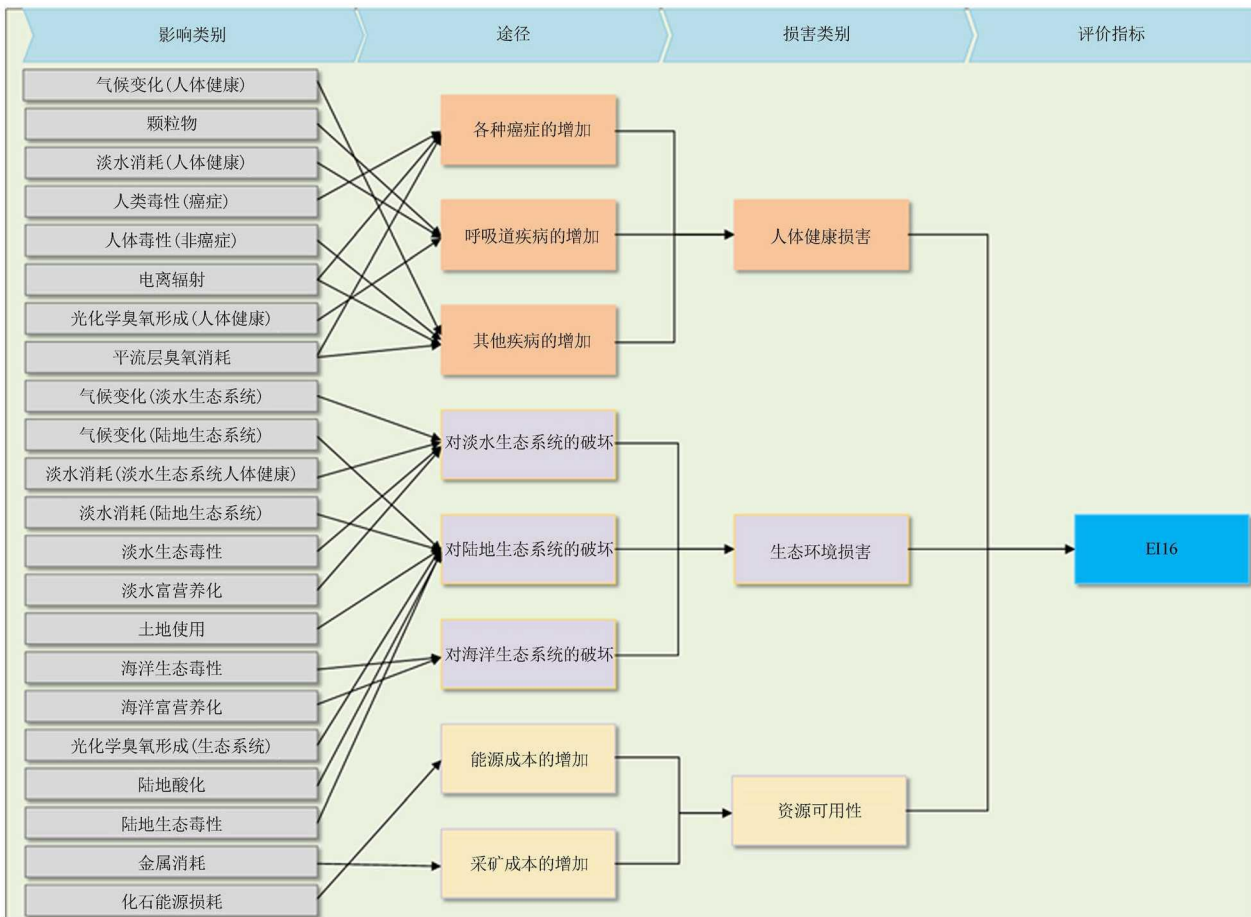


图 3 EI16 综合指标的影响类别

3 生命周期结果与讨论

3.1 系统的生命周期计算结果和分析

表 4 列出了制冷系统在各阶段的影响类别和

EI99 值。在完成量化计算后,本文采用了 Eco-indicator 99 方法对三个标准化指标进行了归一化处理和加权处理。根据权重系数的不同,计算出了耦合系统在建造阶段、运输阶段、使用阶段和废弃阶段的综合指标 EI16,公式如下^[12]:

$$E_{I16} = \sum_d n_d w_d D_{AM,d} = \sum_d \sum_r n_d w_d I_{MP,r} \quad (1)$$

$$= \sum_d \sum_r \sum_b n_d w_d d_{m,br} L_{CI,b}$$

式中： d 为损害类别； r 为影响类别； b 表示化学物质种类； n_d 和 w_d 是 d 类损害的归一化因子和权重因子； $D_{AM,d}$ 是 d 类损害的总体损害值； $I_{MP,r}$ 指每个环境

影响的总损害值； $L_{CI,b}$ 指与化学品 b 相关的生命周期清单，即一种特定物质的数量； $d_{m,br}$ 是指该物质对每个环境的影响损害系数。

表 5 列出了制冷系统在各阶段的损害类别和 EI16 值，可以看出，制冷系统整个生命周期中使用阶段的能源消耗最少，对环境的污染最小。

表 4 各阶段的影响类别和 GaBi 软件计算结果 (EI99)

影响类别	单位	建造阶段	运输阶段	使用阶段	废弃阶段
气候变化(人体健康)	DALY	3.47×10^2	4.89×10^0	1.95×10^{-1}	5.15×10^1
颗粒物	DALY	1.31×10^2	2.16×10^0	2.12×10^{-2}	1.18×10^0
淡水消耗(人体健康)	DALY	1.37×10^2	2.96×10^{-2}	3.56×10^{-2}	3.35×10^0
人类毒性(癌症)	DALY	7.12×10^1	2.17×10^0	1.28×10^{-2}	9.77×10^{-1}
人体毒性(非癌症)	DALY	1.34×10^3	2.80×10^0	2.83×10^{-2}	4.55×10^0
电离辐射	DALY	6.18×10^1	1.33×10^{-1}	9.70×10^{-1}	1.47×10^0
光化学臭氧形成(人体健康)	DALY	2.31×10^2	2.04×10^1	6.96×10^{-2}	6.37×10^0
平流层臭氧损耗	DALY	1.13×10^1	1.56×10^{-1}	8.41×10^{-3}	2.93×10^{-1}
气候变化(淡水生态系统)	Species.yr	5.79×10^2	8.15×10^0	3.25×10^{-1}	8.59×10^1
气候变化(陆地生态系统)	Species.yr	5.79×10^2	8.15×10^0	3.25×10^{-1}	8.59×10^1
淡水消耗(淡水生态系统人体健康)	Species.yr	1.40×10^2	4.52×10^{-2}	8.58×10^{-3}	2.06×10^0
淡水消耗(陆地生态系统)	Species.yr	1.24×10^2	3.88×10^{-2}	1.64×10^{-2}	2.83×10^0
淡水生态毒性	Species.yr	1.83×10^1	3.32×10^{-2}	6.09×10^{-4}	1.60×10^{-1}
淡水富营养化	Species.yr	7.28×10^0	2.09×10^{-1}	7.30×10^{-3}	1.79×10^1
土地使用	Species.yr	8.95×10^0	3.30×10^{-2}	1.65×10^{-3}	8.33×10^{-3}
海洋生态毒性	Species.yr	6.66×10^1	2.40×10^{-2}	9.26×10^{-4}	1.90×10^{-1}
海洋富营养化	Species.yr	1.15×10^1	2.08×10^{-1}	1.24×10^{-2}	9.68×10^0
光化学臭氧形成(生态系统)	Species.yr	4.42×10^2	3.91×10^1	1.33×10^{-1}	1.23×10^1
陆地酸化	Species.yr	3.67×10^2	6.54×10^0	7.26×10^{-2}	3.99×10^0
陆地生态毒性	Species.yr	5.99×10^{-1}	5.87×10^{-5}	8.22×10^{-6}	4.20×10^{-4}
金属损耗	Dollar	2.15×10^0	2.36×10^{-4}	9.95×10^{-6}	1.94×10^{-2}
化石能源损耗	Dollar	3.24×10^2	9.51×10^0	1.09×10^{-1}	6.80×10^0

注：对人类健康的损害，单位是 DALY (Disability Adjusted Life Years)，表示每年生命死亡和残疾的人数；对生态系统的破坏，单位是 species.yr，表示某一时期某一地区物种的丧失。

表 5 制冷系统生命周期损害类别和综合指标计算结果 (EI16)

项目	加权系数	建造阶段	运输阶段	使用阶段	废弃阶段
人体健康损害	0.4	2.33×10^3	3.28×10^1	1.34×10^0	6.97×10^1
生态环境损害	0.4	2.34×10^3	6.25×10^1	9.00×10^{-1}	2.21×10^2
资源损耗	0.2	3.26×10^2	9.51×10^0	1.09×10^{-1}	6.82×10^0
综合指标 EI16	—	1.93×10^3	4.00×10^1	9.18×10^{-1}	1.18×10^2

系统的建造过程中会产生无机排放物，主要是二氧化碳和甲烷；金属、塑料等原材料的生产过程中会造成有害颗粒物的排放；砷和镉等类型的重金属主要通过空气、淡水和土壤污染产生危害； C_{14} 是建造阶段产生的一类环境影响物质，是电离辐射的主要成分；系统在建造过程中使用了大量的不锈钢，产生了许多卤代有机化合物，例如 R_{11} 和 R_{114} ，对臭氧层的消耗有重大影响。建造过程中的淡水消耗和污水排放对生态系统造成了重大影响。在电力的生产过程中，镍、铅、锌和铬等重金属的污染会提高生态毒

性。总体而言，在人体健康这一损害类别中，占比最大的影响类别为非致癌人体毒性，其次为环境变化。

与制冷系统生命周期的其他三个阶段相比，建造阶段对环境的影响非常显著，对于环境有很大的负面影响。运输阶段的卡车废气排放，对生态环境影响不大。在使用阶段，制冷系统在运行时所消耗的能源以及排放相对于其他几个阶段较小，对环境的影响较小。当系统达到其寿命时，系统中的塑料、橡胶和 PVC 管被焚化处理，所用的金属材料进行回收处理，剩下的惰性废物则被掩埋在垃圾填埋场。

建造阶段、运输阶段、使用阶段和废弃阶段的 EI16 值分别为 1.93×10^3 、 4.00×10^1 、 9.18×10^{-1} 和 1.18×10^2 ,表明建造阶段对环境的影响最大,对建造工艺的改进能够大幅度提升该系统的环境效益。

3.2 建造阶段材料的环境影响

图 4 展示了建造阶段各种材料对环境的影响。该系统的主要建造材料是不锈钢,而不锈钢生产过程中将产生大量气体、液体和固体污染物:气体污染物中的细颗粒物会加重对人体呼吸道的危害,其他有毒物质将导致癌症及其他疾病发生率的提升;液

体污染主要是生产过程中的各类废水,会严重影响淡水生态系统、海洋生态系统和陆地生态系统,对人类健康造成危害。不锈钢的生产还会消耗大量燃料,并且其产出的放射性物质会向环境释放辐射,对环境造成很大的影响。铜是该系统中用量第二大的原材料,生产工艺相对复杂,产生的物质会对生态环境造成很严重的重金属污染,对人类健康产生严重影响。橡胶是系统用量第三大的原材料,主要用于溶液的密封,生产过程中会产生很多污染环境的物质如含硫化合物等,影响人类健康。由于使用量较小,其余材料对于环境的影响并不显著。

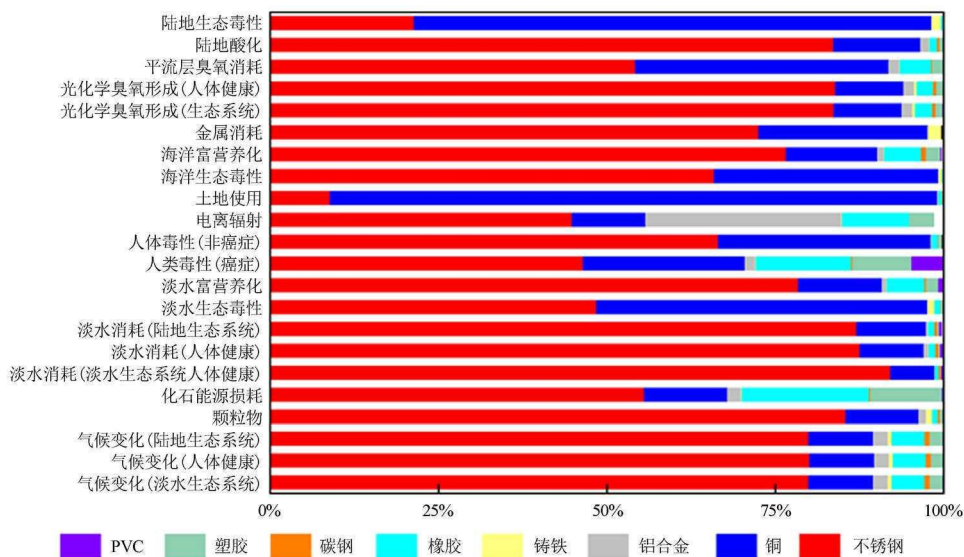


图 4 建造阶段材料对环境的影响

3.3 运输阶段材料的环境影响

运输过程主要考虑了两种排放指标:间接排放,指化石燃料生产所产生的污染;直接排放,指汽车、火车等工具的排放。本文选用柴油燃料卡车作为运输工具。从图 5 可以明显看出,运输过程卡车的直接排放对气候变化、颗粒物的产生、光化学臭氧形成和地球酸化具有严重影响,在排放物中含有大量的二氧化碳、氮氧化物、碳氢化合物、硫化物和颗粒物。柴油的生产消耗了大量的电力、人力和淡水资源,对淡水的流失、海洋生态毒性等环境指标产生了严重影响;柴油原材料的开采过程会产生电离辐射及大量的污染物,影响人类健康。

各类有害气体,例如醛类和芳香族化合物、POPS (Persistent Organic Pollutants,持久性有机污染物)等物质。该类污染物会对环境、光化学臭氧层形成

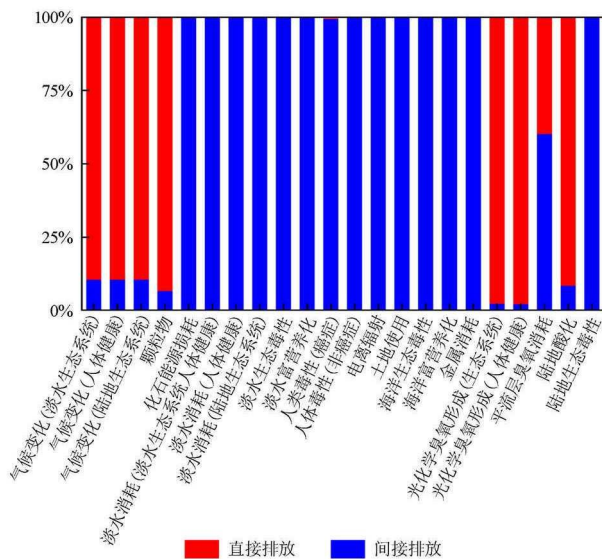


图 5 运输阶段对环境的影响

3.4 废弃阶段材料的环境影响

在废弃阶段,制冷系统中的塑料、橡胶和 PVC 管被焚化处理,所用的金属材料进行回收处理,剩下的惰性废物则被掩埋在垃圾填埋场。如图 6 所示,塑料、橡胶和 PVC 管在焚化过程中的主要污染物为

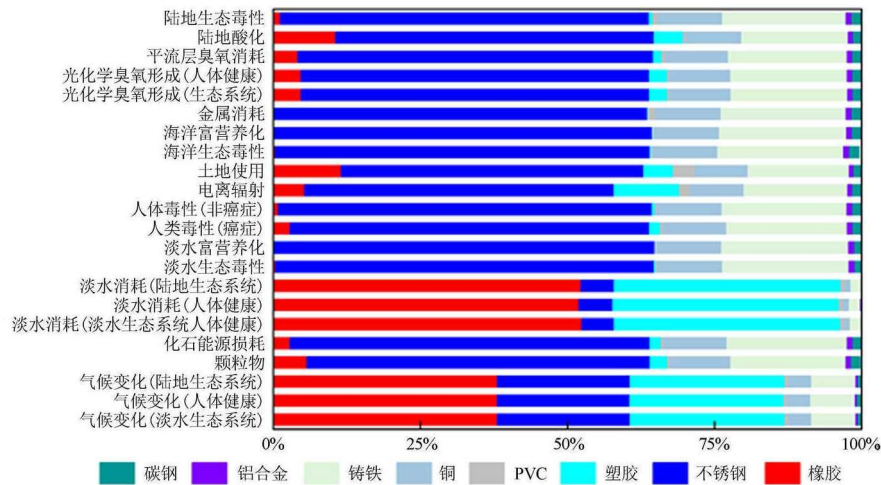


图 6 废弃阶段材料对环境的影响

以及平流层臭氧层损耗等产生严重影响。焚化过程中的不完全燃烧会产生一定量的致癌物,众多重金属污染物会存留在焚烧残渣中,对陆地生态系统和淡水生态系统产生较大的影响。由于不锈钢的使用量较大,其回收过程中对于环境影响也是较大的,对于陆地生态毒性、金属消耗、海洋富营养化、淡水富营养化以及人体毒性等指标的影响较为显著。其他材料在废弃阶段对环境的影响不大。

4 结论

本文基于 Aspen Plus 软件对溴化锂吸收式制冷系统进行了生命周期评价,综合了 22 种环境影响类别,使用 Eco-indicator16 评价指标,对溴化锂吸收式制冷系统整个生命周期的资源消耗和环境影响做出了全面、综合的分析,主要结论如下:

1) 溴化锂吸收式制冷系统在生命周期建造阶段、运输阶段、使用阶段和废弃阶段的 EI16 值分别为 1.93×10^3 、 4.00×10^1 、 9.18×10^{-1} 和 1.18×10^2 。建造阶段对环境的影响最大,对建造工艺的改进能够大幅度提升该系统的环境效益。

2) 溴化锂吸收式制冷系统使用的不锈钢会对环境造成很大的负面影响,导致了建造阶段对环境造成的负面影响最为严重,其次为废弃阶段。

3) 对不锈钢、铜和橡胶的生产和回收过程中的工艺改进能够提升溴化锂吸收式制冷系统的环境效益。

参考文献:

- [1] 梁金强,刘丹竹,徐庶亮,等.“双碳”目标下能源安全定量评价方法[J].化工进展,2022,41(3):1622-1633.
- [2] HU K X, RAGHUTLA C, CHITTEDI K R, et al. The effect of energy resources on economic growth and carbon emissions: A way forward to carbon neutrality in an emerging economy[J].

- Journal of environmental management, 2021,298(11):113448.
- [3] 侯彦坡. 化纤生产中制冷机系统配置及节能方案探讨[J]. 合成纤维工业,2017,40(3):63-66.
- [4] PIETRASANTA A M, MUSSATI S F, AGUIRRE P A, et al. Optimization of a multi-generation power, desalination, refrigeration and heating system[J]. Energy, 2022,238(1):121737.
- [5] 陈莎,孙中梅,李素梅,等. 动态生命周期评价的研究与应用现状[J]. 中国环境科学,2018,38(12):4764-4771.
- [6] PEHL M, ARVESEN A, HUMPENÖDER F, et al. Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modeling[J]. Nature energy, 2017,2(12):939-945.
- [7] FU R H, HE Z G, ZHANG X. Life cycle cost based optimization design method for an integrated cooling system with multi-operating modes[J]. Applied thermal engineering, 2018,140(7):432-441.
- [8] LONGO S, PALOMBA V, BECCALI M, et al. Energy balance and life cycle assessment of small size residential solar heating and cooling systems equipped with adsorption chillers[J]. Solar energy, 2017,158(12):543-558.
- [9] KARIM M, DANIEL C, JOAN I R. Life Cycle Assessment of a Building Integrated Concentrated Photovoltaic scheme[J]. Applied Energy, 2013,111(12):505-514.
- [10] YANG P Z, YUAN M X, LIU, Z Q, et al. Multi-objective optimization and life cycle assessment of a cascade system integrating LiBr/H₂O absorption refrigeration with transcritical CO₂ power cycle[J]. Energy Conversion and Management, 2021,244(9):114453.
- [11] REN C Q, TU M, WANG H H. An analytical model for heat and mass transfer processes in internally cooled or heated liquid desiccant-air contact units[J]. International journal of heat and mass transfer, 2007,50(17):3545-3555.
- [12] GUILLEN-GOSALBEZ G, CABALLERO J A, ESTELLER L J, et al. Application of life cycle assessment to the structural optimization of process flowsheets. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008,47(3):777-789.