



中图分类号: TE09

密级: 公开

UDC: 624

学校代码: 10082

河北科技大学

HEBEI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

硕士学位论文

基于生命周期评价的 CCHP 系统的性能研究

论文作者: 张晓东

指导教师: 崔明辉 教授

副指导教师: 康利改 副教授

申请学位类别: 工学硕士

学科、领域: 土木工程

所在单位: 建筑工程学院

答辩日期: 2019 年 12 月

Classified Index: TE09

Secrecy Rate: Publicized

UDC: 624

University Code: 10082

Hebei University of Science and Technology

Dissertation for the Master Degree

Performance Study of CCHP System Based on Life Cycle Assessment

Candidate:	Zhang Xiaodong
Supervisor:	Prof. Cui Minghui
Associate Supervisor:	A. Prof. Kang Ligai
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Civil Engineering
Employer:	School of Civil Engineering
Date of Oral Examination:	December, 2019

摘 要

天然气分布式冷热电系统具有能量级联利用、靠近用户、能源供应安全稳定等多重优点，获得了我国在政策和经济上的支持，有力推动其进入快速蓬勃发展时期。然而对在建造系统环节、投产使用环节和废置处理环节的资源投入量和污染物排放量等诸如此类问题上的研究却很少，所以本文选择生命周期评价方法来研究以上问题。生命周期评价是一种针对产品在每个阶段内的能源和资源使用量以及污染物排放量进行评价的理论工具，同时也可以为其存在资源过度使用和存在污染排放严重的环节提出建议。

本文研究的主要内容是根据生命周期理论，以天津某生态办公群的分布式系统工程为例，建立了系统的燃气机组板块、地源热泵板块和燃料板块的生命周期分析模型。首先根据目标和研究范围确定了不同板块的研究边界，其中燃气机组板块和地源热泵机组板块主要考虑资源开采、制造整備、成品运输、运营管理和回收再利用五个阶段，而燃料板块主要分析资源开采、成品运输和运营管理三个阶段；其次是收集各个板块在不同阶段中的电能和天然气等能源消耗以及相应的有害污染物气体排放信息，按照种类对资源、能源输入和有害污染物排放进行分类、标准化和加权；最后分别用资源消耗系数和环境污染排放系数评价不同种类资源、能源的消耗程度和有害污染物对环境破坏的严重程度。

在文末将燃料板块的研究结果与现有的火力发电所涉及的煤的开采、运输和发电的资源消耗系数和环境污染排放系数进行了比较。结果显示火力发电在煤炭、天然气等能源投入和有害污染物排放上较多，但在白云石、石灰石等矿产资源投入上较少。

论文的创新点第一是用生命周期评价方法分析天然气分布式系统所涉及的资源、能源消耗和污染物排放情况；第二是与传统火力发电进行了对比。

关键词 生命周期评价；CCHP 系统；资源消耗系数；污染物排放系数；火力发电

Abstract

There are many advantages in CCHP system, for instance, the multi-level utilization of energy, proximity to users and the stability of energy supply and so on. It has obtained the economic and policy support by Chinese government, and has strongly promoted it to enter a period of rapid and vigorous development. However, there are few studies on the resource input and pollutant emissions in the construction system, production and disposal, etc., so this paper chooses the life cycle assessment (LCA) method to study the above problems. LCA is a theoretical tool to evaluate the energy and resource use and pollutant emissions of products in each stage. At the same time, it can also put forward suggestions for the over-use of resources and serious pollution emissions.

The main content of this paper is based on the LCA, taking the CCHP system engineering of an ecological office group in Tianjin as an example to establish the life cycle analysis model of gas unit plate, ground source heat pump plate and fuel plate. First of all, the research boundaries of different plates are determined according to the goal and research scope, in which the gas unit plate and the ground source heat pump unit plate mainly consider five stages: resource exploitation, manufacturing preparation, finished product transportation, operation management and recovery and reuse. While the fuel plate mainly analyzes three stages: resource exploitation, finished product transportation and operation management. The second is to collect the energy consumption of each plate in different stages, such as electric energy and natural gas, as well as the corresponding harmful pollutant gas emission information, and classify, standardize and weight the resources, energy input and harmful pollutant emissions according to the type. Finally, the resource consumption coefficient and the environmental pollutant emission coefficient are used to evaluate the consumption degree of different kinds of resources and energy and the severity of harmful pollutants to the environment.

At the end of this paper, the research results of fuel plate are compared with the resource consumption coefficient and environmental pollutant emission coefficient of coal mining, transportation and power generation involved in thermal power generation. The results show that thermal power generation has more energy input and harmful pollutants such as coal and natural gas, but less investment in mineral resources such as dolomite and limestone.

The first innovation of this paper is to use the life cycle assessment method to analyze

the resources, energy consumption and pollutant emissions involved in the CCHP system;
The second is to compare with the traditional thermal power generation.

Key words LCA; CCHP system; Resources consumption coefficient; Pollutants emission coefficient; Thermal power

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究的背景	1
1.2 研究的目的	2
1.3 国内外 CCHP 系统发展现状和基于 LCA 的评价综述	3
1.3.1 CCHP 系统国外发展现状	3
1.3.2 CCHP 国内发展现状	4
1.3.3 国外基于 LCA 的分布式能源系统研究综述	4
1.3.4 国内基于 LCA 的分布式能源系统研究综述	5
1.4 研究内容与研究思路	7
1.4.1 研究的主要内容	7
1.4.2 研究的主要思路	8
第 2 章 全生命周期评价方法综述	9
2.1 全生命周期评价的定义	9
2.2 全生命周期评价的理论框架	9
2.2.1 SETAC 框架	9
2.2.2 ISO14000 标准框架	10
2.3 全生命周期清单分析	10
2.3.1 清单分析的目标	10
2.3.2 清单分析的系统边界	10
2.3.3 清单分析的功能单位	10
2.3.4 清单分析的数据质量	11
2.3.5 清单分析的数据收集	11
2.4 生命周期影响评价步骤	12
2.4.1 分类	12
2.4.2 环境影响潜值	12
2.4.3 标准化	13
2.4.4 加权	14
2.4.5 资源消耗系数和环境污染排放系数	14
2.4.6 生命周期解释	15

2.5 本章小结	15
第3章 CCHP 系统的全生命周期评价模型构建	17
3.1 研究目的及范围	17
3.2 CCHP 系统生命周期清单	17
3.2.1 资源开采阶段的材料分析	17
3.2.2 制造整备阶段的材料分析	22
3.2.3 成品运输阶段的材料分析	23
3.2.4 运营管理阶段的材料分析	26
3.2.5 回收再利用阶段的材料分析	26
3.3 本章小结	28
第4章 案例分析	31
4.1 工程概况	31
4.1.1 建筑概况	31
4.1.2 CCHP 系统的配置概况	31
4.2 研究目的和范围	32
4.2.1 研究目的	32
4.2.2 定义系统边界	32
4.2.3 数据来源与数据质量	32
4.2.4 假定条件	32
4.3 CCHP 系统的全生命周期清单分析	33
4.3.1 燃气机组板块的资源开采阶段材料分析	35
4.3.2 燃气机组板块制造整备阶段的材料分析	36
4.3.3 燃气机组板块成品运输阶段的材料分析	37
4.3.4 燃气机组板块运行阶段的材料分析	38
4.3.5 燃气机组板块回收再利用阶段的材料分析	39
4.4 地埋换热器的全生命周期清单	41
4.4.1 资源开采阶段的材料分析	41
4.4.2 HDPE 管材加工阶段材料分析	42
4.4.3 HDPE 管材运输阶段材料分析	43
4.4.4 HDPE 管材安装阶段材料分析	43
4.4.5 运营管理阶段的材料分析	44
4.4.6 回收再利用阶段的材料分析	44
4.5 地源热泵机组的清单分析	47
4.5.1 GSHP 机组板块资源开采阶段的材料分析	47

4.5.2	GSHP 机组板块制造整備阶段的材料分析	50
4.5.3	GSHP 机组板块成品输送阶段的材料分析	52
4.5.4	GSHP 机组板块运营管理阶段的材料分析	53
4.5.5	GSHP 机组板块回收再利用阶段材料分析	54
4.6	CCHP 系统燃料的清单分析	55
4.6.1	燃料资源开采阶段的材料分析	55
4.6.2	燃料输送阶段的材料分析	55
4.7	本章小结	57
第 5 章	资源消耗和环境影响	59
5.1	资源耗竭计算	61
5.2	各个阶段的资源耗竭系数	61
5.2.1	资源开采周期环节的消耗资源相对系数	61
5.2.2	CCHP 系统制造整備环节的相关系数	62
5.2.3	机组和燃料运输阶段资源耗竭系数表	62
5.2.4	机组运行阶段资源耗竭系数表	63
5.2.5	机组废弃阶段资源耗竭系数表	64
5.3	环境影响计算	64
5.4	各个阶段的环境影响负荷	66
5.4.1	CCHP 系统资源开采阶段影响负荷	66
5.4.2	CCHP 系统制造整備阶段的影响负荷	68
5.4.3	CCHP 系统成品输送阶段的影响负荷	69
5.4.4	CCHP 系统运营管理阶段的影响负荷	70
5.4.5	CCHP 系统回收再利用阶段的影响负荷	71
5.5	CCHP 系统与火力发电的比较	72
5.6	本章小结	73
结 论		75
参考文献		77
攻读硕士学位期间所发表的论文		83
致 谢		85

第 1 章 绪 论

1.1 研究的背景

从中国改革开放至今我国的经济发展经历了多个速度转折过程，在中国经济腾飞的同时对能源，如对水、自然矿石、石油、天然气和煤资源的消耗巨大，引起的环境问题也将加剧生态环境的不断持续恶化，最终会严重限制人类社会的可持续发展。

同其他国家相比中国的能源消耗比重为 23%，能源的消耗持续增长率大约为 34%。从煤炭方面看，据统计我国 2016 年有 9 亿吨标煤用于日常建筑运行消耗，占到国内能源总消耗量的 21%，造成的温室效应气体排放大约为 20 亿吨，占到国内温室气体总排放量的 19%^[1]。近几年中国的煤炭产量相比其他国家产量占比为 46%，煤炭消费量相比其他国家占比为 51%，相比近十年的能源结构来看煤炭在中国能源结构中的比例由 74%降至目前的 60%，呈现下降趋势；在天然气方面，产量相比于其他国家占比为 4%，消费增长为 15%，净增长为 33%；在石油方面，相比于其他国家产量占比为 4.4%，消费量占比为 13%^[2]。见图 1 为中国近年来各种能源使用占比，可以看出我国使用核能、水电以及可再生能源的比例仍然很低^[3]。除了我国对能源的需求量大外，同时在能源使用环节还会产生高污染的排放物，所以我国为努力实现青山绿水的环境发展之路还积极签署《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》、《哥本哈根议定书》以及《巴黎协定》等全球气候治理公约，所以如何提高一次能源使用效率并有效降低污染物的排放已然成为未来的发展趋势。

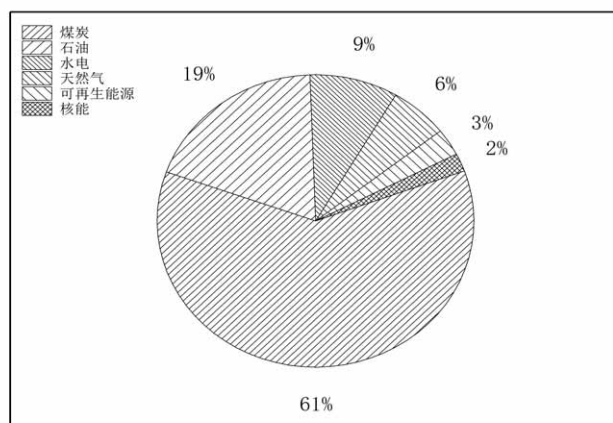


图 1-1 2018 年中国能源占比

面对资源能源使用率较低和污染物排放过多的问题，天然气分布式冷热电联供

系统（Combined Cooling Heating and Power，简称 CCHP）的发展符合当今建设绿色生态背景下的能源供应模式。在天然气分布式系统中，燃料经燃烧室燃烧后产生的高温烟气可以驱使发电机组发电，再次消耗后的烟气余热和燃气内燃机内的缸套水进入换热器，在冬季为目标用户进行供暖并提供热水保障；在夏季可以利用发电余热为溴化锂等吸收式制冷机组设备提供能源动力进而为目标用户进行制冷，同时提供生活热水。这种模式下的能量梯级利用可以有效提高不同品位值的能量使用效率，使得 CCHP 系统的一次能源综合利用率较传统分供系统相比提升了 50%以上。此外 CCHP 系统的优点还表现在以下几个方面：

1) 较高的一次能源使用效率。能量的多级使用，提高了系统的综合利用率，减少了不必要能源的过度使用；

2) 实现环境友好。通过融合使用具有环境友好性的清洁或可再生能源的分布式能源系统，从根本上减少了通过传统方式发电、供暖、制冷高污染物排放的现象；

3) 增强了能源供应的高稳定性和可靠性。系统搭建是靠近能源需求侧，充分利用用户侧的洁净能源或工业余热等，在保证能源的充足供应同时确保了能源输送的安全性，例如天然气运输既可以采用管道输送的形式，也可以将其液化进行运输，这两种方式保障了天然气分布式系统在能源供给上的可靠性和灵活性^[4,5]。

CCHP 系统的这些优势使得越来越多的学者聚焦点在研究如何通过冷热电耦合利用的状况下实现 CCHP 系统更大的综合利用效率，但是一味追求更高的 CCHP 系统一次能源综合利用率的背后是系统的高度集成化和复杂化，这样是否会消耗更多的物质资源并对当地环境和全球气候产生恶劣的影响尚不明确。在以往学者研究中更多关注的是对 CCHP 系统在投产后在运行期间对能源资源的消耗以及向环境排放的污染物，而没有对其在所有周期内的资源使用 and 环境污染能力进行深入研究，并未获知每个阶段内的资源的消耗量和污染物排放量。因此本文在充分了解 CCHP 系统设备装置和运营管理模式后使用生命周期理论(Life Cycle Assessment,简称 LCA)对 CCHP 系统在生产制造、运营管理和废弃回收的所有环节进行能耗和环境污染两个方面的影响分析，根据对各个生产阶段的具体影响的程度评价，为日后制定更加节能、减排的措施提供有力依据，并继续推进 CCHP 系统向低能耗和低污染方向发展。

1.2 研究的目的

本文将 CCHP 系统分为燃气板块、地源热泵板块和燃料三大板块进行生命周期分析。具体的周期环节包含资源开采、制造整备、机组运营管理等，特别是机组运行环节需要大量的天然气能源投入，并伴随有害环境的污染物产生。为协调好天然气分布式能源系统与环境友好的关系，是实现我国能源走高利用率、低污染发展的重要方向。LCA 可以成为处理天然气分布式能源、环境影响分析的重要技术理论，

从而整体、详细、客观地反映出此系统的环境质量。在本课题的研究过程中，基于 LCA 将 CCHP 系统中不同的板块设备以及相应的电力和天然气使用作为一种产品，将所涉及到的系统组成部分分别进行生命到废弃回收的分析。为天然气分布式能源系统进行更出色的环境管理提供研究依据，为高耗能和高污染环节提出改善意见，进而减轻企业生产的环境压力，提高企业利润和形象，继续推进我国天然气分布式 CCHP 可持续发展等目的。

1.3 国内外 CCHP 系统发展现状和基于 LCA 的评价综述

1.3.1 CCHP 系统国外发展现状

美国自 1978 年提出公共事业监管政策法案（Public Utility Regulatory Policy Act, 简称：PURPA）以来，政府开始开发 CHP（Combined Heat — Power, 简称：CHP）工厂/CCHP 工厂。在相关系列的政策激励下 2009 年装机容量从 1995 年的 45GW 大幅增加至 91 GW。到 2011 年，使用 61% 的装机容量用于化工、石油等工业，使用 12% 的装机容量用于商业建筑，使用 8% 的装机容量用于食品相关行业，其他行业占比为 19%。由于电力市场的激烈竞争和不稳定性，为了再次促进发展，美国能源部与环境保护局共同提出了“建筑 2020 年愿景的联合冷却供暖和供电”，实现装机容量是 2010 年的两倍。同时根据“清洁能源标准中的 CHP 白皮书”，美国能源部的目标是到 2030 年将美国电力的 CCHP 装机份额从目前的 9% 增加 11%。这样做可以实现 60% 的项目避免美国的碳排放税；可以创造超过 100 万个新的高技能工作；可以产生 2340 亿美元的新投资。

在英国，CHP / CCHP 工厂的数量和装机容量从 1999 年到 2000 年急剧增加，在此期间英国政府采取财政激励措施，拨款支持，监管框架，促进创新，政府领导和伙伴关系以支持 CHP / CCHP 的发展。在 2000 年之前，装机容量保持在 3.5 GW 左右，而在 2000 年，它增加到 4.5 GW。从那时起，英国政府不断制定一系列政策，旨在实现 10 GW 的优质安装热电联产电厂。2010 年底，英国的总装机容量达到 6GW，还指出高质量的热电联产将成为帮助提供碳预算同时电网脱碳的关键技术，并将在提供安全和具有成本效益的能源供应方面发挥关键作用，特别是对于工业而言。

丹麦的 CCHP 系统的占有率在整个能源系统中已经接近 60%，为了加大分布式供能的发展推动力度，明确颁布了关于供热、供电和供燃气的相关法律政策，并给予 CCHP 项目税收政策的优惠和经济支持，目前是欧洲应用 CCHP 系统最多的国家。荷兰在应用 CCHP 系统形式中的占有率在整个能源系统中已经接近 40%，并且建立了专门的 CCHP 促进机构，并在电力法中给予热电联供特殊的法律地位，规定热电联供的发电量优先上网^[6]。

1.3.2 CCHP 国内发展现状

我国早期受天然气资源价格和煤制气条件制约等多重因素影响，在推广发展天然气分布式 CCHP 系统上阻力颇多，故在 90 年代左右不存在实施的具体项目，为鼓励发展 CCHP 系统形式发布了多种激励性政策，如节能法、可再生能源法律，空气污染防治法和环境保护法，以及建筑物能源效率标准和能源使用补贴和贴现支持 CCHP 工厂的发展。到 2006 年，国家发改委的中国能源保护技术政策纲要建议在北方供热地区的大中城市使用 CCHP 系统应逐步取代小型供暖锅炉。从 90 年代的零起步到 2006 年，超过 2600 个 CHP 总装机容量超过 80 吉瓦的发展趋势看，未来更加高效的 CCHP 是一个很有前景的解决能源短缺和环境污染问题的发展模式^[7,8]。

目前 CCHP 系统发展还有相当大的阻碍，例如要解决的能源价格的改革政策。不平衡煤电价格上涨严重限制了中国 CCHP 的发展。因此供暖和电力部门改革也需要出台相应的政策。其次不仅受经济价格方面限制，还受财政和税收政策限制，应该提议支持 CCHP 的建设优惠政策。除此之外，由于一些新建的热电联产项目在投产后仅以运行供暖热量的模式，使得 CCHP 系统的综合利用能源效率明显减少。因此，还应该加强政府执法力度和监测能力。最后，越来越多的大型和更有效的热电联产工厂的建立投产，相对于一些旧的、小型但非常有效的热电联产电厂将被迫关闭，为了保持整体效率相关部门应该起草适合小而有效单位的政策。

1.3.3 国外基于 LCA 的分布式能源系统研究综述

国外的研究人员通过生命周期评估（LCA）工具处理了不同形式的联合发电系统的评估，如 Pehnt 等评估了以天然气为燃料的 CCHP 和 CHP 电厂与传统电厂相比对环境的影响^[9]。Daniel Maraverd 等人为证明基于生物质燃烧的生物质 CCHP（冷热电联产）系统在环境和能源性能是否总是比常规的独立发电系统更好的问题，通过生命周期评估（LCA）方法对这些工厂进行评估，以提供有关其环境可行性的一些准则^[10]。Luca Cioccolanti 等人对新型能源发电技术的日益兴起的状况，选取了小型太阳能有机朗肯循环（Organic Rankine Cycle，简称 ORC）的发电厂作为环境影响评价的对象，进行了太阳能收集器、ORC 系统和吸收式制冷机三部分的生命周期评估^[11]。Pehnt 等通过进行详细的生命周期评估并分析微型热电联产系统对当地空气质量的影响，研究了微型热电联产对环境的影响^[12]，就减少温室气体排放而言，大多数微型热电联产系统都是优越的，不仅在平均电力和热量供应方面，而且在先进的天然气发电厂电力生产和冷凝式锅炉热量生产方面均如此。最后，Chevalier 等与常规发电相比，分析了生物燃料的 CCHP，但仅针对特定的沼气厂（从技术和工厂规模的角度）^[13]。

同时还有国外研究学者涉及对燃料电池发电和可再生能源利用的分布式能源系

统进行环境影响分析,如 Gioele Di Marcoberardino 等基于膜反应器和 PEM 燃料电池的创新型微型热电联产系统与使用标准蒸汽重整燃料处理器的微型 CHP 系统进行了比较,并使用生命周期评估进行环境分析^[14]。Staffell 等研究提出了基于碱性燃料电池的家用热电联产(CHP)系统的生命周期评估(LCA),并将评价结果与其他燃料电池技术的现有 LCA 结果进行了比较^[15]。C.Y.Li 等人以一次能源节省率、总成本节省率和 CO₂ 排放减少率为优化目标,使用全生命周期评价方法对集成有生物质气化的 CCHP 系统执行原动机的容量,生物质原料的类型和操作策略进行多标准优化^[16]。Caserini 等、Kimming 等和 Buonocore 等研究了生物燃料热电联产系统的不同替代方案的生命周期比较^[17,18,19]。

另外也有的研究学者从单一考虑某种物质排放所产生的环境影响,如 Carvalho 等基于生命周期评价以 CO₂ 为研究对象对 CCHP 内的每个生命周期阶段的排放量进行了详细的横向和纵向对比并针对特定阶段进行优化^[20]。还有从不同运行策略产生的环境效益、能源成本和火用成本进行生命周期评估的,如 Mago 等基于生命周期评价手段对热跟踪、电跟踪等运行策略下的配置最有的能源效率特性做了对比分析,最后考虑了和独立的分供系统的能源效率特性做出了比对^[21]。Nattaporn Chaiyat 等对泰国圣甘烹温泉的 CCHP 系统的使用了新的平均生命周期概念,评估能源成本和火用成本^[22]。除此之外,K.Solano-Olivares 等人在墨西哥首次评估了基于生命周期评估的实验性太阳能吸收式空调系统对环境的影响。为了进行比较,还评估了使用化石燃料发电的商用空调系统。在两个冷却系统中,都分析了构造,运行和寿命终止阶段^[23]。

从以上研究可以了解到国外对基于生命周期评价的分布式能源系统的研究很多,有的侧重于分布式能源发电生命周期中某一环节或部分的环境影响分析,有的结合可再生能源利用系统进行评价时并未对常规的发电系统的进行比较,有的受地区条件限制适用的建立评价模型方法其针对性较强,不具有普遍性。这就需要构建一套更加完整的、符合我国实际的建模评估体系,以便对分布式系统做全面的环境影响分析。

1.3.4 国内基于 LCA 的分布式能源系统研究综述

国内的文献研究主要有王江江等以联供系统的节能效益最大化为目标,利用遗传算法对联供系统的设备容量大小进行了优化并使用 LCA 评价手段进行 5 个生命周期阶段的主要污染物进行分析^[24],以及在文献中提出了一种由太阳能和天然气驱动的新型太阳能建筑制冷供热系统。文中指出系统的性能在很大程度上取决于操作策略^[25],同时根据生命周期评估(LCA)估算遵循电力负荷和遵循热负荷运行策略下的太阳能系统的一次能源消耗和污染物排放。期中主要考虑了三个最重要的与能源

有关的环境问题和人类健康问题，即全球变暖，酸沉淀和呼吸作用，以评估该系统对环境的影响。

黄海耀利用生命周期方法和层次分析法，对采用太阳能式的热水系统和燃煤锅炉热水系统的，从原材料的获取、设备制造、运行到废弃五个环节进行了环境效益评价和技术经济效益的比较^[26]。

王克红等对太阳能热水器进行了 LCA 的环境效益分析与评价，并与传统的电加热热水器进行了比较^[27]。

肖天辉基于生命周期评价理论，以某市新建的太阳能辅助加热的地源热泵空调系统为研究对象，分析其系统的物质输入和污染物输出清单，此外模拟了建立其他两种形式的系统在同样周期内的耗能和污染物排放，并对这三种系统在生命周期的能源输入和废弃物排放进行了比较^[28]。

周楠提出建筑与供热空调系统一体化设计的概念，利用全生命周期评价体系对建筑与供热空调系统在全生命周期内的经济效益和环境效益进行综合评价^[29]。

刘富成本文基于 LCA 理论与框架，针对太阳能供暖系统在原料收集、设备生产、运输等五个阶段进行了资源消耗分析和包括全球变暖、酸雨形成在内的五种影响气候环境的污染物排放的研究^[30]。

Kun Yang 等基于 LCA 对具有生物质燃料的 CCHP 系统的设备容量和运行策略进行了优化^[31]。

Shanguo Zhao 等研究了具有太阳能电池辅助的热泵系统，使用 LCA 方法研究了在不同太阳能电池发电效率下的能源消耗和造成的环境污染^[32]。

姚均天将生命周期分析（LCA）方法结合某医院实际案例分析了系统从建造到用户用能的能源资源输入和污染排放，并未考虑在运行期过后的系统废弃再利用环节的生命评价^[33]；

郑欣妍同样将 LCA 方法应用到分析天然气分布式 CCHP 系统中，结合成本理论的概念分析天然气燃料和传统燃煤发电在开采、运输和燃烧三个阶段内的成本大小分析^[34]。

杨坤以生物质为主要用能的分布式的实际工程案例为研究对象，使用生命周期评价方法建立了生物种植、生物采集、机组运行和系统废弃回收利用环节的环境影响评价^[35]，并未考虑与传统分供系统进行比较。

陈玉林基于生命周期理论，以华北区域的综合建筑应用的分布式系统进行了一次能源使用效率，以及 CO₂、SO₂ 和 PM_{2.5} 减排量为优化目标进行系统选择，并与传统的燃煤发电方式进行了比较^[36]，同时陈拓发建立了生物质和天然气相结合的 CCHP 系统，在研究系统的热力性能和节能效益后，考虑了系统与分供系统在生命周期的环境影响^[37]。

白鹤首先分析了利用太阳能、内燃机和分供三种模式下的冷热电系统的能量输入和污染物排放情况，最后对太阳能利用的 CCHP 系统进行了原料收集、加工、运输、使用四个阶段的进行了生命周期评价^[38]，但是文献[36~38]为考虑系统报废环节的影响。

综上研究可以了解到国内学者在对 CCHP 系统进行 LCA 分析中有的侧重不同操作策略下的设备配置容量进行横向对比；有的侧重分析不同清洁形式的 CCHP 系统之间的比较；有的只针对部分环节的成本分析；有的研究天然气分布式能源系统与传统电厂进行了比较，但是包含的周期环节往往不全面，这些不能代表实际的在此方面的数据，而国外的研究又具有很强的特殊性，因此有必要分析获得依据我国在建设天然气分布式能源系统中所消耗的资源 and 相应的污染物排放，并与传统常规燃煤发电系统的形成对比，以支持 CCHP 在我国的更大范围的应用推广。

1.4 研究内容与研究思路

1.4.1 研究的主要内容

本文基于 LCA 评价理论以某中新生态城的天然气分布式 CCHP 系统为研究对象，讨论系统的资源环境影响，即对投入和运行能耗和产生的环境影响进行分析和评价。具体的研究内容主要包括以下方面：

本文首先对天然气分布式 CCHP 系统进行生命周期评价模型的组建，其次将构建好的生命周期模型应用到某一实际案例中，最后根据分析的结果进行相应的解释并与现有的关于火力发电的生命周期进行比较，并对比较结果进行解释。见图 1-2。

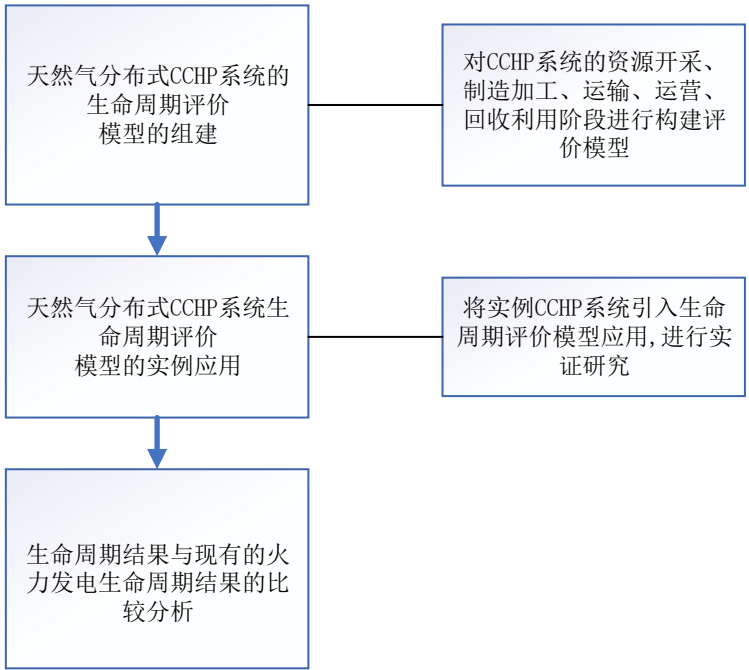


图 1-2 研究内容图

1.4.2 研究的主要思路

本文章在现有的国内外关于基于生命周期评价的 CCHP 文献研究的基础上提出问题，根据问题和研究目标结合文献检索法、企业实地调研、生命周期方法确保数据的高质量。然后重点地对 CCHP 系统的生命周期评价模型构建了模型，在建立好的评价的模型上融合工程实际案例进行分析，并将研究结果与现有的传统电力来源进行比较，来揭示 CCHP 系统的效果如何。本文章的梳理逻辑如图 1-3 所示。

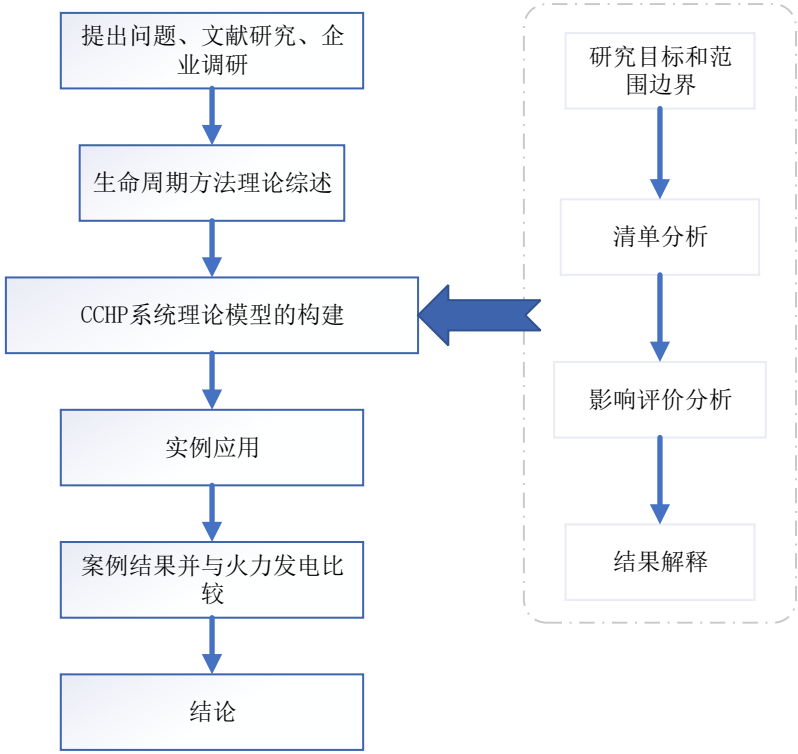


图 1-3 梳理逻辑图

第 2 章 全生命周期评价方法综述

2.1 全生命周期评价的定义

美国环境保护协会 (Environmental Protection Agency, 简称 EPA)规定生命周期评价方法是针对特定物件或工艺从初始到成型再到报废的整个生命周期过程对自然环境产生的影响力进行全面评价的理论研究方法^[39,40]。最后对资源能源消耗和污染物排放两个方面进行自然环境影响力评价,并对造成资源能源过度消耗和环境危害大的方面,提出减少这些影响的措施。

国际环境毒理学及化学学会 (International society of environmental toxicology and chemistry, 简称 SETAC)把 LCA 定义为:通过对产品、工艺等相关的活动能对自然资源产生消耗,并对环境污染作出贡献力的所有污染物进行详细地归类,方便找到并统计某种资源消耗和某种污染物排放量,再考虑权重因子后得出其相对大小,以此评价资源能源耗竭和污染物对环境的影响力,并寻找改善这些影响的机会和途径^[41]。国际标准化组织 (International Organization for Standardization, 简称 ISO)公布的 LCA 的定义为: LCA 是对一个产品在整个生命周期中所有资源能源的输入、所有污染物输出以及自然环境的污染破坏力数值的汇编,并作出结果解释^[42]。通过比较三个组织给出的生命周期评价的定义,其理论的核心是相同的,都是分析一产品从资源开采开始、产品成型、产品投入使用再到产品回收利用的整个过程,统计出这些阶段内的资源能源的消耗情况以及对向环境排放的污染物量,最后进行结果解释以及提出针对某一特定过程或整体提出合理的改善建议。

2.2 全生命周期评价的理论框架

2.2.1 SETAC 框架

关于本章第一节部分的 LCA 理论方法的定义,最早是在 90 年代初 SETAC 提出了生命周期评价方法的概念以此制定了生命周期评价的方法论结构,为了将理论推广到实际实践中,将此方法体系简单准确的归纳为相互联系的四个过程:首先规定了研究的主要目的,以及研究目的的限制条件和研究边界 (Goal and Scope Definition);其次是对每个过程进行所有的数据追踪,并形成初步的清单量化表 (Inventory analysis);接下来是根据清单表分析产生特定的类型的影响作出评价 (Impact assessment),如温室效应的产生中二氧化碳、氮氧化合物等相关气体的贡献分别是多少;最后对引起的环境影响作出影响力的评价和结果解释。

2.2.2 ISO14000 标准框架

接下来在 90 年代末生命周期评价理论体系被国际标准化委员会应用到环境保护管理 ISO14042（环境管理——原则和框架）系列标准实施中，此标准同 SETAC 框架事实结构基本一致，明确规定了其实施的四个阶段，即目标和边界限制条件确定，清单分析，影响评价，生命周期解释，比较之下 ISO 标准的实施步骤重点在于简化工作流程，更适合大范围推广。

2.3 全生命周期清单分析

2.3.1 清单分析的目标

我们在使用 LCA 手段评价研究对象的目标是建立在某一阶段或整体上对自然资源和自然环境所造成的影响力而进行的。其一，通过清单分析可以建立一个关于产品总的资源能源使用和环境负担；其二，识别产品、工艺或系统中资源能源高额使用和高污染环节；其三，便于与其他工艺、系统的输入输出进行比对；其四，有利于指导在产品制造使用中实现更少的资源投入和环境污染。但是随着我们从特定条件下转移到另一种的工况下，此时研究的基础条件会发生改变进而导致研究的目标会发生变化。为了更好地说明这一问题，我们以方案未形成前和方案实施落地后举例说明。在方案形成前我们会准备不同的设计样本，这时使用 LCA 方法的目标就是分别考虑不同方案在生命周期的效益高低，可以包括经济指标、环境指标等从而甄选出最佳方案；而在方案实施落地后的目的很明确就是甄别全生命周期的整体效益怎样，重度影响和轻微影响的在哪一周期，方便我们找到问题，并迅速实施合理的方案纠正。

2.3.2 清单分析的系统边界

锁定研究目标后，我们应该思考使用 LCA 评价应该分几步进行，在每一步识别的过程中又有哪些关键细节需要考虑。其中边界应该作为重点考虑的方面，如何选择恰当合适的范围进行数据收集，会影响后续分析不同详细程度的资料清单等问题；另外，因为在对研究对象进行数据整理的这一过程是反复修订并不断补充的，会随着研究的深度出现新的基础数据，这时候就需要对研究的系统边界进行更正，以满足研究目的^[43]。

2.3.3 清单分析的功能单位

除了考虑研究对象的限定边界问题，还需要考虑时间效率，使用周期和功能单位等问题，其中功能单位的选择和确定，有利于方便计算产品或特定工艺流程的物质的输入和输出，如选取 kg, kwh 等单位进行统计，同时也有利于在数据的清单分

析中依据单位进行绝对量和相对量的计算。

2.3.4 清单分析的数据质量

数据质量主要涉及时间、区域或全球等因素和技术要求等限制，它决定了 LCA 评价结果的可靠信。所以在数据收集范围中尽可能做到资料的广泛性、完整度，确保数据质量更高，同时在 LCA 评价中对收集到的基础数据都必须对其来源进行详尽标注，即文献数据要给出出处，以反映出不同阶段中产品中的主要关系链。

2.3.5 清单分析的数据收集

LCA 评价的关键是以数据作为支撑，不同阶段考虑获取的数据流必须严谨，必须针对特定的环节多方位收集自然资源和能源的消耗和排放情况甄选出最优数据，收集途径可以包括国家统计局或者当地统计局年鉴和相关企业产品的生产监测数据。总之，清单分析具体是对某一工艺过程或某一产品，从资源的开采阶段、制造整备阶段、输送阶段、维护运行阶段、以及回收利用阶段的整个环节用数据表的形式表达出来，经过考虑权重因子后的数据的相对大小值代表着整个生命周期的不同种类的资源、能源消耗相对贡献程度，和污染环境的严重程度。见图 2-1 简要表示出了以上操作流程。

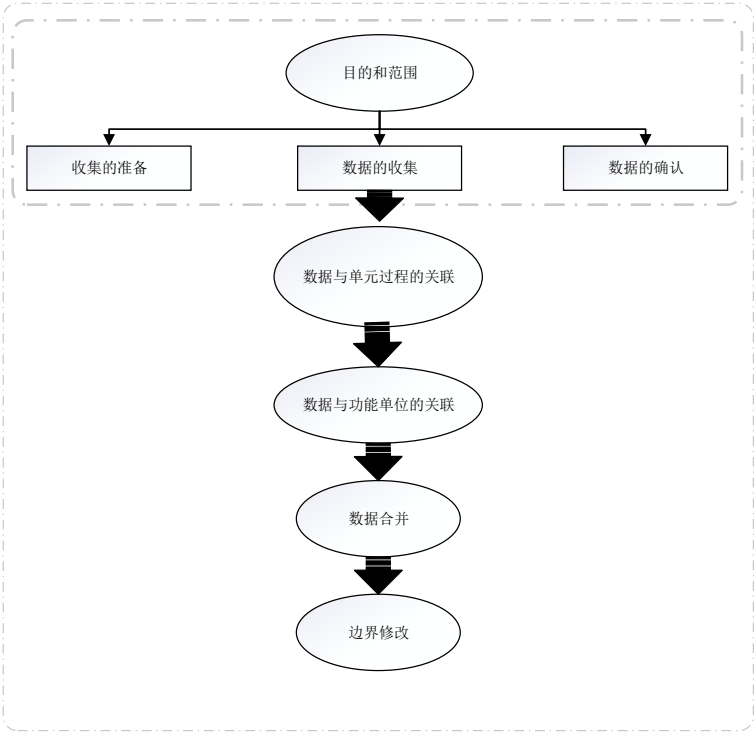


图 2-1 记录协议的操作过程

2.4 生命周期影响评价步骤

2.4.1 分类

分类的作用就是将资料中不同种类的数据整理归类，不同的物质受特性的不同对某种环境影响状态的贡献程度就不同，例如酸雨的形成与二氧化硫气体、二氧化氮等污染物相关，除此影响之外两者的物理特性决定了对温室效应形成的也有所贡献，同时也会对人体产生危害。遇到这样的多重贡献时就需要考虑对每种影响类别的贡献率，若只是单一的影响类别就可直接归为一类，如二氧化碳只对温室效应的产生有贡献，而不再考虑贡献因子。

为了方便快速、准确、完整的整理出有比较价值的资料，分类、归纳的手段是采用 ISO14042 的标准中的三步走的框架原则，即为分类、标准化和加权。依据 ISO14042 标准在数据处理中将资源能源的输入归为自然资源消耗，所有阶段向自然环境中排放的气体归为环境影响力。在自然资源消耗和环境影响力中可以再继续划分多种不同类别形式。国际目前统一的做法是将自然资源消耗和环境影响力按空间当量将其划分为全球影响、区域影响和局地影响，又根据影响对象和影响途径分为气体污染、水体污染、固体污染、以及人体伤害，为了确保数据分类的严谨性和更贴近我国的情况，分类标准使用我国生态环境研究院简化后的环境影响分类^[44]见表 1 所示。

表 2-1 我国环境影响类型

类型	代码	区域
不可更新资源	RC	全球性
全球变暖	GW	全球性
臭氧层破坏	OP	全球性
酸化	AC	地区性
富营养化	NE	地区性
光化学臭氧合成	PO	地区性
固体垃圾	SW	局地性
烟尘灰尘	SA	局地性

2.4.2 环境影响潜值

依据清单分析结果将不同种类的资源 and 不同种类污染物按照引起的环境影响效应归类后，接下来计算环境影响潜值，其作用是将所有排放污染物对所能造成潜在影响进行加和处理。见式（2-1）表示为：

$$EP(m) = \sum EP(m)_n = \sum \{Q(m)_n \times EF(m)_n\} \quad (2-1)$$

式中：

$EP(m)$ ——所排放污染物对第 m 种潜在环境影响的贡献；

$EP(m)_n$ ——研究排放污染物中第 n 种对第 m 种潜在影响力；

$Q(m)_n$ ——第 n 种排放物的质量；

$EF(m)_n$ ——第 n 种排放污染物第 m 种影响类型的效应因子；

2.4.3 标准化

对于加和环境污染影响力值进行标准化的作用一方面是为不同种类污染物引起的污染影响程度提供比较大小的标准，另一方面为进行下一步计算做铺垫，其标准化后的影响和资源消耗见式（2-2）表示：

$$NP(m) = P(m) \times \frac{I}{T \times R(m)} \quad (2-2)$$

式中：

T ——产品周期年限；

$R(m)$ ——第 m 年的参考值；

$P(m)$ ——每种污染物排放质量或每种自然资源使用量；

标准化的过程必须严格规定统一的时间基准作为衡量，为了将不同区域、地区和全球性的环境影响在一个基准线进行比较，需要对标准化处理基准进行选择，一是采用标准人当量的计算，二是标准空间当量，本文章采用标准人当量计算，以选用 2000 年作为基准年为例表示，见式（2-3）：

$$NR(m)_{2000} = \frac{EP(m)_{2000}}{POP_{2000}} \quad (2-3)$$

式中：

$NR(m)_{2000}$ ——2000 年全球每人环境影响力值；

$EP(m)_{2000}$ ——2000 年全球总的环境影响力值；

POP_{2000} ——2000 年全球人口；

则根据公式一、公式二和公式三可以推导出标准人当量环境影响潜力值的公式计算如下，见式（2-4）：

$$NEP(m) = EP(m) \times \frac{I}{T \times ER(m)_{2000}} \quad (2-4)$$

同样可以知道标准人当量的资源消耗量计算公式，见式（2-5）：

$$NEP(m) = EP(m) \times \frac{I}{T \times RR(m)_{2000}} \quad (2-5)$$

式中:

$RR(m)_{2000}$ ——资源消耗基准,即 2000 年全球人均资源消耗量。

2.4.4 加权

上一小节的对环境影响潜值的标准化处理过程只能说明各自的影响力的绝对大小不能说明不同种类环境影响力的相对大小,为了解决使不同种类的影响类型之间实现可比性,这里需要进行加权的处理,使得绝对量数据变为有比较意义的相对量数据,某种影响在加权后的处理见式(2-6):

$$WP(m) = WF(m) \times NP(m) = WF(m) \times \frac{I}{T \times R(m)} \times P(m) \quad (2-6)$$

式中:

$WF(m)$ ——第 m 种类型的权重因子;

$NP(m)$ ——标准化后的影响力。

在公式六中的权重因子采用的计算见式(2-7):

$$WF(m) = ER(m)_{95} / ER(m)_{T2000} \quad (2-7)$$

式中:

$ER(m)_{95}$ ——1995 年世界或区域所有环境环境影响潜力累加值;

$ER(m)_{T2000}$ ——年世界或区域所有环境环境影响潜力累加值;

权重因子为 1 说明 2000 年的消耗资源或污染排放值与 1995 年持平;权重因子大于 1 说明 2000 年消耗资源或污染物排放量低于 1995 年;权重因子小于 1 说明 2000 年的消耗资源或污染排放值大于 1995 年。

根据考虑权重因子的影响潜值公式六和权重因子的计算公式七对于自然当中每种资源消耗的权重的计算方法见式(2-8):

$$WR(m) = WF(m) \times NR(m) \quad (2-8)$$

式中:

$NR(m)$ ——考虑效应因子后的消耗量;

$WF(m)$ ——自然界中资源的可开采时间的倒数。

2.4.5 资源消耗系数和环境污染排放系数

资源消耗系数主要考察不同矿产资源使用量之间引起全球或区域耗竭的剧烈程

度；环境污染物排放系数主要考察不同污染物排放量之间引起全球或区域气候恶化的贡献大小，选取主要的六种气候影响类型作为分布式天然气 CCHP 系统对环境影响力评价指标，分别是全球变暖（Global Warming Potential，简称 GWP）、酸化（Acidulated Potential，简称 AP）、水体营养化（Eutrophication Potential，简称 EP）、光化学臭氧合成潜力（Photochemical Ozone Creation Potential，简称 POCP）、固体垃圾和气体粉尘。

由于考虑权重因子之后不同自然资源消耗之间就可以进行相互比较，这样可以反映出哪种自然资源的消耗量对环境和人类发展影响更剧烈，同时也反映出了某种资源的相对稀缺性，并为减少这种过度使用作出倡导。见式（2-9）：

$$RDI = \sum WR(m) \quad (2-9)$$

式中：

RDI ——总的资源消耗系数；

$WR(m)$ ——考虑效应因子后的资源消耗。

同样对于环境污染物排放系数经考虑效应因子后的每种污染物排放也变成可以相互比较大小的相对量，反映出该污染物在自然环境污染总量中所占比例以及造成的剧烈的程度。见式（2-10）：

$$EIL = \sum WP(m) \quad (2-10)$$

式中：

EIL ——污染物造成的环境压力系数；

$WP(m)$ ——考虑效应因子后的环境影响力。

2.4.6 生命周期解释

生命周期解释是根据研究目的和清单分析的整理结果找到造成问题的原因所在，根据获得的问题对对生命周期中的每个数据收集和处理过程进行完整性检查，对不可获得的数据要进行限制条件，并作出必要说明，最后以简明易懂的报告便于面向应用和日常指导。

2.5 本章小结

本节首先阐述了对全生命周期评价的定义理解，以及在对一产品或系统进行生命周期评价时需要确定研究范围、功能单位、数据质量等必要条件。其次，重点介绍了 LCA 影响评价的四个技术步骤，分别为：

- 1) 计算环境影响潜值；
- 2) 影响潜值的标准化处理；

- 3) 影响潜值的加权处理；
- 4) 资源消耗系数和环境污染排放系数的计算，并进行相应步骤的阐释；最后根据处理后的清单数据进行资源耗竭和环境影响值的计算。

第3章 CCHP系统的全生命周期评价模型构建

本章依据生命周期评价方法的总体框架及研究的目的进行模型构建主要分以下几个步骤：第一，规定了基于生命周期评价CCHP系统是从资源开采到回收利用五个阶段的边界；第二，收集CCHP系统在边界范围内每个阶段的资源开采、污染物排放的清单资料，结合国内外公开文献资料和各国官方已发表的统计年鉴，选取代表性强、准确度高的作为基础数据；第三，依据LCA清单分析结果进行数据比对和整理，具体包括分类、标准化、加权，从而为下一步讨论CCHP系统在整体以及五个阶段内的分析做铺垫。

3.1 研究目的及范围

研究的目的是第一以LCA视角通过对CCHP系统中每个子系统在资源开采、制造整备、成品运输、运营管理和回收再利用五个阶段内的资源的使用量以及污染物排放多少的定量分析。第二在定量分析结果上找到资源使用量较大和污染物排放严重的环节，为以后进行节能绿色设计提供建议和指导。

本文研究的CCHP系统影响评价的研究范围包括资源开采、制造整备、成品运输、运营管理和回收再利用五个阶段。为了保障研究的条理清楚和内容完整，按照系统的组成成分成燃气机组板块、地源热泵机组以及燃料板块。

3.2 CCHP系统生命周期清单

3.2.1 资源开采阶段的材料分析

CCHP系统在资源开采过程当中的清单分析主要考虑组成设备消耗的能源、资源以及向环境排放的污染物。具体包括燃气机组板块和地源热泵机组板块中各个设备单体在制造整备前对各类资源的使用量多少和环境污染物排放的数据分析。

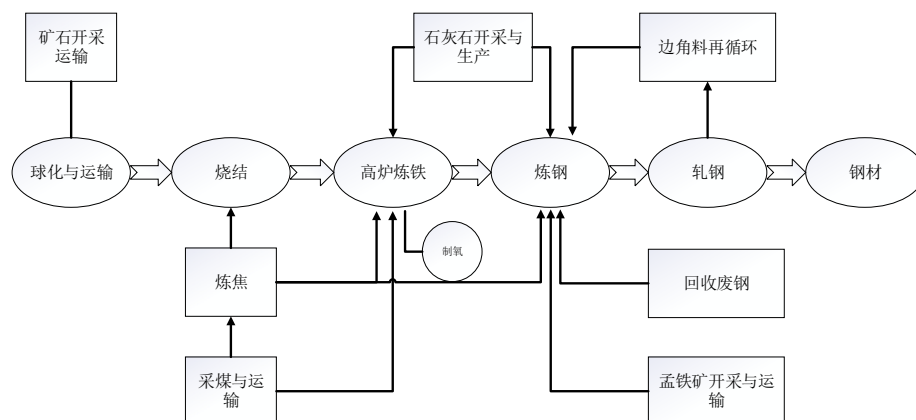


图 3-1 钢材生产流程

在每个子系统中自然资源使用量最多的钢材。钢材是一种重要的物质，其应用广泛、品种繁多，在CCHP系统当中燃气机组的制造、地源热泵机组制造等需求量很多，但是也有部分如用在阀门、仪表等部件时，其对钢材的需求数量就很少，因此可以忽略这类部件的使用。我国社会对钢材使用的需求量有巨大的潜力，由于受工艺流程的限制，往往会造成更多能源的消耗和相关资源的投入，所以在生产技术不高的状况下也会对大气环境产生危害，影响人们的健康生活。见图3-1所示，为我国钢铁工艺流程图及研究范围^[44]。

结合钢材生产工艺流程并参考在相应环节的材料文献以及钢材成型前的每个加工锻造过程的耗能和有害物质的排放，得到了我国每生产1 kg钢材的资源需求量和向环境排放有害气体的结果清单^[44]，详细情况如表 3-1 所示。

表3-1 生产1 kg普通钢材的材料清单^[44]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
电能	1.53E+01 MJ	Dust（气体）	4.50E-02 kg
燃油	9.36E-01 kwh	一氧化碳	1.10E-04 t
煤炭	1.06E+01 kwh	二氧化碳	8.20E-03 t
生铁	1.50E-03 t	硫氧化物	5.10E-05 t
CaCO ₃	1.70E-03 t	氮氧化物	1.60E-05 t
O ₂	6.80E-04 t	C _x H _y	1.90E-06 t
原油	1.74E+00 kwh	CH ₄	1.80E-05 t
黏土	6.30E-05 t	硫化氢	8.70E-08 t
橄榄石	3.90E-05 t	氯化氢	8.74E-07 t
铁锰矿	2.40E-05 t	颗粒悬浮物	1.20E-04 t
白云石	1.40E-05 t	氨离子	9.90E-07 t
氟石	1.30E-05 t	COD	2.82E-07 t
砂砾	5.60E-06 t	BOD	5.00E-09 t
斑脱土	4.80E-06 t	酚	5.00E-09 t
铝土矿	1.50E-06 t	钠离子	3.80E-07 t
氯化钠	2.70E-07 t	矿渣	3.98E-03 t
空气	5.00E-08 t	工业污染物	8.70E-04 t
N ₂	1.00E-08 t	气体粉尘	2.95E-04 t
S	3.00E-07 t	—	—
H ₂ O	3.40E-02 t	—	—

我国在生产铜环节中有原生铜和再生铜，而前者的火法冶炼工艺在实际应用中更加广泛，因此本文仅考虑此种工艺冶铜的制造。生产 1 kg 工业纯铜的系统边界如图 3-2 火法炼铜系统边界^[45]。

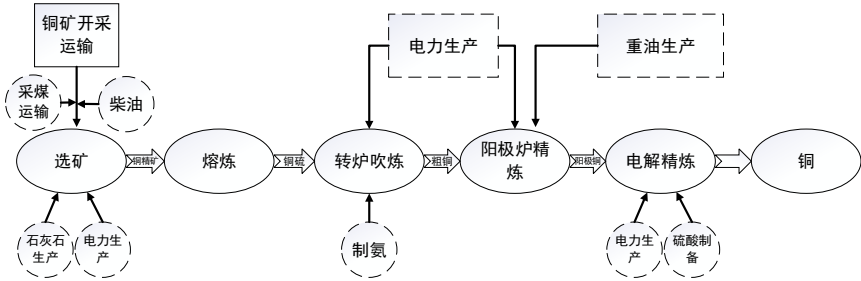


图 3-2 铜材生产边界

参考上述纯铜的冶炼工艺流程和在已公开发表文献资料^[46]查得相应各个流程环节的资源 and 能源使用情况汇总了我国在冶炼铜锭过程的资源使用和耗能统计表，其中覆盖了在冶炼环节中产生的有害废弃物，详细情况如表 3-2 所示。

表3-2 生产1 kg纯铜的材料清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	1.66E+01 kwh	CO ₂	1.84E-02 t
电力	2.12E+01 MJ	SO ₂	1.30E-03 t
重油	2.53E+01 kwh	NO ₂	5.41E-05 t
矿石	1.03E-01 t	废水	4.04E-01 t
硫酸	6.80E-03 t	固体垃圾	2.28E-01 t
石灰	1.44E-03 t	—	—
镁砖	5.42E-05 t	—	—
石英	7.20E-04 t	—	—
铸铁球	1.75E-04 t	—	—
循环水	3.36E-01 t	—	—

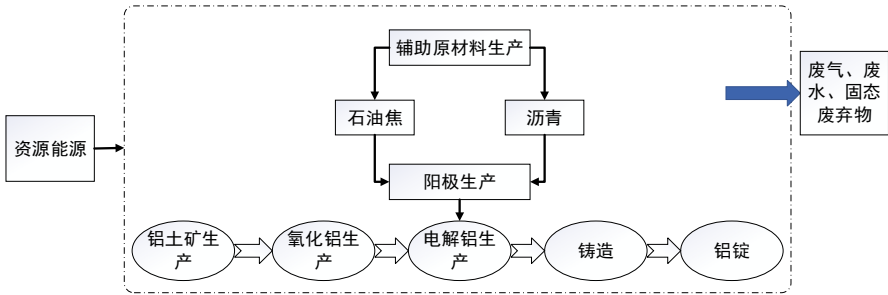


图 3-3 铝锭的生产流程

铝工业是高耗能和高污染的行业，其生产过程对环境造成的影响较大，我国生产纯铝的生产环节见图 3-3 表示分别为铝土矿生产、氧化铝制造、阳极电解铝过程、锻造以及成型等过程。

根据上图中铝材的工艺流程，查得相关文献资料^[47]获得了每个相应生产环节的资源消耗和污染物排情况，详细情况如表 3-3 所示。

表 3-3 1 kg 铝的输入和输出材料分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
铝矿	4.27E-03 t	氯化氢	2.40E-07 t
原油	8.85E+00 kwh	二氧化碳	8.57E-03 t
无烟煤	7.57E+00 kwh	一氧化碳	3.08E-06 t
褐煤	5.28E+00 kwh	氟化氢	6.00E-07 t
天然气	8.95 E+00 kwh	氮氧化物	1.40E-05 t
电力	5.40 E+01 MJ	二氧化硫	3.42E-05 t
—	—	甲烷	1.43E-05 t
—	—	氟化颗粒物	5.50E-07 t
—	—	多环芳烃	1.51E-07 t
—	—	六氟乙烷	1.00E-08 t
—	—	四氟化碳	1.09E-07 t
—	—	乙烷	3.14E-07 t
—	—	丙烷	4.06E-07 t

保温材料被使用在CCHP系统上的燃气机组设备和地源热泵机组设备以及地埋管路当中，因其内部存在多气室结构是减少热量或冷量损失的最佳材料。如图 3-4 为硬质聚氨酯发泡保温材料的生产系统边界图^[48]。

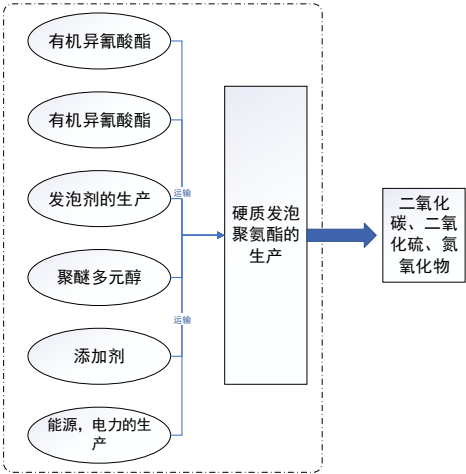


图 3-4 保温材料生产流程图

结合上图保温材料的生产工艺，通过对企业调研和有关硬质发泡聚氨酯加工制造文献^[49]，整理出了每1 kg 硬聚氨酯发泡所产生的资源能量输入与有害污染物输出状况，见表3-4所示。

表3-4 保温材料输入输出清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	2.55E+00 kwh	二氧化碳	4.76E-03 t
原油	1.17E+01 kwh	二氧化硫	1.66E-05 t
天然气	1.64E-03 kwh	氮氧化物	1.34E-05 t
电力	6.00E-01 MJ	—	—

以往地热井的换热管道大量使用金属制品，在深埋地下后很难进行有效维修和管理，由于潮湿的环境也很容易造成氧化而影响其使用年限，不仅造成了经济损失还大量耗费了资源，使得自然环境资源过度开采并带来环境恶化。为了克服金属管道的不能解决地下潮湿易氧化的缺点，高密度聚乙烯材料(High Density Polyethylene, HDPE)被应用。HDPE 研究的周期范围是为从油开采蒸馏，到裂解净化造粒等步骤最终提炼成聚乙烯材料为止，工艺流程见图 3-5 所示。

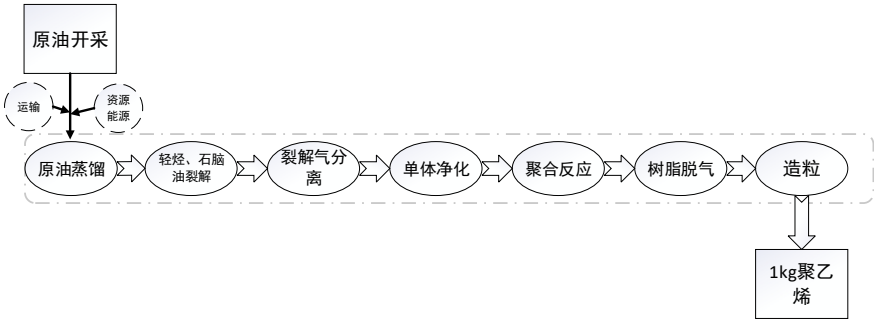


图 3-5 中国 1 kg HDPE 管材生产系统边界

如图 9 所示，为我国 HDPE 的生产流程边界图^[50,51]。结合生产工艺流程图查得相应生产过程中资源和污染物排放资料得到了其输入输出环境清单，见表 3-5。

表 3-5 生产 1 kg 高密度聚乙烯管材的材料清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原油	1.75E+01 kwh	二氧化碳	6.40E-03 t
电力	3.24E+01 MJ	二氧化硫	4.25E-05 t
—	—	氮氧化物	2.00E-09 t
—	—	乙烯	2.02E-06 t
—	—	工业残渣	4.89E-04 t
—	—	工业污水	1.52E-02 t

天然气勘探阶段的主要实施步骤有地质勘测、气井建设、气田集输、天然气维护作业等过程，而所造成的环境破坏主要是碎石、碎渣和废弃水排放见如图3-6^[52]。

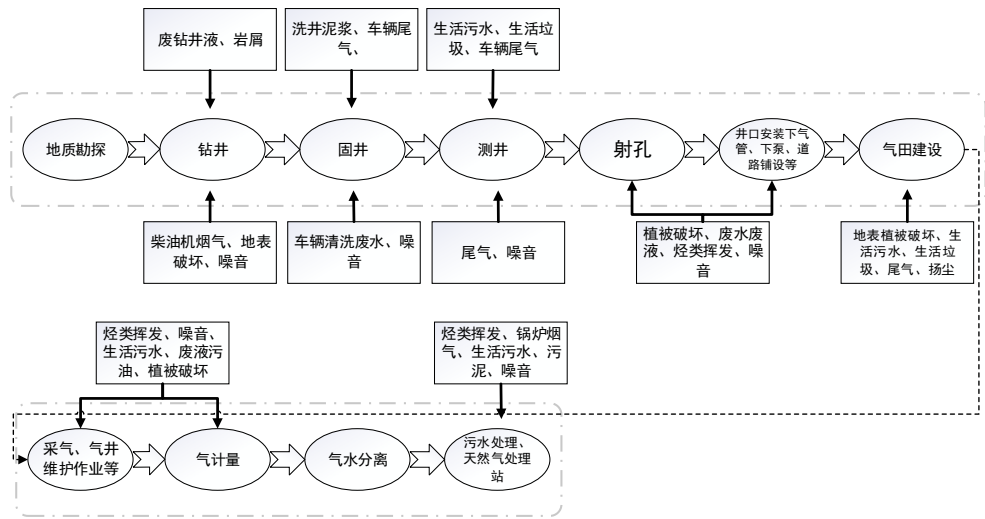


图 3-6 天然气开采流程

天然气田在建造过程中主要工艺流程涉及到的是土建施工，即对混凝土的使用和钢材的使用。为了方便统计计算这里取1标准立方天然气（单位：1 Nm³）。每生产1 Nm³天然气会导致原有天然气储存的数量减少1.32 m³，原油储存的量减少3.27×10⁻² kg，在开采天然气时也会伴随氮氧化物、温室气体、气体粉尘和固体垃圾等^[53,54]，天然气勘测建设阶段的材料清单见表3-6。

表3-6 天然气勘测及建设期间的材料分析^[53,54]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
钢材(基建)	1.00E-05 t/Nm ³	二氧化碳	7.48E-05 t/Nm ³
水泥（基建）	5.00E-06 t/Nm ³	二氧化硫	1.91E-07 t/Nm ³
水（钻井开采）	3.00E-05 t/Nm ³	甲烷	7.32E-09 t/Nm ³
钢材生产总能耗	1.58E-01 kwh/Nm ³	一氧化碳	7.23E-09 t/Nm ³
水泥生产总能耗	9.33E-03 kwh/Nm ³	氮氧化物	1.87E-07 t/Nm ³
能耗合计(包括钻井消耗的原 油、电力、天然气以及设备基 建的钢材水泥生产过程)	5.78E-01 kwh/Nm ³	气体粉尘	9.18E-08 t/Nm ³
标准煤（能耗折算为标准煤）	7.00E-05 t/Nm ³	废液	5.70E-04 t/Nm ³
-	-	固体垃圾	5.76E-06 t/Nm ³

3.2.2 制造整备阶段的材料分析

该阶段主要考虑燃气内燃机、吸收式制冷机、换热器和水蓄能罐的生产安装过

程，即对每个设备单元执行LCA分析方法来获得制造阶段的生命周期清单，同时考虑到CCHP系统中各个设备单元部分的钢材使用量最多，忽略相对很少被使用的材料保温材料。除此之外关于由于受制造过程保密等影响，在获得更加细节信息很少时可以在LCA计算中使用粗略估计的分析手段是比较方便的。该阶段消耗的能量主要来自电网，所以主要考虑由于电力消耗引起的能量消耗和污染物排放。

电力的产生可以有核电站发电、燃煤发电等，综合来看不同的国家发电的主要模式也大体不同，对于我国来讲，我国的煤炭总量占世界煤炭总量的45%以上，所以电力的产生主要是煤被用来发电，煤发电的资源有害物质的输入输出见表3-7^[55]。

表3-7 我国净火力发电的材料清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	2.65E+00 kwh	二氧化碳	8.77E-04 t
原油	1.03E-01 kwh	二氧化硫	8.04E-06 t
天然气	7.85E-02 kwh	氮氧化物	6.34E-06 t
—	—	一氧化碳	1.25E-06 t
—	—	甲烷	2.65E-06 t
—	—	非甲烷挥发性有机物	3.95E-07 t
—	—	气体烟尘	1.63E-05 t
—	—	砷	1.62E-09 t
—	—	镉	1.03E-11 t
—	—	铬	1.37E-10 t
—	—	汞	7.11E-11 t
—	—	镍	2.03E-10 t
—	—	铅	1.42E-09 t
—	—	钒	2.33E-09 t
—	—	锌	1.94E-09 t
—	—	工业废水	1.31E-03 t
—	—	COD	6.02E-08 t
—	—	固体污染物	1.02E-04 t

3.2.3 成品运输阶段的材料分析

燃气机组中各个设备单元的全生命周期过程中的运输阶段主要是铁路和公路运输时消耗的燃料和燃料燃烧的污染物排放。主要的运输过程包括三个部分：设备单体生产用的资源物质运送到产品生产加工厂；成型产品（包括燃气内燃机、地源热

泵、吸收式制冷机等）运送到目的地。其中第一阶段的运输造成的环境影响已经包含在资源开采的阶段中；第二阶段造成的资源消耗和污染物排放大小是由运输成品的距离长短、质量大小决定的。这里每种运输方式产生的影响负荷系数采用表3-8和表3-9的基本数据进行计算。

表3-8 每吨公里铁路运输的输入输出清单^[44,56,57]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
煤	6.30E-02 kwh	CO	3.90E-08 t
—	—	CO ₂	6.77E-06 t
—	—	PM _{2.5}	4.00E-09 t
—	—	SO ₂	6.50E-08 t
—	—	NO _x	3.30E-08 t
—	—	NO ₂	2.00E-09 t
—	—	CH ₄	4.60E-08 t

表3-9 每吨公里公路运输的输入输出清单^[44,56,57]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
柴油	9.00E-01 kwh	CO	8.94E-06 t
—	—	CO ₂	2.09E-04 t
—	—	PM _{2.5}	9.42E-07 t
—	—	SO ₂	9.42E-06 t
—	—	NO _x	3.16E-06 t
—	—	NO ₂	6.41E-06 t
—	—	CH ₄	1.43E-07 t

通过以上两个周期的材料分析，燃气机组中各设备在资源开采及输送期间相应的影响结果可以用以下公式进行计算汇总，见式（3-1）：

$$E_{\text{总}} = \sum_{a=1}^{a=n} (E_{1a} \times M_a) + \sum_{a=1}^{a=n} (E_{2a} \times M_a \times L_a) \quad (3-1)$$

式中：

- E_1 ——资源开采周期；
- E_2 ——成品输送周期；
- E_{1a} ——开采阶段单位质量资源引起的有害污染物输出量，kg；
- E_{2a} ——输送环节每公里每吨成品引起的有害污染物输出量，kg；
- M ——某一资源总重量，t；

L ——距离目的地的公里数, km;

α ——不同种类的资源物质。

目前对于天然气的运输形式以燃气管道运输为主,也可将天然气液化靠海运和公路运输。在燃气管道方面,当修建输气管道的过程中会对当地的生态环境造成破坏,这种破坏影响远远大于输气管道在运行后对环境所造成的影响。根据文献^[58,59]得知,输气管道的管沟的开挖宽度为1.0~2.0 m,管道深度为1.5~2.0 m,假设输送天然气的管道长度为300 km,则管道沿线开槽的土石方量会达到 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$,此外天然气管道的施工地带宽度要在管道的两边各留出10 m,在此基础上加上施工时的土体扰动和重型卡车、推土机、挖掘机的碾压,会导致沿线管路周边近20 m宽度范围内的生态生物遭到一定的破坏,破坏的面积可达 $550 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。造成严重破坏的是管道沟槽,开挖深度将使其表面的土壤结构遭到破坏,进而影响地表植被的健康生长。除此之外,输送天然气的沿线管路的长久使用会使得土地永久得不到恢复,此部分的面积为 $90 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。每年输送天然气的量在 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$,管路全长为300 km的主干管道下,使用的钢材为15万吨,水泥达5万吨,以及木材、气泵、仪器仪表和自动化设备。假设输气管道的使用时间按30年计。

同时输气管道在使用中会向自然界排放部分的天然气造成当地大气污染,此部分排放的天然气主要包括清管施工时排放的天然气和使用天然气当做燃料的燃气内燃机排气以及事故燃烧产生的烟气等;清扫管道过程中产生的FeO粉末和渗透液,除此之外还有首站排放少量工业使用后的污水和生活污水,压缩机运行过程产生的噪音和振动等,也是对自然生态环境造成污染直接因素。输送清单见下表3-10。

表3-10 中国1 Nm³天然气输送300 Km能源输入和污染物排放清单^[58,59]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
钢材消耗量	8.00E-06 t/Nm ³	一氧化碳	3.22E-09 t/Nm ³
水泥消耗量	3.00E-06 t/Nm ³	氮氧化物	8.73E-08 t/Nm ³
钢材能耗	1.26E-01 kwh/Nm ³	甲烷	3.57E-09 t/Nm ³
水泥能耗	5.58E-03 kwh/Nm ³	气体粉尘	1.90E-09 t/Nm ³
输气能耗	4.08E+00 kwh/Nm ³	液体污染物	6.33E-09 t/Nm ³
能耗合计	4.22E+00 kwh/Nm ³	固体垃圾	1.83E-10 t/Nm ³
标准煤(能耗折算为 标准煤)	6.20E-04 t/Nm ³	—	—

在天然气输送的钢材在此阶段的使用还有水泥的使用,水泥的生命周期内的输入输出见表3-11。

表3-11 普通硅酸盐水泥的数据清单^[60,61] (/t)

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
石灰石	1.10E+00 t	二氧化碳	8.09E-01 t
黏土	1.98E-01 t	二氧化硫	4.61E-04 t
铁粉	4.12E-02 t	氮氧化物	2.42E-03 t
石膏	5.00E-02 t	气体粉尘	3.44E-04 t
煤	9.41E-02 t	COD	1.18E-05 t
矿渣	1.25E-01 t	油	3.36E-04 t
电力	1.20E+02 kwh	甲烷	9.37E-04 t
—	—	汞	1.09E-05 t

液化天然气运输在整个天然气运输中占的比例很少，运输过程中污染物排放量几乎为零，这里不考虑运输载体的生命周期分析。

3.2.4 运营管理阶段的材料分析

本文假设CCHP系统在生命周期30年内消耗的能源主要为天然气的消耗和电网的电力消耗，电网电力的消耗清单在设备加工阶段已经介绍本节不在介绍，天然气能源消耗和污染物排放清单^[62,63]见表3-12。

表3-12 单位天然气燃烧阶段的清单分析表^[62,63]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
天然气	9.76E+00 kwh/Nm ³	SO ₂	1.03E+01 g/Nm ³
—	—	CO ₂	6.70E+02 g/Nm ³
—	—	NO _x	6.80E-02 g/Nm ³
—	—	PM _{2.5}	1.20E-02 g/Nm ³
—	—	CO	1.84E-01 g/Nm ³
—	—	CH ₄	5.00E-03 g/Nm ³
—	—	N ₂ O	4.00E-04 g/Nm ³

3.2.5 回收再利用阶段的材料分析

根据2019年6月我国全面实行垃圾分类的通知要求，回收再利用阶段显得尤为重要，其包括燃气机组中每个设备单体（PGU、吸收式制冷机组、换热器等）的拆解并回收可以利用的铜材、铝材和钢材，而不可回收利用的有机油类、部分聚氯乙烯材料将被掩埋或是焚烧处理。电力消耗在拆解和掩埋期间被主要考虑。查阅文献^[64]，获知钢材、铜材、铝材和其他材料的回收再生利用能耗和再利用百分比见表3-13所示。

表3-13 中国每单位质量材料回收百分比和耗能^[64]

	钢	铝	铜	HDPE
回收能量输入 (kwh/t)	4.56E+03	3.58E+03	5.29E+03	1.93E+04
回收百分比 (%)	8.50E+01	8.50 E+01	9.00 E+01	6.00 E+01

从表14中可以看出主要材料的回收率在85%以上,对于不能进行回收利用的剩余材料要进行特殊处理,目的在于将其环境的影响危害降至最低。燃气机组中每个设备单体在垃圾分类中按照可回收物、有害垃圾等主流归类方法,处理,在处理每吨污染物时涉及的能量消耗按照集中污染物处理办法中的公式^[65]计算,见式(3-2):

$$H_{\text{总}} = H_{\text{可}} + H_{\text{其他}} = \sum_{i=1}^{i=n} (M_i \times \Delta_i \times E_i) + \sum_{j=1}^{j=n} (N_j \times E_j) \quad (3-2)$$

式中:

$H_{\text{总}}$ ——回收再利用环节总能量输入, kwh;

$H_{\text{可}}$ ——收集可回收物时的能量输入, kwh;

$H_{\text{其他}}$ ——有害垃圾、干垃圾、湿垃圾等掩埋能量输入, kwh;

M_i ——第*i*种可回收物质量, t;

N_j ——第*j*种垃圾质量, t;

Δ_i ——不同种物质的再利用系数, %;

E_i ——第*i*种可回收物再利用回收时的能量输入, kwh/t;

E_j ——第*j*种垃圾填埋时的能量输入, 取值8 kwh/t;

根据表3-13种不同物质回收能量输入和回收百分比,并结合GB2589-2008T 综合能耗计算通则,利用上述公式可以计算得到集热系统在废弃处理阶段的能耗和环境排放值。回收过程中和掩埋能耗统计表见表3-14。

表 3-14 设备单元废弃过程处理电能耗

回收物质	质量	回收百分比	回收能量输入	填埋能量输入	总能耗
钢材	(t)	85 (%)	4.56E+00 (kwh/t)	8.00E+00 (kwh/t)	(MJ)
铜材	(t)	90 (%)	4.56E+00 (kwh/t)	8.00E+00 (kwh/t)	(MJ)
铝材	(t)	85 (%)	4.56E+00 (kwh/t)	8.00E+00 (kwh/t)	(MJ)

根据我国最新实施的垃圾处理污染物排放的相关文献^[66],其有害物质排放计算规则见(3-3)和(3-4)所示:

$$C_l = m_l \times \sigma \quad (3-3)$$

式中：

- C_l ——不可回收物质的每年污染物产生总量， m^3/yr ；
- m_l ——每年不可回收物质质量， t/yr ；
- σ ——不可回收物质的产污系数， m^3/t ，这里取产污系数：0.02 m^3/t

$$S_l = C_l \times \sigma \tag{3-4}$$

式中：

- S_l ——每年污染物产生有害液体总量， t/yr ；
- σ ——有害液体产出系数， g/m^3 ；
- 填埋过程中不同种类污染物的输出量见表3-15。

表3-15 掩埋污染物排放分析^[66]

污染物指标	单位	治理组合工艺类别	排污核算系数
化学需氧量	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.06
氨氮	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.055
总磷	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00012
石油类	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.002
挥发酚	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00005
氰化物	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00008
总铬	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.0008
汞	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00001
镉	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00005
铅	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.0003
砷	kg/m ³ 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00007

3.3 本章小结

本章主要根据第二章的分析步骤对天然气分布式能源系统的动力设备、辅助动力设备以及燃料三大部分在资源开采环节、制造整備环节、成品输送环节、运营管

理环节、回收再利用环节的五个阶段内的资源能源输入和污染物排放进行全生命周期构建模型。

第4章 案例分析

4.1 工程概况

4.1.1 建筑概况

本章根据建立的生命周期评价理论模型对实际案例进行分析。研究对象为以天然气为燃料的分布式CCHP系统被用于一生态办公建筑群，建筑物均为钢筋混凝土结构，总建筑面积33750 m²，窗墙比为36%，人员密度为10 m²/人，设备功率密度13 w/m²，灯光功率密度为18 w/m²。

根据建筑物办公性质了解到由于夜间人员很少建筑的电负荷也很小；同样在12:00以及18:00-20:00室内人员很少，因此用电负荷随之减少；此外在正常办公时间，由于人员集中，用电量很多，日最大电功率为918 kw，累计日用电为8516.9 kwh；周末的最大电功率为276.5 kw，累计电量为2985.7 kwh。此外，根据模拟的全年小时热冷负荷结果发现，在夏季的7、8月冷负荷较高，最高可达3568 kw，年均冷负荷指标为81.7 w/m²；相应的热负荷在12月和次年的1月较高，最高为3290.2 kw，热负荷指标为58.5 w/m²。

4.1.2 CCHP 系统的配置概况

为了向办公建筑群提供足够的能源并保持能源供应系统的独立性、灵活性和安全性，为此办公建筑群使用了CCHP系统。CCHP系统组件包括卡特G3516E系列的燃气内燃机发电机组，远大科技集团的XII型非电空调中的热水、烟气机装置，约克系列的地源热泵机组（Ground source heat pump，简称GSHP）和两个容积130 m³个水蓄能罐。安装水蓄能系统的目的既可以平衡电网的峰值和非峰值，有效地实现峰值负荷转移，近而降低地源热泵和电力冷却器的容量和功率容量，减少在电力价格上有高峰期和非高峰期之间的电价差异，水蓄能系统也可以降低运营成本。

对于CCHP系统，天然气燃料供应给燃气内燃机以产生建筑物所需的电负荷（灯，办公设备等）。回收废热并用于使用吸收式冷却器产生冷却或使用热交换器产生热。如果燃气内燃机的回收的废热量不能够满足建筑物的负荷，则水蓄能系统中储存的冷量或热量将被释放，并且地源热泵系统用于提供剩余的所需热、冷负荷。反之，燃气内燃机中的热量将被储存在储罐中或排放掉。

此外，若燃气内燃机的发电量不满足电力需求，则可以从电网输入差值。考虑到我国并没有相应的政策鼓励分布式冷热电系统多余的电量上网，所以本文章并未考虑此部分电量。

4.2 研究目的和范围

4.2.1 研究目的

研究目的是运用LCA理论对在某生态办公建筑群中以天然气为清洁燃料的CCHP系统进行所有周期内资源使用量和能量输入进行定量分析；其次为所有周期内因能量的输入和资源的开采导致的有害污染物输出进行定量分析，并对污染物排放引起的环境影响类型进行分类；最后对CCHP系统在不同周期内产生的资源使用量和能量输入量以及污染物排放量进行影响评价，并解释造成影响的原因。这样做旨在将不同环境影响类型的影响力程度进行可视化数据处理，这样既可以找到各个环节造成影响大的问题出处也可以从整体把握对环境的影响力，并针对问题规划改善其影响的措施；从社会效益来讲，探索CCHP系统本身资源使用量和所有周期内能量的输入量以及产生的污染物质排放大小的研究，不仅有利于相应企业的在清洁生产环节为减少环境影响改善生产模式提高使用效率提供依据，也为我国日后制定符合绿色、可持续发展生态主题的CCHP系统政策制定提供有效建议。

4.2.2 定义系统边界

研究的具体范围界定为资源开采、制造整備、成品运输、运营管理和回收再利用五个阶段。研究的功能单位是某生态办公建筑群的CCHP机房设备一套。CCHP的系统被划分为燃气机组板块、地源热泵板块以及燃料板块。燃气机组板块主要包含燃气内燃机、水蓄能装置、吸收式制冷机、热交换设备等。地源热泵板块主要包含辅助加热和制冷的地源热泵机组，循环水泵、补水泵、地埋管路等设备。燃气板块主要考虑天然气以及开采、运输和燃烧过程。

4.2.3 数据来源与数据质量

CCHP系统中的燃气内燃机机组、地源热泵机组、水泵、水蓄能罐、换热器、吸收式制冷机、水管等众多设备，由于受相应的不同条件限制，所调研的企业有限不能完整的代表同行业的平均生产制造水平，为了弥补这方面的缺点，同时采用数据质量更高的公开发表数据，如《产品生命周期评价方法及应用》、《我国城镇住宅空调生命周期能耗与资源消耗研究》^[67]以及《高炉炼铁生产技术手册》等。

4.2.4 假定条件

受到人力、时间以及CCHP系统在所有周期内所需要的资源使用和能量输入量较大的限制因素，在保证研究的完整性、准确性、代表性的基础上方便对涉及的环节以及能源的输入输出进行计算，主要分析CCHP系统的设备在全生命周期中资源消耗较大的、能量消耗较多的、对环境产生破坏影响较大的为研究对象，以提高此次研

究的可操控性，因此做出以下假设，范围系统边界见图4-1。

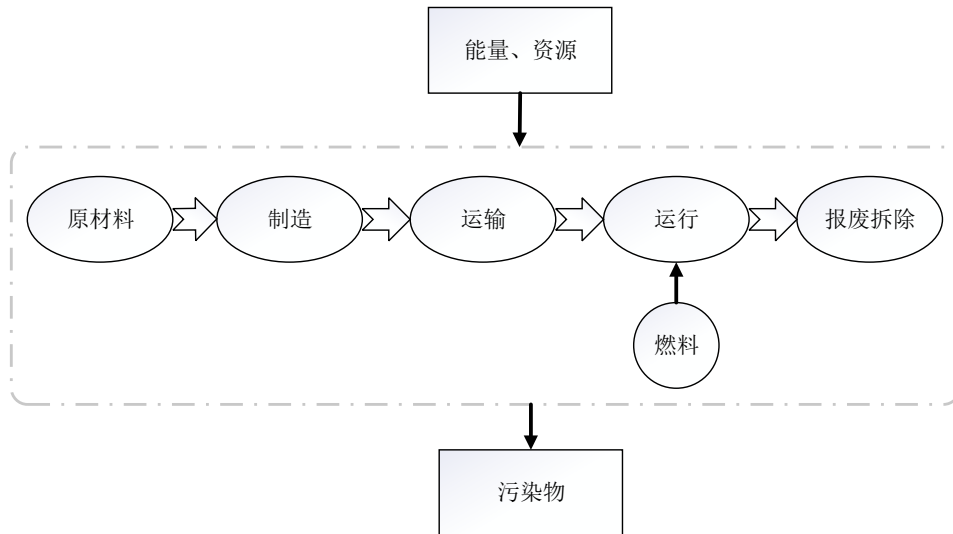


图 4-1 生命周期边界

- 1) 由于CCHP系统各机组设备在制造时涉及到许多资源，而且同一材料还有不同种型号，以钢为例包括高强度合金钢、镍基高温合金、球墨铸铁或铸钢等，因此对这样的原材料以普通钢最为研究标准。除此之外还规定用于运输产品的载体不再进行全生命周期分析。
- 2) 设备组件制造阶段该阶段包括CCHP设备的所有制造活动。该阶段的能量主要来自电网。目前，我国大部分的电网主要来自火力发电厂，因此将煤电厂用作电网发电。
- 3) 运行操作阶段由于使用时间较长，是CCHP系统所有生命周期中的关键阶段，因此规定CCHP系统的使用时间按30年运行期计算。同时主要考虑运行阶段中天然气能源的使用，其他使用较少的润滑油的物质不再进行分析。
- 4) 回收再利用阶段主要考虑的是设备被拆解时以消耗电力为主的输入和电力生产带来的污染物排放，以及在不可循环材料被填埋处理后产生危险渗透液对环境的影响。
- 5) 机组运行在室内，不考虑占用土地的影响。

4.3 CCHP 系统的全生命周期清单分析

燃气内燃机的三大部件分别是压气机、燃烧室、透平，即资源的材料消耗主要为不同型号的钢材料。其他设备如水蓄能罐、热交换器、吸收式制冷机主要用材也是钢材，且使用量相对于用在温度计、压力表等部件较多，本文不考虑这部分金属材料的使用。

机组的配置概况分别见表 4-1、4-2、4-3、4-4。

表 4-1 燃气发电机组技术规格

技术规格	数量
最大连续额定值(ekw)	1603
燃油类型	天然气
最高电力效率	1603
排量(L)	69.0
机组材料	钢
长度 (mm)	5523.0
宽度 (mm)	1828.0
高度 (mm)	2340.0
发电机组干重 (kg)	14161.0

表 4-2 换热器基本参数规格

技术规格	数量
设计压力(mPa)	≤2.5
设计温度 (°C)	-50-250
装机面积 (m ²)	10-45
处理量液体/气体 (m ³ /h)	130/1300
热交换量 (mw)	10
设备质量(kg)	1200
板片材料	钢

表 4-3 吸收式制冷机基本参数规格表

技术规格	数量
型号	远大 XII 型非电空调中的热水、烟气机 500 型
制冷量 (kw)	2908
制热量 (kw)	1918
烟气(kg/h)/热水(m ³ /h)(制冷状态)	18057/82.2
烟气(kg/h) (制热状态)	19036
材料	钢材
主体运输重量 (t)	14.3

表 4-4 主要材料和使用量汇总

设备名称	数量	钢材 (kg)	合计
燃气内燃机	1 (台)	14161.0	14161.0kg
板式换热器	1 (个)	1200	1200 kg
烟气热水型制冷机	1 (台)	14300.0	14300.0kg

蓄能罐采用文献^[68]中关于储能罐的制造耗材和制造能耗, 钢材使用量为 1.0000 kg/kw, 根据运行优化下的蓄能罐的功率 2000 kw, 可以计算出钢材使用量为 2000 kg, 计算得出总钢材耗用量为 31661 kg。

从以上可以得知 CCHP 中燃气机组设备单体使用的主要资源材料, 根据对 CCHP 系统研究边界分别进行所有周期内的资源使用与有害污染物评价的分析。

4.3.1 燃气机组板块的资源开采阶段材料分析

根据上面燃气机组设备单体中基础物性参数, 结合第三章资源开采环节的处理方法, 可以得到资源能量的输入, 以及污染物排放的输出清单, 见表 4-5 所示。

表 4-5 CCHP 系统中设备单元资源开采期间的能耗与污染物排放清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
电力	4.84E+05 MJ	Dust (气体)	1.42E+03 kg
燃油	1.07E+05 MJ	CO	3.48E+03 kg
煤炭	1.20E+06 MJ	CO ₂	2.60E+05 kg
生铁	4.75E+04 kg	SO _x	1.61E+03 kg
石灰石	5.38E+04 kg	NO _x	5.07E+02 kg
氧气	2.15E+04 kg	C _x H _y	6.02E+01 kg
原油	1.99E+05 kg	CH ₄	5.70E+02 kg
黏土	1.99E+03 kg	H ₂ S	2.75E+00 kg
橄榄石	1.23E+03 kg	HCL	2.77E+01 kg
铁锰矿 ⁺	7.60E+02 kg	悬浮物	3.80E+03 kg
白云石	4.43E+02 kg	NH ₄	3.13E+01 kg
氟石	4.12E+02 kg	COD	8.93E+00 kg
砂砾	1.77E+02 kg	BOD	1.58E-01 kg
斑脱土	1.52E+02 kg	酚	1.58E-01 kg
铝土矿 ⁺	4.75E+01 kg	Na ⁺	1.20E+01 kg

(续表)

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
氯化钠	8.55E+00 kg	矿渣	1.26E+05 kg
空气	1.58E+00 kg	工业污染物	2.75E+04 kg
氮	3.17E-01 kg	气体粉尘	9.34E+03 kg
硫	9.50E+00 kg	—	—
水	1.08E+06 kg	—	—

4.3.2 燃气机组板块制造整备阶段的材料分析

同理，根据主要使用材料和使用量汇总，得到制造阶段生产能耗，见表 4-6。

表 4-6 生产阶段能耗表

材料名称	数量	单位能源耗量 (kwh/kw)	制造能耗 (kwh)
燃气内燃机	1 (台)	6.3636	10200.85
板式换热器	1 (个)	1.2000	2369.28
烟气热水型制冷机	1 (台)	11.8980	34599.38
水蓄能罐	1 (个)	1.0000	2000.00
合计	——	——	49169.51

由此得到了生产安装阶段的设备单元的能源、资源输入量 and 环境污染物排放情况。具体见表 4-7。

表 4-7 产品加工阶段能源资源消耗和环境污染物排放表

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	2.25E+04 kg	CO ₂	4.31E+04 kg
原油	4.37E+02 kg	SO ₂	3.95E+02 kg
天然气	2.80E+02 kg	NO _x	3.12E+02 kg
—	—	CO	6.15E+01 kg
—	—	CH ₄	1.30E+02 kg
—	—	NM VOC	1.94E+01 kg
—	—	Dust	8.01E+02 kg
—	—	As	7.97E-02 kg
—	—	Cd	5.06E-04 kg
—	—	Cr	6.74E-03 kg

(续表)

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
—	—	Hg	3.50E-03 kg
—	—	Ni	9.98E-03 kg
—	—	Pb	6.98E-02 kg
—	—	V	1.15E-01 kg
—	—	Zn	9.54E-02 kg
—	—	废水	6.44E+04 kg
—	—	COD	2.96E+00 kg
—	—	固体垃圾	5.02E+03 kg

4.3.3 燃气机组板块成品运输阶段的材料分析

设备成品的运输阶段指的是燃气内燃机、热水烟气制冷机、换热器和水蓄能罐体等设备被转送至目的地时的能量消耗和污染物排放评价分析。因此规定：

1) 卡特彼勒天然气内燃机、水蓄能罐从广东省运输到 1890 km 的天津市，因距离目的地较远不适合进行公路运输而选择铁路方式，此运输的过程中两部分的运输质量分别为 14.16 t、2.00 t；

2) 热水烟气型制冷机的运输质量为 14.30 t，要从湖南省长沙市运输到 1204 km 的天津市，同样依靠铁路方式；

3) 换热器等设备从河北省本地运输以及从铁路转运至目的地采用公路运输，运输的距离为 30 km，运输货物重量为 31.66 t。

4) 再根据每吨公里公路和铁路的计算表格，可以得到此阶段的能源输入量和有害污染物输出量的大小清单，见表 4-8、4-9 所示。

表 4-8 铁路运输的输入输出清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
煤	3.23E+03 kwh	CO	2.00E+00 kg
—	—	CO ₂	3.48E+02 kg
—	—	PM _{2.5}	2.05E-01 kg
—	—	SO ₂	3.33E+00 kg
—	—	NO _x	1.69E+00 kg
—	—	NO ₂	1.02E-01 kg
—	—	CH ₄	2.36E+00 kg

表 4-9 公路运输的输入输出清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
柴油	8.55E+02 kwh	CO	8.49E+00 kg
—	—	CO ₂	1.99E+02 kg
—	—	PM _{2.5}	8.95E-01 kg
—	—	SO ₂	8.95E+00 kg
—	—	NO _x	3.00E+00 kg
—	—	NO ₂	6.09E+00 kg
—	—	CH ₄	1.36E-01 kg

4.3.4 燃气机组板块运行阶段的材料分析

本节在运行阶段做出如下规定：运行中的能耗量和污染物排放量以消耗 1 m³ 的天然气为基本单位。消耗的电力引起的能源消耗量和污染物排放是在考虑了火电发电的效率和传输效率之后的数值。

机组运行阶段主要是依靠燃气内燃机发电和从电网买电，一年内的发电量为 5518640 kwh，耗用燃气量为 1343617 m³，从电网买电量为 248701 kwh。机组运行 30 年，则总用气量为 40308510 m³，买电量为 7461030 kwh。则此阶段的清单分析见表 4-10、4-11。

表 4-10 运行阶段的能源消耗和污染物排放清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
天然气	3.93E+08 kwh	SO ₂	4.15E+05 kg
—	—	CO ₂	2.70E+07 kg
—	—	NO _x	2.74E+03 kg
—	—	PM _{2.5}	4.84E+02 kg
—	—	CO	7.42E+03 kg
—	—	CH ₄	2.02E+02 kg
—	—	N ₂ O	1.61E+01 kg

表 4-11 电网净电力生产的清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	3.41E+06 kg	CO ₂	6.54E+06 kg
原油	6.63E+04 kg	SO ₂	6.00E+04 kg
天然气	5.93E+04 m ³	NO _x	4.73E+04 kg
—	—	CO	9.33E+03 kg
—	—	CH ₄	1.98E+04 kg
—	—	NM VOC	2.95E+03 kg
—	—	Dust	1.22E+05 kg
—	—	As	1.21E+01 kg
—	—	Cd	7.68E-02 kg
—	—	Cr	1.02E+00 kg
—	—	Hg	5.30E-01 kg
—	—	Ni	1.51E+00 kg
—	—	Pb	1.10E+01 kg
—	—	V	1.74E+01 kg
—	—	Zn	1.45E+01 kg
—	—	废水	9.77E+06 kg
—	—	COD	4.49E+02 kg
—	—	固体垃圾	7.61E+05 kg

4.3.5 燃气机组板块回收再利用阶段的材料分析

回收再利用环节的耗能情况见表 4-12。

表 4-12 设备单元废弃过程处理电能耗

回收物质	质量	回收百分比	回收能量输入	填埋能量输入	总能耗
钢材	31.661 t	85%	16.41 MJ	28.81 MJ	578.45 MJ
铜材	—	—	—	—	—
铝材	—	—	—	—	—

这里消耗的总能耗主要消耗的是电力，则此阶段的清单利用第三章节净电力生

产的清单可以计算出此环节的输入和排放清单，见表 4-13。

表 4-13 电力消耗的输入和输出清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	7.36E+01 kg	CO ₂	1.41E+02 kg
原油	1.43E+00 kg	SO ₂	1.29E+00 kg
天然气	9.18E-01 kg	NO _x	1.02E+00 kg
—	—	CO	2.01E-01 kg
—	—	CH ₄	4.27E-01 kg
—	—	NMVOC	6.36E-02 kg
—	—	Dust	2.62E+00 kg
—	—	As	2.61E-04 kg
—	—	Cd	1.66E-06 kg
—	—	Cr	2.21E-05 kg
—	—	Hg	1.14E-05 kg
—	—	Ni	3.27E-05 kg
—	—	Pb	2.29E-04 kg
—	—	V	3.75E-04 kg
—	—	Zn	3.12E-04 kg
—	—	废水	2.11E+02 kg
—	—	COD	9.69E-03 kg
—	—	固体垃圾	1.64E+01 kg

由于目前还没有关于处置 CCHP 系统的明确政策和准确数据，所以报废阶段的废弃物最后的掩埋处理过程，对环境所造成的污染破坏按照本文前面所述的进行清单计算。

因河北地区属于温带大陆性季风气候年降雨量小于 800 mm，按照集中式“物理化学+生物方法”填埋处理的相关规定方法计算^[66]，经公式十二计算得到 CCHP 系统中设备单元在报废阶段所产生的垃圾总量为 4.75 t，滤液产生量为 0.095 m³ 可以计算得到其污染物排放清单，见表 4-14 所示。

表 4-14 污染物排放清单

区域	污染物指标	单位	末端治理组合工艺类别	排污核算系数	总量
干旱-半湿润区 (降雨量<800 mm)	渗滤液量	产污系数: 0.02 m ³ /t 垃圾	—	—	—
	化学需氧量	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.06	5.70E-03
	氨氮	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.055	5.23E-03
	总磷	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00012	1.14E-05
	石油类	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.002	1.90E-04
	挥发酚	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00005	4.75E-06
	氰化物	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00008	7.60E-06
	总铬	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.0008	7.60E-05
	汞	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00001	9.50E-07
	镉	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00005	4.75E-06
	铅	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.0003	2.85E-05
	砷	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00007	6.65E-06

4.4 地埋换热器的全生命周期清单

4.4.1 资源开采阶段的材料分析

地源热泵系统在地源一侧包含 56 口垂直深度为 100 m 地热井^[69], 地埋管规格为管径 De32 mm、内壁厚度 3 mm 的 HDPE 材料, 水平管道采用的是管径为 De63 mm、内壁厚度 5.8 mm 的 HDPE, 其他材质的使用数量相对于 HDPE 管材的使用量很少可以忽略不计。水平埋管部分包裹了 20 mm 的橡塑保温材料, 材料见表 4-15。

表 4-15 地埋换热器耗材统计结果

材料类型	HDPE De32	HDPE De63
管道长度 (m)	22400	490
保温层体积 (m ³)	—	2.55
质量 (kg)	59.97	5

由地埋换热器的清单分析表可知地埋管的能源输入和污染物排放表，见表 4-16。

表 4-16 生产 HDPE 材料的生命周期清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原油	9.81E+01 kg	CO ₂	4.16E+02 kg
电力	5.85E+02 kWh	SO ₂	2.76E+00 kg
—	—	NO _x	1.30E-04 kg
—	—	C ₂ H ₄	1.31E-01 kg
—	—	废渣	3.18E+01 kg
—	—	废水	9.88E+02 kg

4.4.2 HDPE 管材加工阶段材料分析

表 4-17 加工 HDPE 的生命周期清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	6.49E+02 kg	CO ₂	1.24E+03 kg
原油	1.26E+01 kg	SO ₂	1.14E+01 kg
天然气	8.09E+00 kg	NO _x	9.00E+00 kg
—	—	CO	1.77E+00 kg
—	—	CH ₄	3.76E+00 kg
—	—	NM VOC	5.61E-01 kg
—	—	Dust	2.31E+01 kg
—	—	As	2.30E-03 kg
—	—	Cd	1.46E-05 kg
—	—	Cr	1.94E-04 kg
—	—	Hg	1.01E-04 kg
—	—	Ni	2.88E-04 kg
—	—	Pb	2.02E-03 kg
—	—	V	3.31E-03 kg
—	—	Zn	2.75E-03 kg
—	—	废水	1.86E+03 kg
—	—	COD	8.54E-02 kg
—	—	固体垃圾	1.45E+02 kg

通过表 4-15 得知 HDPE 管材 22890 m，橡塑保温层 2.55 m³。据实际企业咨询得知得出每米 HDPE 管的生产耗电量是 0.062 kwh，总计 1419.18 kwh。根据中国生产 1 kwh 电力得知其能源输入和污染物排放见表 4-17。

4.4.3 HDPE 管材运输阶段材料分析

其成品运输到安装地点的平均距离取 30 公里，则运输能耗和污染物排放量情况见表 4-18。

表 4-18 输送 HDPE 的生命周期清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
柴油	1.48E-01 kg	CO	1.74E-02 kg
—	—	CO ₂	4.07E-01 kg
—	—	PM _{2.5}	1.84E-03 kg
—	—	SO ₂	1.84E-02 kg
—	—	NO _x	6.16E-03 kg
—	—	NO ₂	1.25E-02 kg
—	—	CH ₄	2.79E-04 kg

4.4.4 HDPE 管材安装阶段材料分析

HDPE 管的安装施工过程是在其所有周期内对资源和环境影响贡献最大的阶段，此阶段主要考虑安装设备在使用过程中电力输入和相应的污染物排放的评价分析。

通过调研施工过程中钻机和泥浆泵的功率大小和施工时间得到了总的耗电量为 27081.6 kwh。所涉及到的设备用电量的计算见式（4-1）：

$$D_{\text{总}} = P_z \times H_z + P_n \times H_n \quad (4-1)$$

式中：

- $D_{\text{总}}$ ——HDPE 管安装总耗电量，kWh；
- P_z ——钻机额定功率，kW；
- P_n ——泥浆泵额定功率，kW
- H_z ——钻机总的施工时间，h；
- H_n ——泥浆泵总的施工时间，h。

表 4-19 安装过程中的能源输入和污染物排放清单

能源/原材料输入		废物排出	
类别	数量	类别	数量
原煤	1.24E+04 kg	CO ₂	2.38E+04 kg
原油	2.40E+02 kg	SO ₂	2.18E+02 kg
天然气	1.54E+02 kg	NO _x	1.72E+02 kg
—	—	CO	3.39E+01 kg
—	—	CH ₄	7.18E+01 kg
—	—	NM VOC	1.07E+01 kg
—	—	Dust	4.41E+02 kg
—	—	As	4.39E-02 kg
—	—	Cd	2.79E-04 kg
—	—	Cr	3.71E-03 kg
—	—	Hg	1.93E-03 kg
—	—	Ni	5.50E-03 kg
—	—	Pb	3.85E-02 kg
—	—	V	6.31E-02 kg
—	—	Zn	5.25E-02 kg
—	—	废水	3.55E+04 kg
—	—	COD	1.63E+00 kg
—	—	固体垃圾	2.76E+03 kg

4.4.5 运营管理阶段的材料分析

由于地埋管在运行操作期间使用的资源和能耗相对生产阶段很小，同时对环境的污染破坏的影响较小，因此在全生命周期分析中忽略地埋管换热器的使用和运行这个阶段。

4.4.6 回收再利用阶段的材料分析

HDPE 管材的回收百分比为 60%，剩余部分作为有害垃圾进行填埋，此部分单位质量管材的回收能量和单位污染物排放详见表 4-20 和表 4-21。此外不再考虑回收再利用的材料被运送至回收处理厂的过程影响。总的能量输入和污染物排放量见表 4-20 表 4-21 所示。

表 4-20 HDPE 的回收率和掩埋能耗表^[51]

回收物质	总重量	回收百分比	填埋能量输入	总能耗
HDPE	0.06497t	60%	28.81MJ/t	0.7487MJ

表 4-21 中国回收 1kg HDPE 的生命周期清单^[51]

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
电力	3.17E+00 MJ	二氧化碳	2.31E-04 t
水	3.28E-03 t	二氧化硫	2.56E-05 t
—	—	甲烷	4.00E-05 t
—	—	一氧化碳	1.28E-04 t
—	—	HC	3.85E-04 t
—	—	TSP	8.57E-04 t
—	—	废水	2.05E-04 t
—	—	固体垃圾	1.03E-06 t

经计算得知回收和掩埋 HDPE 使用电力的污染物排放见表 4-22、表 4-23。

表 4-22 回收 HDPE 能耗输入和输出清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
电力	3.43E+01 kwh	CO ₂	9.00E+00 kg
水	1.28E+02 kg	SO ₂	9.98E-01 kg
—	—	CH ₄	1.56E+00 kg
—	—	CO	4.99E+00 kg
—	—	HC	1.50E+01 kg
—	—	TSP	3.34E+01 kg
—	—	废水	7.99E+00 kg
—	—	固体垃圾	4.02E-02 kg

表 4-23 回收和掩埋消耗电能的输入和输出清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	1.57E+01 kg	CO ₂	3.01E+01 kg
原油	3.05E-01 kg	SO ₂	2.76E-01 kg
天然气	2.73E-01 kg	NO _x	2.18E-01 kg
—	—	CO	4.29E-02 kg
—	—	CH ₄	9.09E-02 kg
—	—	NMVOC	1.36E-02 kg
—	—	Dust	5.59E-01 kg
—	—	As	5.56E-05 kg
—	—	Cd	3.53E-07 kg
—	—	Cr	4.70E-06 kg
—	—	Hg	2.44E-06 kg
—	—	Ni	6.96E-06 kg
—	—	Pb	4.87E-05 kg
—	—	V	7.99E-05 kg
—	—	Zn	6.66E-05 kg
—	—	废水	4.49E+01 kg
—	—	COD	2.07E-03 kg
—	—	固体垃圾	3.50E+00 kg

回收 HDPE 材料的处理能耗包括可利用材料回收能耗和不可回收材料的处理过程能耗，掩埋废弃物的渗透污染物经计算可得，见表 4-24。

表 4-24 掩埋废弃物排放清单

区域	污染物指标	单位	末端治理组合工艺类别	排污核算系数	总量
降雨量 <800 mm)	渗滤液量	产污系数：0.02 m ³ /t 垃圾	—	—	—
	化学需氧量	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.06	3.12E-05
	氨氮	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.055	2.86E-05
	总磷	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00012	6.24E-08

(续表)

区域	污染物指标	单位	末端治理组合工艺类别	排污核算系数	总量
降雨量	渗滤液量	产污系数: 0.02	—	—	—
<800 mm)		m ³ /t 垃圾			
	石油类	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.002	1.04E-06
	挥发酚	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00005	2.60E-08
	氰化物	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00008	4.16E-08
	总铬	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.0008	4.16E-07
	汞	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00001	5.20E-09
	镉	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00005	2.60E-08
	铅	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.0003	1.56E-07
	砷	kg 渗滤液量	物理化学+生物方法	0.00007	3.64E-08

4.5 地源热泵机组的清单分析

4.5.1 GSHP 机组板块资源开采阶段的材料分析

对于作为辅助的地源热泵系统的评价分析同燃气机组板块的处理方式一样，选择系统中资源和能量输入较大的设备单体为研究对象，不考虑阀门、压力表等耗材较少的部件以及润滑油等液体使用，其主要的设备物性参数见表 4-25。此能源的消耗主要考虑电力的消耗^[70]。

表 4-25 地源热泵机组和相关设备基本参数

类别			参数
	机组型号		YEWS260HA50E-HP
	材质		铸铁、锻钢、碳钢、铜
	质量 (kg)		6750
	制冷量	TR	349
		kw	1227
	输入功率	kw	187.3
制冷工况	Cop	kw/kw	6.55
	蒸发器	水流量 (I/S)	58.6
		水压降(kpa)	84

(续表)

类别		参数
制热工况	冷凝器	水流量 (I/S)
		73.3
		水压降(kpa)
		91
	制热量	kw
		1188
	输入功率	kw
		260.8
地埋侧和负荷侧循环水泵	蒸发器	水流量 (I/S)
		73.3
		水压降(kpa)
		126
系统补水	冷凝器	水流量 (I/S)
		58.6
		水压降(kpa)
		57
地埋侧和负荷侧循环水泵	型号	100-160-IA
	材质	不锈钢、铜
	质量 (kg)	241
	功率(kw)	22
	流量(m³/h)	160
	扬程(m)	32
系统补水	型号	CDL(F)12-3
	质量 (kg)	39
	材质	不锈钢、铜
	功率(kw)	2.2
	流量(m³/h)	12
	扬程(m)	30

热泵系统包括 2 台螺杆地源热泵机组、地源侧水泵、需求侧水泵共计 6 台，补水 2 台。每个机组设备的功能性质决定了材质的要求，地源热泵主要使用钢材作为外壳以及支撑结构，铜由于本身具有极佳的导热性能和导电性能，主要被应用在热交换器、地源热泵内制冷剂管道以及电机等部位，铝由于在价格上较铜具有优势，而且在导热性能上同铜一样的导热性能，因此在热交换器中也被大量使用。根据地源热泵的物性参数，结合热泵结构文献资料^[67]整理出了各个部分的材料占比情况，其中热泵当中使用钢材、铜材和铝的百分比分别为 72.2%，27%，0.8%；根据对水泵生产企业的询问结合相关泵文献^[71]得到了铜、钢以及铝被用在水泵及电机中的占比为分别为 3.9%、95.9%、0.2%，详细数据见表 4-26。

表 4-26 地源热泵机组材料用量表

名称	钢材 (kg)	铜材 (kg)	铝材 (kg)
地源热泵	9747	3645	108
水泵	1461.516	59.436	3.048
合计	11208.516	3704.436	111.048

通过上表分析可以得到原材料开采阶段的清单分析，见表 4-27、4-28、4-39。

表 4-27 钢材的生产清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
电力	4.75E+04 kwh	Dust (气体)	5.04E+02 kg
燃油	3.78E+04 MJ	CO	1.23E+03 kg
原煤	4.26E+05 MJ	CO ₂	9.19E+04 kg
生铁	1.68E+04 kg	SO _x	5.72E+02 kg
石灰石	1.91E+04 kg	NO _x	1.79E+02 kg
氧气	7.62E+03 kg	碳氢化合物	2.13E+01 kg
原油	7.03E+04 MJ	CH ₄	2.02E+02 kg
黏土	7.06E+02 kg	H ₂ S	9.75E-01 kg
橄榄石	4.37E+02 kg	HCL	9.80E+00 kg
铁锰矿	2.69E+02 kg	悬浮物	1.35E+03 kg
白云石	1.57E+02 kg	NH ₄	1.11E+01 kg
氟石	1.46E+02 kg	COD	3.16E+00 kg
砂砾	6.28E+01 kg	BOD	5.60E-02 kg
斑脱土	5.38E+01 kg	酚	5.60E-02 kg
铝土矿	1.68E+01 kg	Na ⁺	4.26E+00 kg
氯化钠	3.03E+00 kg	矿渣	4.46E+04 kg
空气	5.60E-01 kg	工业混合废物	9.75E+03 kg
氮	1.12E-01 kg	粉尘、灰尘 (固体)	3.31E+03 kg
硫	3.36E+00 kg	—	—
水	3.81E+05 kg	—	—

表 4-28 铜材生产清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	1.06E+04 kg	CO ₂	6.82E+04 kg
电力	2.19E+04 kwh	SO ₂	4.82E+03 kg
重油	8.41E+02 kg	NO ₂	2.00E+02 kg
矿石	3.82E+05 kg	废水	1.50E+06 kg
硫酸	2.52E+04 kg	固体垃圾	8.45E+05 kg
石灰	5.33E+03 kg	—	—
镁砖	2.00E+02 kg	—	—
石英	2.67E+03 kg	—	—
铸铁球	6.48E+02 kg	—	—
循环水	1.24E+06 kg	—	—

表 4-29 铝材生产清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
铝土矿	4.74E+02 kg	HCL	2.67E-02 kg
原油	8.46E+01 kg	CO ₂	9.52E+02 kg
无烟煤	9.91E+01 kg	CO	3.42E-01 kg
褐煤	8.40E+01 kg	HF	6.66E-02 kg
天然气	7.22E+01 kg	NO _x	1.55E+00 kg
电力	1.67E+03 kwh	SO ₂	3.80E+00 kg
—	—	CH ₄	1.59E+00 kg
—	—	颗粒氟化物	6.11E-02 kg
—	—	多环芳烃	1.68E-02 kg
—	—	C ₂ F ₆	1.11E-03 kg
—	—	CF ₄	1.21E-02 kg
—	—	C ₂ H ₆	3.49E-02 kg
—	—	C ₃ H ₈	4.51E-02 kg

4.5.2 GSHP 机组板块制造整备阶段的材料分析

通过地源热泵机组相关制造企业走访调查可以得知主体部分的占比情况如下：压缩机的质量占整体机组质量的百分比为 70%，电机质量占总体质量百分比为 10%，冷凝器和蒸发器的质量占总质量百分比为 15%，剩余的 5%为其他部件所占百分比。

其中压缩机包含压缩转子和压缩定子两个部分，并通过企业和相关文献资料进行比对，最终确定此部分的耗电量为 90.78 kwh/kg^[72,73]，所以地源热泵机组中压缩机总的制造耗电量为 181.56 kwh/kg。电机在制造过程主要为电力、柴油、天然气，其中 3.0698 kwh/kg 来自电力直接消耗，0.641248 kwh/kg 来自天然气直接消耗，0.0823 kwh/kg 来自柴油的消耗^[74,75]；由于受时间和重要技术资料保密等的限制条件，对于热泵其他零部件加工能源输入用文献^[76]设备加工耗电指标 0.12 kwh/kg 进行计算，各部分质量见表 4-30。水泵的加工能源输入参考了文献^[28]资料数据，见表 4-31：

表 4-30 地源热泵机组各部分质量

机组组成部分	压缩机	电机	蒸发器、冷凝器	其他
质量（kg）	9450	1350	2025	675
加工能耗（KJ）	3.09E+09	1.84E+07	8.75E+05	2.92E+05

表 4-31 水泵输入能耗见下表

类别	质量（kg）	输入能耗（KJ）
循环水泵	1446	1.16E+06
补水泵	78	6.24E+04
总计	—	—

此阶段的总能耗为 3.11E+09 KJ。此过程消耗的主要为电能，即为 8.64E+05 kwh，污染物排放清单见表 4-32。

表 4-32 地源热泵和水泵的制造整備输入输出分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	3.95E+05 kg	二氧化碳	7.58E+05 kg
原油	7.67E+03 kg	二氧化硫	6.95E+03 kg
天然气	6.87E+03 m ³	氮氧化物	5.48E+03 kg
—	—	一氧化碳	1.08E+03 kg
—	—	甲烷	2.29E+03 kg
—	—	非甲烷挥发性有机物	3.41E+02 kg
—	—	气体粉尘	1.41E+04 kg
—	—	砷	1.40E+00 kg
—	—	镉	8.90E-03 kg
—	—	铬	1.18E-01 kg
—	—	汞	6.14E-02 kg

(续表)

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
—	—	镍	1.75E-01 kg
—	—	铅	1.23E+00 kg
—	—	钒	2.01E+00 kg
—	—	锌	1.68E+00 kg
—	—	废水	1.13E+06 kg
—	—	COD	5.20E+01 kg
—	—	固体垃圾	8.81E+04 kg

4.5.3 GSHP 机组板块成品输送阶段的材料分析

机组运输是指从原材料到安装地点，热泵机组从无锡市发出共计 1000 km，采用铁路运输，水泵采购本市水泵，平均运输距离同样取 30 km，采用公路运输方式。此阶段的能源输入和污染物排放清单见表 4-33、4-34。

表 4-33 铁路运输清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
煤	8.51E+05 kwh	CO	5.27E+02 kg
—	—	CO ₂	9.14E+04 kg
—	—	PM _{2.5}	5.40E+01 kg
—	—	SO ₂	8.78E+02 kg
—	—	NO _x	4.46E+02 kg
—	—	NO ₂	2.70E+01 kg
—	—	CH ₄	6.21E+02 kg

表 4-34 公路运输清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
柴油	4.06E+05 kwh	CO	4.03E+03 kg
—	—	CO ₂	9.42E+04 kg
—	—	PM _{2.5}	4.25E+02 kg
—	—	SO ₂	4.25E+03 kg
—	—	NO _x	1.42E+03 kg
—	—	NO ₂	2.89E+03 kg
—	—	CH ₄	6.45E+01 kg

4.5.4 GSHP 机组板块运营管理阶段的材料分析

地源热泵机组的运行期间主要消耗电力，本文仅考虑机房设备不包含末端风机盘管装置，所以地源热泵机组中常用的耗电设备包含热泵机组、水泵。假设整个地源热泵系统的寿命是 30 年，那么可以得到在 1 年周期内机组的运行能耗为 2589628 kwh，则在整个生命周期内的运行能耗为 7.77E+07 kwh，运行阶段清单见表 4-35。计算公式见式（4-2）：

$$S_{\text{总}} = S_1 + S_2 = \sum_{a=1}^{30} (P_{1a} \times H_{1a}) + \sum_{b=1}^{30} (P_{2b} \times H_{2b}) \quad (4-2)$$

式中：

$S_{\text{总}}$ ——总耗电量，kwh； S_1 、 S_2 ——分别为热泵机组和水泵 1 年的耗电量，kwh
 P_{1a} ——热泵机组的功率 kw； P_{2b} ——水泵功率，kw；
 H_{1a} ——热泵机组 1 年内运行的时间 h； H_{2b} ——水泵 1 年内运行的时间 h；
 a ——热泵机组的运行周期数； b ——水泵的运行周期数。

表 4-35 地源热泵机组运行阶段清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	7.42E+08 MJ	CO ₂	6.81E+07 kg
原油	2.89E+07 MJ	SO ₂	6.25E+05 kg
天然气	2.20E+07 MJ	NO _x	4.93E+05 kg
—	—	CO	9.71E+04 kg
—	—	CH ₄	2.06E+05 kg
—	—	NMVOC	3.07E+04 kg
—	—	Dust	1.27E+06 kg
—	—	As	1.26E+02 kg
—	—	Cd	8.00E-01 kg
—	—	Cr	1.06E+01 kg
—	—	Hg	5.52E+00 kg
—	—	Ni	1.58E+01 kg
—	—	Pb	1.10E+02 kg
—	—	V	1.81E+02 kg
—	—	Zn	1.51E+02 kg
—	—	废水	1.02E+08 kg
—	—	COD	4.68E+03 kg
—	—	固体垃圾	7.93E+06 kg

4.5.5 GSHP 机组板块回收再利用阶段材料分析

地源热泵机组和水泵的回收利用参照上文，整理得到见表 4-36。

表 4-36 地源热泵机组回收和掩埋能耗表

回收类型	总重量 (t)	回收率 (%)	回收能耗 (MJ/t)	掩埋能耗 (MJ/t)	总能耗 (MJ)
钢材	11.21	85	16.41	28.81	204.80
铜材	3.70	90	19.05	28.81	74.10
铝材	0.11	85	12.90	28.81	1.69

同样此阶段主要消耗的电力为 77.94 kwh，则生命周期能源输入和污染物排放见表 4-37：

表 4-37 回收和掩埋过程的输入和输出清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
原煤	7.45E+02 MJ	CO ₂	6.84E+01 kg
原油	2.89E+01 MJ	SO ₂	6.27E-01 kg
天然气	2.26E+01 MJ	NO _x	4.94E-01 kg
—	—	CO	9.74E-02 kg
—	—	CH ₄	2.07E-01 kg
—	—	NMVOC	3.08E-02 kg
—	—	Dust	1.27E-02 kg
—	—	As	1.26E-04 kg
—	—	Cd	8.03E-07 kg
—	—	Cr	1.07E-05 kg
—	—	Hg	5.54E-06 kg
—	—	Ni	1.58E-05 kg
—	—	Pb	1.11E-03 kg
—	—	V	1.82E-04 kg
—	—	Zn	1.51E-04 kg
—	—	废水	1.02E+02 kg
—	—	COD	4.69E-03 kg
—	—	固体垃圾	7.95E+00 kg

4.6 CCHP 系统燃料的清单分析

4.6.1 燃料资源开采阶段的材料分析

在运营管理阶段，能源输入和环境污染排放是由电力和天然气燃烧引起的。天然气的开采如同其他资源的开采一样，在开采阶段、输送阶段和使用阶段里也会对环境产生一系列的污染问题。所以考虑怎样在开采阶段以及使用天然气阶段中，找到既能有效的保护生态环境，又可以维持资源开发和环境保护两者的互利共赢的局面，就成了我们需要解决的一项重要问题。

依据天然气的工艺流程和在生命周期内的消耗总量，可以得知天然气开采阶段的资源和能源输入和输出清单分析，见表 4-38。

表 4-38 天然气开采阶段输入和污染物排放清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
钢材(设备、基建)	4.03E+05kg	CO ₂	3.02E+06 kg
水泥(基建)	2.02E+05 kg	SO ₂	7.70E+03 kg
水(钻井开采)	1.21E+06 kg	CH ₄	2.95E+02 kg
钢材(钢材生产总能耗)	2.29E+10 kJ	CO	2.91E+02 kg
水泥(水泥生产总能耗)	1.35E+09 kJ	NO _x	7.54E+03 kg
能耗合计(基建的钢材水泥生产过程)	8.38E+10 kJ	烟尘	3.70E+03 kg
标准煤(能耗折算为标准煤)	2.82E+06 kg	废液	2.30E+07 kg
—	—	固体垃圾	2.32E+05 kg

4.6.2 燃料输送阶段的材料分析

天然气的气源站到使用地点总距离为 3300 km，则资源输入和污染物排放清单见表 4-39。在天然气生产和运输过程中的钢材消耗和水泥消耗统计表见表 4-40、表 4-41。

表 4-39 天然气的运输阶段的清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
钢材消耗量(输送管道消耗)	3.55E+06 kg	CO	1.43E+03 kg
水泥消耗量(基建建设)	1.33E+06 kg	NO _x	3.87E+04 kg
钢材能耗(钢材制造过程能耗)	2.01E+11 KJ	CH ₄	1.58E+03 kg
水泥能耗(水泥制造过程能耗)	8.91E+09 KJ	烟尘	8.42E+02 kg
输气能耗(输送过程电耗和气耗)	6.52E+12 KJ	水污染物	2.81E+03 kg
标准煤(能耗折算为标准煤)	2.75E+08 kg	固体垃圾	8.11E+01 kg

表 4-40 钢材消耗清单

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
电力	1.68E+07 kwh	Dust（气体）	1.78E+05 kg
燃油	1.33E+07 MJ	CO	4.35E+05 kg
煤炭	1.50E+08 MJ	CO ₂	3.24E+07 kg
生铁	5.93E+06 kg	SO _x	2.01E+05 kg
石灰石	6.72E+06 kg	NO _x	6.32E+04 kg
氧气	2.69E+06 kg	碳氢化合物	7.51E+03 kg
原油	2.48E+07 MJ	甲烷	7.11E+04 kg
黏土	2.49E+05 kg	H ₂ S	3.44E+02 kg
橄榄石	1.54E+05 kg	HCL	3.45E+03 kg
铁锰矿	9.48E+04 kg	悬浮物	4.74E+05 kg
白云石	5.53E+04 kg	NH ₄	3.91E+03 kg
氟石	5.14E+04 kg	COD	1.11E+03 kg
砂砾	2.21E+04 kg	BOD	1.98E+01 kg
斑脱土	1.90E+04 kg	酚	1.98E+01 kg
铝土矿	5.93E+03 kg	Na ⁺	1.50E+03 kg
氯化钠	1.07E+03 kg	矿渣	1.57E+07 kg
空气	1.98E+02 kg	工业混合废物	3.44E+06 kg
氮	3.95E+01 kg	粉尘、灰尘	1.17E+06 kg
硫	1.19E+03 kg	—	—
水	1.34E+08 kg	—	—

表 4-41 水泥消耗清单分析

资源和能源	输入量	有害污染物	输出量
石灰石	1.68E+09 kg	CO ₂	1.24E+09 kg
黏土	3.03E+08 kg	SO ₂	7.06E+05 kg
铁粉	6.31E+07 kg	NO _x	3.71E+06 kg
石膏	7.66E+07 kg	粉尘	5.27E+05 kg
煤	1.44E+08 kg	COD	1.81E+04 kg
矿渣	1.91E+08 kg	油	5.15E+05 kg
电力	1.84E+08 KWh	CH ₄	1.44E+06 kg
—	—	Hg	1.67E+04 kg

4.7 本章小结

本章在 LCA 构建的生命周期模型基础之上结合天津一具体案例进行评价分析。具体包括天然气分布式能源系统的燃气内燃机发电机组的动力设备、余热回收设备、制热供冷设备、地源热泵机组的辅助动力设备以及天然气资源等以此作为研究对象。根据案例在一年内的电力和天然气的消耗情况以及向环境排放的污染物数量进行清单汇总，同时估算其在生命周期（假设 30 年）内的资源能源消耗和污染物排放的清单数据。

第 5 章 资源消耗和环境影响

这章就是利用生命周期影响评价中的标准化和加权方法对 CCHP 系统的清单数据进行资源消耗和环境影响两个方面的评价。资源消耗指的是能源消耗和自然矿产消耗的总称。环境影响是指对环境产生危害的物质，如二氧化碳、氮氧化物、硫化物等会进一步造成气温升高、酸雨、水体资源营养化等。资源消耗和环境影响分类的类别见表 5-1。

表 5-1 影响类型^[44]

资源耗竭	能源耗竭	全球性
	矿产（铁、铝、锰等）	全球性
	全球变暖（GWP）	全球性
	酸化（AP）	地区性
环境影响潜值	富营养化（EP）	地区性
	光化学氧化（POCP）	地区性
	固体垃圾	局地性
	烟尘和灰尘	局地性

在对数据进行资源消耗和环境影响计算时，首先需要选用标准值作为参考。对于资源消耗的基准是以一九九零年世界资源、能源的每人平均消费为计算标准，具体见表 5-2。

表 5-2 全球主要资源消耗的基准^[44]

名称	净消耗量 (kg/(人·a))	区域	名称	净消耗量 (kg/(人·a))	区域
油	592	全球	铜	1.7	全国
煤	574	全球	镍	0.18	全国
褐煤	254	全球	锰	1.8	全国
天然气	382	全球	铅	0.64	全国
铁	103	全球	锑	0.04	全国
铝	3.4	全球	木材 (m ³)	0.15	中国
锌	1.4	全球	淡水(m ³)	472	中国

接下来需要确定资源消耗的权重因子。每种资源的权重本身代表着每种物质在自然界储有量的相对丰富程度或者每种环境影响类型对气候变化的相对贡献大小，

所以标准化处理后计算结果乘以权重可以使得无实质意义的绝对标准化数值转变成可以相互比较的相对数值。权重小于一说明该资源的丰富；权重大于一说明该资源的紧缺。资源消耗和污染物影响类型的权重分别见表 5-3^[44]。

表 5-3 全球不可更新资源的权重

资源	可供应期 (a)	权重	资源	可供应期 (a)	权重
煤	170	0.006	铜	36	0.028
油	43	0.023	镍	50	0.020
天然气	60	0.017	锰	86	0.012
铁	120	0.008	铅	20	0.050
铝	200	0.005	锑	27	0.037
锌	20	0.050			

对于环境影响的基准采用标准人当量。以硫化物和氮氧化物形成的酸雨影响为例进行对此基准值说明。在计算标准值时要先求得酸雨的影响潜值，即实际排放的二氧化硫、氮氧化物和氨气分别于相应效应因子相乘，再将三种物质的影响潜值相加得到酸雨对此区域的影响潜值，见表 5-4^[44]。

表 5-4 1990 年中国酸化影响潜值

名称	1990 年排放量 (kt/a)	效应当量因子 EF (ac) (g SO ₂ eq./g)	影响潜值 EP (ac) (kt SO ₂ eq./a)
NH ₃	8918	1.88	16767
NO _x	8353	0.7	5847
SO ₂	17932	1	17932

最后用酸雨的影响潜值除当年的世界人口总数，最后得到酸化的环境基准值。其他环境影响类型基准值的计算方法与酸化潜值基准类似，不再进行表述。环境影响效应的基准值和权重大小分别见表 5-5^[44]。

表 5-5 不同影响效应的标准化基准和权重

影响类型	标准化基准 (kg/ (人·a))	权重
GWP	8.70E+03	8.30E-01
AP	3.60E+01	7.30 E-01
EP	6.20E+01	7.30 E-01
POCP	6.50E-01	5.30 E-01
固体垃圾	2.51E+02	6.20 E-01
气体粉尘	1.80E+01	6.10 E-01

5.1 资源耗竭计算

CCHP 系统在计算资源消耗系数时的计算步骤如下：（1）根据计算得到的 CCHP 系统清单数据利用第三章公式，即资源消耗量除以标准化基准得到标准化后的消耗量；（2）使用标准化后的数量乘以权重，可得到加权后的消耗量即为资源消耗系数。

5.2 各个阶段的资源耗竭系数

5.2.1 资源开采周期环节的消耗资源相对系数

表 5-6 资源开采环节的资源耗竭系数

资源	清单分析结果(kg)	标准化基准 (kg/(人·a))	权重	加权结果
煤	2.91E+06	5.74E+02	6.00E-03	3.04E+01
油	4.48E+03	5.92E+02	2.30E-02	1.74E-01
气	7.22E+01	3.82E+02	1.70E-02	3.21E-03
铁矿	6.02E+07	1.03E+02	8.00E-03	4.67E+03
铝矿	5.85E+03	3.40E+00	5.00E-03	8.60E+00
铁锰矿	8.62E+04	1.80E+00	1.20E-02	5.75E+02
合计	—	—	—	5.28E+03

经过上表进行计算后煤、金属矿等自然资源的相对消耗大小可以被资源消耗系数直观反映出来，见图 5-1。石灰石这类资源的使用量非常少，不再进行统计。从直接消耗量上来看（清单分析结果一栏）CCHP 系统设备在此周期内煤碳较燃油和天然气的消耗量最大，天然气的消耗量最小。铁矿石的资源开采量高于铁锰矿，位于第一位，而铁锰矿产和铝矿的开采分别是 8.62E+04、5.85E+03。通过加权处理后每种资源的对资源减少的贡献率来看铁矿资源的对资源耗竭贡献率最高，铁锰矿的贡献率高于铝以及煤炭，而铝消耗系数大于油，天然气对资源的耗竭贡献率最小，反映出我国的天然气储有量偏于劣势，所以不同的资源的权重结果在一定程度上反映了我国资源和能源结构。

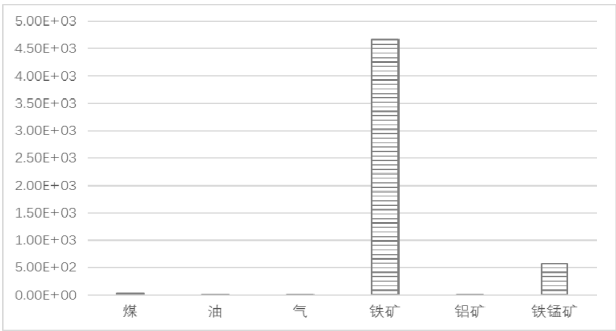


图 5-1 资源消耗的潜在影响

5.2.2 CCHP 系统制造整备环节的相关系数

表 5-7 制造整备环节的资源耗竭系数

资源	清单分析结果(kg)	标准化基准 (kg/(人·a))	权重	加权结果
煤	4.30E+05	5.74E+02	6.00E-03	4.49E+00
油	8.35E+03	5.92E+02	2.30E-02	3.24E-01
气	5.36E+03	3.82E+02	1.70E-02	2.39E-01
铁矿	2.82E+03	1.03E+02	8.00E-03	2.19E-01
合计	—	—	—	5.27E+00

在此周期内从资源的直接消耗量上看，煤的消耗量最大，其次是燃油和天然气，铁矿消耗量最小。经过加权处理后，对环境资源能源耗竭的贡献率的大小顺序依次是煤、油和天然气，铁矿的在此阶段的贡献率最小，因为此阶段消耗的能源主要是电力，电力的产生主要依靠火力发电，消耗更多的是煤炭、燃油等化石能源，所以二者的贡献率偏高，铁矿石的贡献率较低，如图 5-2 所示

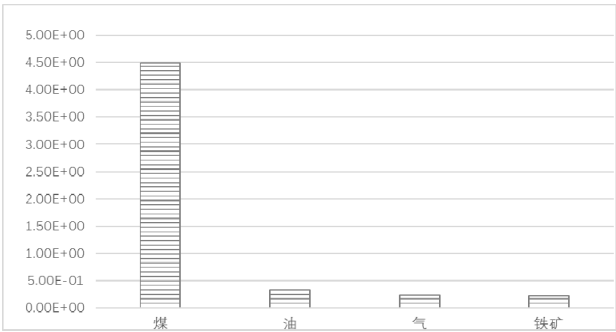


图 5-2 资源消耗的潜在影响

5.2.3 机组和燃料运输阶段资源耗竭系数表

表 5-8 成品运输环节的资源耗竭系数

资源	清单分析结果(kg)	标准化基准 (kg/(人·a))	权重	加权结果
煤	2.75E+08	5.74E+02	6.00E-03	2.88E+03
油	3.44E+04	5.92E+02	2.30E-02	1.34E+00
铁矿	6.01E+07	1.03E+02	8.00E-03	4.67E+03
铝矿	5.33E+03	3.40E+00	5.00E-03	7.83E+00
铁锰矿	8.52E+04	1.80E+00	1.20E-02	5.68E+02
合计	—	—	—	8.13E+03

在设备运输阶段分析看，能源的使用量最多的是煤炭资源，矿产资源的使用量最多的是铁矿和铁锰矿，铝矿的使用量最小。经过加权处理，这几种能源资源对环

境的资源耗竭贡献率最高的是铁矿和煤炭，其次是铝矿，最小的是燃油。因为在运输过程中主要天然气资源主要依靠管道运输，在管道的施工中钢材的消耗量最多，其次是机组的运输主要依靠铁路，所以煤炭发电被更多用于铁路运输，公路的运输较少，所以燃油的相对贡献系数较低，如图 5-3 所示

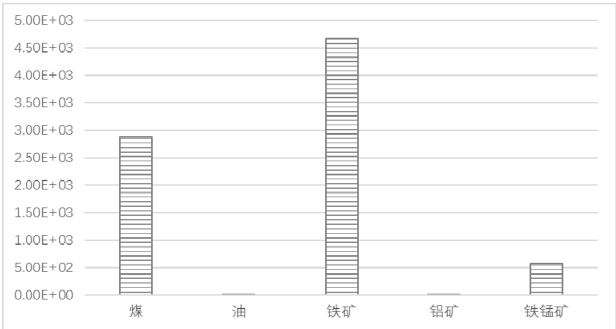


图 5-3 资源消耗的潜在影响

5.2.4 机组运行阶段资源耗竭系数表

表 5-9 机组运行环节的资源耗竭系数

资源	清单分析结果(kg)	标准化基准 (kg/(人·a))	权重	加权结果
煤	3.41E+06	5.74E+02	6.00E-03	3.56E+01
油	6.63E+04	5.92E+02	2.30E-02	2.57E+00
气	3.93E+08	3.82E+02	1.70E-02	1.75E+04
合计	—	—	—	1.75E+04

分析以上图表可以看出，在能源的使用数量最大的是天然气，燃油的使用量最小。经过加权后的对环境的资源耗竭系数的来看，天然气的消耗量相比其他两种资源贡献率较高，贡献率最低的是燃油。因为在此阶段，主要是依靠燃烧天然气发电来满足用户的电负荷，其次是买入少量的电网电力作为补充，所以天然气的消耗量对环境资源耗竭的贡献最大，如图 5-4 所示

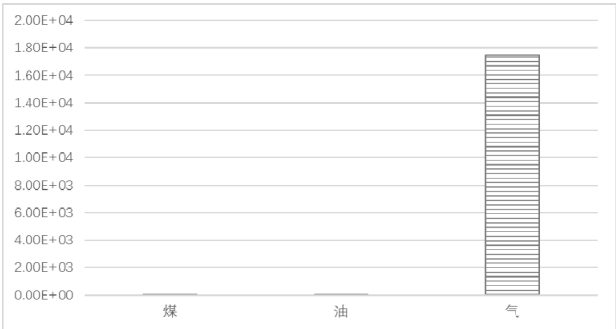


图 5-4 资源消耗的潜在影响

5.2.5 机组废弃阶段资源耗竭系数表

表 5-10 回收再利用环节的资源耗竭系数

资源	清单分析结果(kg)	标准化基准 (kg/(人·a))	权重	加权结果
煤	1.25E+02	5.74E+02	6.00E-03	1.31E-03
油	9.97E-01	5.92E+02	2.30E-02	3.87E-05
气	1.64E+00	3.82E+02	1.70E-02	7.28E-05
合计	—	—	—	1.42E-03

在此阶段主要以电力消耗为主，可以看出煤资源使用量最大，天然气使用量低于煤高于燃油的使用量。经过加权处理后，对环境的资源消耗产生压力的大小排序是煤、天然气，燃油的贡献率最小，如图 5-5 所示

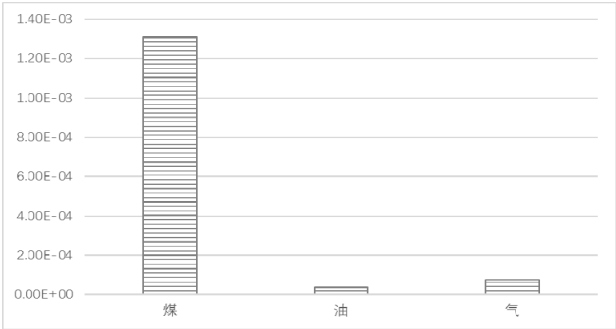


图 5-5 资源消耗的潜在影响

根据以上五个阶段分析可以得知总的资源相对贡献值依次为 5.28E+03、5.27E+00、8.13E+03、1.75E+04 和 1.42E-03，由此可见对环境资源能源耗竭贡献最大是机组运行环节，其次是机组和燃料运输环节、资源开采环节和制造整备环节，最小的是机组废弃环节。原因在于机组运行环节消耗的电量的天然气以及电力，而部分电力又是通过火力发电获得，因此对整体环境的资源能源耗竭贡献值最多；而设备废弃阶段消耗了少量的电力，则相应的耗竭值也就越低。

5.3 环境影响计算

对于环境影响系数的确定需要先计算每种的气候效应的影响潜值，其计算方法是：

- 1) 每种污染物排放量乘以各自的效应因子，此时的结果是各自的绝对量
- 2) 将同一类的影响潜值加和并除此种影响类型的基准值；
- 3) 第三，标准化后的结构乘以相应的权重。其结果就是有害污染物排放效应影响系数，环境影响系数是具有比较意义的相对量。

下面分别给出了不同环境影响效应的当量因子^[44]。

(1) 全球变暖

由于二氧化碳、一氧化碳、甲烷等温室气体与全球变暖有着紧密的联系，但是每种物质对全球变暖的贡献程度不同，各自的效应当量因子见表 5-11。

表 5-11 GWP 相关效应当量系数

物质类别	总排放量	效应当量因子	环境影响潜值
CO ₂	—	1	—
CH ₄	—	25	—
NO _x	—	320	—
CO	—	2	—

(2) 酸化效应

表 5-12 AP 相关效应当量系数

物质类别	总排放量	效应当量因子	环境影响潜值
NH ₃	—	1.88	—
HCL	—	0.88	—
N ₂ O	—	1.07	—
SO ₂	—	1	—
SO _x	—	1	—
H ₂ S	—	1.88	—
NO _x	—	0.7	—

(3) 水体营养化

表 5-13 EP 相关效应当量系数

物质类别	总排放量	效应当量因子	环境影响潜值
COD	—	0.022	—
NH ₄	—	0.33	—
总氮	—	0.42	—
PO ₄ ⁻	—	1	—
NO ₃ ⁻	—	0.1	—
CO	—	2	—

(4) 光化学氧化影响

表 5-14 POCP 相关效应当量系数

物质类别	总排放量	效应当量因子	环境影响潜值
CHCl ₃	—	0.021	—
C ₂ H ₂	—	0.168	—
PAHs	—	0.761	—
C ₂ H ₄	—	1	—
CH ₄	—	0.007	—
酚	—	0.761	—
C _x H _y	—	0.021	—
CCl ₄	—	0.021	—

(5) 固体垃圾

表 5-15 固体垃圾相关效应当量系数

物质类别	总排放量	效应当量因子	环境影响潜值
残渣	—	1	—
固体物	—	1	—

(6) 气体粉尘

表 5-16 气体粉尘相关效应当量系数

物质类别	总排放量	效应当量因子	环境影响潜值
烟尘	—	1	—
灰尘	—	1	—
可吸入颗粒	—	1	—

5.4 各个阶段的环境影响负荷

5.4.1 CCHP 系统资源开采阶段影响负荷

根据第四章整理出的 CCHP 系统在资源开采环节的污染物输出大小，可以计算得到此阶段的环境负荷，见表 5-17。

表 5-17 资源开采环节的污染环境影响负荷

影响类型	影响潜值	影响物质	基准值	权重	加权后影响 潜值
GWP	6.10E+06	CCL ₄ 、CO ₂ 、CH ₄	8.70E+03 kg CO ₂ eq/（人 'a）	0.83	5.82E+02
AP	2.08E+04	SO ₂ 、Sox、NO _x 、HCL	3.60E+01 kg SO ₂ eq/（人 'a）	0.73	4.21E+02
EP	1.11E+04	NH ₄ 、PO ₄ ³⁻	6.20E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq/（人 'a）	0.73	1.31E+02
POCP	4.02E+01	NMVOC、CH ₄ 、C ₂ H ₄	6.50E-01 kg C ₂ H ₄ eq/（人 'a）	0.53	3.28E+01
固体垃圾	1.29E+06	—	2.51E+02 kg 固废 eq/（人 'a）	0.62	3.19E+03
气体粉尘	2.21E+04	—	1.80E+01 kg 气废 eq/（人 'a）	0.61	7.49E+02
合计	—	—	—	—	5.10E+03

CCHP 系统资源开采环节中仅从污染物的排放量来看，引起全球变暖排放的污染物最多，其次是固体垃圾，最小的是引起光化学臭氧合成的污染物。经过加权来看，对环境破坏最严重的是固体垃圾，占比为 63.45%，其他污染物贡献值的大小顺序依次是气体粉尘、全球变暖、酸化、水体营养化和光化学臭氧合成。在这些影响类型中全球变暖属于对全球性气候的影响，固体垃圾为局地性影响，反映出局地性环境影响大于全球性环境影响。如图 5-6 所示。

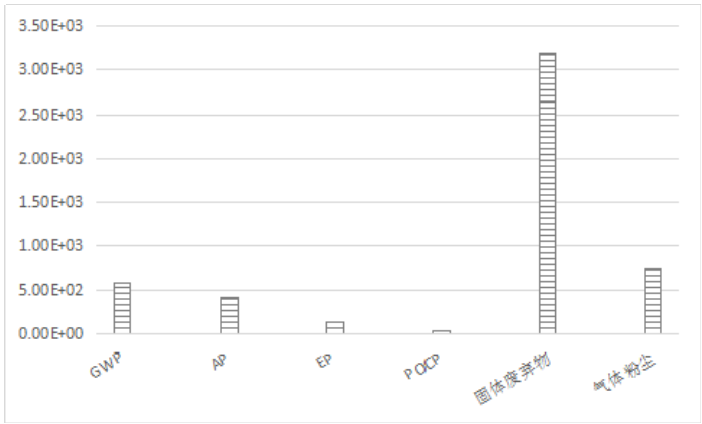


图 5-6 资源开采环节不同污染物对环境影响负荷值

5.4.2 CCHP 系统制造整备阶段的影响负荷

表 5-18 制造整备环节的污染环境影响负荷

影响类型	影响潜值	影响物质	基准值	权重	加权后影响潜值
GWP	2.80E+06	CCL4、CO ₂ 、CH ₄	8.70E+03 kg CO ₂ eq/（人'a）	0.83	2.67E+02
AP	1.17E+04	SO ₂ 、Sox、NOx、HCL	3.60E+01 kg SO ₂ eq/（人'a）	0.73	2.38E+02
EP	8.06E+03	NH ₄ 、PO ₄ ³⁻	6.20E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq/（人'a）	0.73	9.49E+01
POCP	1.74E+01	NMVOC、CH ₄ 、C ₂ H ₄	6.50E-01 kg C ₂ H ₄ eq/（人'a）	0.53	1.42E+01
固体垃圾	9.59E+04	—	251	0.62	2.37E+02
气体粉尘	1.53E+04	—	18	0.61	5.19E+02
合计	—	—	—	—	1.37E+03

从系统制造整备环节的直接排放污染物数量的结果看，引起全球变暖的污染物排放量最高，其次依次为固体垃圾、气体粉尘、酸化、富营养化和光化学臭氧合成。从最后的加权结果分析，对环境损害最严重的是气体粉尘所造成当地环境质量下降的影响最大，是造成当地空气质量下降并影响人类居住环境和健康的重要原因，其次是对全球变暖的影响，两者的对环境的影响比例分别为 37.86%、19.50%。其他环境影响严重性的比例大小分别是酸化效应占比 17.38%，固体垃圾占比为 17.30%，富营养化占比为 6.93%，光化学臭氧合成占比为 1.04%，所以此环节对于当地环境的生态质量影响比全球气候变化的影响更大，如图 5-7 所示

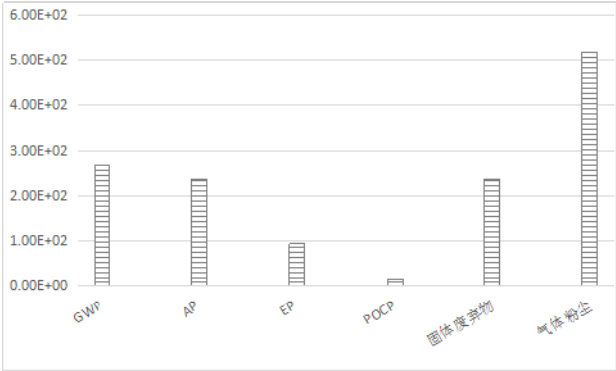


图 5-7 制造整备环节不同污染物对环境影响负荷值

5.4.3 CCHP 系统成品输送阶段的影响负荷

表 5-19 成品运输环节的污染环境影响负荷

影响类型	影响潜值	影响物质	基准值	权重	加权后影响潜值
GWP	1.32E+07	CCL ₄ 、CO ₂ 、CH ₄	8.70E+03 kg CO ₂ eq/（人'a）	0.83	1.26E+03
AP	3.67E+04	SO ₂ 、Sox、NO _x 、HCL	3.60E+01 kg SO ₂ eq/（人'a）	0.73	7.44E+02
EP	5.48E+04	NH ₄ 、PO ₄ ³⁻	6.20E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq/（人'a）	0.73	6.45E+02
POCP	1.59E+01	NMVOC、CH ₄ 、C ₂ H ₄	6.50E-01 kg C ₂ H ₄ eq/（人'a）	0.53	1.30E+01
固体垃圾	8.11E+01	—	251	0.62	2.00E-01
气体粉尘	1.32E+03	—	18	0.61	4.47E+01
合计	—	—	—	—	2.71E+03

从机组和燃料运输环节不同污染物排放量的结果表明，引起全球变暖的污染物排放量最多，其次是引起水体富营养化和酸雨的相关污染物排放，最小的是引起光化学臭氧合成的污染物排放量。通过加权分析可以看出对环境的破坏最严重的是全球变暖，占比为 46.53%，其次依次为酸化效应、富营养化、气体粉尘、光化学臭氧合成和固体垃圾。全球性环境影响大于局地性环境影响，区域性环境影响最弱，如图 5-8 所示

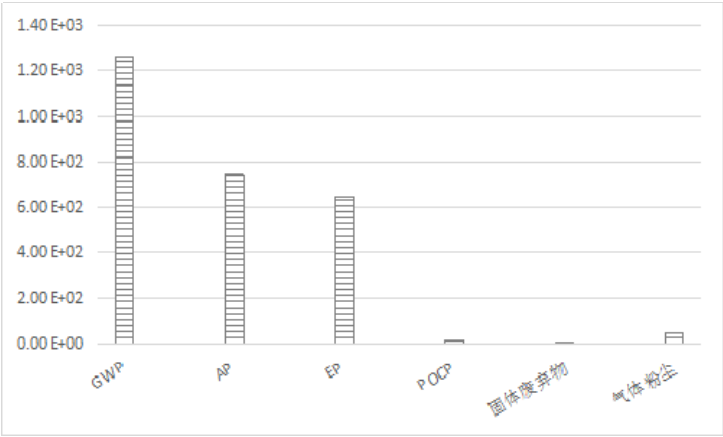


图 5-8 机组和燃料运输环节不同污染物对环境影响负荷值

5.4.4 CCHP 系统运营管理阶段的影响负荷

表 5-20 运营管理环节的污染环境影响负荷

影响类型	影响潜值	影响物质	基准值	权重	加权后影响潜值
GWP	5.01E+07	CCL ₄ 、CO ₂ 、CH ₄	8.70E+03 kg CO ₂ eq/（人'a）	0.83	4.78E+03
AP	5.10E+05	SO ₂ 、Sox、NO _x 、HCL	3.60E+01 kg SO ₂ eq/（人'a）	0.73	1.03E+04
EP	6.77E+04	NH ₄ 、PO ₄ ³⁻	6.20E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq/（人'a）	0.73	7.97E+02
POCP	1.40E+02	NMVOC、CH ₄ 、C ₂ H ₄	6.50E-01 kg C ₂ H ₄ eq/（人'a）	0.53	1.14E+02
固体垃圾	7.61E+05	—	251	0.62	1.88E+03
气体粉尘	1.22E+05	—	18	0.61	4.13E+03
合计	—	—	—	—	2.20E+04

从系统运行的污染物排放量的结果分析看出，引起全球变暖的污染物排放量高于固体垃圾的排放量，其次依次为酸雨污染物排放和气体粉尘，最小的是被引起的光化学臭氧合成污染物排放。加权后得出酸化的相关污染物排放是最重要的环境影响，占比为 46.81%，其次依次为全球变暖、气体粉尘、固体垃圾、富营养化和光化学臭氧合成。此环节的区域性影响较高，如图 5-9 所示

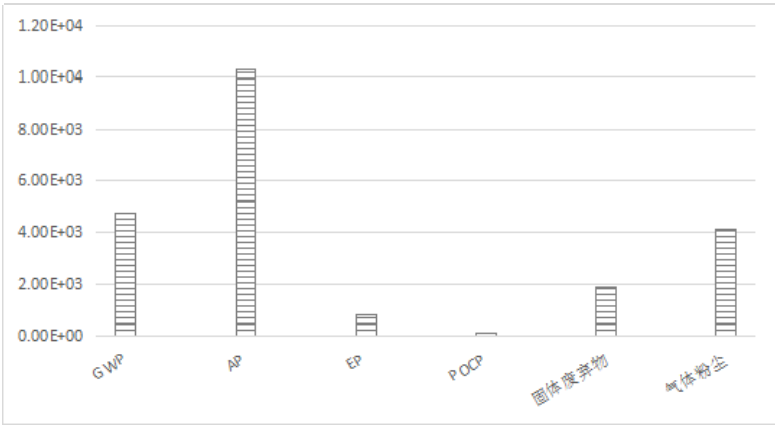


图 5-9 系统运行环节不同污染物对环境影响负荷值

5.4.5 CCHP 系统回收再利用阶段的影响负荷

表 5-21 回收再利用环节的污染环境影响负荷

影响类型	影响潜值	影响物质	基准值	权重	加权后影响潜值
GWP	8.71E+02	CCL ₄ 、CO ₂ 、CH ₄	8.70E+03 kg CO ₂ eq/（人·a）	0.83	8.31E-02
AP	4.41E+00	SO ₂ 、Sox、NO _x 、HCL	3.60E+01 kg SO ₂ eq/（人·a）	0.73	8.94E-02
EP	2.34E+00	NH ₄ 、PO ₄ ³⁻	6.20E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq/（人·a）	0.73	7.76E-02
POCP	1.60E-02	NMVOC、CH ₄ 、C ₂ H ₄	6.50E-01 kg C ₂ H ₄ eq/（人·a）	0.53	1.30E-02
固体垃圾	5.78E+01	—	251	0.62	1.43E-01
气体粉尘	4.45E+00	—	18	0.61	1.51E-01
合计	—	—	—	—	5.57E-01

从系统回收再利用环节的不同污染物排放来看，引起全球变暖的污染物排放量最多，其次依次为固体垃圾、气体粉尘、酸化效应、富营养化和光化学臭氧合成。加权后得出气体粉尘排放对环境污染影响最严重，占比为 27.09%，其次依次为固体垃圾、酸化效应、全球变暖、富营养化和光化学臭氧合成。此环节的局地环境影响大于全球环境的影响，如图 5-10 所示

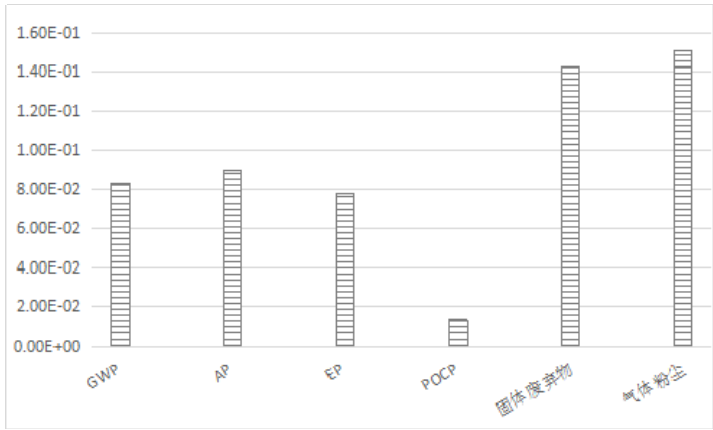


图 5-10 系统回收再利用环节不同污染物对环境影响负荷值

经以上分析，由此可以得出五个环节中对环境产生影响负荷总值依次为

5.10E+03、1.37E+03、2.71E+03、2.20E+04、5.57E-01。其中对环境破坏最严重的是系统运行环节，其次为资源开采周期环节和成品输送环节，最小的环境影响是系统回收再利用环节。原因在于系统运行和成品输送环节消耗了大量的天然气和用于开采矿石所消耗的电力引起的更多的污染物排放。

5.5 CCHP 系统与火力发电的比较

根据以上的分析，可以得知在 CCHP 系统的在全生命周期环节中的能量输入和污染物排放对环境产生不同程度的影响，为了更好的证明天然气分布式 CCHP 系统产生的环境效应，将于传统的火力发电在 30 年内为建筑物供能所产生的环境效应作对比。

火力具有是能量密集的特点，多用于电厂产电，在中国大多区域中电能的来源几乎来自于火力发电，而用于驱动的煤炭资源供应是火力发电生命周期的重要的组成部分。因此，对于火力发电的生命周期的研究重要的是对包括煤炭，石油和天然气等能源的开采，加工，运输和使用的环节，在这里并不考虑相关的制造加工的电力设备的生命周期内产生的能耗和有害污染物排放。本文的火力发电相关统计数据来自于中国国家统计局编制^[77]。

表 5-22 火力发电生命周期与 CCHP 系统清单表

资源和污染物	火力发电		CCHP	环境效益	相对减排量/kg
	kg/kwh	总量/kg	总量/kg		
标煤	6.04E+00	1.05E+09	3.29E+08	+	-7.17E+08
铝土矿 ^a	1.72E-10	2.98E-02	5.93E+03	-	5.93E+03
铁矿石	1.50E-07	2.60E+01	6.02E+06	-	6.02E+06
白云石	2.95E-10	5.10E-02	5.53E+04	-	5.53E+04
石灰石	6.70E-08	1.16E+01	1.69E+09	-	1.69E+09
CO2	1.04E+00	1.80E+08	3.66E+07	+	-1.43E+08
PM	9.24E-03	1.60E+06	1.27E+05	+	-1.47E+06
N2O	1.19E-05	2.06E+03	1.61E+01	+	-2.04E+03
CO	2.04E-02	3.53E+06	1.85E+04	+	-3.51E+06
CH4	1.56E-02	2.70E+06	2.19E+04	+	-2.68E+06
NOx	3.72E+00	6.44E+08	9.63E+04	+	-6.44E+08
SO2	8.07E-03	1.40E+06	4.83E+05	+	-9.14E+05

表中的正负号代表此环节的环境效益好和差，可以分析得出在主要的资源消耗和有害污染物排放种类中,CCHP 和电网匹配结合的模式其消耗的能源和相关污染物

的排放量远远低于纯电网发电所消耗的资源 and 有害污染物的排放，同时也看出在矿产资源的消耗上 CCHP 系统使用的矿产资源更多，原因是目前我国的天然气的开采和运输过程中主要依靠天然气管道运输，极少量用于船舶运输，因此在天然气管道建设和气田建设中使用了大量的钢材和水泥，而这些主材对于铁矿、铝矿和石灰石等资源需求更多，但是这仅是从一次投入来看，当气田建设和管道建设完成后，其对上述资源的消耗量较燃煤发电来讲会极大减少。综之，天然气分布式 CCHP 系统的在资源能源消耗和污染物气体排放方面所产生的环境效益比火力发电均有不错的优势。

5.6 本章小结

本章根据清单分析结果对清单数据进行分类、标准化和加权处理。在分类和标准化之后的清单数据只是绝对量并不能代表相对大小，所以需要根据当量因子进行加权处理。根据资源耗竭和环境影响的计算步骤得到了在不同阶段的资源耗竭系数和环境影响值，并对影响值大的某一物质或某一阶段所产生的原因进行分析，最后以生命周期内 CCHP 以天然气开采、运输和燃烧与火力发电的煤炭开采、运输和燃烧进行了比较。

结 论

本论文以中心生态城的 CCHP 为实际案例,使用 LCA 评价方法对 CCHP 系统进行了评价模型的建立,并依据模型对其在五个周期环节进行了自然资源消耗量和污染物排放引起的环境影响的研究。研究结果表现为以下几个方面:

1) 使用 LCA 方法为天然气分布式 CCHP 系统建立了生命周期评价模型,并综合考虑了时间和所处地域条件的限制下,通过对相关设备制造企业的调研咨询和翻阅整理相关生命周期数据库的公开资料等方法,建立了燃气机组、地源热泵机组以及天然气燃料所有周期内的生命材料数据。

2) 在资源开采周期环节对自然资源损耗中,铁矿产的相对消耗系数占到此阶段的总资源消耗的 88.38%,侧面反映了铁矿资源在我国资源存有量中优势明显,而铁锰矿产资源的相对贡献为 10.88%,煤矿和铝矿产的相对贡献占比均不超过 1.00%,说明在本周期中对我国的铝矿资源和煤炭耗竭量几乎不存在影响。在污染排放引起的环境恶化分析中看出固体垃圾贡献百分比为 62.45%,气体粉尘和全球变暖对环境恶化的相对贡献率为 14.68%和 11.41%,而对其他类型的气候变化贡献均不超过 9.00%,尤其对光化学臭氧合成的影响程度最低,占比为 0.64%。

3) 在制造整備周期环节中,从资源消耗系数方面看煤碳的损耗系数值高于燃油和天然气能源的贡献值,相对贡献率分别为 85.17%、6.15%和 4.53%,铁矿的贡献系数最小,说明此阶段以使用电力生产为主。在污染排放引起的环境恶化分析中看出气体粉尘对于造成当地环境质量下降的影响最大,占比为 37.86%,主要造成当地空气质量下降并影响人类居住环境和健康的重要原因,其次是对全球变暖的影响、酸化效应以及固体垃圾的影响,占比分别为 19.50%、17.38%和 17.30%,其他对环境损害影响最小的是光化学臭氧合成,贡献值为 1.04%,说明在局部区域更容易出现有气体粉尘而导致的雾霾等恶劣天气。

4) 在成品运输周期环节中,资源能源的消耗系数的大小排序是铁矿、煤碳和铁锰矿,对资源的消耗程度的贡献比例分别是 57.46%、35.44%和 6.99%,燃油的消耗量最小,说明在此环节主要是在天然气在输送中消耗了较多的钢材等相关材料;在污染排放引起的环境恶化分析中看出对全球变暖的贡献占比为 46.53%,对酸化效应和 水体营养化的贡献比例分别为 27.47%和 23.86%,由固体垃圾产生的环境损害影响最小。

5) 在运营管理周期环节中,从资源消耗系数方面看天然气的对系统运行贡献值最大,燃油的贡献值最低,仅为 0.01%。在污染排放引起的环境恶化分析中严重破坏环境的是酸化,占比为 46.81%,而对全球变暖和气体粉尘的贡献比例分别为 21.72%和

18.79%，水体营养化和光化学臭氧合成的影响程度是最小，建议在运行期间对二氧化碳的排放和二氧化硫等物质应该进行碳捕捉等措施以降低对气候的影响。

6) 在回收再利用周期环节中，从资源消耗系数方面看不同资源贡献值大小排序是煤碳、天然气，燃油的贡献系数最小。在污染排放引起的环境恶化分析中看出气体粉尘对环境破坏程度最大，其次依次为固体垃圾、酸化、全球变暖、水体营养化和光化学臭氧合成。

7) 从整个周期内的资源影响来看以运行管理及成品输送环节的资源 and 能源消耗占 CCHP 系统生命周期总能耗比重的最大，分别为 56.66%和 26.25%，最小的阶段为系统回收再利用环节；从整个周期内的对环境影响破坏来看依次是运营管理环节占 70.56%，资源开采阶段占 16.36%，成品运输环节所占比例为 8.68%，回收再利用阶段所占比例最少。从整个周期内所有被使用的资源对自然矿产存储量耗竭来看天然气资源的和铁矿产资源的相对消耗系数最高，占到总资源贡献中的 56.53%和 30.17%，燃油和铝矿的消耗系数最小，占总资源贡献的 0.01%和 0.05%；从整个周期内所有污染物对环境影响贡献来看对酸化效应和全球变暖的影响在 CCHP 系统生命周期环境影响所占比例较高，分别为 37.53%和 22.09%，对气体粉尘和固体垃圾的贡献比例分别为 17.47%和 17.01%，对光化学臭氧合成贡献比例最少。

8) 最后通过将 CCHP 系统中天然气在开采、运输、燃烧与传统火力发电涉及大煤炭开采、运输和燃烧的周期比较得出，CCHP 和电网匹配结合的模式其消耗的能源和相关污染物的排放量远远低于纯电网发电所消耗的资源 and 有害污染物的排放，同时也看出在矿产资源的消耗上如铁矿、白云石、铝矿等，CCHP 系统使用的更多，但是从长远来看，当气田建设和管道建设完成后，其对上述资源的消耗量较燃煤发电来讲会极大减少，相比之下，CCHP 系统优势更胜一筹。

本文不足与展望

LCA 理论模型分析手段在我国尚处于发展期，各种材料的详细清单数据并不是很完善，相关的高质量文献资料相对缺乏，尤其对于在中国蓬勃发展不久的 CCHP 系统材料清单更是不足，同时因作者学识能力有限，对于下一步的工作内容还有许多，主要有：

1) 本文在分析 CCHP 系统时主要分析资源消耗和不同的环境危害情况，并没有考虑其在生命周期内的经济效益，并与其它形式的能用利用系统进行经济和环境效益上的优势比较。

2) 本文受时间区域等限制，在数据整理方面还不是什么完善，下一步应该更加细化系统材料用量，得到更加确切的清单资料，使得对于 CCHP 生命周期评价模型更加完善，能够满足不同条件下的评价要求。

参考文献

- [1] 中国建筑节能协会能耗统计专委会.中国建筑能耗研究报告.北京,2018
- [2] 2018 年 BP 世界能源统计年鉴
- [3] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴.北京:中国统计出版社,2018
- [4] 杨颖. 太阳能与天然气互补的冷热电联供系统研究[华北电力大学硕士论文].北京:华北电力大学,2017
- [5] M FANI, A SADREDDIN. Solar assisted CCHP system, energetic, economic and environmental analysis, case study: Educational office buildings. *Energy & Buildings*, 2017, 136:100-109
- [6] 杨干,翟晓强,郑春元,等.国内冷热电联供系统现状和发展趋势. *化工学报*,2015,66 (S2) :1-9
- [7] 吴金,崔亚蕾,孙仁金.天然气热电联产项目经济效益评价. *资源与产业*,2019,21(02):95-103.
- [8] 李树田. 国内大型燃气轮机发展历程及运行综述. *浙江电力*,2012,31 (12): 75-78
- [9] M. PEHNT. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 2006, 31 (1): 55-71
- [10] D. MARAVER, A. SIN, F. SEBASTIÁN, et al. Environmental assessment of CCHP (combined cooling heating and power) systems based on biomass combustion in comparison to conventional generation. *Energy*. 2013, (57): 17-23
- [11] L. CIOCCOLANTI, S. R. HAMEDANI, M. VILLARINIB. Environmental and energy assessment of a small-scale solar Organic Rankine Cycle trigeneration system based on Compound Parabolic Collectors. *Energy Conversion and Management*, 2019, (198): 11829
- [12] M. PEHNT. Environmental impacts of distributed energy systems—the case of micro cogeneration. *Environmental Science and Policy*, 2008,11 (1): 25-37
- [13] C. CHEVALIER, F. MEUNIER. Environmental assessment of biogas co- or tri-generation units by life cycle analysis methodology. *Applied Thermal Engineering*, 2005,25 (17–18) : 3025-3041
- [14] G. D. MARCOBERARDINO, G. MANZOLINI, C. GUIGNARD, et al. Optimization of a micro-CHP system based on polymer electrolyte membrane fuel cell and membrane reactor from economic and life cycle assessment point of view. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2018, (131): 70-83
- [15] I. STAFFELL, A. INGRAM. Life cycle assessment of an alkaline fuel cell CHP system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35 (6): 2491-2505
- [16] C. Y. LI, J. Y. WU, C. CHAVASINT, et al. Multi-criteria optimization for a biomass gasification-integrated combined cooling, heating, and power system based on life-cycle assessment. *Energy Conversion and Management*, 2018, (178): 383-399

- [17] S. CASERINI, S. LIVIO, M. GIUGLIANO, et al. LCA of domestic and centralized biomass combustion: the case of Lombardy (Italy). *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34 (4): 474-482
- [18] M. KIMMING, C. SUNDBERG, Å. NORDBERG, et al. Biomass from agriculture in small-scale combined heat and power plants – a comparative life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35 (4): 1572-1581
- [19] E. BUONOCORE, P. P. FRANZESE, S. ULGIATI. Assessing the environmental performance and sustainability of bioenergy production in Sweden: a life cycle assessment perspective. *Energy*, 2012, 37 (1): 69-78
- [20] M. CARVALHO, L. M. SERRA, M. A. LOZANO. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy*, 2011, 36 (6): 3779-3790
- [21] P. J. MAGO, A. K. HUEFFED. Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies. *Energy and Buildings*, 2010, 42 (10) : 1628-1636
- [22] N. CHAIYAT, S. CHAONGEW, P. ONDOKMAI, et al. Levelized energy and exergy costings per life cycle assessment of a combined cooling, heating, power and tourism system of the San Kamphaeng hot spring, Thailand. *Renewable Energy*. 2020, (146): 828-842
- [23] K. S. OLIVARES, R. J. ROMERO, E. SANTOYO, et al. Life cycle assessment of a solar absorption air-conditioning system. *Journal of Cleaner Production*, 2019 (240): 118206.
- [24] J. J. WANG, Z. Q. ZHAI, Y. Y JING, et al. Optimization design of BCHP system to maximize to save energy and reduce environmental impact. *Energy*, 2010, 35(8) : 3388-3398.
- [25] Y. Y. JING, H. BAI, J. J. WANG, et al. Life cycle assessment of a solar combined cooling heating and power system in different operation strategies. *Applied Energy*, 2012, 92 (0): 843-853
- [26] 黄海耀. LCA 法比较太阳能热水器和燃煤锅炉系统的环境效益.[天津大学硕士论文].天津: 天津大学, 2004
- [27] 王克红,赵黛青,王伟. 太阳能热水器和电热水器的环境和经济效益分析与评价.*能源工程*, 2006, (5): 4-8
- [28] 肖天辉. 基于全寿命分析的太阳能-地源热泵空调系统能耗分析与评价.[河北工业大学硕士学位论文].天津: 河北工业大学, 2013
- [29] 周楠. 基于全生命周期的建筑与供热空调系统一体化设计研究.[青岛理工大学硕士论文].青岛:青岛理工大学, 2015.
- [30] 刘富成. 基于生命周期评价理论的太阳能供暖系统能耗分析与环境影响评价.[辽宁工业大学硕士论文].锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- [31] K. YANG*, N. ZHU, T. H. YUAN. Analysis of optimum scale of biomass gasification combined cooling heating and power (CCHP) system based on life cycle assessment (LCA) . *ScienceDirect, Procedia Engineering* , 2017, 205 : 145 – 152

- [32] S. ZHAO, G. XU, J. WANG, et al. Environmental performance of a solar assisted hybrid power gas heat pump based on life cycle assessment. *Science Direct, Energy Procedia* , 2017,42 :() 419 – 425
- [33] 姚均天. 基于 LCA 的分布式供能系统的评价研究. [上海电力学院硕士论文].上海:上海电力学院,2011
- [34] 郑欣妍. 天然气分布式能源环境效益.[中国石油大学硕士论文].北京: 中国石油大学,2017.
- [35] 杨昆. 基于生物质气化的冷热电联供系统研究.[华北电力大学硕士论文].北京: 华北电力大学,2015
- [36] 陈玉林.基于生命周期分析的冷热电联供系统优化设计. *建筑科学*,2014,30(02):30-34+40
- [37] 陈拓发.生物质与天然气冷热电联供系统的优化研究. [华北电力大学硕士论文].北京:华北电力大学,2013.
- [38] 基于太阳能利用的分布式冷热电联供系统的优化研究. [华北电力大学硕士论文].北京:华北电力大学,2012.
- [39] U.S EPA (Environmental Protection Agency)(2010).Defining life cycle assessment (LCA). <http://www.gdrc.org/uem/lca/lca-define.html>
- [40] J. HONG, Z. YU, W. SHI, et al. Life cycle environmental and economic assessment of lead refining in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016:1 -10
- [41] R. B. SETAC LCA workgroup: Date availability and date quality. *The international Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, (3): 121-123
- [42] ISO14042. Life Cycle Assessment-Principles and Framework. Geneva: International Organization forStandardization, 2006
- [43] H. PING, X. F. YI, T. MORTEZA, et al. Life Cycle Assessment of End-of-Life Treatments for Plastic Film Waste. *Journal of Cleaner Production*, 2018,10(201):1052-1060
- [44] 杨建新,徐成,王如松.产品生命周期评价方法与应用.北京:气象出版社, 2002
- [45] 韩明霞,孙启宏,乔琦.中国火法铜冶炼污染物排放情景分析. *环境科学与管理*, 2009, 34(12): 40-44
- [46] 姜金龙, 戴剑峰, 冯旺军. 火法和湿法生产电解铜的生命周期评价研究. *兰州理工大学学报*, 2006, 32(1): 19-21
- [47] 陈伟强,万红艳,武娟妮.铝的生命周期评价与铝工业的环境影响. *轻金属*,2009,(5): 3-10
- [48] 马丽萍,蒋荃,赵春芝.我国典型硬泡聚氨酯板生命周期评价研究. *化学工程与装备*, 2013, (1): 1-4
- [49] M. SOULIOTIS, G. PANARAS, P. A. FOKAIDES, et al. Solar water heating for social housing: Energy analysis and life cycle assessment. *Energy & Buildings*, 2018, 15 (169): 157-177
- [50] 陈红,郝维昌,石凤.几种典型高分子材料的生命周期评价. *环境科学学报*,2004, 24(3): 545-549

- [51] 李蔓. 聚乙烯塑料生产和废聚乙烯塑料资源化技术生命周期评价. [哈尔滨工业大学硕士学位论文].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
- [52] 金忠臣,杨川东,张守良,等.采气工程.北京:石油工业出版社,2004
- [53] 杨川东.采气工程.北京:石油工业出版社,2006
- [54] 袁宝荣, 狄向华.中国化石能源生产的生命周期清单(II).现代化工, 2006, 4(4): 59~61
- [55] X. H. DI, Z. R. NIE, B. R. YUAN. Life cycle inventory for electricity generation in China. The International Journal of Life Cycle Assessment,2007, 12(4): 217-224
- [56] China statistical yearbook. State Statistics Bureau. Beijing: China Statistical Press; 2004.
- [57] 中国交通运输部.交通运输行业发展统计公报, 2017
- [58] 游正安,李儒沛.早区输气管道环境影响评价中的工程分析.新疆环境保护,1995,(6):47~51
- [59] 董志强,马晓茜.天然气利用对环境影响的生命周期分析.天然气工业,2003, 11(6):126~130
- [60] 徐小宁.中国水泥工业的生命周期评价.[大连理工大学硕士论文].大连: 大连理工大学,2013
- [61] 曹杰.住宅建筑全生命周期的碳足迹研究.[重庆大学硕士论文].重庆:重庆大学,2017.
- [62] M. CARVALHO, L. M. SERRA, M.A. LOZANO. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. Energy, 2010,36(6): 3779-3790
- [63] Y. Y. JING, H. BAI, J. J. WANG, et al. Life cycle assessment of a solar combined cooling heating and power system in different operation strategies. Appl Energy 2012,92:843-53.
- [64] 动力工程师手册编辑委员会.动力工程师手册,北京:机械工程出版社, 2001,16-37
- [65] 中国科学技术协会学会工作部编.废弃物处理与管理全国废弃物处理与管理学术讨论会论文集.北京::中国科学技术出版社,1990
- [66] 中华人民共和国环境保护部,集中式污染治理设施产排污系数手册(2010 修订)第三分册,www.mep.gov.cn
- [67] 李兆坚.我国城镇住宅空调生命周期能耗与资源消耗研究[清华大学硕士论文].北京:清华大学,2007
- [68] J. J. WANG, Y. YANG, T. Z. MAO, et al. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system. Applied Energy, 2015,15(146):38-52
- [69] 周泉.岩土热物性测试系统的设计与实现.[河北科技大学硕士论文].石家庄: 河北科技大学,2018
- [70] 张彬. 空调系统生命周期评价.[西安建筑科技大学硕士论文].西安: 西安建筑科技大学, 2010
- [71] 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.制冷与空调(四川),2017,31 (02) :140-144
- [72] 王亮. 基于多种清单分析方法的压缩机转子生命周期评价[大连理工大学硕士论文].大连: 大连理工大学,2017

- [73] H. WILLEM, Y. LIN, A. LEKOV. Review of Energy Efficiency and System Performance of Residential Heat Pump Water Heaters. *Energy & Buildings*,2017,143:191-201
- [74] 张磊. 基于 GaBi4 的电动汽车生命周期评价研究[合肥工业大学硕士论文].合肥:合肥工业大学,2011
- [75] 王攀.电动汽车与天然气车全生命周期环境影响评价研究[长安大学硕士论文].西安:长安大学,2018.
- [76] 李兆坚,张声远,江亿.蒸汽压缩式冷水机组生产能耗和资源消耗分析.暖通空调,2008,38(11):55-58
- [77] NBOS. China Energy Statistical Yearbook. National Bureau of Statistics of China, Beijing,2013

攻读硕士学位期间所发表的论文

- [1] 崔明辉,张晓东,支鹏羽.石家庄某小区空气源热泵集中供热改造的运行经济分析.供热制冷,2019(02):40-44

致 谢

在河北科技大学两年半的研究生学习时光终于要画上圆满的句号，在这里留存的回忆有苦有甜，但更多的是让我获得充分的成长。

首先最想表达内心感激的是我的导师崔明辉教授和康利改老师。崔明辉教授为人和蔼可敬，学识渊博，在教书育人和工作上更是一丝不苟，是崔明辉教授使我参与《建筑领域合同能源管理制约因素与对策》科研项目开始，将我一手带上了科研的道路，并在与人处事上面以身作则告诉了我做人做事的道理。对康利改老师介绍使用生命周期评价理论研究 CCHP 系统的兴趣开始，到每周阅览相关论文和期刊的学习汇报和各类讲解的 PPT 制作，再到后来关于空气源热泵生命周期评价的小论文的撰写，康利改老师总是会不厌其烦地将具有实用性技巧和方法传授给我。在初次的小论文编写及后续的论文排版过程中，康利改老师更是在百忙之中耐心的为我讲解直至改好。最感激的是在本论文撰写过程期间，两位导师从我开始确定所要的研究方向和开始学习 LCA 的相关知识，再到研究生中期答辩时的的基础数据收集加工处理，直至最后的论文提交，本人均得到了两位老师的有力帮助。另外，本人还要致谢马坤茹教授还有建环专业的其他老师，以示内心的感激之情。马坤茹教授从本人进入本校学习以来给予了很多锻炼的在校实践和实习机遇，从参与合同能源管理与节能审计调研，充分掌握了当下公共建筑历年来的能耗情况，并学会运用自己的专业理论知识和合同能源管理实践结合如何在具体节能改造项目中实施，再到参与河北省制冷学会工作，充分的在学术交流中获得本专业领域最新知识和行业动态以及在京津冀清洁供暖调研和举办京津冀暖通空调科技创新高峰论坛的活动中锻炼了与人合作相处的交际能力，获益匪浅。

在这里同样要感谢班级同学们。感谢你们入学以来一直支持着我和信任，这是对我努力做好班级工作的最大的动力，种种经历也让我明白了什么是责任，更让我明白了付出并不等于失去，服务好一个班集体收获更多的是回报，也体会到了往往集体荣誉获得感远远高于个人荣誉获得感。看到新入学的师弟师妹们不断的加入，感谢你们又可以将课题组光荣传统发扬下去，带来了有力的生机。

最后感恩我的家人和挚爱，是他们为我努力营造了舒适的学习环境，并在背后努力的支持我一路走来，替我承担了很多压力和责任，做了我有力的靠山，是我随时可以寻求温暖的避风港。

再次感谢评审专家和老师们，感谢您为本论文提出的珍贵意见！