

分类号_____

密级_____

UDC _____

昆明理工大学 专业学位硕士学位论文

工业硅生产过程碳排放量影响研究

研 究 生 姓 名 _____ 姜凯之

指导老师姓名、职称 _____ 陈正杰 副教授

校外导师姓名、职称 _____ 文建华 教授级高工

学 科 专 业 _____ 冶金工程

研 究 方 向 _____ 硅冶金能源环境

起 止 日 期 _____ 2020 年 09 月 ~ 2023 年 05 月

论 文 提 交 日 期 _____ 2023 年 05 月

本论文受云南省重大科技专项(202102AB080013)、云南省“高层次人才培养支持计划”(YNWR-QNBJ-2020-022)和中国科协“青年人才托举工程”(YESS29290311)的资助，特此感谢！

摘 要

“碳达峰、碳中和”背景下，工业硅生产过程存在的高能耗、高排放等问题尤为突出。本文基于大量实际生产数据，利用多种方法分析工业硅生产过程碳排放影响因素及程度，旨在为该行业提供相对科学的节能减排思路。具体研究内容与结果主要包括以下三条：

（1）以实际工厂数据为研究对象，计算出工业硅生产过程的碳排放总量。碳排放总量包括消耗碳质还原剂所产生的直接碳排放、工业过程消耗石墨电极的碳排放与消耗电力所造成的间接碳排放。运用对数平均迪氏指数分解法（LMDI 法）建立工业硅生产过程 1 年内 11 个月度阶段碳排放量因素分解模型，分解为能源碳排放系数、能源消费结构、能源强度和工业硅产量 4 项因素。研究结果表明能源强度是抑制二氧化碳排放的最大因素，能源消费结构对减少碳排放量有一定影响，但影响效果并不明显。能源碳排放系数一年内对碳排放量没有影响，而工业硅产量是在一年每个月内均导致二氧化碳排放增加的最具影响力因素。

（2）运用活动水平法及能源碳排放系数计算出工业硅生产过程的直接碳排放量，分析其平均值及影响比例，研究结果表明电力消耗的间接碳排放为主要排放，其次是碳质还原剂的碳排放，电极的碳排放最低且最为稳定。利用统计学分析碳质还原剂对不同类型埋弧炉中工业硅生产过程的碳排放情况，研究发现碳质还原剂消耗与直接碳排放量呈高度相关，与碳排放总量呈中等相关。8.5 MVA 炉型中不同碳质还原剂对碳排放影响程度顺序为：烟煤>石油焦>木块；12.5 MVA 炉型为：石油焦>烟煤>木块。

（3）通过生命周期评价方法对工业硅生产及其下游的高纯晶硅提纯过程进行环境影响的定量计算和评价。在使用改良西门子法将工业硅不断提纯获得高纯晶硅的过程中，通过贡献分析和改进评价将生命周期内的主要环境影响分为 1 至 10 个影响类别，并得出决定环境负荷的关键因素权重。研究结果表明，工业硅生产与改进西门子法生产高纯多晶硅对环境的综合影响分别约为 4.532 与 4.991，根据量化结果，改进的重点是降低生产高纯晶硅阶段的功耗，并进一步优化其生产过程中的废物循环利用。

关键词：工业硅；碳排放；碳质还原剂；对数平均迪氏指数分解法（LMDI）；生命周期评价（LCA）

Abstract

In the context of "carbon peaking and carbon neutral", the problems of high energy consumption and high emissions in the industrial silicon production process are particularly prominent. Based on a large amount of actual production data, this paper uses various methods to analyze the factors and degree influencing carbon emissions in the industrial silicon production process, with the aim of providing relatively scientific ideas for energy saving and emission reduction in this industry. The specific research content and results include the following three main articles:

(1) Taking the actual factory data as the research object, the direct carbon emission and total carbon emission of industrial silicon production process were calculated by using activity level method and energy carbon emission coefficient. The total carbon emissions include direct carbon emissions from the consumption of carbon reducing agents, carbon emissions from the consumption of graphite electrodes in industrial processes and indirect carbon emissions from the consumption of electricity. A factor decomposition model of carbon emission in industrial silicon production process of 11 monthly stages was established by using logarithmic average Dirichter index decomposition method (LMDI method), which was divided into four factors: energy carbon emission coefficient, energy consumption structure, energy intensity and industrial silicon output. The results show that energy intensity is the biggest factor to curb carbon dioxide emissions, and energy consumption structure has a certain impact on reducing carbon emissions, but the effect is not obvious. The energy carbon emission coefficient has no effect on carbon emissions within a year, while industrial silicon production is the most influential factor that increases carbon dioxide emissions in every month of the year.

(2) According to the carbon emission data calculated in (1), its average value and influence ratio are analyzed. The research results show that indirect carbon emission from power consumption is the main emission, followed by carbon emission from carbon reducing agent, and carbon emission from electrode is the lowest and most stable. The carbon emission of carbon reductants in industrial

silicon production process in different types of mineral furnace was analyzed by statistics. It was found that raw material consumption was highly correlated with direct carbon emission and moderately correlated with total carbon emission. In 8.5MVA furnace type, the order of influence degree of different carbon reducers on carbon emission is: bituminous coal > petroleum coke > wood block; 12.5MVA furnace type: petroleum coke > bituminous coal > wood block.

(3) The environmental impact of industrial silicon and its downstream high purity silicon production process is quantitatively calculated and evaluated by using life cycle assessment method. In the process of continuous purification of industrial silicon to obtain high purity crystal silicon by modified Siemens method, the main environmental impacts during the life cycle are divided into 1 to 10 impact categories by contribution analysis and improvement evaluation, and the weight of key factors determining environmental load is calculated. The results show that the combined environmental impacts of industrial silicon production and improved Siemens process to produce high-purity polysilicon are about 4.532 and 4.991, respectively. According to the quantitative results, the emphasis of improvement is to reduce the power consumption in the production stage of high-purity silicon, and further optimize the waste recycling in the production process.

Key words: Industrial silicon; carbon dioxide emissions; Carbonaceous reducing agent; Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition (LMDI) method; Life Cycle Assessment (LCA)

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景综述.....	1
1.1.1 政策背景及能源环境问题.....	1
1.1.2 工业硅及高纯晶硅发展情况.....	2
1.1.3 冶金领域碳排放影响因素研究.....	5
1.1.4 工业硅及高纯晶硅碳排放影响因素研究	7
1.2 论文研究意义与研究内容	10
1.2.1 论文研究意义.....	10
1.2.2 论文研究内容.....	10
第二章 研究方法综述	13
2.1 论文研究方案.....	13
2.2 数据分析方法.....	14
2.2.1 对数平均迪氏指数分解(LMDI)分析法.....	14
2.2.2 线性分析方法.....	17
2.2.3 生命周期评价(LCA)方法	18
第三章 工业硅生产过程碳排放量影响因素分解研究	21
3.1 引言.....	21
3.2 研究思路.....	21
3.2.1 数据来源及处理方法.....	21
3.2.2 实验方法	22
3.3 计算结果及分析.....	23
3.3.1 对 8.5 MVA 埋弧炉数据分析	23
3.3.2 对 12.5 MVA 埋弧炉数据分析	25
3.3.3 工作结果分析.....	26
3.4 本章小结.....	28
第四章 碳质还原剂对工业硅生产碳排放量的影响	31
4.1 引言.....	31
4.2 研究思路.....	31
4.2.1 实验原料.....	31
4.2.2 实验数据处理.....	32
4.2.3 碳排放量计算方法.....	32
4.3 实验结果与分析.....	34
4.3.1 碳排放比例.....	34
4.3.2 碳质还原剂对直接碳排放的影响.....	36

4.3.3 碳质还原剂对碳排放总量的影响.....	37
4.3.4 不同炉型的原料消耗与碳排放线性方程斜率的变化	38
4.3.5 不同炉型平均原料消耗和碳排放量比较分析	39
4.4 本章小结.....	41
第五章 基于 LCA 法的晶硅原料生产周期评价研究	43
5.1 引言.....	43
5.2 研究思路.....	43
5.2.1 研究目标范围确定	43
5.2.2 生命周期清单数据来源.....	44
5.2.3 生命周期阶段和数据清单分析.....	46
5.3 结果和讨论.....	49
5.3.1 生命周期影响贡献分析.....	49
5.3.2 量化和影响结果.....	51
5.3.3 高纯晶硅生命周期评价分析和讨论.....	53
5.4 本章小结.....	54
第六章 结论与展望	57
6.1 结论.....	57
6.2 展望.....	58
参考文献.....	59

第一章 绪论

1.1 研究背景综述

1.1.1 政策背景及能源环境问题

近年来，由于人们对全球变暖与气候变化的日益关注并且社会与经济发展陷入瓶颈，能源类型缺少和节能减排措施引起了全世界的高度关注，同时传统石化能源的高碳排放也促使环境问题更加恶化，成为当前重要急需解决的问题。中国已经成为全球最大的化石能源进口国和消费国，目前也是世界上最大的二氧化碳排放国^[1]，成为了大众的焦点，中国必然也会主动要承担起节能减排的重要责任，与此同时我国也采取了一系列政策方案努力减缓国内碳排放量的增长^[2, 3]。1994年中国最早提出可持续发展战略《中国 21 世纪议程》，实施发展与经济并重的方针。2006 年颁布的中华人民共和国可再生能源法进一步加强对可再生能源发展的引导和支持，促进清洁可再生能源规模化开发利用。2007 年 6 月发布的《中国应对气候变化国家方案》认为到应该将可再生能源开发利用总量（包括水电）在一次能源供应结构中的比重提高到 10%左右来降低碳排放量。2009 年 11 月，中国宣布了首个温室气体减排目标。2013 年由国务院设定的《大气污染防治行动计划》，到 2017 年完成调整产业结构，推广清洁生产，鼓励节约能源，减少污染物排放的标准。在 2015 年的巴黎协议中，中国承诺到 2030 年达到二氧化碳排放峰值，到 2030 年碳强度比 2005 年降低 60-65%^[4, 5]。2015 年 12 月，符合国家有关光伏产业的政策文件《太阳能利用“十三五”发展规划》提出，重点打造大型光伏发电基地，形成分布全国的重要清洁电力供应基地。国家发展改革委与国家能源局在 2016 年 12 月 29 日印发《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》，规定到 2030 年能源消费总量控制在 60 亿吨标准煤以内。2017 年国家发展和改革委员会发布了《全国碳排放交易市场建设计划（发电行业）》^[2, 6]。2019 年，中国单位 GDP 能耗为每万元 0.490 吨标准煤，比 2015 年下降 21.4%，单位 GDP 二氧化碳排放量为每万元 0.010 吨，比 2015 年下降 25.6%，比 2005 年下降 48.5%，提前完成了“2020 年碳强度比 2005 年下降 40%-45%”的目标。这表明，中国“自上而下”的能源政策在降低能源消耗、抑制碳排放增长方面发挥了积极作用^[7]。2020 年“碳达峰和碳中和”目标在第七十五届联合国大会一般性辩论上首次提出：中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和^[8]。综合上述的相关政策，表明中

国提出了绿色低碳发展的新发展理念，也是中国提升产业结构提出的承诺，也是中国新发展理念中的重要组成部分。

全球变暖和全球气候变化现象是人类文明现今面临的紧迫环境问题，其主要原因在于提供能源的化石燃料消耗所产生的大量二氧化碳，值得关注的是目前已观察到的主要发达国家的能源消费已经较为固定甚至逐渐下降，清洁能源需求持续增长，所以如何科学的节能减排成为工业行业研究的重点。近年来，随着经济的不断发展，中国已经超过日本成为仅次于美国的世界第二大经济体^[9]，而且中国的能源消费持续快速增长，不仅加剧了能源危机，也提高了碳排放水平。与经济增长相似，随着大规模工业化和城市化推动经济蓬勃发展，中国的能源需求也迅速增长。中国已经成为仅次于美国的世界上第二大能源消费国^[10]和成为最大的碳排放国^[11]，所以我国需要主动起到全球碳减排与节约能源的借鉴作用。因此，推进节能减排和低碳经济，不仅有利于解决国内能源和环境问题，也有利于促进全球减排，缓解国际碳减排压力。而化石能源的消耗必然使得温室气体的排放增加，特别是二氧化碳，是全球变暖的主要驱动因素^[12, 13]。使用传统化石能源产生二氧化碳气体和其他环境污染物，恶化环境^[14]。由于化石燃料的储量有限，它们不能被无休止地开发^[15, 16]。基于可再生能源的新型能源发电方法，比如太阳能光伏发电、锂电池和氢能，被认为是最有可能满足日益增长的能源需求，同时满足二氧化碳的减排目标^[17, 18]。其中太阳能是一种绿色的可再生能源，通常由高纯晶硅制成的光伏电池将光转化为电能而获得^[19]。太阳能发电不会污染环境，是一种清洁能源。多晶硅行业领域广泛，市场前景广阔，在整个产业链中，工业硅及高纯晶硅是太阳能光伏材料的主要原材料，太阳能光伏发电越来越普及，以多晶硅和单晶硅片制造的太阳能电池占到整个太阳能电 80%以上。然而，硅行业也具有低生产弹性、投资回收缓慢、能源和用水量高、空气污染高等缺点，在能源消耗方面，光伏硅行业是一个巨大的化石能源与电力消费行业^[20]。因此，减少工业硅生产过程与高纯晶硅提纯过程中的二氧化碳排放，对于实现我国的温室气体减排目标，促进社会、经济和环境的可持续发展具有重要的现实意义。

1.1.2 工业硅及高纯晶硅发展情况

太阳能发电是一个不产生环境污染的物理过程^[21]，因此几乎没有对环境产生影响^[22]。太阳能光伏产业是国家“四个革命、一个全面的”能源发展战略的重要方向和内容，也是世界各国未来能源发展的重要方向，作为太阳能光伏产业的基础原料工业硅与高纯晶硅产业在未来 10 年必将迎来一个快速的发展机遇。伴随着清洁能源替代化石能源的大变革，光伏产业在未来能源格局中的地位正在重塑，

也将成为可再生能源领域的重要组成部分。随着环保意识的增强和清洁能源需求的增加,光伏产业在全球范围内得到了快速发展。从全球来看,发达国家多集中在北半球,使得光伏产业市场主要在北半球,而光伏制造企业集中在沿海地区,具有海运优势。与核能的安全问题和风能的间断发电相比,太阳能是最可靠的可再生能源,具有相当大的发展潜力^[23],并且改造后的光伏系统运行时间长,维护成本低^[24, 25]。所以硅元素产业对国民经济的发展和社会建设具有重要意义并且具有较高的产业意义,是国家发展的基础产业。许多与人类生活相关的行业都高度依赖于硅材料,包括光伏工业、半导体和电子工业、光纤通信工业、航空航天和航空工业,以及国防工业^[26, 27]。电子信息产业的发展促使半导体集成电路产业进入新的快速发展轨道。光伏应用领域不断拓展,不仅用于发电,还广泛应用于建筑、交通、农业等领域。例如,建筑一侧的玻璃墙面可以采用太阳能电池板进行改造,将其转化为发电设备,实现建筑自给自足。因此,一个国家的硅材料技术水平是衡量其工业化水平的一个重要指标^[28]。由于输出光伏组件成本的持续增加^[29],效率不断提高的光伏发电系统将不可避免地成为未来重要的能源^[30, 31]。目前的光伏发电主要依靠多晶硅生产。此外,多晶硅还可以通过在一个硅芯片上集成多个组件制造不同类型的光电电路和光子电路^[32]。而半导体工业在其他几乎全部工业行业内的广泛应用更是加大了多晶硅材料的应用范围。太阳能级高纯晶体硅是硅光伏的关键材料,预计未来几年将达到太瓦(TW)水平,2050年将达到50TW左右^[33]。随着技术的不断成熟和政策的不断支持,2020年光伏产业同时能够和氢能源、新能源汽车等产业相耦合,成为未来国家“碳达峰、碳中和”的重要途径,所以未来光伏产业的发展前景非常广阔。

硅是地壳的主要组成部分,在地壳中,硅元素通常以天然二氧化硅(二氧化硅含量大于99%)的形式存在^[34]。二氧化硅可以通过碳热还原转化为工业硅,硅元素纯度达到97-99%。从此纯度的工业硅中继续提纯可以获得高纯度的多晶硅。高纯晶硅具有良好的半导体性能,广泛应用于电子行业。作为一种半导体材料,它被广泛地应用于电子工业领域。根据硅含量及用途的不同,可分为冶金级(工业级)、高纯多晶硅(大于纯度99.8%)、太阳能级(4至6N)和电子级(9至11N)^[35]。

图1.1为工业硅冶炼过程示意图,该冶炼过程是一种能源极其密集型的工业过程,硅元素含量大于98%的硅产品主要是通过消耗石油焦、烟煤、木块等碳质还原剂,在埋弧炉中经碳热还原反应,即利用电力在三相石墨电极产生的超过1800℃的高温条件下形成^[36, 37]。为了后续便于碳排放量的计算,采用理论方程式,

即硅石与碳质还原剂完全反应并且生成熔融态硅与碳氧化物，具体简化方程式如下：

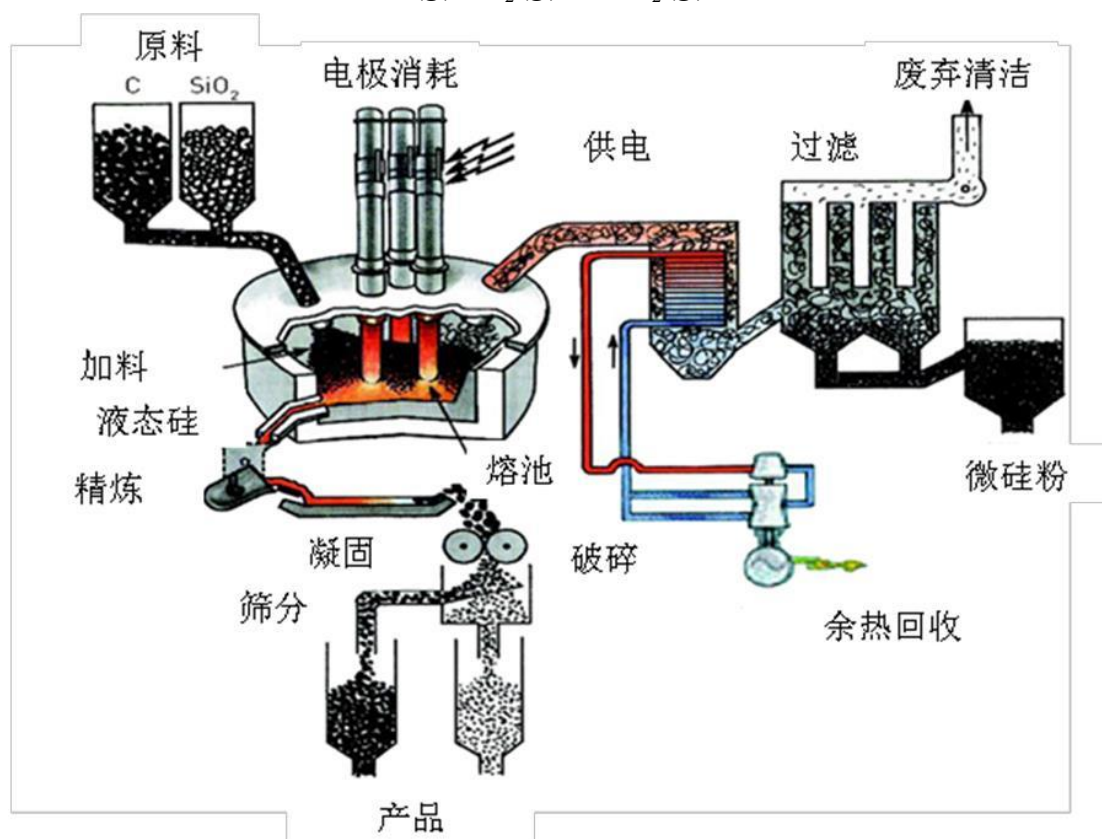
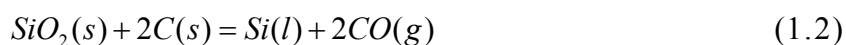
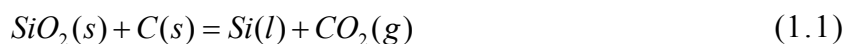


图 1.1 工业硅冶炼工艺示意图^[36, 38]

Fig. 1.1 Schematic diagram of industrial silicon smelting process

高纯晶硅具有光伏效应，是太阳能发电系统与电池生产中所采用的不可缺少的核心原材料^[39]。工业生产过程的基本流程图如图 1.2 所示，从硅石开采到工业硅冶炼成硅锭，再通过改良西门子法变成高纯晶硅。

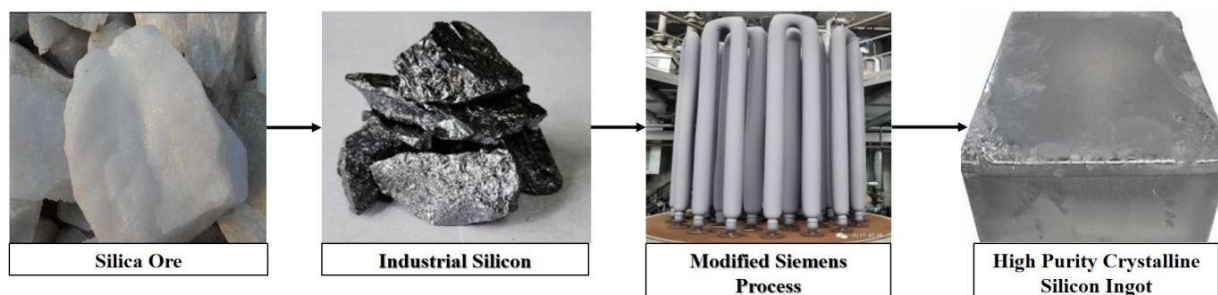


图 1.2 工业硅及高纯结晶硅生产基本流程图

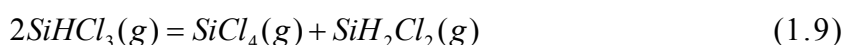
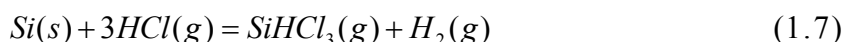
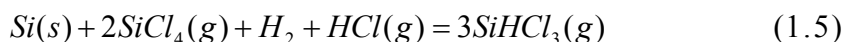
Fig. 1.2 Basic flow chart of industrial silicon and high purity crystalline silicon production

因此,就其用途而言,高纯晶硅是一种环保产品^[40]。依据设计的工艺反馈的主要的化学反应化学式如下:

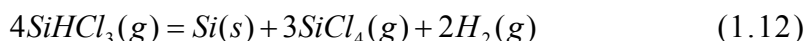
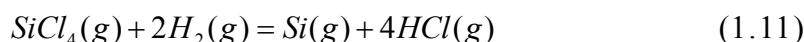
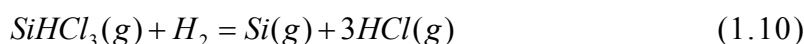
(1) 三氯氢硅合成



(2) 冷氢化: 其中式 (1.5) (1.6) (1.7) 为主反应, 式 (1.8) (1.9) 为副反应。



(3) 三氯氢硅还原: 其中式 (1.10) 为主要反应式。同时会产生式 (1.11) (1.12)。反应均为吸热反应。



1.1.3 冶金领域碳排放影响因素研究

由于工业硅产业与钢铁产业较为相似,均通过在电弧炉中消耗电力达到所需的高温条件,然后生产原料与碳质还原剂发生碳热还原反应并且产生大量直接碳排放与消耗电力的间接碳排放量,所以本论文主要参考了钢铁工业中使用的方法来计算碳排放量^[41]。以下综述了部分关于计算钢铁工业中碳排放的主要方法及其对解决高碳排放量的节能减排相关战略的研究。

Worrell 等人^[42]分析了 1994 年美国钢铁制造的能源使用和二氧化碳排放的基线,并确定了多达 47 种节能做法和技术。Helle 等人^[43]研究了生物质在钢铁工业生产中的应用潜力,研究结果表明在炼钢中使用生物质可以有效地减少二氧化碳的排放,并提高生产利润。Mitra 等人^[44]使用遗传算法分析抑制钢铁工厂二氧化碳排放的方法,并从高炉顶部煤气中剥离二氧化碳,将煤气反馈到风口,为寻找更可持续的生产概念提供指导。Zhang 等人^[45]评估了中国北方一家钢铁厂的余热回收和碳还原的潜力: 对于一个年产量为 1000 万吨的炼钢厂,采用低能热回收技术可以节省 165 万吨煤当量和约 500 万吨二氧化碳排放量。通过施加 61 个关键约束条件,Shen 等^[46]获得了钢铁生产系统批量率和节能减排的最佳解决方案,使得每吨钢材的最高节能率可达到 20.63 千克标煤。针对在中国钢铁行业存在的高碳排放现象,另外有其他研究人员认为,提高能源效率和节能回收技术的开发和应

用以及可再生能源的持续使用是减少温室气体，尤其是二氧化碳排放的关键所在[47, 48]。

中国地质大学的 Li 等人^[49]基于 2010 年投入产出扩展数据表，通过对中国 2011 年钢铁工业相关环节的直接和间接二氧化碳排放量建立经济投入产出-生命周期评价（EIO-LCA）模型进行研究。证明了焦炭和煤炭是钢铁行业二氧化碳直接排放的最大影响因素，并提出了相应的减少碳排放的方法。

安徽工业大学的刘影等人^[50]在 2016 年利用对数平均迪氏指数分解法（LMDI 方法）探讨了中国 2000—2010 年钢铁产量相关数据，将钢铁行业二氧化碳排放影响因素模型特征化分解，得到碳排放量变化的影响并制定针对性节能减排政策。可见，提高我国能源利用效率是实现碳减排的关键。

北京科技大学的 Wang 等人^[51]在 2020 年对中国钢铁工业大气污染物排放进行了因素分解与解耦分析。钢铁工业也是工业层面上主要的空气污染物排放过程。文章首先采用对数平均迪氏分解指数（LMDI）方法，从环境法规效应、污染物产生强度效应、能源结构效应、技术进步效应、规模效应 5 个维度考察钢铁行业大气污染物排放的影响因素。通过对 2005 - 2015 年中国钢铁产业的进一步实证分析计算得到了不同历史阶段为实现钢铁产业增长与污染物排放解耦贡献值。总结认为环境法规在缓解钢铁行业的空气污染方面起着决定性作用。其次，环境法规和技术进步对大气污染物的排放都具有抑制作用，污染物产生的强度效应和规模效应在一定程度上促进了排放。能源结构效应的作用不稳定，但累积效应分析表明，能源结构效应对近期减排的影响较大。最后行业脱钩力度逐步由弱向强转变。总体而言，环境监管和技术进步的作用都促进了脱钩。

当然除了钢铁行业，针对其他金属冶金产品，目前也有一定的相关碳排放量影响因素研究方法，这些研究对光伏行业晶硅原料工业生产及国家政策与企业战略来说均具有借鉴意义。

北京科技大学的 Cao 等人^[52]于 2016 年计算了 2003-2013 年中国原镁生产的生命周期能耗和温室气体排放并采用 LMDI 方法对镁生产过程的温室气体排放进行影响因素分解。得出减少温室气体排放的关键途径是优化能源结构和降低能源消耗。

2019 年中南大学的 Guo 等人^[53]采用生命周期评估（LCA）方法探讨了中国铝制造业的碳排放量和二氧化碳来源，并采用情景分析方法评估了该行业碳排放的减排潜力和驱动力。通过评估方案包括新的容量分配方案、技术进步和能源结构优化。铝材料产业链的碳排放主要来自发电的间接排放（超过 68%）。从环

境支柱看，区域排放总量和强度差异显著，合理的产业布局有向南部和西南部转移的趋势。生产产出仍然是制造业企业（如铝材料企业）碳排放总量的主要影响因素。技术进步和能源结构有助于减少总量和提高碳效率，尽管前者对铝材料企业的影响相对有限。本文还表明，在产出高速增长背景下，边际碳效率提高对降低二氧化碳总排放量并不是很有效。

2021 年东北大学的 Li 等人^[54]认为自 1990 年以来，中国经济的快速增长和工业化产生了大量的铝材料需求。面对当前复杂的国际经济形势，该文章采用动态物质流分析（MFA）、回归分析和正态寿命分布方法，估算了 1990 至 2030 年中国铝的国内消费量、废品量和在用库存。结果表明：1990 年以来，中国国内消费量、废品量、在用存量不断增加，预计 2030 年将分别达到 54、19 和 640 百万吨。然后，采用情景分析方法，探讨减少铝外循环（出口量）对中国铝生产及相关温室气体排放的影响。情景分析结果表明，采取有效措施减少铝产品出口可显著降低中国原铝产量和温室气体排放。此外，未来回收铝材料的数量将逐渐增加，即使在最不利的情况下，其占比也将在 2030 年达到 30% 左右（2017 年为 22%）。依托再生铝的增长和铝产品出口的下降，在满足国内铝材料消费的前提下，中国铝行业预计将在 2030 年左右达到温室效应气体排放峰值。

综上所述，对数平均指数迪氏分解法（LMDI）与生命周期评价方法（LCA）均被广泛应用于材料与化工领域，特别是冶金领域，所以针对光伏行业的晶硅原料的相关研究需要进一步推进。

1.1.4 工业硅及高纯晶硅碳排放影响因素研究

通过近十年的快速发展，配套高纯晶硅行业的装备制造业（设备、仪表、阀门等）日趋成熟，价格大幅下降，因此，非常有必要研究影响作为工业硅原料及高纯晶硅提纯生产过程中产生的碳排放量的影响因素。较为早期的硅原料碳排放研究有德国的 Huber 等人^[55]在 1995 年分析评估了硅太阳能电池在其生命周期内的环境排放和资源利用情况，该评估基于冶金级硅、多晶硅和单晶硅标准、金属-绝缘体-半导体电池和非晶电池制造的详细数据收集。结果表明，硅光伏产品取代物质排放技术对环境有利，但由于其应用的制造过程污染严重，因此不可取。支撑结构的重量应尽可能轻，对材料的要求应尽可能低，以实现光伏系统制造过程中的低排放。随着半导体、太阳能电池等行业的发展，对工业硅的需求不断增加。据统计，全球工业硅市场规模从 2015 年的约 21 亿美元增长到了 2020 年的约 30 亿美元。工业硅是一个重要的高新技术材料，其市场需求、产业竞争、技术创新、环保要求和应用领域都在不断发展和变化。未来，工业硅产业将会迎来更多的挑

战和机遇。总之，工业硅碳排放受到多种因素的影响。未来，随着环保意识的增强和低碳技术的不断发展，工业硅产业将会面临更多的压力和机遇。下面综述介绍部分本论文借鉴的研究方法文献。

日本的 Kato 等人^[56]和 Ito 等人^[57, 58]对该国大型光伏电站的实际应用进行了案例研究，从经济和环境的角度对五种类型的 100 兆瓦超大规模光伏发电系统进行了比较研究，计算了成本、能源需求和二氧化碳排放量。此外，还评估了发电成本、能源回收期（EPT）和二氧化碳排放率。

A.Stoppato^[59]介绍了光伏板发电的生命周期评价结果。考虑到了从二氧化硅提取到最终面板组装的整个生产过程。认为最关键的阶段是金属硅转化为太阳能硅和电池板的组装。前者的特点是耗电量很大，即使考虑到最有效的转换技术，后者使用铝框架和玻璃屋顶，这是非常耗能的材料。此外，考虑到太阳能辐射量、纬度、海拔和国家发电能量组合不同的光伏电站的不同地理配置，还评估了能源回报时间（Energy Pay-Back Time, EPBT）和减缓二氧化碳的潜力。

昆明理工大学叶宏亮等人^[60]在 2007 年进行了 LCA 分析，研究工业硅生产中采用的碳热还原工艺的环境合规性，提出了相应的节能减排措施，但是实验所用的炉型与数据较为落后，需要更新。

Fthenakis 等人^[61]在 2008 年及时更新了硅材料环境指标。基于 2004-2006 年光伏生产数据，该研究介绍了多晶硅、单晶硅、带状硅和薄膜碲化镉（CdTe）四种主要商业光伏系统的生命周期温室气体排放、标准污染物排放和重金属排放。在每个光伏系统的材料和模块生产过程中，使用欧洲和美国的平均电力混合物来确定生命周期排放。结果表明在当前的光伏技术中，薄膜碲化镉光伏排放的有害气体最少，因为它在组件生产过程中需要的能量最少。然而，与光伏可以取代的传统能源技术的排放相比，不同光伏技术之间的排放差异非常小。

2012 年扬州大学的刘臣辉等人^[62]采用 LCA 方法研究了与多晶硅光伏系统产业链相关的碳排放环节。研究发现，多晶硅光伏系统的碳排放环节来自于资源和能源的消耗，以及污染物的处理。因此，多晶硅光伏系统中的碳排放环节可以归结为来自资源和能源消耗以及污染物处理的碳排放环节。。

2017 年昆明理工大学的 Yu 等人对中国冶金路线多晶硅光伏发电系统并网发电进行了生命周期评估（LCA）。计算了能源回收期、环境影响和总环境影响指标。通过贡献分析，可以找出最关键的阶段（或过程）和对环境影响最大的阶段。同时，分别对其产生的主要原因进行了分析。敏感性分析结果表明，铝消费量的影响最为明显。但是，电站退役对重要材料的回收利用影响较大。比较了冶金法

生产太阳能级多晶硅（SoG-Si）与改良西门子净化法生产太阳能级多晶硅的总环境影响指标。结果表明，冶金路线具有明显的优势。在可再生能源中，环境影响最小的光伏发电仅占燃煤发电的 3.33%。目前的工作对环境的影响约为其他国家光伏成果的 56-66%。

2019 年昆明理工大学的 Ma 等人^[63]以 LCA 方法为基础，对冶金路线生产 1 千克 SoG-Si 的整个过程的资源投入、能耗、排放和对环境的综合影响进行了计算和分析。该项目基于对冶金路线中具有代表性的四种工艺的研究，即炼渣、湿法提纯、定向凝固和电子束熔融。通过贡献分析和改进评价，找出决定环境负荷的关键因素。提出了改进的措施和建议。建立了比较冶金路线和改进西门子法对 SoG-Si 环境影响的 LCA 模型，比较了冶金法生产 SoG-Si 与改进西门子法净化 SoG-Si 对环境的影响。结果表明，冶金路线 SoG-Si 对环境的综合影响仅为改良西门子工艺 SoG-Si 的 49.57%。冶金路线具有明显的环境优势。改进的重点应放在降低生产过程的电力消耗上。

2021 年西班牙的 Méndez 等人^[33]认为超冶金级硅（UMG-Si）已被证明是标准多晶硅的可行替代品。该研究利用了 LCA 方法对升级冶金级硅进行分析。此外，还展示了基于该材料的光伏组件和发电对环境的影响。为此，对光伏价值链的生命周期库存（LCI）进行了详尽的审查，从冶金级硅（MG-Si）到发电，更新了所有工艺的输入。系统平衡（Balance of System, BOS）也已更新为固定露天大型光伏站点（100mw_{pk}）的最新数据。考虑了两种不同的电力组合，低碳强度和高碳强度。结果表明，在光伏发电中，使用超冶金级硅代替多晶硅可使气候变化（Climate Change）排放总体减少 20% 以上，EPBT 提高 25%，分别达到 12 gCO_{2eq}/kWh_e 和 0.52 年的显著低值。此外，结果表明，光伏组件制造业是主要的电力的碳足迹和能源足迹贡献源，不是硅原料。

在课题组以往的研究中，利用对工业硅生产相关数据的线性回归，确定了不同原料消耗和烟效率之间的相关系数^[64, 65]。采用多种人工神经网络（ANN）模型，模拟和评价了不同石油焦、烟煤、二氧化硅和电极条件下碳材料的近似组成波动、最终功率应变和燃烧效率^[66, 67]。研究了原料、固定碳、挥发性物质和水含量对硅产量和能耗的影响^[68, 69]，最近的研究发现了硅产品中杂质含量与不同碳质还原剂消耗之间的相关证据^[38, 70]。综上所述，这些研究为研究工业硅生产过程中碳排放量的影响因素，如原料各项参数、电耗、能源消费结构、能源强度等，提供了不同的直接或者间接方法。

1.2 论文研究意义与研究内容

1.2.1 论文研究意义

本论文探究了光伏行业晶硅原料产业链发展过程中影响工业硅生产与高纯晶硅提纯过程中碳排放量的特点和影响因素，对制定有针对性的节能减排政策具有重要意义。晶硅原料生产过程属于高能耗工业过程，为实现我国“碳达峰和碳中和”目标任务，在有限时间内探究其产生的碳排放量并得到影响因素分析结果是现阶段改善该工业环境保护措施的关键所在。由于全球工业格局的快速发展，太阳能光伏领域已经成为当前信息时代的一个基础产业。据估计，到 2025 年，全球光伏装机容量预计将超过 300GW（额定有效功率），这将推动工业硅的需求在未来三年内增加 90 万吨。因此，为实现晶硅原料生产过程科学节能减排，满足生产企业利益需求，本文采取工业硅工厂实测数据，利用多种分析方法得出影响其生产过程碳排放量的影响因素，并提出相应参考与建议。

相对较少的研究试图分解碳排放的行业水平。此外，将分解分析应用于影响工业硅二氧化碳排放的因素的研究非常有限。因此，从企业的角度来看，本文的研究目标是帮助能耗高、污染严重的工业硅企业节能减排。根据额定容量分别为 8.5 MVA 和 12.5 MVA 的埋弧炉（Submerged Arc Furnaces, SAF）的实际硅产品产量，结合工业硅生产企业的所使用的能源消耗真实数据，分析了 1 年内工业硅生产过程二氧化碳排放的月度动态变化，确定了影响碳排放的主要因素。这对于指导硅产业的节能减排和可持续发展，同时增加就业机会，改善投资环境，促进产业结构升级，实现战略性新兴产业项目的建设，使得投资环境得到大幅度改善，以及产业的发展具有重要的政策和现实意义。

1.2.2 论文研究内容

本论文针对使用以高焦高煤为主的碳质还原剂的工业硅冶炼过程中伴随的高能耗、低效率、低产量等问题，利用多种计算与分析方法得到工业硅生产过程中碳排放量影响因素及其分解因素结果，并从其下游光伏电池原料的高纯晶硅生命周期入手，进行了环境影响的定量计算和评价。具体研究内容主要为：

（1）以取自工厂的实际生产数据为研究对象，结合工业硅生产过程时间层面的动态特性，将一年内的实测能耗数据按每个月进行划分，采用对数平均迪氏指数分解法建立工业硅生产过程的碳排放分解模型，将碳排放影响因素分解为能源碳排放系数、能源结构、能源强度和工业硅产量 4 项并得出相应影响碳排放量结果。

(2) 根据(1)计算得来的碳排放量数据,通过统计学计算方法研究不同还原剂组分、吨硅用量对 8.5 MVA 与 12.5 MVA 两种埋弧炉炉型生产过程碳排放量的影响,同时,研究三种不同碳质还原剂生产单吨硅产品过程中直接碳排放量与碳排放总量的具体影响。

(3) 运用生命周期评价方法对工业硅生产及其下游的高纯晶硅提纯过程进行环境影响的定量计算和评价,从而给企业管理者和环境保护管理部门提供相关的参考和建议。在使用改良西门子法将工业硅不断提纯获得高纯晶硅的过程中,将生命周期内的主要环境影响分为 1 至 10 个影响类别。通过贡献分析和改进评价,找出决定环境负荷的关键因素。

第二章 研究方法综述

2.1 论文研究方案

2023 年将是光伏发展极具潜力的一年，在去年上游原材料与疫情的等众多因素干扰下，光伏行业整体情势骤变；而今年随着各项原材料价格从高峰向下，供需层面将开始逐渐回到正常水位，结合各国减碳需求进一步带动终端装机量。光伏产业将助力全球的减碳目标，其中中国、欧洲与美国约占据全球 7 成体量。2021 年底，全球多晶硅的产能 93.5 万吨，其中，中国的多晶硅企业的产能将达到 76 万吨。中国硅料产能持续增加，2021 年中国多晶硅产能和产量分别达到 76 万吨和 50.5 万吨，从 2008 年的 5% 到 2013 年的 30%，2021 年已经达到 82.9%。相较去年增幅达到 56%。这主要支撑来自于 2021 年中国政府下发的多项利好光伏行业政策，以及国家对于“碳达峰和碳中和”政策的支持。从全球未来产业发展分析，由于中国的产业基础优势较大，光伏产业集中度将进一步偏向中国。同时世界各地的研究人员已经开发了各种方法来研究不同技术的环境影响和二氧化碳排放。Heijungs 等人设计了一个系统综合评估的人类和生态生命周期工具（HELIAS），对废水处理、环境政策措施的优先级、材料的环境加权这三种情况进行了分析^[71]。Kang 等人开发了一个输入输出线性规划（Input Output Linear Programming）模型^[72]，该模型被用于确定一种具有成本效益的战略，通过改变发电结构来减少整个经济范围内的二氧化碳排放，结果表明中国的煤炭和水电技术可能在 2020 年至 2050 年之间显著发展。O‘Ryan 等人基于可计算一般平衡（CGE）模型分析了来自智利电力市场的数据，结果证明智利政府通过政策导向正在减少其总体碳排放^[73]。Takla 等人^[36]对工业硅的实际和理论生产过程进行了分析，并利用焓效率和能量分析评价了工业硅生产过程的资源利用^[36]。

通过上述政策及文献综述，本论文采用与工厂合作实测数据，围绕当前工业硅实际生产过程主要的能源消耗量与碳排放量进行了三个方面的研究：首先分析了碳质还原剂对工业硅生产过程中碳排放量的线性影响，比较了不同炉型碳排放量比例；其次利用对数平均迪氏指数分解（Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition method）分析法，以下简称 LMDI 方法，将碳排放量进行了因素分解并得出相应结论；最后通过生命周期评价（Life cycle assessment）方法，以下简称 LCA 法，建立高纯晶硅生命周期评价模型，对从工业硅冶炼到高纯晶硅提纯

进行了评价,得到了相应环境影响量化结果,论文研究的总体研究方案思路与技术路线概括如图 2.1 所示。

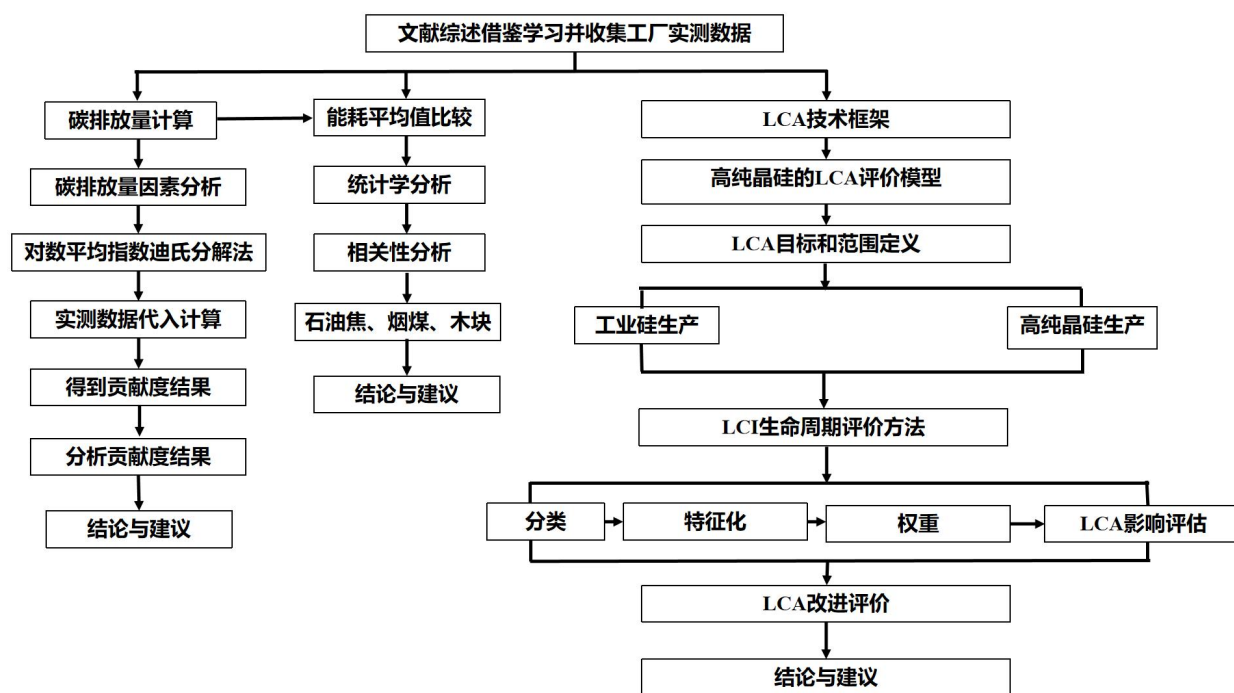


图 2.1 本论文研究技术路线图

Fig.2.1 Technical roadmap of this paper

2.2 数据分析方法

2.2.1 对数平均迪氏指数分解 (LMDI) 分析法

近年来,国际上对温室气体的排放越来越关注,因此许多研究都是为了分析二氧化碳的排放和影响因素而进行的。由 Ang 等人提出的对数平均迪氏指数分解 (LMDI)方法为在环境现象研究中获得更准确可靠的结果提供了一种实用的解决方案,最近被广泛应用于碳排放量分解^[80, 81]。该方法已被证明可以解决数据分析过程中可能出现的残差和负值问题的有效方法。LMDI 分析方法法是一种广泛用于碳排放量分析的方法,其基本原理是将碳排放量分解为不同因素的贡献,进而确定每个因素对总排放量的影响大小。这种方法可以用于评估不同行业、地区、国家和全球碳排放量的变化趋势,以及分析影响碳排放量的各种因素,如经济增长、能源结构、技术进步等。LMDI 分析法最初来源于迪氏指数分解法,是迪氏指数分解法的一种改进方法。其基本思想是使用对数变换将碳排放量分解为不同因素的对数差异,然后计算每个因素对总排放量的贡献,综合来看 LMDI 方法可以有效解决迪氏指数分解法中存在的一些问题,如过度估计和欠估计等。

LMDI 分析法的使用对象包括政府部门、学术机构、企业和社会组织等。政

府部门可以利用 LMDI 分析法评估不同政策措施对碳排放量的影响，制定更有效的减排措施。学术机构可以利用 LMDI 分析法分析不同因素对碳排放量的影响，探究减排路径和技术创新。企业可以利用 LMDI 分析法评估不同业务活动的碳排放量，制定减排计划和可持续发展战略。社会组织可以利用 LMDI 分析法监督企业和政府减排行动的效果，推动可持续发展。所以本研究也针对这种方法进行相关参考文献的学习与综述。

在 2005 年由清华大学的 Wang 等人^[82]针对 1957-2000 年中国能源相关数据进行了 LMDI 方法的二氧化碳排放分解，并将其分解为平均二氧化碳排放系数、燃料在总能源消耗中的份额、能量强度、人均 GDP 等 4 项因素。文章分析了 1957 至 2000 年中国二氧化碳总量的变化趋势，结果表明中国的二氧化碳排放量大幅下降主要是由于能源强度的提高。

大连理工大学的 Zhang 等人^[83]在 2009 年对 1991-2006 年中国能源相关二氧化碳排放量的分解。对 1991 至 2006 年中国能源相关二氧化碳排放进行了分解分析，并将其划分为三个时间区间。采用 Sun 提出的完全分解方法^[84]提出了一个二氧化碳减排的公式，表明中国为减少全球二氧化碳排放做出了重大贡献。

2011 年由中东科技大学的 Akbostanci 等人^[85]在研究中，采用 LMDI 方法计算得到土耳其制造业的二氧化碳排放量并且涵盖了该国 1995 年至 2001 年期间的 57 个行业。

韩国能源经济研究院的 Jeong 等人^[86]在 2013 年通过对其国内制造业碳排放进行了 LMDI 方法分解分析，确定了以总体工业活动（活动效应）、工业活动结构（结构效应）、部门能源强度（强度效应）、部门能源结构（能源结构效应）和二氧化碳排放因素（排放因素效应）为特征的模型。得出的结论为加强制造业低碳化和应对气候变化提供政策并建议提高能源强度和提供需要 10-20 年的产业结构调整计划并保持。

康塞普西翁大学的 Duran 等人^[87]在 2015 年因为能源成本的上升和对气候变化的担忧，对智利工业能源消耗进行了分析和分解。文章主要研究了通过运用指数分解分析（IDA）方法与对数平均迪氏指数强度方法（LMDI-I），其研究结果表明，虽然能源消耗保持稳定，但能源强度随着时间的推移而上升。这一事实支持了能源效率政策可以在工业部门发挥重要作用的观点。此外，能源消耗和能源强度在每个子部门遵循不同的模式；因此，结论还认为，实行差异化的部门政策比单一的全球政策更可取。

突尼斯的苏塞大学的 Achour 与 Belloumi^[88]在 2016 年由于经济的快速发展和

城市化的加速运用 LMDI 方法对突尼斯交通运输部门能源消耗的影响因素进行分解。本研究通过对 1985-2014 年期间突尼斯交通能源数据使用 LMDI 方法确定了消耗的驱动因素，并测定了它们在交通能源消耗中的相应贡献。根据驱动机制，该文献的实证结果为交通运输部门降低温室气体排放的政策措施提供了科学依据。

新加坡国立大学的 Liu 等人^[89]在 2019 年采用指数分解分析（IDA）方法在多区域、多部门分解和归因方法及统一一致的框架下从行业和区域的角度对 2000 年至 2015 年中国碳总量强度（ACI）的驱动因素进行研究分析。在此基础上，对中国为减少 ACI 而实施的行业和区域层面政策和措施的有效性进行了评估。

曲阜师范大学的 Gong 等人^[90]在 2022 年采用因素分解模型分析了中国二氧化碳排放的影响因素及其效应，并建立了弹性解耦的因果链模型。还分析了二氧化碳排放与经济增长的历史解耦状态及其影响因素的解耦效应。利用二氧化碳排放量预测模型，探讨中国未来中短期二氧化碳排放量的变化趋势及其峰值。预测了二氧化碳排放与经济增长之间的弹性脱钩趋势。结果表明，经济增长是推动二氧化碳排放的主要力量。能源强度和能源消费结构对二氧化碳排放的抑制作用除个别年份外均较强，但前者的抑制作用较后者更为显著。总体而言，二氧化碳排放与经济增长的弹性解耦经历了从弱解耦到增长联动再到弱解耦的状态。而这种弱脱钩趋势将在中短期内继续增强。“十四五”和“十五”期间，如果年均经济增长率保持在 4.61 至 5.85%，能源强度将降低 16.14 至 18.37%，“十四五”、“十五五”和“十六五”末期非化石能源在能源消费结构中的比重将分别在 19.9%、23.2%和 26.1%左右，届时二氧化碳排放强度将继续下降。预计 2025 年至 2027 年，二氧化碳排放量将在 10453 亿吨至 106.9 亿吨之间达到峰值。峰值时间越早，峰值越小，这将为碳中和提供宝贵的时间，为中长期减少二氧化碳排放提供空间。

中南林业科技大学的 Peng 等人^[91]研究了 1996 至 2019 年中国石化工业的脱钩现状和减排潜力。首先采用 IPCC 方法计算了中国石化行业二氧化碳排放量，然后利用 LMDI 方法分解了二氧化碳排放的影响因素，然后构建了解耦指数，分析了经济发展对二氧化碳排放的依赖性。最后利用影响因素建立了反映石化行业二氧化碳减排潜力的减排潜力模型。结果表明政府应建立节能环保的工业生产体系，加大清洁能源的使用力度，优化劳动力结构。不仅有效加强了石化行业与经济发展的脱钩关系，也为世界其他国家石化行业的碳减排和经济可持续发展提供了经验借鉴。

综上所述，LMDI 方法被广泛应用于各大行业、各种领域，所以本研究也采用该方法对来自工业硅企业的实测数据进行分析并进行工业硅生产过程相关数据

的分解。依据此方法得出的碳排放量影响因素分解研究在丰富硅行业碳排放量影响因素常用研究方法的同时，为工业硅行业提供全面参考意义与建议。

2.2.2 线性分析方法

为研究碳质还原剂用量对工业硅生产过程中碳排放量的影响，采用皮尔逊相关系数法（Pearson correlation coefficient method），其已被广泛采用来评估变量之间的相关性，和衡量变量间线性相关性的趋势数值进行分析^[74, 75]。皮尔逊相关系数法是一种用于评估两个变量之间线性相关程度的统计方法。该方法是由卡尔·皮尔逊（Karl Pearson）于 1895 年提出的，因此得名。皮尔逊相关系数法被广泛应用于社会科学、自然科学、医学和工程等领域。这种方法已经成为评估不同因素之间关系及其对碳排放影响的流行工具。总之，皮尔逊相关系数法是一种简单而有效的统计方法，可以帮助研究人员了解不同变量之间的关系，为决策提供数据支持。皮尔逊相关系数法的使用对象包括但不限于以下几个方面：

1. 社会科学：在心理学、经济学、社会学等领域中，皮尔逊相关系数法被用来研究不同变量之间的关系，如收入和教育程度、人口增长和经济发展等。

2. 自然科学：在物理学、化学和生物学等领域中，皮尔逊相关系数法被用来研究不同变量之间的关系，如温度和压力、反应速率和浓度等。

3. 医学：在医学领域中，皮尔逊相关系数法被用来研究不同变量之间的关系，如体重和身高、血糖水平和糖尿病风险等。

4. 工程：在工程领域中，皮尔逊相关系数法被用来研究不同变量之间的关系，如温度和材料强度、电流和电压等。因此它已成为科学研究领域的一个重要组成部分。具体公式表述如下：

$$r = \frac{\sigma_{x_i y_i}}{\sigma_{x_i} \cdot \sigma_{y_i}} = \frac{\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n}}{\sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \times \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n}}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.1)$$

其中 r 为皮尔逊相关系数， n 为样点数量， σ_{x_i} 和 σ_{y_i} 表示标准差， \bar{x} 和 \bar{y} 表示平均值。皮尔逊相关系数的范围为 $(-1, +1)$ 。当皮尔逊相关系数越接近+1，表示自变量与因变量正相关性就越高，其数值大于等于 0.8 时，有高度正相关性；在大于等于 0.5 小于 0.8 之间时，有中度正相关性；在大于等于 0.3 小于 0.5 之间时，有低度正相关性；当在小于 0.3 大于 0 时，自变量与因变量之间的正相关性较弱。越接近 0，表示变量之间没有相关性；当皮尔逊越接近-1，表示自变量与因变量有较大的负相关性，其数值小于等于-0.8 时，有高度负相关性；在大于-0.8

小于等于-0.5 之间时, 有中度负相关性; 在大于-0.5 小于等于-0.3 之间时, 有低度负相关性; 当在大于-0.3 小于 0 时, 自变量与因变量之间的负相关性较弱。皮尔逊相关系数的平方代表了自变量通过回归关系可以解释的因变量总变化的比例。

吉林大学地球探测科学与技术学院的王凯等人^[76]利用皮尔逊相关系数法进行了快慢横波波场分离研究。国家电网公司的杨帆等人^[77]在 2014 年基于皮尔逊相关系数法对水树枝与超低频介损的相关性进行了研究。2019 年天津大学的姜丰等人^[78]利用皮尔逊相关系数评价了有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle) 系统蒸发器特性的应用。2021 年智能电气量测与应用技术湖南省重点实验室的许阳等人^[79]基于皮尔逊相关系数法针对台区窃电进行了精准分析。上述部分文献对研究该方法应用该方法在工业硅实际生产数据与碳排放量之间的影响关系提供了参考。

2.2.3 生命周期评价 (LCA) 方法

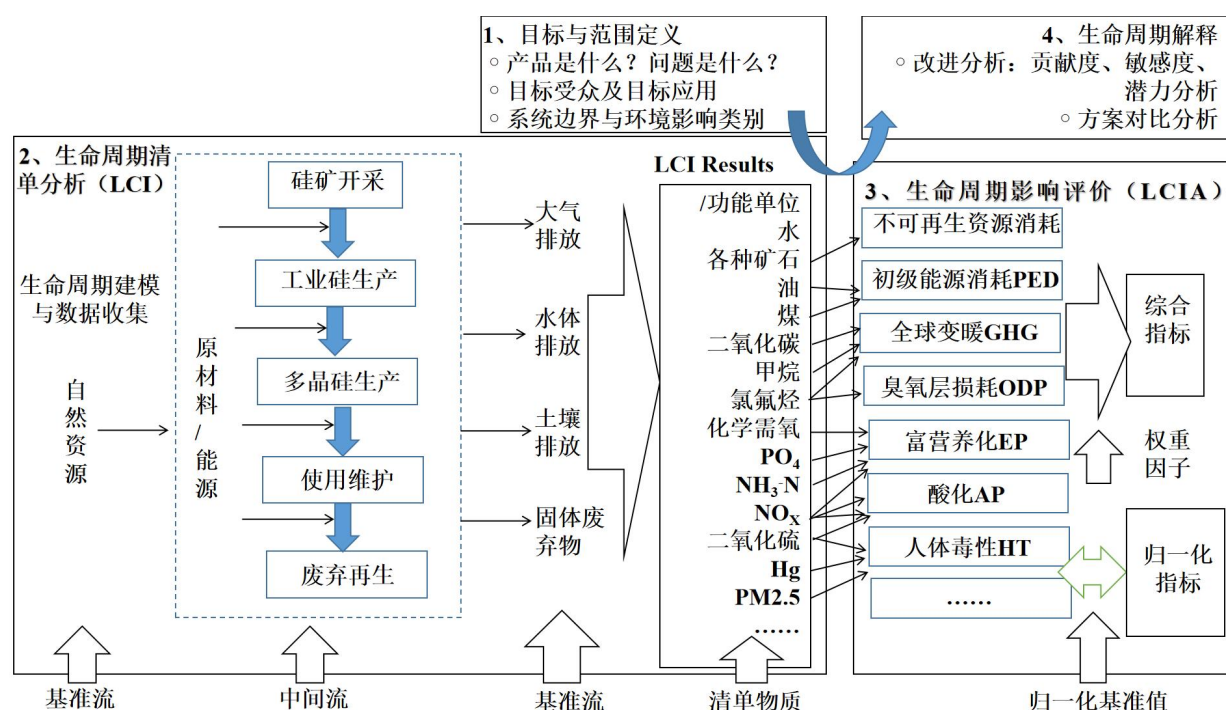


图 2.2 生命周期评价方法框架

Fig.2.2 Method frame of LCA

LCA 方法是一种广泛应用于环境因素影响评价的方法, 其基本思路是将产品或服务的整个生命周期分解为不同的阶段, 然后对每个阶段的环境影响进行评估, 并对其进行加总和综合分析, 以确定产品或服务对环境的综合影响。LCA 方法的来源可以追溯到 20 世纪 70 年代, 当时美国环保署开始研究如何评估产品的环境影响。LCA 方法的发展经历了多个阶段, 包括数据收集、方法论建立、标准化等。目前, LCA 方法已经成为一种公认的评估产品或服务环境影响的方法, 并被广泛

应用于企业环境管理、政策制定、产品设计等领域。LCA 方法的使用对象可以是任何产品或服务，包括日常生活中的消费品、工业产品、能源系统、交通运输等。LCA 方法可以评估产品或服务的整个生命周期，包括原材料采集、生产、运输、使用和废弃等不同阶段。通过对不同阶段的环境影响进行评估和分析，可以确定产品或服务对环境的综合影响，为环境保护和可持续发展提供决策支持。

LCA 目前其已广泛应用于企业部门，包括 AT&T^[92]，IBM^[93, 94]，SI^[95]和 HP^[96, 97]。其他领先企业与高校也利用产品的实际生产数据，对 LCA 理论与实践进行了大量的研究，针对本文运用 LCA 方法对晶硅原料进行分析的总体框架如图 2.2 所示。接下来进行部分相关行业文献综述。

2020 年中国矿业大学的 Li 等人^[98]采用自下而上的 LCA 方法进行了中国煤电产业链温室气体排放的准确估算并提出了改进措施。综合了影响煤矿、煤炭运输路线和煤电机组点源温室气体排放的 10 个技术指标。量化了 2016 年煤电产业链各省际温室气体排放因素，在 964-1232 克二氧化碳等价值每千瓦时范围内变化较大。基于这些排放因素，2016 年中国煤电产业链的温室气体排放总量估计为 4232 百万吨二氧化碳等价值，在中国北部和东部是空间密集的。按照目前的政策，碳排放预计将在 2025 年达到峰值，各省的差异表明，碳减排战略应因地制宜，全国统筹协调。

2021 年佩鲁贾大学的 Gul 等人^[99]认为可以采用四种解决方案来降低钢铁行业的排放量占全球温室气体排放总量的比例：用氢气或合成气直接减排、改进电弧炉、碳捕获和储存以及使用生物燃料（生物质碳）。该研究建议采用创新的方法，将木炭与热解油制成球团，并在高温下重新加热，以获得足够硬度、减少孔隙率和适当的反应性的材料，并将欧洲和中国钢铁工业用球团生物碳替代焦炭进行了 LCA 方法分析。但是事实上，考虑到经济和能源的角度，生物质热解固体产物的产出率远低于煤热解所得的产出率，因此生物碳的累计能耗往往高于煤。最后也对硅和钢铁工业中生物碳预期最终使用的技术和经济分析以及环境分析的结果提出预测。

以上文献表明，LCA 方法作为一种广泛应用于环境因素影响评价的方法，在行业中得到了广泛的应用^[40, 100]，因此本文也采用其对晶硅原料生产过程的生命周期进行评价。

第三章 工业硅生产过程碳排放量影响因素分解研究

3.1 引言

随着全球对环保兴趣日益浓厚的趋势，硅的制造过程中会使用大量的碳质还原剂并且产生大量的碳排放，成为中国企业深为关注的问题。以往的研究计算了硅生产过程中产生的碳排放量，而对硅生产过程中影响碳排放的因素的研究却很少。了解工业硅生产过程中实际影响二氧化碳排放量的因素，分析得到相应因素的影响程度是非常重要的。在分析影响碳排放的因素时，指数分解方法已被广泛采用，该方法可以揭示各因素对碳排放量的相同时间内的动态影响。该分解方法可以逐层进行，最后区分每个因素对目标变量的贡献。在现有的指数分解技术中，拉斯佩尔指数法（Laspeyres Index）和迪氏指数（Divisia Index）指数因其功效而被广泛使用。Laspeyres 指数采用的权重在基期是固定的，具有每个因素的意义明确与计算方便的优势；而 Divisia 指数采用的权重则随时间变化，它的优势在于，它可以通过将交叉效应分布到各时间分组来确定变量权重，其残差小于拉斯佩尔指数的残差。具体组成因素的选择可以根据分析的目的而有所不同。本质上，目标变量的任何变化都可以被分解为多个关键影响因素的乘积，再根据各种权重确定方法进行分析，从而得到每个因素对碳排放变化的贡献率。

本章针对采用 LMDI 方法建立工业硅实际生产的二氧化碳排放指数分解模型，将一年内每月不同类型的埋弧炉产生的二氧化碳排放量影响因素分解为能源二氧化碳排放系数、能耗结构、能源强度和总产量 4 项。对硅生产行业的定量因素分析从而确定影响二氧化碳排放量变化的动态特性驱动因素，得到以下结果工业硅产量是导致二氧化碳排放增加的最具影响力的因素，而能源强度是抑制二氧化碳排放的最大因素。能源消费结构对二氧化碳排放量的减少也有重要影响，但影响并不明显，因为这一时期能源结构没有明显改善。因此，除了降低整体产量外，提高硅生产的能源效率是实现二氧化碳减排的关键。

3.2 研究思路

3.2.1 数据来源及处理方法

本章节数据来源取自工业硅生产企业实际的能源消耗数据。首先选取了我国工业硅制造商一年期间 12 个月份 8.5 MVA 和 12.5 MVA 埋弧炉的二氧化碳排放

数据，并按每月（30 天）的时间序列进行了研究。电力的碳排放系数在 IPCC 的指导方针中没有明确给出，但通常是用两个数值表示，也就是说，即“当量值”和“等价值”。“当量值”指一个能源单位本身的热量，而“等价值”是指一个能源单位在生产过程中所消耗的另一种能源产品的热量。化学需氧量是描述反应水体中有机污染水平的一个重要指标，它可以影响表征结果。目前，这些规定一般用于电力产品消耗的换算计算。

3.2.2 实验方法

因此本章采用对数平均迪氏指数分解法（LMDI）方法，探讨 1 年内 8.5 MVA 和 12.5 MVA 埋弧炉对二氧化碳排放变化的影响因素，研究我国硅产业发展过程中影响二氧化碳排放变化的关键因素。本文选择的组成因素包括二氧化碳排放系数、能耗结构、能源强度和总产量，因此二氧化碳排放的变化可以用下式表示：

$$E = \sum_{i=1}^4 E_i = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{E_i}{AD_i} \times \frac{AD_i}{C} \times \frac{C}{Y} \times Y \right) = \sum_{i=1}^4 EF_i \times S_i \times I \times Y \quad (3.1)$$

其中， E 为硅工业生产过程中能源使用的总二氧化碳排放（吨）； E_i 为燃料 i 的二氧化碳排放（吨）； AD_i 为燃料 i （吨）消耗； C 为工业硅生产过程的实际总能耗（吨）； Y 为工业硅的实际总产量（吨）； i 代表 4 种燃料：烟煤、石油焦、木块和电力；根据《中国能源统计年鉴》（2016 版）和《中国统计年鉴》（2016 版）中提取的标准能源转换系数转化为标准煤消耗。 EF_i 是工业硅生产实际排放的燃料的二氧化碳排放系数，等于 $E_i \cdot AD_i^{-1}$ ，具体数值如表 3.1 所示； S_i 为燃料消耗结构，等于 $AD_i \cdot C^{-1}$ ； I 为能量强度，等于 $C \cdot Y^{-1}$ 。

表 3.1 能源 i 燃料的二氧化碳排放系数

Table 3.1 Carbon dioxide emission coefficients of energy i fuels

能源 i 种类	烟煤	石油焦	木块	电力
EF_i , 碳排放系数	2.53 kgCO ₂ /kg	3.35 kgCO ₂ /kg	1.35 kgCO ₂ /kg	0.7035 kgCO ₂ /kWh

假设经过 $t+1$ 的时间，二氧化碳的排放量从 $E^t = \sum_{i=1}^4 (EF_i^t \times S_i^t \times I^t \times Y^t)$ 变为 $E^{t+1} = \sum_{i=1}^4 (EF_i^{t+1} \times S_i^{t+1} \times I^{t+1} \times Y^{t+1})$ 。使用 LMDI 方法可以得到指数分解形式表达式有加性分解和乘法分解两种，如下：

乘法形式：

$$D_{tot} = E^{t+1} / E^t = D_{EF} D_S D_I D_Y \quad (3.2)$$

加法形式：

$$\Delta D_{tot} = E^{t+1} - E^t = \Delta E_{EF} + \Delta E_S + \Delta E_I + \Delta E_Y \quad (3.3)$$

其中， E 为硅工业生产过程中能源使用的二氧化碳排放总量（吨）， D_{tot} 为一

个月时间内碳排放因素的贡献； ΔD_{tot} 为碳排放量总量（吨），表示各种因素下碳排放的变化； ΔE_{EF} 和 D_{EF} 为排放系数因素及其贡献度； ΔE_S 和 D_S 为能耗结构因素及其贡献度； ΔE_I 和 D_I 为能源强度因素的贡献值及其贡献率； ΔE_Y 和 E_Y 为生产总量因素的贡献值及其贡献率。

加法分解主要是对碳排放的基准基期和比较期进行差分分解，研究影响碳排放的各因素在一定时间段内的绝对影响强度；乘法分解主要考察各因素在影响碳排放变化中的相对贡献。这两种分解形式得出了相同的结论，所以本研究采用相对简洁明了的乘法形式进行了分析。贡献度计算公式如下，其中 ω 为 Sato-Vartia 指数权重：

$$D_{EF} = \exp \left[\sum_i \omega \ln \left(\frac{EF_i^{t+1}}{EF_i^t} \right) \right] \quad (3.4)$$

$$D_S = \exp \left[\sum_i \omega \ln \left(\frac{S_i^{t+1}}{S_i^t} \right) \right] \quad (3.5)$$

$$D_I = \exp \left[\sum_i \omega \ln \left(\frac{I_i^{t+1}}{I_i^t} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$D_Y = \exp \left[\sum_i \omega \ln \left(\frac{X_i^{t+1}}{X_i^t} \right) \right] \quad (3.7)$$

$$\omega = \frac{E^t - E^{t+1}}{\ln \left(\frac{E^t}{E^{t+1}} \right)} \quad (3.8)$$

3.3 计算结果及分析

3.3.1 对 8.5 MVA 埋弧炉数据分析

本文采用 LMDI 方法，根据上述公式计算各因素对二氧化碳排放的贡献率。详细数据和计算结果分别见表 3.2 和表 3.3。将 1 月份各项数据作为所有变化比较的基线，任何给定月份的变化都是相对于前一个月（30 天）。另外，虽然二氧化碳排放系数在 1 年时间内会发生一定变化，但变化较小，所以在本应用中作为常数，即二氧化碳排放系数变化的贡献率设为 1（ $D_{EF} = 1$ ）。一般来说，贡献率大于 1 会导致二氧化碳排放量的增加，而贡献率小于 1 则表明该因素会导致了二氧化碳排放量的减少。

根据表 3.2 中数据，可以计算得到相对应的平均值和标准差，8.5MVA 埋弧炉的月度工业硅产量约为 496.706 ± 22.484 吨；烟煤消耗量约为 $330.623 \pm$

67.555 吨；石油焦消耗量约 335.701 \pm 15.150 吨；木块消耗量约 306.295 \pm 62.867 吨，用电量约 6144653.333 \pm 89877.482 千瓦时；总碳排放量约为 6084.269 \pm 113.088 吨。

表 3.2 在 8.5MVA 埋弧炉月度总能耗和二氧化碳排放量结果

Table 3.2. Total energy consumption and CO₂ emission of actual ISP of 8.5MVA SAF in each month

月度阶段	工业硅产量 (t)	能源消耗量				二氧化碳排放量 / (t)
		烟煤/ (t)	石油焦/ (t)	木块/ (t)	电力 / (kWh)	
1	467.244	229.783	294.692	325.068	6215260	5759.650
2	476.652	381.100	343.372	258.685	6075580	6131.939
3	482.225	304.109	325.403	349.099	6079500	6000.888
4	482.409	270.674	348.429	397.652	6152020	6102.517
5	482.912	264.783	333.588	357.568	6344660	6100.356
6	486.161	299.531	346.304	315.442	6237120	6109.273
7	492.395	252.189	334.136	417.851	6210540	6070.373
8	494.020	374.488	345.884	247.020	6082300	6112.001
9	510.133	373.074	347.452	256.226	6121360	6149.646
10	515.011	419.147	331.921	251.851	6094200	6191.895
11	535.345	418.504	330.749	242.736	6085660	6168.929
12	535.964	380.098	346.486	256.341	6037640	6113.769

如表 3.3 所示，1 月至 2 月、3 月至 4 月、5 月至 6 月、7 月至 8 月、9 月至 10 月、11 月至 12 月，即共 6 个月度时间阶段的 D_s 贡献值均大于 1，其余 5 个月度时间阶段的 D_s 小于 1，表明能源结构对工业硅生产过程碳排放总体促进作用大于总体抑制作用，但 D_s 总贡献度仍然起到一定的抑制作用。1 月至 2 月、3 月至 4 月、4 月至 5 月，即共 3 个月度时间阶段 D_i 大于 1，其余 8 个时期 D_i 小于 1，表明能源强度对工业硅生产过程的碳排放有明显的抑制作用。从 1 月至 12 月， D_y 的贡献度在 11 个月度时间阶段里均大于 1，因此工业硅产量在工业硅生产过程的碳排放中发挥了整体的促进作用。1 月至 2 月、3 月至 4 月、5 月至 6 月、7 月至 8 月、8 月至 9 月、9 月至 10 月、11 月至 12 月，即共有 6 个月度时间阶段的 D_{tot} 贡献值均大于 1，其余 5 个月度时间阶段的 D_{tot} 小于 1，由总贡献度数据可以得出，在 8.5MVA 额定容量埋弧炉中，工业硅生产各影响因素总体对碳排放量

促进作用大于抑制作用。

表 3.3 在 8.5MVA 埋弧炉中二氧化碳排放影响因素分解结果

Table 3.3 Decomposition calculation results of CO₂ emission in ISP of 8.5MVA SAF

月度阶段	D _{tot}	D _S	D _I	D _Y
1-2	1.076	1.058	1.005	1.012
2-3	0.973	0.979	0.986	1.007
3-4	1.010	1.000	1.009	1.000
4-5	0.992	0.986	1.005	1.001
5-6	1.011	1.015	0.992	1.004
6-7	0.987	0.988	0.991	1.008
7-8	1.026	1.031	0.993	1.002
8-9	1.003	0.999	0.984	1.020
9-10	1.006	1.004	0.996	1.006
10-11	0.998	0.999	0.974	1.024
11-12	0.995	1.000	0.994	1.001

3.3.2 对 12.5 MVA 埋弧炉数据分析

与第 3.3.1 节类似，采用 LMDI 方法计算各影响因素对二氧化碳排放的月贡献率。详细数据和计算结果分别见表 3.4 和表 3.5。在对 12.5 MVA 埋弧炉的工作数据进行处理后，发现总体贡献度结果与 8.5 MVA 埋弧炉大体相似。根据表 3.4 中计算的平均值和标准差，12.5 MVA 埋弧炉的月度工业硅产量约为 873.547 ± 47.188 吨；烟煤消耗量约为 918.695 ± 83.998 吨；石油焦消耗量约为 277.808 ± 56.852 吨；木块消耗量约为 707.617 ± 21.224 吨；用电量约为 $10014499.000 \pm 165857.761$ 千瓦时；总碳排放量约为 10255.125 ± 175.272 吨。

如表 3.5 所示，2 月至 3 月、6 月至 7 月、8 月至 9 月、10 月至 11 月，即共 4 个月度时间阶段的 D_S 贡献值均大于 1，其余 7 个月度时间阶段的 D_S 小于 1，表明能源结构对工业硅生产过程碳排放抑制作用明显大于促进作用。5 月至 6 月、7 月至 8 月、8 月至 9 月，即共 3 个月度时间阶段 D_I 大于 1，其余 8 个时期 D_I 小于 1，表明能源强度对工业硅生产过程的碳排放有明显的抑制作用。从 1 月至 12 月，D_Y 的贡献度在 11 个月度时间阶段里均大于 1，因此工业硅产量在工业硅生产过程的碳排放中发挥了整体的促进作用。2 月至 3 月、5 月至 6 月、6 月至 7 月、7 月至 8 月、8 月至 9 月、10 月至 11 月，即共有 6 个月度时间阶段的 D_{tot} 贡献值均大于 1，其余 5 个月度时间阶段的 D_{tot} 小于 1，由总贡献度数据可以得出，在 12.5

MVA 额定容量埋弧炉中,工业硅生产过程各影响因素总体对碳排放量促进作用大于抑制作用。

表 3.4 在 12.5MVA 埋弧炉月度总能耗和二氧化碳排放量结果

Table 3.4. Total energy consumption and CO₂ emission of actual ISP of 12.5MVA SAF in each month

月度 阶段	工业硅产量 (t)	能源消耗量				碳排放量/ (t)
		烟煤/ (t)	石油焦/ (t)	木块/ (t)	电力 / (kWh)	
1	811.920	885.631	322.546	690.469	10071700	10332.838
2	813.290	835.031	316.438	714.674	10097220	10232.317
3	834.273	1012.940	223.474	686.566	9938040	10237.060
4	836.928	870.320	288.260	686.231	10024820	10145.230
5	856.499	1030.120	167.657	702.879	9625560	9926.724
6	857.551	942.60	230.721	676.032	10035480	10128.0683
7	877.012	731.685	378.796	731.331	9843540	10048.924
8	891.528	1004.580	237.113	699.871	9927120	10272.881
9	895.036	969.570	275.887	724.236	10031640	10410.101
10	915.124	928.015	265.274	704.628	10160220	10320.712
11	932.468	909.266	318.594	741.000	10193328	10520.799
12	960.940	904.597	308.938	733.481	10225320	10485.853

3.3.3 工作结果分析

图 3.1 和图 3.2 显示了一年内 8.5 MVA 和 12.5 MVA 埋弧炉在生产过程影响工业硅生产二氧化碳排放的各种因素的月贡献率。从图 3.1 和图 3.2 可以看出:工业硅产量是驱动其生产过程中二氧化碳排放量增加的最大促进因素,这也是生产过程中二氧化碳排放量增加的决定性因素且贡献率最大,即生产过程中二氧化碳排放量的增加与工业硅生产过程产量的增加最为密切相关。虽然能耗结构因素的二氧化碳排放贡献率在某些月内大于 1,但能耗结构和能量强度因素总体上是抑制因素。虽然能源消耗结构确实对二氧化碳的排放有降低作用,但效果不是很明显,但是相比之下,能量强度因素对降低二氧化碳排放的影响明显大于能源消耗结构因素。这主要是因为中国硅工业的能源消费结构的改善幅度很小,而且仍然以烟煤、石油焦等化石燃料的消费为主。总体而言,工业硅生产过程中二氧化碳总排放量呈上升趋势,这是由于工业硅生产过程产量的需求愈发增加,其贡献

率远远大于能源消耗结构和能源强度因素。

表 3.5 在 12.5MVA 埋弧炉中二氧化碳排放影响因素分解结果

Table 3.5. Decomposition calculation results of CO ₂ emission in ISP of 12.5MVA SAF				
月度阶段	D _{tot}	D _S	D _I	D _Y
1-2	0.989	0.992	0.996	1.001
2-3	1.000	1.003	0.983	1.015
3-4	0.993	0.996	0.996	1.002
4-5	0.984	0.999	0.972	1.014
5-6	1.011	0.996	1.014	1.001
6-7	1.006	1.014	0.979	1.013
7-8	1.010	0.998	1.002	1.010
8-9	1.010	1.003	1.005	1.002
9-10	0.989	0.990	0.986	1.013
10-11	1.018	1.010	0.997	1.011
11-12	0.996	0.996	0.982	1.018

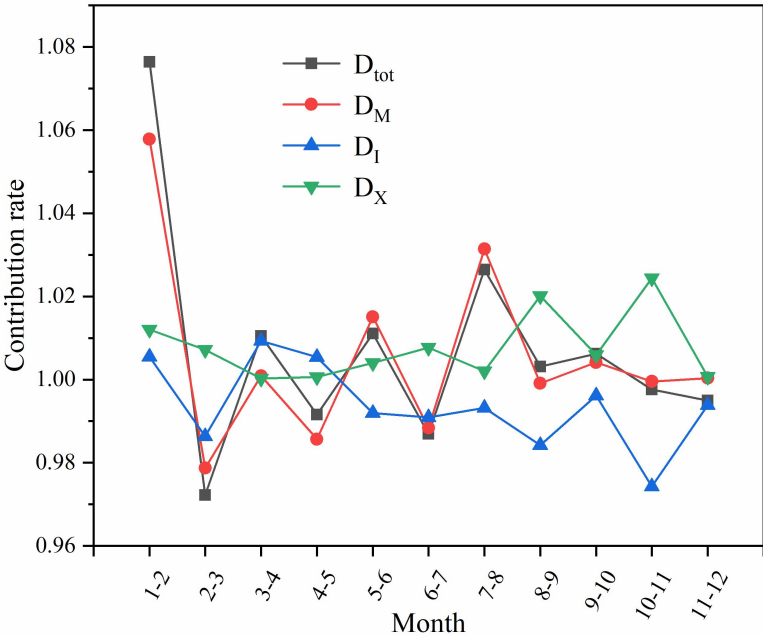


图 3.1 在 8.5MVA 炉各项影响因素对工业硅生产二氧化碳排放月贡献率

Figure 3.1 Monthly contribution rate of influencing factors to CO₂ emission of ISP in 8.5MVA SAF

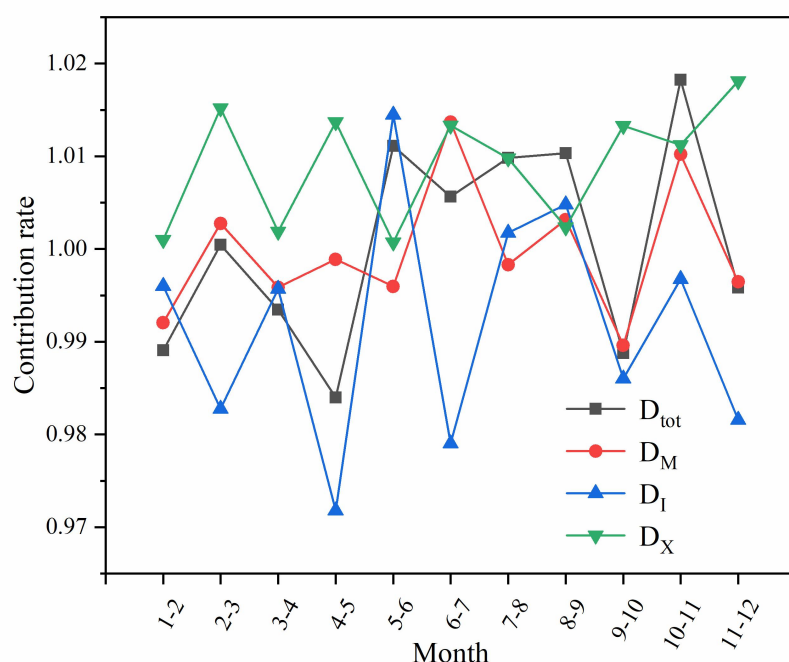


图 3.2 在 12.5MVA 炉各项影响因素对工业硅生产二氧化碳排放月贡献率

Figure 3.2 Monthly contribution rate of influencing factors to CO₂ emission of ISP in 12.5MVA SAF

为了提高能源效率，努力应集中在几个关键领域。首先，工业硅企业应注重发展低碳技术，提高能源效率，实施更严格的减排政策。在技术进步方面，提高能源效率是节能减排的重要组成部分。因此，工业硅企业应大力引进先进的环保技术，更新高科技设备，提高能源的综合利用效率，并为碳减排技术研究提供资金。第二，硅行业应逐步淘汰高排放、高能耗、低产量的企业，将低排放、低能耗、高产量的企业所采用的优秀措施集成消化并继续创新。进一步改进碳排放标准，并整合晶硅原料生产阶段全过程污染监测系统，以准确地测量和控制所有的碳排放量。第三，应通过经济法规来限制煤炭的供应，如增加煤炭的开采成本。短期内，煤炭价格机制被视为一条可行的途径。之后，煤炭和其他化石燃料将需要被升级硅工业中碳质还原剂的结构来取代。然而，中国的能源资源和环境意味着，以烟煤和石油焦为基础的能耗结构根深蒂固，难以在短时间内改变，所以应该尽量提高晶硅原料生产使用的碳质还原剂的质量，特别是烟煤。第四，推动绿色能源发展已经成为我国能源发展战略需求的方向，并且将供给侧结构性进行改革，促进区域多能互补协调发展。

3.4 本章小结

本章主要采用 LMDI 方法分析了工业硅生产过程中影响二氧化碳排放的因素。

因此,从未来发展的角度来看,工业硅企业应仍然以增长工业硅产能为目标,提高节能水平,减少碳排放。对能源消耗结构、能源效率等问题进行分析,系统、全面地完善和优化行业。除此以外应该努力确定可能存在的主要改进点及其实际影响,并应在政策中采取适当措施。具体结论如下:

(1)对 8.5 MVA 和 12.5 MVA 埋弧炉实际连续生产 12 个月的数据分析显示,工业硅产量的增加推动了二氧化碳排放量的增加。能源强度和能源消耗结构则是抑制二氧化碳排放的重要因素,月度阶段计算结果表明,与 8.5 MVA 埋弧炉相比,每生产 1t 工业硅 12.5 MVA 埋弧炉的平均每月二氧化碳排放量将减少 0.5096 吨。

(2)对 1 年(12 个月),即 11 个月度时间阶段,8.5 MVA 和 12.5 MVA 埋弧炉的实际生产数据的 LMDI 分解法分析显示,工业硅产量的贡献值均大于 1,而能量强度的贡献值大多小于 1,能耗结构的贡献值在 1 左右波动。这表明,工业硅产量的增长是驱动工业硅生产过程二氧化碳排放增加的最重要因素,而能量强度对二氧化碳排放的抑制有显著影响,而能耗结构对二氧化碳减排的影响则不明显,并且能量强度因素对二氧化碳减排的贡献率远大于能量消耗结构因素。

(3)计算结果表明,8.5MVA 炉型 D_{tot} 平均值为 1.0067,12.5MVA 炉型 D_{tot} 平均值为 1.0061,即 12.5MVA 炉型在促进碳排放量的程度上低于 8.5MVA。因此,工业硅企业应尽可能使用大容量炉型,努力开发低碳能源,积极开展技术创新,降低烟煤和石油焦在工业硅生产工艺的能源消耗结构中所占的比例,提高烟煤和石油焦的利用效率,特别是副产品尾气和废水的利用效率。目前,工业硅产业的能耗结构仍以烟煤和石油焦为主,这说明硅产业的能耗结构亟待改善。对企业来说,应重点考虑调整和优化生产工艺,进一步提高碳质还原剂的利用效率。

第四章 碳质还原剂对工业硅生产碳排放量的影响

4.1 引言

为了降低硅生产过程中的碳排放量，通过对实际生产数据的统计学分析，研究了合适的碳质还原剂用量与比例和不同额定容量炉型（8.5 MVA 和 12.5 MVA）对硅生产过程中碳排放量的影响。根据第三章采集自某具有代表性的工业硅生产企业的生产数据，进一步分析三种主要碳质还原剂对 8.5 MVA 和 12.5 MVA 埋弧炉在硅生产过程中二氧化碳排放量的影响程度。通过皮尔逊系数法分析了碳质还原剂对工业硅生产过程中直接碳排放量与碳排放总量的影响关系。

埋弧炉（Submerged arc furnace, SAF）是工业硅生产的主要设备。本章节利用工业硅实际生产数据，采用统计学方法线性分析了不同碳质还原剂在生产单吨工业硅产品时对直接碳排放量与碳排放总量的影响，为不同埋弧炉优化碳质还原剂配比生产硅提供减排建议。本研究的结果对优化各种碳质还原剂的使用和减少埋弧炉的功率消耗具有重要意义，最终目的是提高工业硅生产的效率，减少能源消耗和生产成本。虽然以前的研究已经探讨了炉子类型和原材料与能源消耗之间的关系，但对大额定容量炉型的研究仍然很缺乏。鉴于小容量的炉子正在被淘汰用于硅生产，因此必须优先调查硅冶炼背景下的埋弧炉的工艺参数。

4.2 研究思路

4.2.1 实验原料

以二氧化硅为原料生产工业硅的主要碳质还原剂包括烟煤、石油焦、蓝碳、半焦、沥青焦、焦粉、木炭、木块、生物质炭等。取自工厂实际生产数据的实验所用以石油焦、烟煤、木块这三种碳质还原剂为主要代表，以碳元素含量为 100% 的石墨为电极材料。这些材料的划分分析结果主要是由固定碳、挥发物、水分和灰分组成，表 3.1 为本工作中工业硅生产实验中使用的含碳原料的主要化学成分参考结果。其中石油焦的固定碳含量最高，达到 84.74%；烟煤的挥发分含量最高，达到 39.55%；木块的水分最高，达到 57%。除此以外还测定了木炭的化学分析结果，虽然它不参与工业硅实际生产过程，但需要其作为其他三种碳质还原剂的参考结果。

表 4.1 碳质还原剂的化学分析结果

Table 4.1 Results of chemical analysis of carbonaceous reductants

原料	固定碳 (%)	挥发分 (%)	水分 (%)	灰分 (%)
石油焦	84.74	14.68	0.12	0.46
烟煤	53.37	39.55	4.70	2.38
木块	10	32	57	1
木炭	52	10	33	5
电极	100	0	0	0

4.2.2 实验数据处理

在本工作中，我们通过与某具有代表性的工业硅企业合作，收集了大量的实际生产数据，并仅保留埋弧炉正常运行的常规数据。对这些数据的分析揭示了不同炉型工业硅生产过程中原料消耗和碳排放量之间的关系。了解数据之间的关系有助于降低生产成本和碳排放，实现更合理和有效地利用资源，提高资源利用和产品质量，并保护环境。

8.5 MVA 炉型命名为 1#埋弧炉和 2#埋弧炉，12.5 MVA 炉型命名为 3#埋弧炉和 4#埋弧炉。为了便于比较分析，将 3 种碳质还原剂的消耗数据转化为生产每吨工业硅的数据，数据单位为吨/吨。将二氧化硅含量和电极材料设定为保持固定不变，碳质还原剂与二氧化硅完全反应。

4.2.3 碳排放量计算方法

碳排放计算方法可分为活动水平方法、质量守恒方法和连续监测方法三类^[41]。鉴于这三种方法的特点，活动水平方法是目前最常用的方法^[101]。在本工作中，对碳排放的研究也采用了活动水平法来衡量企业的碳排放。

4.2.3.1 直接排放量

直接碳排放是指化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放。直接碳排放量的计算公式源自《政府间气候变化专门委员会准则》（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC），具体公式表示如下：

$$E = \sum AD_i \times EF_i \quad (4.1)$$

式中，E 为工业硅生产过程中所有燃料燃烧引起的总碳排放的值，i 为不同碳质还原剂的类型， AD_i 为 i 的总消耗量， EF_i 为不同碳质还原剂 i 的二氧化碳排放系数。根据 IPCC 指南中发布的能源推荐碳排放系数公式，各种碳质还原剂的碳排放系数可计算为：

$$C = A \times B \times \left(\frac{44}{12}\right) \times 1000 \quad (4.2)$$

$$F = C \times 4186.6 \times 10^{-9} \times 10^{-3} \quad (4.3)$$

$$H = F \times G \quad (4.4)$$

其中, A 为碳排放系数 (kgC/GJ), B 为碳氧化因素, 所有工业硅生产原料的重量均为 1 kg。C 为二氧化碳排放系数 (kgCO₂/TJ), F 为原始系数 (kgCO₂/kcal), C 为二氧化碳排放系数 (kgCO₂/TJ), G 为热值 (千卡/kg), H 为推荐排放系数 (kgCO₂/kg)。值得注意的是, 用于计算的二氧化碳排放因素取自 2006 年 IPCC 指南, 因为这些值更适合于中国的工业硅生产企业且木块固体和木炭的发热量都采用中国的热值。木块的热值约为 1.2×10^7 J/kg, 可转换为 2866800 卡路里/公斤的普通单位, 或 2866.8 千卡/公斤。木炭的热值为 3.4×10^7 J/kg, 即当 1kg 木炭完全烧焦时释放 3.4×10^7 J, 转化为普通单位, 获得 8122600 卡路里/公斤, 或 8122.6 千卡/公斤。

表 4.2 标准条件下 (25℃、标准大气压) 热量 G 数据

Table 4.2. Calorific value G data at standard condition (25 °C, 1 atmosphere)

能源种类	烟煤	石油焦	木块	木炭
热值 kcal/kg	6400	8200	2866.8	8122.6

利用等式 (4.1) 和表 4.2 和表 4.3 中的数据, 可以得到工业硅生产过程中不同碳质还原剂能源燃烧所产生的直接碳排放量。

表 4.3 各燃料的碳排放系数数据

Table 4.3. Carbon emission coefficient data of each fuel

能源种类	烟煤	石油焦	木块	木炭
碳排放系数 kgCO ₂ /kg	2.53	3.35	1.35	3.81

4.2.3.2 工业过程产生的排放量

工业生产过程中的碳排放是指工业硅生产过程中如电极等其他采购的含碳原料所产生的二氧化碳排放。其计算公式如下:

$$E_{\text{electrode}} = P \times EF_P \quad (4.5)$$

其中, $E_{\text{electrode}}$ 为工业硅生产过程中消耗石墨电极所产生的二氧化碳量 (kgCO₂/kg), P 为电极消耗量 (kg), EF_P 为电极的二氧化碳排放系数, 等于 3.6630 tCO₂/t。

4.2.3.3 用电所产生的排放量

二氧化碳的排放是由工业硅制造商购买的电力驱动的。工业硅企业消耗的电力输出实际上发生在电力生产企业中，并由工业硅企业消耗。根据效益原则，利用工业硅企业输出能力中所体现的二氧化碳排放量来计算总排放量。排放量的计算方法如下：

$$E_e = P \times EF_e \quad (4.6)$$

式中， E_e 为所购电力 (kgCO_2) 产生的间接二氧化碳排放， P 为功耗 (kWh)， EF_e 为排放区域功耗的二氧化碳排放系数，因此，根据工业硅厂的地址区域，电力的“等价值”碳排放系数取自中国云南省，为 $0.7035 \text{ kgCO}_2 \text{ kwh}^{-1}$ 。

4.2.3.4 碳排放总量

根据 2013 的 ISO 14067 框架规定的一种产品相关的碳排放是指在生命周期内直接和间接产生的排放总量，根据上述分类，工业硅企业的碳排放可根据其排放源分为直接排放和间接排放^[102]。直接排放主要是指在生产过程中燃烧化石燃料所产生的排放，而间接排放主要是指用电所产生的二氧化碳排放净额，也包括工业过程所产生的碳排放量。因此，总碳排放量的计算公式如下：

$$E_{total} = E + E_{electrode} + E_e \quad (4.7)$$

式中， E_{total} 为工业硅生产过程的二氧化碳排放总量， E 为工业硅生产过程的直接二氧化碳排放量， $E_{electrode}$ 为工业硅生产过程的工业生产所产生的二氧化碳排放量，即消耗石墨电极产生的二氧化碳排放量， E_e 为购买电力产生的间接二氧化碳排放量。

4.3 实验结果与分析

4.3.1 碳排放比例

将生产每吨工业硅产品计算得到的总碳排放值进行分析，分别比较五种主要能源原料电力、电极、石油焦、烟煤和木块的碳排放总量比例。从图 4.1 中发现，1#埋弧炉 8.5MVA 炉型电力的碳排放总量平均值为 63.8%，石油焦的碳排放总量平均值为 16.4%，烟煤的碳排放总量平均值为 9.3%，木块的碳排放总量平均值为 7.1%，石墨电极的碳排放总量平均值为 3.4%。电力消耗的碳排放总量贡献最大，低额定容量炉平均为 63.45%，高额定容量炉平均为 60.85%。2#埋弧炉 8.5MVA 炉型电力的碳排放总量平均值为 63.1%，石油焦的碳排放总量平均值为 16.4%，烟煤的碳排放总量平均值为 9.3%，木块的碳排放总量平均值为 8.1%，石墨电极的碳排放总量平均值为 3.1%。3#埋弧炉 12.5MVA 炉型电力的碳排放总量平均值为 60.8%，石油焦的碳排放总量平均值为 16%，烟煤的碳排放总量平均值为 10.6%，

木块的碳排放总量平均值为 9.5%，石墨电极的碳排放总量平均值为 3.1%。4#埋弧炉 12.5MVA 炉型电力的碳排放总量平均值为 60.9%，石油焦的碳排放总量平均值为 18.7%，烟煤的碳排放总量平均值为 9.5%，木块的碳排放总量平均值为 7.9%，石墨电极的碳排放总量平均值为 3%。总结上述，电力消耗占碳排放总量比重最大，低额定容量炉平均为 63.45%，高额定容量炉平均为 60.85%，这表明高额定容量炉型在能源利用效率上优于低额定容量炉。在低额定容量炉型中三种碳质还原剂中的石油焦碳排放总量比例最大，平均为 16.4%；烟煤碳排放总量比例居中，平均为 9.3%；木块碳排放总量比例最小，平均为 7.6%。在高额定容量炉型中三种碳质还原剂中的烟煤碳排放总量比例最大，平均为 17.35%；石油焦碳排放总量比例居中，平均为 10.05%；木块碳排放总量比例最小，平均为 8.7%。在低额定容量炉型中消耗石墨电极产生的碳排放总量平均为 3.25%，在高额定容量炉型中消耗石墨电极产生的碳排放总量平均为 3.05%，高低额定容量炉型的消耗石墨电极产生的碳排放总量最小且相对稳定，保持在 3%-3.4%之间。

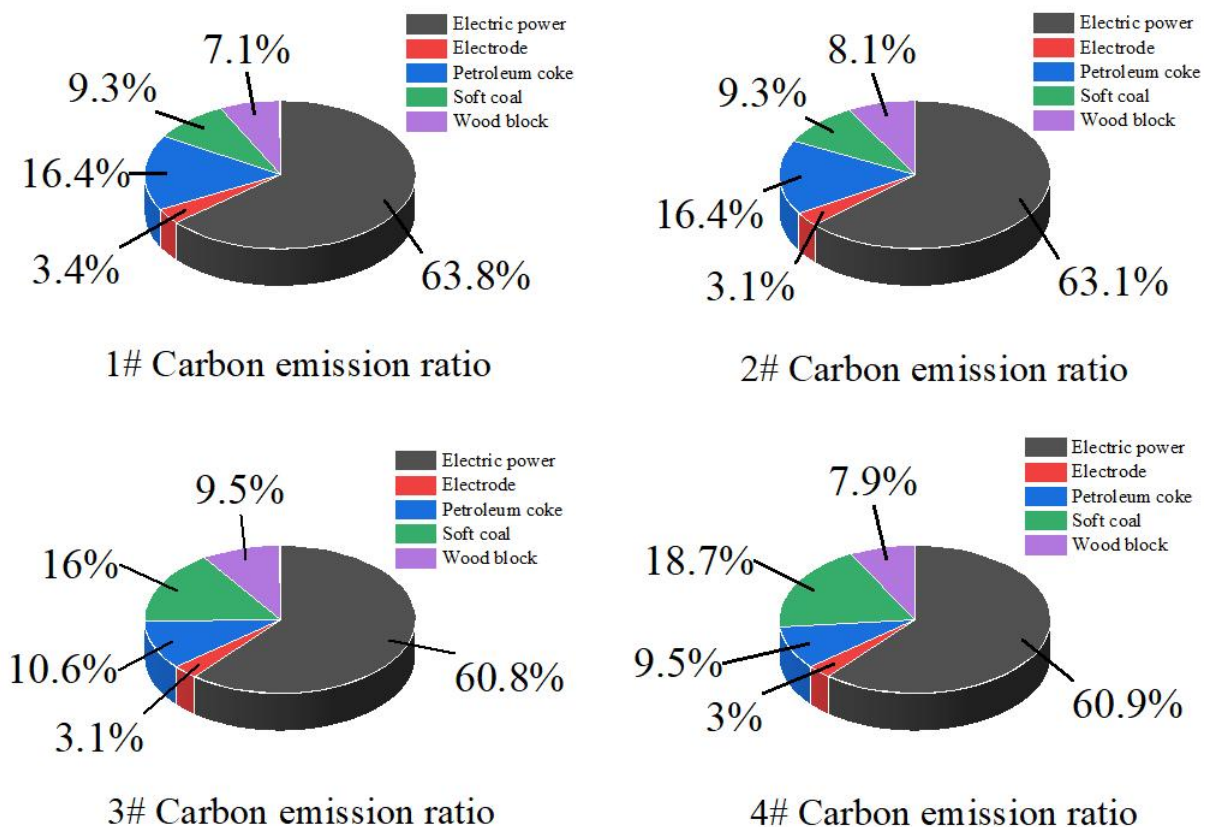


图 4.1 不同炉型的碳排放比例

Fig 4.1 The proportion of carbon emission from different furnace

4.3.2 碳质还原剂对直接碳排放的影响

4.3.2.1 碳质还原剂对 8.5 MVA 额定容量埋弧炉中直接碳排放量的影响

本小节分析了烟煤、石油焦和木块在 8.5 MVA 额定容量埋弧炉中对直接碳排放的影响。在 1#、2#炉中分别对含石油焦、烟煤和木块的三种碳质还原剂进行了 150 多组实验，并采用线性回归分析的方法对现有数据进行了比较。

图 4.2 显示了三种主要碳质还原剂和直接碳排放的趋势，所有实验情况下均呈现很强的线性相关性。1#埋弧炉烟煤、石油焦和木块的皮尔逊相关系数，即 r 值，分别为 0.940、0.982 和 0.977。2#埋弧炉烟煤、石油焦和木块的皮尔逊相关系数分别为 0.921、0.963 和 0.947。1#埋弧炉烟煤、石油焦、木块对碳排放的影响程度绝对值分别为 8.496、6.256 和 5.834，2#埋弧炉烟煤、石油焦、木块对碳排放的影响程度绝对值分别为 7.306、6.414 和 5.444。通过对 1#、2#低额定容量埋弧炉的数据分析，得出烟煤对单吨工业硅生产产生的直接碳排放的影响最大，其次是石油焦，木块的影响最小。

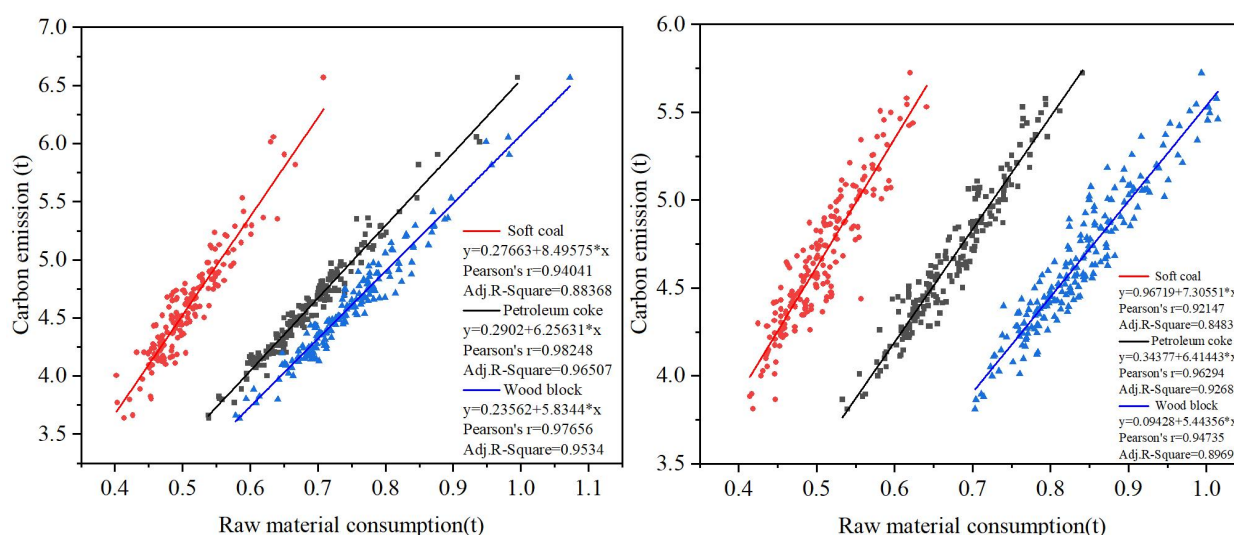


图 4.2 碳质还原剂在 1#、2#埋弧炉中与直接碳排放的关系

Fig. 4.2 Relationship between reducers and direct carbon emissions in the 1# and 2# furnaces

4.3.2.2 碳质还原剂在 12.5 MVA 额定容量埋弧炉中直接碳排放量的影响

在本小节中，主要分析了烟煤、石油焦、木块等三种还原剂对直接碳排放的影响。在 3#、4#埋弧炉中，对含烟煤、石油焦、木块的三种还原剂分别进行了 80 多组试验，并采用线性回归分析对现有数据进行比较。

图 4.3 显示了三种主要碳质还原剂和直接碳排放量的变化趋势，在所有情况中都具有很强的线性相关性。3#埋弧炉烟煤、石油焦和木块的皮尔逊相关系数分别为 0.836、0.881 和 0.892。3#埋弧炉的烟煤、石油焦、木块与碳排放的绝对值

分别为 5.768、8.321 和 4.335，4#埋弧炉的绝对值分别为 5.373 和 11.280 和 5.090。通过对 3#、4#高额定容量埋弧炉的分析，得出 12.5 MVA 埋弧炉使用石油焦对单吨工业硅产生的直接碳排放的影响最大，其次是烟煤，木块的影响最小。

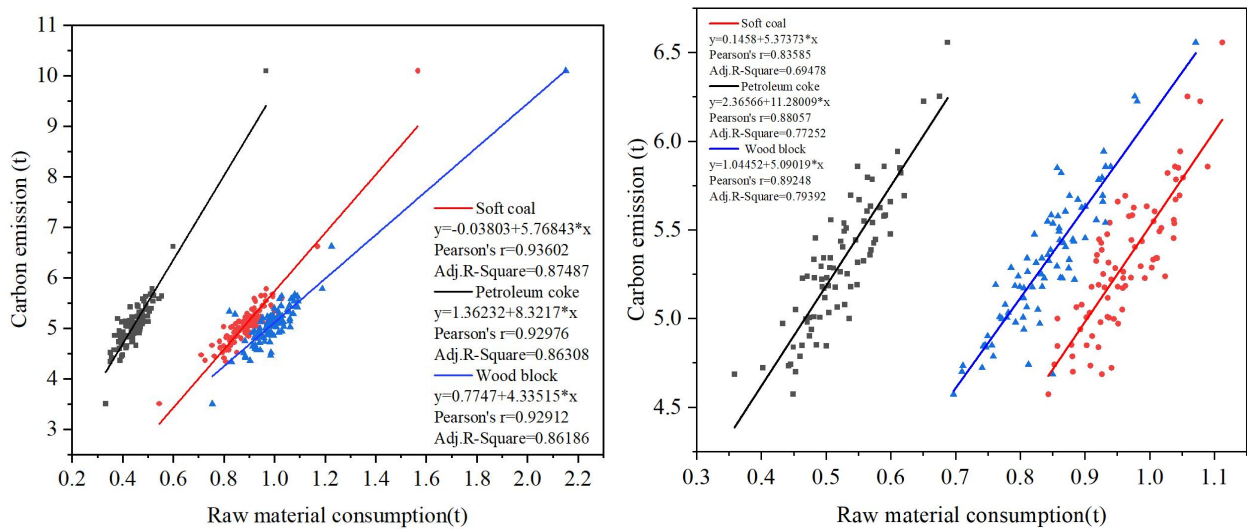


图 4.3 碳质还原剂在 3#、4#埋弧炉中与直接碳排放的关系

Fig. 4.3 Relationship between carbonaceous reducers and direct carbon emissions in the 3# and 4# furnaces

4.3.3 碳质还原剂对碳排放总量的影响

4.3.3.1 碳质还原剂对 8.5 MVA 额定容量埋弧炉中碳排放总量的影响

与 4.3.2.1 相似，图 4.4 显示了三种主要碳质还原剂对工业硅生产过程碳排放总量的变化，所有实验数据呈现出中等线性相关。1#埋弧炉内烟煤、石油焦、木块的皮尔逊相关系数分别为 0.825、0.724 和 0.733，2#埋弧炉内烟煤、石油焦和木块的皮尔逊相关系数分别为 0.873、0.880 和 0.885。1#埋弧炉烟煤、石油焦与木块对碳排放的影响程度分别为 19.299、11.798 和 11.419，2#埋弧炉烟煤、石油焦与木块对碳排放的影响程度分别为 18.189 和 15.395 和 13.362。根据 4.3.2.1 可以得出类似结论，烟煤对使用 8.5 MVA 埋弧炉生产单吨工业硅过程中产生的碳排放总量影响最大，其次是石油焦，木块的影响最小。

4.3.3.2 碳质还原剂对 12.5 MVA 额定容量埋弧炉中碳排放总量的影响

与 4.3.2.2 相似，图 4.5 显示了三种主要碳质还原剂和碳排放总量的变化，结果表明它们存在一定的中等线性正相关关系。3#埋弧炉烟煤、石油焦和木块的皮尔逊相关系数分别为 0.773、0.778 和 0.682。4#埋弧炉烟煤、石油焦和木块的皮尔逊相关系数分别为 0.727、0.810 和 0.727。3#埋弧炉烟煤、石油焦、木块对碳

排放的斜率绝对值分别为 8.284、13.392 和 8.045，4#埋弧炉的斜率绝对值分别为 11.618、13.239 和 11.493。根据 4.3.2.2 可以得出类似结论，石油焦对使用 12.5 MVA 埋弧炉生产单吨工业硅过程中产生的碳排放总量影响最大，其次是烟煤，木块的影响最小。

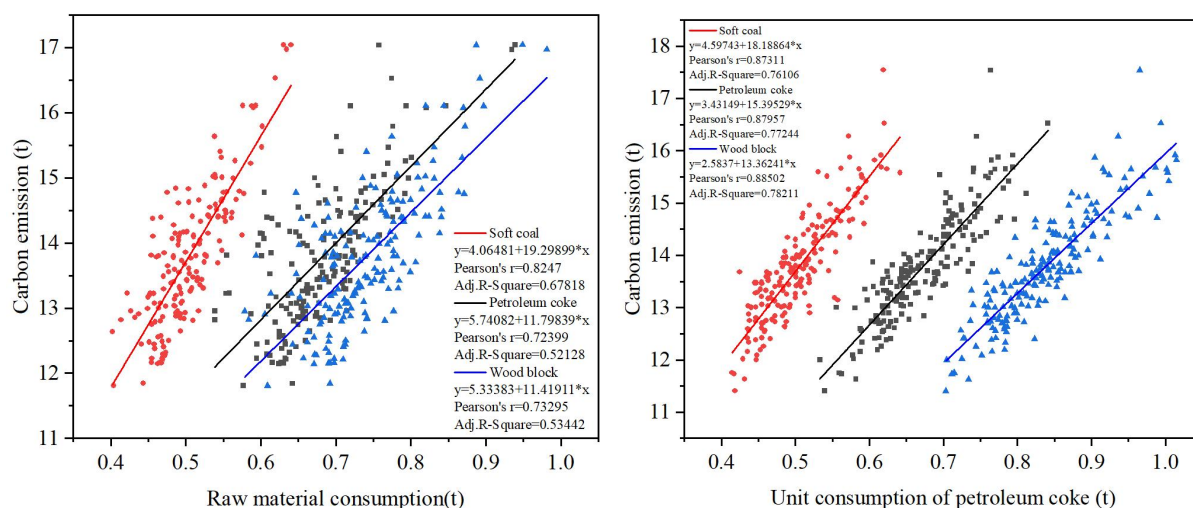


图 4.4 碳质还原剂在 1#、2#埋弧炉中与碳排放总量的关系

Fig. 4.4 The relationship between carbonaceous reducers and total carbon emissions in 1# and 2# furnaces

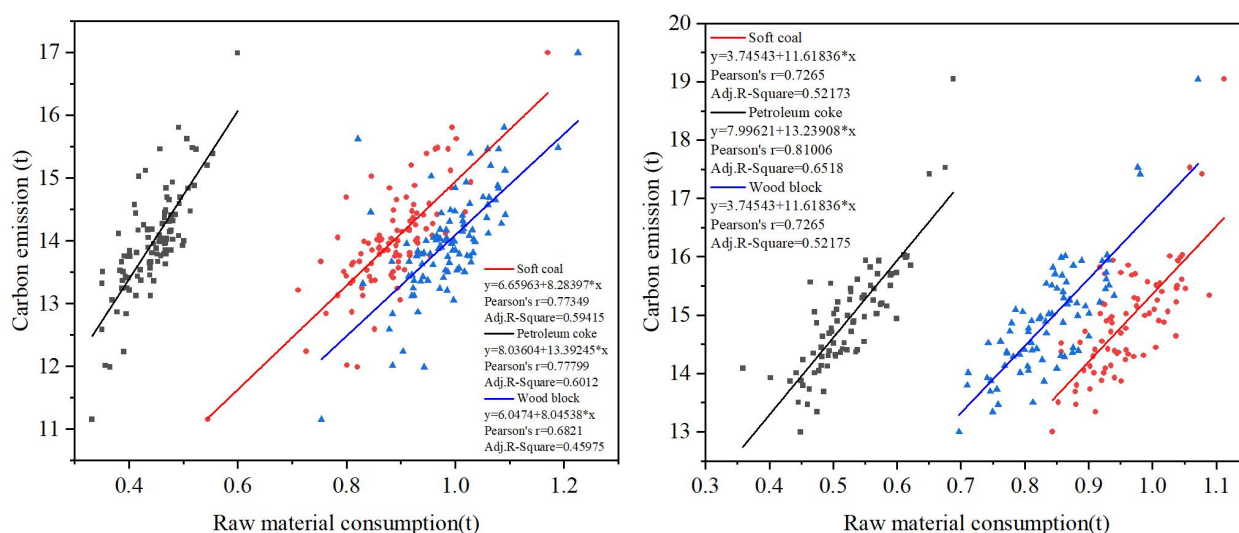


图 4.5 碳质还原剂在 3#、4#埋弧炉中与碳排放总量的关系

Fig 4.5 The relationship between three carbonaceous reducer and total carbon emissions in the 3# and 4# SAF

4.3.4 不同炉型的原料消耗与碳排放线性方程斜率的变化

为了更直观地了解在 8.5 MVA 和 12.5 MVA 炉类型条件下，不同原料与碳排

放之间线性关系的斜率变化, 将其绘制成折线图, 如图 4.6 所示。结果表明, 随着额定容量的增加, 烟煤和木材的碳排放斜率减小, 而石油焦的碳排放斜率增大。因此, 可以得出以下推论: 在使用 8.5 MVA 炉时, 为了提高工业硅生产, 减少碳排放, 需要减少烟煤的使用, 增加石油焦和木块的使用量。在使用 12.5 MVA 炉时, 为了提高工业硅的生产, 减少碳排放, 需要减少石油焦的使用, 增加烟煤和木块的使用量。

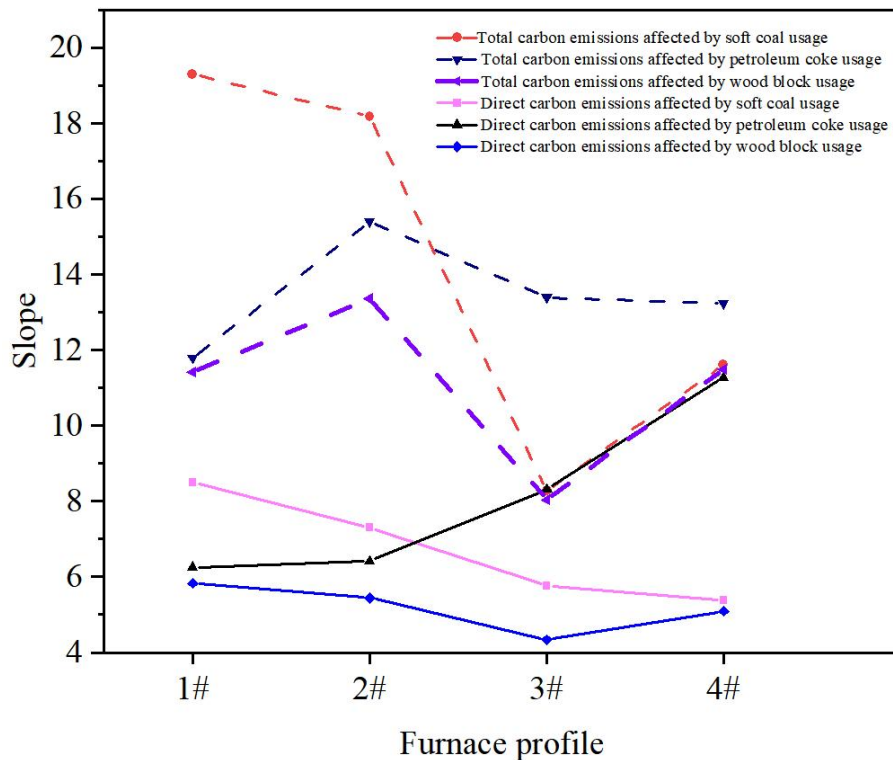


图 4.6 线性方程斜率图

Fig. 4.6 The slope of a linear equation

4.3.5 不同炉型平均原料消耗和碳排放量比较分析

4.3.5.1 不同炉型生产单吨产品的平均原料消耗

采集自工业硅企业的所有数据都使用平均值进行分析。从图 4.7 可以清楚地看出, 不同炉型生产的一吨工业硅的功耗基本维持在 12384 ± 215 kWh/t, 电极材料消耗基本维持在 0.12 ± 0.005 t/t。然而, 原材料的消耗量差异很大。通过比较平均数据, 发现低额定容量炉型石油焦和烟煤的消耗量较为稳定, 8.5 MVA 炉的石油焦、烟煤的消耗量基本分别维持在 0.679 ± 0.007 t/t、 0.506 ± 0.001 t/t。木块的消耗量变动较大, 范围大约在 0.792 ± 0.046 t/t。12.5 MVA 炉的石油焦、烟煤和木块的消耗量波动较大, 但也均分别维持在 0.484 ± 0.040 t/t、 0.923 ± 0.039 t/t 和 0.913 ± 0.074 t/t 范围内。

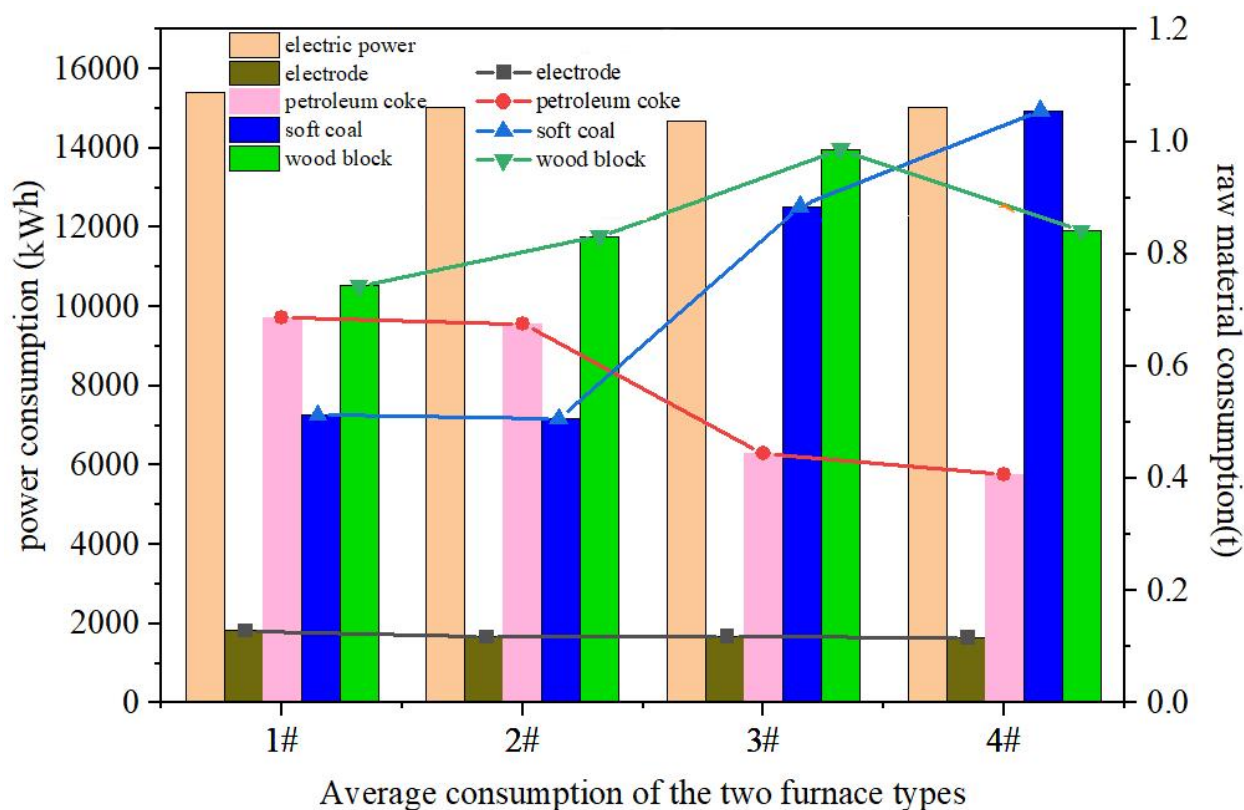


图 4.7 不同炉型的电力、电极和碳质还原剂的平均消耗量

Fig.4.7 Average consumption of electric power, electrode and carbon reducing agent for both furnace types

4.3.5.2 不同炉型生产单吨产品碳排放量比较分析

由图 4.8 可知, 1#埋弧炉生产的 1 吨工业硅的直接碳排放量为 $4.585 \text{ t} \pm 0.435 \text{ t/t}$, 总碳排放量为 $13.997 \pm 1.633 \text{ t/t}$ 。2#埋弧炉生产的 1 吨工业硅的直接碳排放量为 $4.648 \pm 0.368 \text{ t/t}$, 总碳排放量为 $14.024 \pm 0.940 \text{ t/t}$ 。3#埋弧炉生产的 1 吨工业硅的直接碳排放量为 $5.052 \pm 0.3356 \text{ t/t}$, 总碳排放量为 $13.934 \pm 0.7835 \text{ t/t}$ 。4#埋弧炉生产的 1 吨工业硅的直接碳排放量为 $5.318 \pm 0.380 \text{ t/t}$, 总碳排放量为 $13.940 \pm 1.189 \text{ t/t}$ 。比较四个埋弧炉的生产数据, 发现虽然高容量炉的直接碳排放量高于低额定容量炉, 但高额定炉的总碳排放量低于低额定容量炉型, 这是因为高额定容量炉的碳质还原剂材料的用量较高, 但是其能源利用效率较强, 从而使得产生的总碳排放量降低。通过计算, 我们认为高额定容量炉比低额定容量炉平均减少了 0.074 t/t 二氧化碳, 证明使用 12.5 MVA 炉可以提高能源的利用效率, 降低工业硅生产的碳排放量。以一家每年生产 70 万吨工业硅的公司为例, 使用 12.5 MVA 额定容量的埋弧炉可以每年减少约 5 万吨的碳排放。

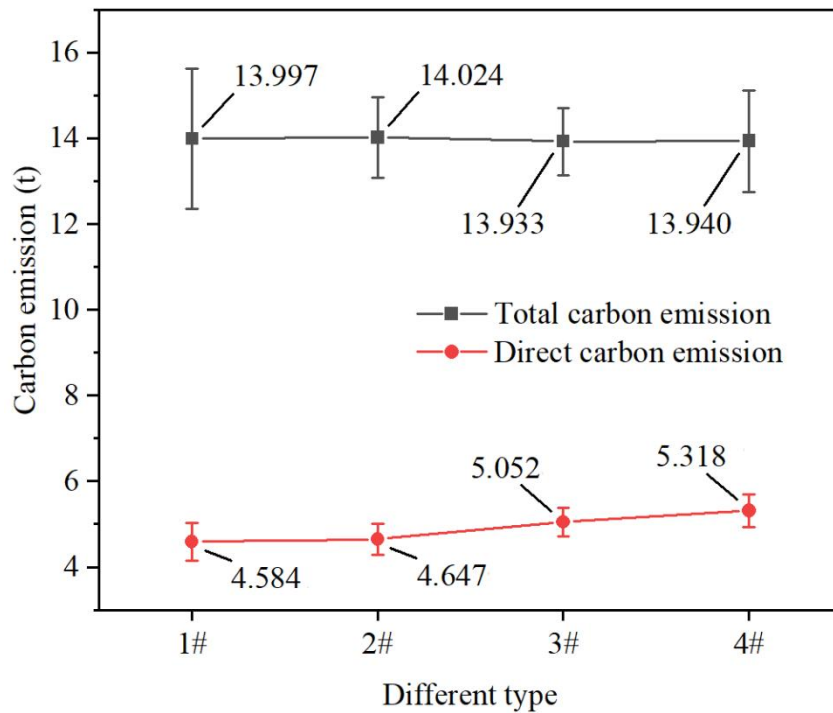


图 4.8 不同炉型的平均碳排放总量和直接碳排放总量的比较

Fig. 4.8 Comparison of the total average carbon emissions and direct carbon emissions of different furnace types

4.4 本章小结

本章节研究了工业硅冶炼过程中直接碳排放量与碳排放总量的影响因素及其贡献比。通过对实测数据进行平均值计算，对不同碳质还原剂对直接碳排放量与碳排放总量在不同炉型（8.5MVA 与 12.5MVA）中的结果进行了分析，以及对不同埋弧炉得出的碳排放线性方程斜率与原料消耗进行了类比分析，并对不同埋弧炉炉型平均原料消耗和平均碳排放量比较分析，得到碳质还原剂对碳排放量的研究影响结果总结如下：

（1）工业硅冶炼过程中电力消耗贡献了最大的碳排放量，平均占比 62.15%；碳质还原剂的影响位于第二，平均占比 34.7%；电极的影响较为稳定，保持 3.15% 的平均比例。针对不同炉型的碳质还原剂消耗与碳排放总量进行分析，结果发现低额定容量炉型石油焦排放量最大，平均为 16.4%；高额定容量炉型烟煤排放量最大，平均为 17.35%。

（2）原料消耗与工业硅直接碳排放量之间呈现高度相关，相关系数 $\geq 83\%$ ，与碳排放总量呈中度相关，相关系数 $\geq 68\%$ 。使用 8.5 MVA 炉时，烟煤对 1 吨工业硅生产中碳排放的影响最大，其次是石油焦，木块的影响最小；使用 12.5 MVA 炉时，石油焦对 1 吨工业硅生产中碳排放的影响最大，其次是烟煤，木块的影响最小。

(3) 结果表明, 当不同炉型生产一吨工业硅时, 功耗大致相同, 约为 12384 ± 215 kWh/t, 电极材料消耗量也相对稳定, 约为 0.12 t/t。当使用 8.5 MVA 炉生产 1 吨工业硅时, 约产生直接排放 4.662 吨碳, 总排放 14.011 吨。当使用 12.5 MVA 炉生产 1 吨工业硅时, 将产生约 5.1851 吨直接碳排放和 13.937 吨总碳排放。基于以上分析, 与 8.5 MVA 炉相比, 12.5 MVA 炉减少了 1 吨工业硅产生的二氧化碳碳排放约 74 公斤。

第五章 基于 LCA 法的晶硅原料生产周期评价研究

5.1 引言

高纯度晶体硅作为太阳能电池的核心原料，也是太阳能光伏系统的一个关键组成部件。通过光伏效应，太阳能可以转化为电能，使太阳能发电成为一种不产生环境污染物的物理过程，是一种清洁能源。高纯多晶硅被认为是一种环境友好型产品，其生产过程涉及工业硅的持续净化。随着高纯度多晶硅产业链的不断发展，它正日益成为寻求可持续能源的重要组成部分。但是，在原料生产和生产高纯多晶硅的过程中，不可避免地会产生高能耗和环境污染。生命周期评价作为一种环境管理工具，被广泛应用于工业产品的环境影响研究。

因此，本文基于生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）方法，首先确定了对 1t 工业硅和 1t 高纯晶硅的生产工艺现状进行研究的目标与意义，然后构建了改进西门子法生产高纯多晶硅的生命周期评价模型，进行了生命周期清单分析（Life Cycle Inventory Analysis, LCI），再应用生命周期影响评价（Life Cycle Impact Assessment, LCIA）确定了环境影响权重，最后通过评价结果提出相对应的减排技术措施。

5.2 研究思路

5.2.1 研究目标范围确定

根据以往的研究，本研究以工业硅冶炼和高纯晶硅生产为研究对象。LCA 用于定量计算高纯晶硅在其典型生产条件下的整个生命周期内的资源、能量输入和环境排放值。研究目标范围为：

（1）鉴于目前高纯度晶体硅原料的生产现状和使用情况，其数据均来自高纯晶硅行业企业。然后，对数据进行分析，建立了一个相对完整的高纯晶硅 LCA 列表数据库。

（2）对高纯晶硅在其整个生命周期内的环境影响进行分类、表征、量化、计算和评估。我们还寻求为改进当前高纯晶硅行业的工艺技术和生产水平提供建议。

（3）为那些在“碳达峰和碳中和”方面的国家制定相关的环境技术政策、规范和管理措施提供参考。

所确定的研究模型边界示意图如图 5.1 所示。从材料节约的角度来看，高纯

度结晶硅生命周期过程中的资源和能量输入之和等于产品系统所有生物循环过程的利用率和环境排放之和。

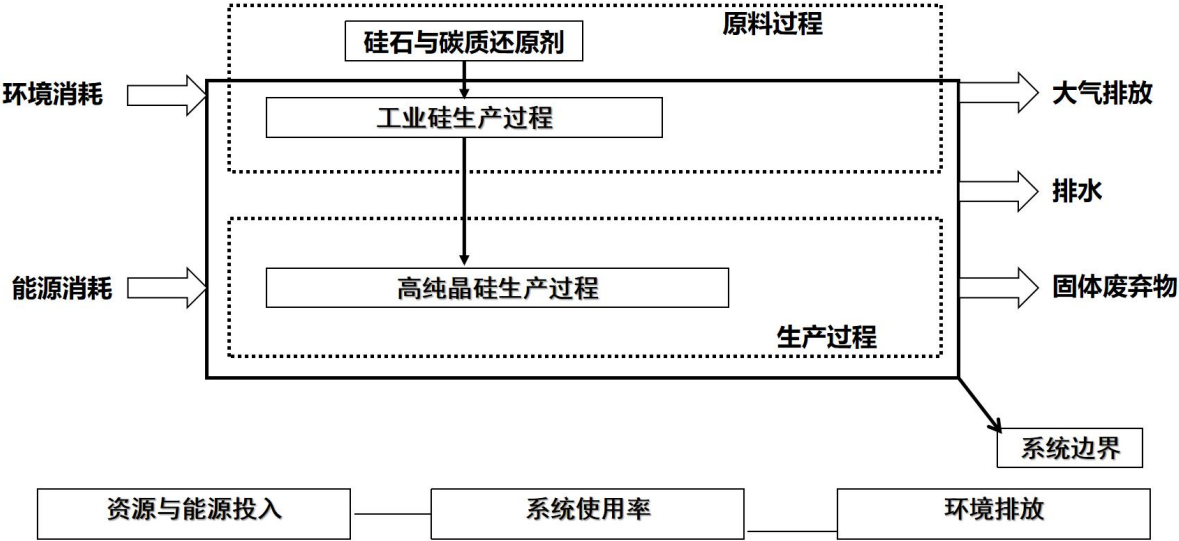


图 5.1 高纯晶硅 LCA 模型边界示意图

Fig. 5.1 Schematic diagram of the LCA stages of high-purity crystalline silicon and its LCA model boundaries

5.2.2 生命周期清单数据来源

对工业硅冶炼和高纯结晶硅提纯采用生命周期评价方法，利用实际工厂生产数据和软件数据库（Ecoinvent 数据库和 eBalance 数据库）对晶体硅原料生产过程的环境影响进行研究分析。

清单分析是一个技术过程，它对一个研究系统的整个生命周期阶段的资源和能源的使用，以及对环境的废物排放进行量化。这可以包括产品、过程或活动。

表 5.1 LCI 分析的数据来源和类型

Table 5.1. LCI analyzes the source and type of data	
数据来源	数据类型
企业数据	实际测量
实验数据	模拟的
期刊与论文	借鉴的
LCA 软件数据库	未经计算过
相关 LCI 数据	取时间平均值
产品及生产工艺规范	取空间平均值
其余的	省略

数据来源的收集可以是工厂报告、政府文件、报告、杂志、参考书和其他相关来源。数据类型可以是实际测量值、模拟值、借来的值、未计算的值、随时间变化的平均值、随空间变化的平均值，以及太小而无法省略的值等^[103]。在本研究中，进行了实际的生命周期数据清单分析，所用数据的来源和类型见表 5.1。LCI 分析的结果显示，在所分析的研究系统的不同阶段，资源和能源的使用以及废物的排放有很大的差异。根据每个系统的具体特点，包括其设计、生产过程和预期用途，讨论了这些结果。这项研究的结果对可持续研究系统的未来发展具有重要意义。

本文的研究对象是高纯度的晶体硅。为了全面分析高纯度结晶硅的生命周期数据，根据高纯度晶体硅生命周期的单位过程进行了数据来源类型分析，如表 5.2 所示。数据来源主要是有代表性的工业硅企业的实际生产数据和相关文献参考等。

表 5.2 高纯晶硅生命周期单位工艺数据来源类型

Table 5.2. High purity silicon life cycle unit process data source

生命周期过程	数据来源	数据类型
工业硅冶炼	企业数据	实际测量值的平均值
	实验数据	仿真理论数据
	期刊与论文	使用调整后的平均值
	软件数据库	参考数据
	其他的影响较低数据	省略
高纯晶硅制备	企业数据	实际测量值的平均值
	期刊与论文	使用调整后的平均值
	产品及生产工艺规范	取空间平均值
	其他的影响较低数据	省略

根据高纯晶硅的生命周期特性和现有的生命周期评价技术，对本项目高纯晶硅生命周期的研究作出了以下一般的假设和解释。在后续章节中分别解释了具体的方法假设和详细的数据处理。

（1）高纯晶硅提纯过程中实际消耗的能源种类有：电力、蒸汽（天然气）、新鲜水、脱盐水、仪表空气、压缩空气和氮气。以上耗能工质中消耗的脱盐仪表空气、压缩空气及氮气均由工艺配套设备自行制备，故而全部计入电力消耗。蒸汽（天然气）由园区外供和新建燃气锅炉进行制备，全部计入天然气消耗，不再重新计算。因此，将电力、新鲜水、天然气纳入能源折算分析内。

（2）评价所需的运输车辆、生产设备运输车辆、行政生活车辆，依靠于社会

交通力量，所以只考虑工厂厂内运输使用柴油量。

(3) 评估不涉及员工的住宿条件。本研究主要考虑员工们的用电量、用水量、生活废水和产生固体废物的影响。

5.2.3 生命周期阶段和数据清单分析

5.2.3.1 工业硅的生产工艺

将现代工业规模硅生产的碳热还原法发生在 20 世纪初，不到一百年，是目前使用的工业硅生产方法。工业硅的生产主要包括熔炼法和化学气相沉积法两种方法。其中熔炼法生产工业硅的碳排放量相对较高，因为熔炼法需要将硅石精炼成工业硅，这个过程需要采用埋弧炉在高温下进行连续运行冶炼，从而导致碳排放量增加。此外，熔炼法还需要高温下加热炉料，这也需要消耗大量的能源，从而增加了碳排放量。相比之下，化学气相沉积法生产工业硅的碳排放量相对较低。化学气相沉积法是利用化学反应将气态硅源转化为固态硅粉末，这个过程主要依靠电子加热器和电子束加热器等电力设备，因此不需要使用煤炭和焦炭等燃料。此外，化学气相沉积法的生产过程中，所需的能量较少，因此碳排放量也相对较低。



图 5.2 工业硅生产流程图

Fig. 5.2 Flow chart of industrial silicon production

总体来说，工业硅生产过程的碳排放量主要受到生产方法、燃料类型和能源消耗等因素的影响。因此，在生产工业硅时，应该尽可能减少燃料的使用和能源的消耗，从而降低碳排放量。此外，可以采用低碳生产技术，如利用可再生能源代替化石燃料，开发高效节能的生产设备等具体的生产过程，生产过程流程图如图 5.2 所示，主要包括二氧化硅清洗干燥、匹配原料、工业硅冶炼、硅熔体转移、炉外精炼、浇铸、冷却剥离、破碎硅锭、称重包装等工艺，最终获得工业硅产品。

5.2.3.2 工业硅生产与排放数据

工业硅生产中消耗的主要原料是二氧化硅和碳质还原剂。主要能源消耗为电能；产生的主要环境污染物为二氧化碳、二氧化硫、固体废物等。根据数据来源，结合工业硅企业生产过程的数据收集和整理，生产过程中材料的输入和输出如表 5.3 所示。依据《综合能耗计算通则》（GB2589-2020），部分数据处理的描述如下：工业硅电能是指企业实际生产过程中每吨工业硅产品的平均能耗；在工业硅的生产过程中，使用了循环水，而其他水的消耗量太小，因此可以省略；企业固体废物主要分为危险固体废物和一般固体废物。危险废物主要由外包处理，普通固体废物主要由城市固体垃圾填埋场处理。目前还没有外包处理的流程和数据。本研究主要考虑的一般固体废物主要是工业硅生产过程中的矿渣、矿渣、未燃烧的原料和生活垃圾。

表 5.3 一吨工业硅生产的生命周期工艺数据表

Table 5.3. List of life cycle process data for making 1 ton of industrial silicon

能源消耗和材料消耗		排放和产出	
名称	消耗量	名称	输出量
功耗	12384 kWh	工业硅	1 t
硅石	2.4 t	CO ₂	5.346 t
石墨电极	0.12 t	SO ₂	0.058 t
石油焦	0.582 t	NO _x	0.037 t
烟煤	0.715 t	固体废弃物	0.54 t
木块	0.852 t	H ₂ O	120 t
循环水	120 t		

5.2.3.3 高纯晶硅提纯工艺

高纯度晶体硅的生产可分为两大类：化学和物理（冶金）方法。纯化太阳能级高纯度晶体硅的两种最广泛使用的化学工艺技术是改良西门子法和硅烷流化床

法。^[104]。目前，改进西门子法是在工业硅中净化高纯晶硅的主要方法。本文采用先进的改良西门子法工艺路线，该工艺技术在改良西门子法的基础上更加先进、转化率高、节能。改进后的西门子工艺工程技术成熟可靠，建成后生产成本将比同行业有显著的降低，具体的主要的工艺步骤可根据实际情况进行设计^[105]。

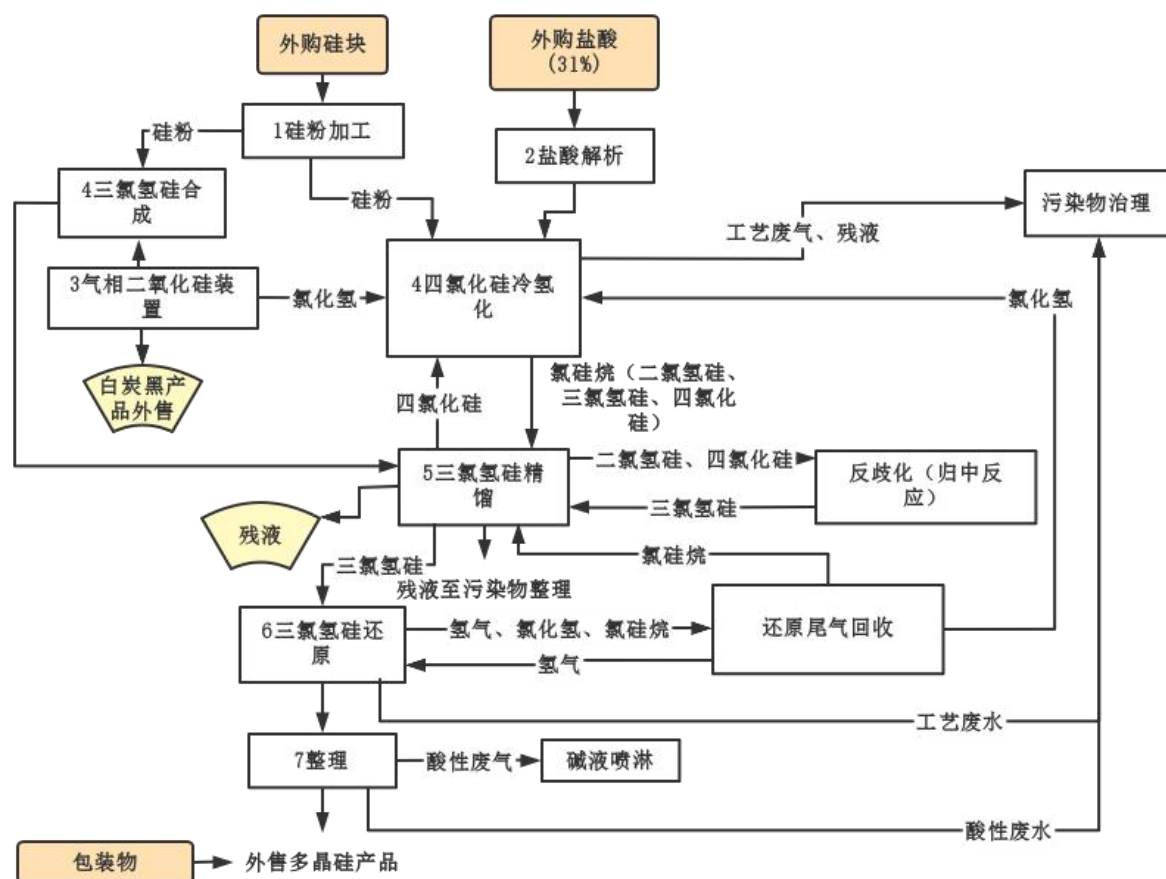


图 5.3 改进高纯晶硅生产工艺设计流程图

Fig. 5.3 The process design flow chart of high purity crystalline silicon production was improved

本文依据上述文献提出的改进工艺，总结设计的高纯晶硅提纯工艺如图 5.3 所示，主要包括：三氯氢硅合成、四氯氢硅冷氢化、三氯氢硅还原、三氯氢硅精馏、反歧化反应、干法回收、还原尾气回收等工艺。

5.2.3.4 高纯晶硅提纯与排放数据

改良西门子工艺生产高纯多晶硅过程中的主要原料消耗为工业硅和氯化氢气体，电能为主要的能源消耗，排放的主要环境污染物为氯化氢、废水和固体废弃物等^[106]。根据数据来源，结合高纯晶硅企业生产过程的数据收集和整理，企

业生产过程中材料的输入和输出如表 5.4 所示。依据《综合能耗计算通则》（GB2589-2020），部分数据处理的描述如下：实际消耗的各种能源应包括一次能源、二次能源和生产使用耗能工质所消耗的能源。故电力消耗数据为高纯晶硅提纯用电及其配套装置全年生产总用电消耗；高纯晶硅晶片生产过程中使用的水包括生活水和生产水，列表数据包括两部分的水；如 5.3.2 所述，高纯晶硅提纯过程中的固体废物主要为细硅粉、废硅粉、废固体废渣和生活垃圾。

表 5.4 生产 1 吨高纯晶硅的生命周期工艺数据表^[107]

Table 5.4 Life cycle process data list for making 1 ton of high purity crystalline silicon

能源消耗和材料消耗		排放和产出	
名称	消耗量	名称	输出量
电耗	58569 kWh	高纯晶硅	1 t
工业硅	1.3 t	HCl	0.322583 t
氢气	0.089 t	氯化物	1.944 t
氯气	1.196 t	氟化物	0.00004 t
NaOH	0.05458 t	化学需氧量	0.0013158 t
生产用水	96.595 t	总悬浮颗粒物	0.00518 t
蒸汽	52.805 t	固体废弃物	0.34 t
氮气	205.67 NM ³		
压缩空气	447.28 NM ³		

5.3 结果和讨论

5.3.1 生命周期影响贡献分析

国际环境毒理学与化学学会（Society for Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC）建议的分类方法^[108]和 LCA 模型确定的污染项目各环境影响因子的相关关系见表 5.5。特定废物的排放量根据由此产生的环境损害指数进行加权,可分为:资源消耗(Resource Consumption)、能源消耗(Energy Consumption)、全球变暖影响（Global Warming Impact）、水质影响（Water Quality Impact）、水富营养化（Water Eutrophication）、人体毒性影响（Human Toxic Impact）、颗粒物（Particulate Matter）、酸化潜力（Acidizing Potential）、空间消耗（Space Consumption）、臭氧消耗影响（Ozone Depletion Impact）。

表 5.5 高纯晶硅原料的生命周期消耗及各物质影响评估输出参数

Table 5.5 The life cycle consumption of crystalline silicon raw materials and the output of each substance impact assessment parameters

名称	GW	WQ	WE	HTP	PM	AP	SC	ODI
CO ₂	1							0.0001
CO	2							0.0002
SO ₂				0.104		1		
NO _x	310			34		0.7		0.02
HCl						0.88		
SiCl ₄						3.52		
TVOC	9200							1
粉尘					1			
COD		1	0.022					
固体废弃物							0.0001	
氯化物				7				
氟化物				2.73				

如表 5.6 所示，根据本研究的主要目的和所选的上述 10 种环境影响指标，其生态重要性按优先顺序从 1 到 10 排序。

根据表 5.6 环境指标因素的重要性尺度，列出以下矩阵：

$$\mathbf{M}_{ij} = \begin{Bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/8 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/9 & 1/8 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/10 & 1/9 & 1/8 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{Bmatrix}$$

计算采用根法计算，公式（5.1）如下：

$$m_i = \sqrt[10]{\prod \mathbf{M}_{ij}} (i=1,2,3,\dots,10)(j=1,2,3,\dots,10) \quad (5.1)$$

所以这个几何平均值是：

$m_i=(4.529, 3.356, 2.414, 1.707, 1.196, 0.836, 0.586, 0.414, 0.298, 0.221)$

然后将上面得到的几何平均值归一化，按公式（5.2）计算：

$$W_i = \frac{m_i}{\sum m_i}$$

(5.2)

表 5.6 环境指标因子的重要量表

Table 5.6 The importance scale of environmental index factor

顺序	RC	EC	GW	WQ	WE	HTP	PM	AP	SC	ODI
RC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EC	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
GW	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8
WQ	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7
WE	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6
HTI	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5
PM	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
AP	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3
SC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
ODI	1/10	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1

最后，矩阵 M_{ij} 的近似特征向量可以写为 $W_i=(0.291, 0.216, 0.155, 0.110, 0.077, 0.053, 0.038, 0.027, 0.019, 0.014)$ 。也就是说，上述得到的近似特征向量是在这个生命周期评估中需要确定的各种影响因素的权重。

5.3.2 量化和影响结果

表 5.7 显示了改进的西门子工艺生产 1 吨高纯度结晶硅的具体表征结果，以及通过分析层次法（Analytic Hierarchy Process）计算出的各种影响的权重系数结果^[109]。表 5.8 为生产 1 吨高纯晶硅的整体表征评价结果。析阶段首先采用层次分析法计算各种环境影响的权重，计算结果为：资源消耗（RC）为 0.291，能耗（EC）为 0.216、全球变暖影响（GW）为 0.155、水质影响（WQ）为 0.110、水富营养化影响（WE）为 0.077，慢性公共卫生影响（HTI）为 0.054，气溶胶影响（PM）为 0.038，酸化影响（AP）为 0.027，固体废物影响（SC）为 0.020，臭氧层消耗影响（ODI）为 0.014。

表 5.7 生产 1 吨高纯晶硅生命周期的环境影响描述

Table 5.7. Characterization of environmental effects on the life cycle of producing 1t high purity crystalline silicon

环境影响类别	权重	特征值		综合影响	
		工业硅冶炼	高纯晶硅提纯	工业硅冶炼	高纯晶硅提纯
RC	0.291	2.4	3.12	0.699	0.908
EC	0.216	3.850	18.064	0.831	3.897
GWI	0.155	16.924	0	2.626	0
WQ	0.110	0	0.001	0	0.0001
WE	0.077	0	2.895E-05	0	2.226E-06
HTI	0.054	6.962	3.305	0.374	0.178
PM	0.038	0.012	0	0.0004	0
AP	0.026	0.084	0.284	0.002	0.008
SC	0.019	0.0006	0.0004	1.149E-05	7.235E-06
ODI	0.014	0.001	0	1.819E-05	0
总计	1	30.222	24.778	4.532	4.991

表 5.8 生产 1 吨高纯晶硅的整体表征评价结果

Table 5.8 Overall characterization evaluation results of 1t high purity crystalline silicon

类别	整体价值	单位	类别	整体价值	单位
RC	3.12	t 硅石	CO ₂	5.346	t
EC	21.914	t 标准煤	SO ₂	0.058	t
GWI	16.924	t CO ₂	NO _x	0.037	t
WQ	0.001	t COD	固体废弃物	0.783	t
WE	2.895E-05	t PO ₄ ⁻	HCl	0.323	t
HTI	10.218	t (非致癌有 毒物)	氯化物	1.944	t
PM	0.0116	t 粉尘	氟化物	0.00004	t
AP	0.368	t SO ₂	COD	0.0013	t
SC	0.00098	t 固废	电力	70954	kWh
ODI	0.0013	t CFC-11	循环水	216.595	t

production

5.3.3 高纯晶硅生命周期评价分析和讨论

根据相对环境影响的定义和实例计算结果, 计算出高纯晶硅的综合生命周期影响, 1t 工业硅的生命周期环境影响为 4.532, 1t 高纯晶硅的生命周期环境影响为 4.991。工业硅生产对环境的影响占总影响的 47.6%, 高纯晶硅生产对环境的影响占总影响的 52.4%。通过定量模型的应用和比较, 高纯晶硅提纯过程对环境的相对影响较大。

根据相对环境影响的定义和实例计算结果, 计算出高纯晶硅的综合生命周期影响, 1t 工业硅的生命周期环境影响为 4.532, 1t 高纯晶硅的生命周期环境影响为 4.991。工业硅生产对环境的影响占总影响的 47.6%, 高纯晶硅生产对环境的影响占总影响的 52.4%。通过定量模型的应用和比较, 高纯晶硅提纯过程对环境的相对影响最大。

根据计算, 1t 高纯晶硅的生命周期全球变暖总潜力值为 16.924075t 的二氧化碳, 其中对全球变暖影响最大的生命周期过程是工业硅生产过程。因此, 在晶硅原料生产过程中, 应着重考虑减少工业硅冶炼过程中的环境排放对全球变暖的影响, 所以调整碳质还原剂比例, 提高其能源利用效率成为碳减排的当务之急。为了减少工业硅生产过程中的温室气体排放, 从理论上讲, 减少碳排放可以通过尽量减少碳质还原剂的使用来实现, 这被认为是最基本的方法。然而, 目前的科学研究还没有找到一个可行的碳质还原剂替代品。此外, 碳质还原剂的使用量直接影响到工业硅的生产效率。因此, 在这个时候替代碳质还原剂仍然是不可行的。然而, 随着科学和技术的不断进步, 发现合适的替代品的潜力是不容忽视的。

高纯晶硅的生命周期对臭氧层的破坏可以用臭氧消耗潜力来表示。计算结果表明 1t 高纯晶硅在寿命周期内的臭氧消耗潜力约为 0.0013 t CFC-11, 其影响主要集中在工业硅的生产过程中。工业硅生产工艺对臭氧损耗的影响主要来自于二氧化碳和氮氧化物的排放。通过对工业硅生产过程的分析, 氧化氨的生产主要来自含有复杂成分的碳质还原剂的杂质, 氮氧化物的生产是不必要的过程。因此, 可以避免或减少使用含氮络合物的还原剂。

酸化的影响是用酸化的潜力来表示的。根据计算, 1kg 高纯多晶硅的生命周期酸化潜在值约为 0.368 kg 二氧化硫, 主要贡献来自次工业硅制备和高纯多晶硅生产, 约占总影响的 22.85%和 77.15%。因此, 高纯晶硅寿命周期过程的酸化效应应主要分析在两个过程中: 工业硅的生产和高纯晶硅的生产。酸化效应分别为二氧化硫、氮氧化物、氨气、HCl、硫化氢、四氯化硅, 其中工业硅生产过程的酸化效应主要由二氧化硫和氮氧化物的排放控制, 高纯晶硅生产过程的酸化效应

主要由 HCl 的排放控制。

富营养化和水质分析中需要考虑的主要因素是总氮和化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)。目前, 化学需氧量是描述反应水体中有机污染水平的一个重要指标, 它可以影响表征结果。通过影响表征结果, 可以知道 1t 高纯度结晶硅在生命周期中的富营养化电位值为 2.895×10^{-5} t 磷酸离子和 0.0013 t COD。在高纯晶硅提纯过程中, 废水的产量和废水中的总氮含量相对较高。通过分析结果, 建议可以通过设立用于处理工艺装置及辅助装置产生的生活污水、生产废水、初期雨水的污水处理站来提高污染物的去除率。经过处理后出水部分用于废气处理装置再次利用, 剩余部分送中水处理站, 从而控制水质富营养化的影响。

高纯晶硅的生命周期气溶胶影响效应分析主要由粉尘影响。根据计算结果, 1t 高纯多晶硅的生命周期气溶胶影响潜力为 0.0116t 粉尘, 其影响主要来自于工业硅的生产过程。建议工业硅生产企业应把产生的废气收集处理至达标排放, 加强对装置的源头治理、末端控制等措施, 减少生产装置的无组织排放, 从而降低对大气环境的影响。

固体垃圾排放和特征的影响主要通过垃圾填埋空间的消耗来评价。经计算, 1t 高纯晶体硅在垃圾填埋处理时的生命周期消耗为 0.00098 t。相对较大的垃圾填埋空间消耗是工业硅冶炼过程, 占总影响的 61.36%, 高纯晶硅提纯过程占 38.64%。项目固体废物按照属性划分为一般废物和危险废物, 在改进西门子法的更新设计下, 具备可回收利用价值的硅粉、硅泥、废石墨头、次氯酸钠等优先综合回收利用处理。废催化剂、废树脂、废活性炭等已不能使用的危险废物或送具有一定危废处理能力的企业处置, 或由厂家处理。污泥根据鉴定结果确定处理措施。生活垃圾联系企业所在地卫生系统处理。建议未来为了减少垃圾填埋空间的消耗, 应不断提高各种固体废物的回收率和利用率。

根据特征计算结果, 1t 高纯晶硅对慢性公共健康的生命周期影响为 10.218 t (非致癌和毒性), 其中影响最大的过程是工业硅冶炼过程, 其贡献值占总影响的 67.81%, 高纯晶硅提纯过程贡献为 32.19%。

5.4 本章小结

本章主要通过使用生命周期评价方法 (LCA) 与层次分析法 (AHP), 得到生产高纯多晶硅生命周期对环境的影响和其权重结果, 再通过分析得到的数据, 确定其综合影响并提出相应减排措施:

(1) 通过 SETAC 方法将 1t 高纯晶硅生命周期环境影响因素分类, 再计算数

据得到了相关指数及其权重总结如下：资源消耗（RC）：3.12t 二氧化硅/0.291；能耗（EC）：21.914t 标准煤/0.216；全球变暖影响（GWI）：16.9t CO₂/0.155；水质影响（WQI）：0.0013t COD/0.11；水体富营养化（WE）：2.89E-05t PO₄⁻/0.077；人体毒性影响（HTI）：10.22kg 非致癌有毒物质/0.054；颗粒物（PM）：0.0116kg 粉尘/0.038；酸化电位（AP）：0.368t 二氧化硫/0.027；空间消耗（SC）：0.00098 t 固废/0.019；臭氧消耗影响（ODI）：0.0013 t CFC-11/0.014。

（2）通过对高纯晶硅生命周期过程环境影响的数据分析，确定了高纯晶硅生命周期定量模型与环境影响的主要权重，计算结果 1kg 高纯晶硅生命周期综合环境影响为 9.52，其中工业硅生产的综合影响为 4.531，高纯晶硅提纯的综合影响为 4.992。

（3）建议采取减排措施：首先在工业硅生产工艺过程中要提高碳质还原剂的还原效率，减少或避免使用含硫和含氮元素过高的碳质还原剂，优化硅锭的破碎和筛选工艺；其次在高纯多晶硅生产工艺中，采用改进后的西门子工艺，提高四氯化硅的回收率，实现闭环生产；然后将工业硅生产和高纯晶硅精炼工艺相结合，减少温室气体排放；最后从环境自净角度优化硅产业布局。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文对工业硅生产过程所产生的碳排放量进行了因素分解分析与统计学分析,并结合光伏产业下游的高纯晶硅提纯过程进行了相关环境影响的生命周期评价。依据有关学者的相关文献与数据参考进行研究,从探索合理的碳质还原剂用量的角度在提高工业硅与高纯晶硅产量的同时,提高能源结构利用率,降低单吨硅产品的碳排放量。通过文献综述,借鉴并结合多种计算与分析方法,从不同分解因素和不同埋弧炉生产参数,即使用的三种主要碳质还原剂原料及电力消耗,对碳排放量进行了系统性研究。通过研究得出以下结论:

(1) 在工业硅生产过程中依据其碳排放量时间的动态特性,按照每个月进行划分,采用对数平均分割指数分解法(LMDI方法)建立了碳排放量分解模型,将影响碳排放因素分解为能源碳排放系数、能源消费结构、能源强度和工业硅产量4项。通过对8.5MVA与12.5MVA埋弧炉的比较,发现能源碳排放系数在一年时间里对碳排放量没有影响,能源消费结构在4-6个月度阶段内促进碳排放量,5-7个月月度阶段内抑制排放量,能源强度在3个月度阶段内促进碳排放量,在8个月度阶段内抑制碳排放量,工业硅产量在11个月度阶段均促进了碳排放量。

(2) 以某具有代表性工业硅生产企业的实际生产数据为研究对象,通过统计学分析方法,探究烟煤、石油焦、木块对两种不同炉型生产条件下(8.5 MVA和12.5 MVA)的工业硅生产过程碳排放量的具体影响。研究发现原料消耗与直接碳排放量呈高度相关,相关系数 $\geq 83\%$,与碳排放总量呈中度相关,相关系数 $\geq 68\%$ 。得出多个生产参数对碳排放量的影响,结果发现不同碳质还原剂对碳排放影响程度在8.5 MVA炉型具体顺序为:烟煤>石油焦>木块;12.5 MVA炉型为:石油焦>烟煤>木块。8.5MVA炉型在生产1吨工业硅产品时直接碳排放量明显低于12.5MVA炉型,但碳排放总量却多出74千克,这表明12.5MVA炉型在电能利用上要优于8.5MVA炉型。

(3) 利用广泛用于工业产品的生命周期环境影响评价(LCA)方法对工业硅至高纯晶硅生命周期的环境影响进行研究。首先构建了1t工业硅冶炼和1t高纯晶硅改进西门子法提纯的生命周期评价模型,分析并计算出从工业硅到高纯多晶硅生产整个生命周期的资源投入、能耗、排放以及对环境的综合影响等生命周期数据清单。对工业硅至高纯晶硅在生命周期内的主要1~10个影响类别环境影响

进行了权重计算并提出相对应的改进方法。结果表明，工业硅生产与改进西门子法生产高纯多晶硅对环境的综合影响分别约为 4.532 与 4.991，根据量化结果，改进的重点在于提高碳质还原剂还原效率、优化生产工艺和环境自净等角度实现节能减排。

6.2 展望

本论文主要围绕工业硅冶炼及高纯晶硅提纯过程中碳排放量影响因素进行研究并针对性的提出相应节能减排措施。目前做到的工作仍处于基础研究，数据来源有限，未来可以通过与政府部门、相关企业进行合作来实现晶硅原料行业的碳排放减少。当然仍有一些新的展望可以进一步丰富此项研究：

（1）未来可以收集光伏行业整个生命周期碳排放数据，利用对数平均指数迪氏分解法分解为不同年份、不同地区、不同生产原料及工艺等进行分析，对细化后的碳排放影响因素分解进一步分析，得到针对关键点的减排措施。

（2）利用生命周期评价方法评估晶硅原料实际生产中其他因素，比如工业硅质量、电耗、碳质还原剂元素含量对碳排放量的具体环境影响。还可以将包括建筑、交通消耗的能源一并分析计算，将结果结合实际投产地区，得到回收周期等。

参考文献

- [1] S. Wang, X. Wang, Y. Tang. Drivers of carbon emission transfer in China—An analysis of international trade from 2004 to 2011 [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 709: 135924.
- [2] Y. Duan, Z. Han, H. Mu, J. Yang, Y. Li. Research on the Impact of Various Emission Reduction Policies on China's Iron and Steel Industry Production and Economic Level under the Carbon Trading Mechanism [J]. *Energies*, 2019, 12: 1-26.
- [3] H. Zhang, X. Zhang, J. Yuan. Driving forces of carbon emissions in China: a provincial analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 21455-21470.
- [4] T. Ding, Y. Huang, W. He, D. Zhuang. Spatial-temporal heterogeneity and driving factors of carbon emissions in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(9) : 1-14.
- [5] 张洋. 基于 IPSO-LSTM 模型的中国能源消费碳排放预测研究 [D]: 华北电力大学(北京), 2021.
- [6] 段治. 基于博弈理论的钢铁工业产业集聚和 CO₂ 减排政策研究 [D]: 大连理工大学, 2018.
- [7] Y. Liu, Y. Jiang, H. Liu, B. Li, J. Yuan. Driving factors of carbon emissions in China's municipalities: a LMDI approach [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(15) : 21789-21802.
- [8] 任梦洋. 在碳达峰目标下广州市交通低碳发展路径研究 [D]: 广州大学, 2022.
- [9] 韦丙龙. 湖北省绿色经济效率及影响因素研究 [D]: 湖北省社会科学院, 2020.
- [10] H. Wang, D. Guan, P. Guthrie. Comparative Analysis of Carbonization Drivers in China's Megacities [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4) : 564-575.
- [11] 汪中华, 于孟君. 中国石化行业二氧化碳排放的影响因素分解——基于广义迪氏指数分解法 [J]. *科技管理研究*, 2019, 39(24) : 7.

- [12] W.F. Ruddiman. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago [J]. Climatic Change, 2003, 61(3) : 261-293.
- [13] J. Gibbins, H. Chalmers. Carbon capture and storage [J]. Energy Policy, 2008, 36(12) : 4317-4322.
- [14] S.M. Moosavian, N.A. Rahim, J. Selvaraj, K.H. Solangi. Energy policy to promote photovoltaic generation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25(5) : 44-58.
- [15] N. Valkila, A. Saari. Urgent need for new approach to energy policy: The case of Finland [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(7) : 2068-2076.
- [16] M. Zhang, D. Zhou, P. Zhou. A real option model for renewable energy policy evaluation with application to solar PV power generation in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40:944-955.
- [17] D.S. Cohan., C. Douglass. Potential emissions reductions from grandfathered coal power plants in the United States [J]. Energy Policy, 2011, 39: 4816-4822.
- [18] K. Zhou, S. Yang, C. Shen, S. Ding, C. Sun. Energy conservation and emission reduction of China's electric power industry [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 10-19.
- [19] M.A. Green. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2009, 17(3).
- [20] C. Nan, B. Liu, S. Qiu, G. Liu, G. Du. Study of SiC and Si₃N₄ inclusions in industrial multicrystalline silicon ingots grown by directional solidification method [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2010, 13(4) : 231-238.
- [21] T. Jing, S. Yu. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 141: 108-124.
- [22] X. Xu, K. Vignarooban, B. Xu, K. Hsu, A.M. Kannan. Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1106-1131.

- [23] M. Arriaga, C.A. Canizares, M. Kazerani. Long-Term Renewable Energy Planning Model for Remote Communities [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 7(1) : 221-231.
- [24] H. Hondo, K. Baba. Socio-psychological impacts of the introduction of energy technologies: Change in environmental behavior of households with photovoltaic systems [J]. Applied Energy, 2010, 87(1) : 229-235.
- [25] D. Li, T. Lam, W. Chan, A. Mak. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings [J]. Applied Energy, 2009, 86(5) : 722-729.
- [26] S.T. Walsh, R.L. Boylan, C. Mcdermott, A. Paulson. The semiconductor silicon industry roadmap: Epochs driven by the dynamics between disruptive technologies and core competencies [J]. Technological Forecasting & Social Change, 2005, 72(2) : 213-236.
- [27] L.Y. Hu, X.F. Guo. Correlation Analysis of Polycrystalline Silicon Industry and Photovoltaic Industry in China [J]. Advanced Materials Research, 2011, 383-390: 7049-7053.
- [28] R. Siddique, N. Chahal. Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar [J]. Resources Conservation & Recycling, 2011, 55(8) : 739-744.
- [29] M. Hosenuzzaman, N.A. Rahim, J. Selvaraj, M. Hasanuzzaman, A. Malek, A. Nahar. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 284-297.
- [30] Hauksdottir, S. A., Soderstrom, T., Thorfinnsson, P. Y., Gestsson, A. System identification of a three-phase submerged-arc ferrosilicon furnace [J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1995.
- [31] G.S. Aglietti, S. Redi, A.R. Tatnall, T. Markvart. Harnessing High-Altitude Solar Power [J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION EC, 2009, 24(2) : 442-451.
- [32] Z. Ni, S. Zhou, S. Zhao, W. Peng, X. Pi. Silicon nanocrystals: unfading silicon materials for optoelectronics [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2019, 138: 85-117.

- [33] L. Méndez, E. Forniés, D. Garrain, A. Vázquez, A. Souto, T. Vlasenko. Upgraded metallurgical grade silicon and polysilicon for solar electricity production: A comparative life cycle assessment [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 789: 147969.
- [34] D. Yue, F. You, S.B. Darling. Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis [J]. *Solar Energy*, 2014, 105: 669-678.
- [35] 李亚广, 聂陟枫, 周扬民, 方文宝, 谢刚, 侯彦青. 改良西门子法制备多晶硅还原过程研究进展 [J]. *现代化工*, 2018, 38(5) : 5.
- [36] M. Takla, N.E. Kamfjord, H. Tveit, S. Kjelstrup. Energy and exergy analysis of the silicon production process [J]. *Energy*, 2013, 58(1) : 138-146.
- [37] R. Benioub, M. Adnane, A. Boucetta, A. Chahtou, K. Itaka. Optimization of the Raw Material Input Molar Ratio on the Carbothermal Production of Solar-Grade Silicon [J]. 2017, 7: 90-96.
- [38] H.M. Zhang, Z.J. Chen, W.H. Ma, S.J. Cao, K.Z. Jiang, Y.Q. Zhu. The Effect of Silica and Reducing Agent on the Contents of Impurities in Silicon Produced [J]. *Silicon*, 2021, 14: 4925–4934.
- [39] D.D. Hsu, P. O'donoghue, V. Fthenakis, G.A. Heath, H.C. Kim, P. Sawyer, J.K. Choi, D.E. Turney. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation : Systematic Review and Harmonization [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16: S122-S135.
- [40] C.E.L. Latunussa, F. Ardente, G.A. Blengini, L. Mancini. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2016, : 101-111.
- [41] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 谢欣悦, 杨笑楹. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践 [J]. *钢铁*, 2016, 51(4) : 74-82.
- [42] Ernst, Worrell, And, Lynn, Price, And, Nathan, Martin. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector [J]. *Energy*, 2001, 26: 513-526.
- [43] H. Helle, M. Helle, H. Saxen, F. Pettersson. Mathematical Optimization of Ironmaking with Biomass as Auxiliary Reductant in the Blast Furnace [J]. *Isij International*, 2009, 49(9) : 1316-1324.

- [44] T. Mitra, M. Helle, F. Pettersson, H. Saxén, N. Chakraborti. Multiobjective Optimization of Top Gas Recycling Conditions in the Blast Furnace by Genetic Algorithms [J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2011, 26(3) : 475-480.
- [45] D.L. Zhang H, Li Hq, Chen B, Tang Q, Fujita T Investigation of the residual heat recovery and carbon emission mitigation potential in a Chinese steelmaking plant: A hybrid material/energy flow analysis case study [J]. *Sustainable Energy Technologies & Assessments*, 2013, 2: 67-80.
- [46] X. Shen, L. Chen, S. Xia, Z. Xie, X. Qin. Burdening proportion and new energy-saving technologies analysis and optimization for iron and steel production system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172(2) : 2153-2166.
- [47] P. Jin, Z.Y. Jiang, C. Bao, S.Y. Hao, X.X. Zhang. The energy consumption and carbon emission of the integrated steel mill with oxygen blast furnace [J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2015, : 561–574.
- [48] Q. Zhang, Y. Li, J. Xu, G.Y. Jia. Carbon element flow analysis and CO₂ emission reduction in iron and steel works [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172(1): 709-723.
- [49] L. Li, Y. Lei, D. Pan. Study of CO₂ emissions in China's iron and steel industry based on economic input–output life cycle assessment [J]. *Natural Hazards*, 2016, 81: 957-970.
- [50] 刘影, 段蒙, 赵云杰. 基于 LMDI 方法的我国钢铁行业 CO₂ 排放影响因素分解研究 [J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(6): 6.
- [51] X. Wang, X. Gao, Q. Shao, Y. Wei. Factor decomposition and decoupling analysis of air pollutant emissions in China's iron and steel industry [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(13): 15267-15277.
- [52] Y.C. Cao, F. Gao, Z.H. Wang, X.Z. Gong, X.Q. Li. Analysis on Influence Factors of Greenhouse Gas Emissions of Magnesium Production Process [J]. *Materials Science Forum*, 2016, 847: 321-327.
- [53] Yaoqi, Guo, Wensong, Zhu, Yi, Yang, Hui, Cheng]. Carbon reduction potential based on life cycle assessment of China's aluminium industry-a perspective at the province level [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239:118004.

- [54] S. Li, T. Zhang, L. Niu, Q. Yue. Analysis of the development scenarios and greenhouse gas (GHG) emissions in China's aluminum industry till 2030 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125859.
- [55] W. Huber, G. Kolb. Life cycle analysis of silicon-based photovoltaic systems [J]. *Solar Energy*, 1995, 54(3): 153-163.
- [56] K. Kato, A. Murata, K. Sakuta. An evaluation on the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1997, 47(1-4) : 95-100.
- [57] M.K.K.T.K. Ito. A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV (VLS-PV) systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe, and CIS modules [J]. *Progress in photovoltaics*, 2008, 16(1): 17-30.
- [58] M. Ito, K. Komoto, K. Kurokawa. Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules [J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10: 271-273.
- [59] A. Stoppato. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation [J]. *Energy*, 2008, 33(2) : 224-232.
- [60] 叶宏亮, 马文会, 杨斌, 任玖阳, 刘大春, 戴永年. 工业硅生产过程生命周期评价研究 [J]. *轻金属*, 2007, 11 : 46-49.
- [61] V.M. Fthenakis, H.C. Kim, E. Alsema. Emissions from photovoltaic life cycles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(6) : 2168-2174.
- [62] 刘臣辉, 詹晓燕, 范海燕, 吕信红. 多晶硅-光伏系统碳排放环节分析 [J]. *太阳能学报*, 2012, 33(7) : 6.
- [63] L. Ma, Z. Yu, W. Ma, S. Qing, J. Wu. Assessment and Study on the Impact on Environment by Multi-crystalline Silicon Preparation by Metallurgical Route(Article) [J]. *Silicon*, 2019, 11(3) : 1383-1391.
- [64] Z.J. Chen, W.H. Ma, J.J. Wu, K.X. Wei, X. Yang, G.Q. Lv, K.Q. Xie, J. Yu. Influence of carbothermic reduction on submerged arc furnace energy efficiency during silicon production [J]. *Energy*, 2016, 116 : 687-693.
- [65] Z.J. Chen, W.H. Ma, K.X. Wei, S.Y. Li, W.M. Ding. Effect of Raw Materials on the Production Process of the Silicon Furnace [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 158: 359-366.

- [66] Z.J. Chen, W.H. Ma, K.X. Wei, J.J. Wu, G.Q. Lv. Artificial Neural Network Modeling for Evaluating the Power Consumption of Silicon Production in Submerged Arc Furnaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 226-236.
- [67] Z.J. Chen, W.H. Ma, J.J. Wu, K.X. Wei, G.Q. Lv. Predicting the Electricity Consumption and the Exergetic Efficiency of a Submerged Arc Furnace with Raw Materials using an Artificial Neural Network [J]. Silicon, 2018, 10: 603-608.
- [68] Z.J. Chen, W.H. Ma, S.Y. Li, J.J. Wu, K.X. Wei, Z.Q. Yu, W.M. Ding. Influence of carbon material on the production process of different electric arc furnaces [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 17-25.
- [69] Z.J. Chen, W.H. Ma, J.J. Wu, K.X. Wei, Y. Lei, G.Q. Lv. A Study of the Performance of Submerged Arc Furnace Smelting of Industrial Silicon [J]. Silicon, 2018, 10: 1121 - 1127.
- [70] Z.J. Chen, S.C. Zhou, W.H. Ma, X.C. Deng, S.Y. Li, W.M. Ding. The effect of the carbonaceous materials properties on the energy consumption of silicon production in the submerged arc furnace [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 191: 240-247.
- [71] R. Heijungs, R. Kleijn, E. Voet, A.D. Koning, L.V. Oers, A. Elshkaki, R. Huele, G. Huppes, S. Suh, A.W. Sleeswijk. Human and Ecological Life Cycle Tools for the Integrated Assessment of Systems (HELIAS) [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11: 19-28.
- [72] J. Kang, T.S. Ng, B. Su, R. Yuan. Optimizing the Chinese Electricity Mix for CO₂ Emission Reduction: An Input-Output Linear Programming Model with Endogenous Capital [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 54(2) : 697-706.
- [73] A. Ro, A. Sn, B. Le. Renewable energy expansion in the Chilean power market: A dynamic general equilibrium modeling approach to determine CO₂ emission baselines [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247.
- [74] L.E. Eberly. Correlation and Simple Linear Regression [J]. Radiology, 2003, 227(3) : 617-622.

- [75] J. Hauke, T. Kossowski. Comparison of values of pearson's and spearman's correlation coefficients on the same sets of data [J]. Quaestiones Geographicae, 2011, 30(2) : 87-93.
- [76] 王凯, 冯晖, 刘财. Pearson 相关系数法快慢横波波场分离 [J]. 世界地质, 2012, 31(2) : 371-376.
- [77] 杨帆, 冯翔, 阮羚, 陈俊武, 夏荣, 陈昱龙, 金志辉. 基于皮尔逊相关系数法的水树枝与超低频介损的相关性研究 [J]. 高压电器, 2014, 50(6) : 6.
- [78] 姜丰, 朱家玲, 胡开永, 辛光磊, 赵洋洋. Pearson 相关系数评价 ORC 系统蒸发器特性的应用研究 [J]. 太阳能学报, 2019, 40(10) : 7.
- [79] 许阳, 任盛, 刘鑫, 李若, 李宗恩, 王智勇. 基于皮尔逊相关系数法的台区窃电精准分析 [J]. 大众用电, 2021, 36(08) : 14-15.
- [80] B.W. Ang. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide [J]. Energy Policy, 2005, 33(7) : 867-871.
- [81] Ang, W. B. LMDI decomposition approach: A guide for implementation [J]. Energy Policy, 2015, 86: 233-238.
- [82] C. Wang, J. Chen, Z. Ji. Decomposition of energy-related CO₂ emission in China: 1957–2000 [J]. Energy, 2005, 30(1) : 73-83.
- [83] Z. Ming, H. Mu, Y. Ning, Y. Song. Decomposition of energy-related CO₂ emission over 1991-2006 in China [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7) : 2122-2128.
- [84] J.W. Sun. Accounting for energy use in China, 1980–94 [J]. Energy, 1998, 23(10) : 835-849.
- [85] E. Akbostanci, G.I. Tunc, S. Turut-Asik. CO₂ emissions of Turkish manufacturing industry: A decomposition analysis [J]. Applied Energy, 2011, 88(6) : 2273-2278.
- [86] K. Jeong, S. Kim. LMDI decomposition analysis of greenhouse gas emissions in the Korean manufacturing sector [J]. Energy Policy, 2013, 62(Complete) : 1245-1253.
- [87] E. Duran, C. Aravena, R. Aguilar. Analysis and decomposition of energy consumption in the Chilean industry [J]. Energy Policy, 2015, 86(NOV.) : 552-561.

- [88] Belloumi, Mounir, Achour, Houda. Decomposing the influencing factors of energy consumption in Tunisian transportation sector using the LMDI method [J]. Transport policy, 2016, 52: 64-71.
- [89] N. Liu, Z. Ma, J. Kang, B. Su. A multi-region multi-sector decomposition and attribution analysis of aggregate carbon intensity in China from 2000 to 2015 [J]. Energy Policy, 2019, 129: 410-421.
- [90] W. Gong, C. Wang, Z. Fan, Y. Xu. Drivers of the peaking and decoupling between CO₂ emissions and economic growth around 2030 in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(3): 3864-3878.
- [91] J.Y. Duanxiang Peng, aibin Chen, huanyu Chen, jieqiong Yang. Decoupling trend and emission reduction potential of CO₂ emissions from China's petrochemical industry [J]. Environmental science and pollution research international, 2022, 30: 23781 - 23795 .
- [92] G.A. Keoleian, W.J. Glantschnig, W. Mccann. Life cycle design: AT&T demonstration project [J]. International Symposium on Electronics & the Environment, 1994: 134-135.
- [93] A. Brinkley, J.R. Kirby, I.L. Wadehra, J. Besnainou, R. Coulon, S. Goybet. Life cycle inventory of PVC: disposal options for a PVC monitor housing [J]. International Symposium on Electronics & the Environment, 1995, 5(1-3):145-151.
- [94] A. Brinkley, J.R. Kirby, I.L. Wadehra, J. Besnainou. Life cycle inventory of PVC: manufacturing and fabrication processes [J]. International Symposium on Electronics & the Environment, 1996, 5: 6-8.
- [95] G.L. Touchton, G.H. Quentin, B. Mastrodonato. Lessons Learned From Durability Surveillance of Advanced Gas Turbines [J]. American Society of Mechanical Engineers, 1997, 33(2): 116-123.
- [96] D. Pollock, R. Coulon. Life cycle assessment: of an inkjet print cartridge [J]. International Symposium on Electronics & the Environment, 1996, 5(6-8):154-160.
- [97] K. Grzesik, T. Terefeńko. Life cycle assessment of an inkjet printer [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2012, 21(5A) : 95–105.

- [98] J. Li, Y. Tian, Y. Deng, Y. Zhang, K. Xie. Improving the estimation of greenhouse gas emissions from the Chinese coal-to-electricity chain by a bottom-up approach [J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 167: 105237.
- [99] E. Gul, L. Riva, H.K. Nielsen, H. Yang, F. Fantozzi. Substitution of coke with pelletized biocarbon in the European and Chinese steel industries: An LCA analysis [J]. Applied Energy, 2021, 304(3): 117644.
- [100] S. Gerbinet, S. Belboom, A. Léonard. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 38: 747-753.
- [101] 邬少燕. 钢铁企业碳预算体系设计及应用研究 [D]: 重庆理工大学, 2019.
- [102] 侯玉梅, 梁聪智, 田歆, 潘登. 我国钢铁行业碳足迹及相关减排对策研究 [J]. 生态经济, 2012, (12) : 5.
- [103] 何洋. 太阳能级多晶硅的生命周期评价 [D]: 西南交通大学, 2013.
- [104] 张晓辉, 周齐领. 太阳能级多晶硅装置工艺路线比较 [J]. 化工设计, 2021, 31(4) : 6.
- [105] 杨凯, 施晨鹏. 西门子法生产多晶硅工艺设计改良分析 [J]. 化工时刊, 2017, 31(8) : 3.
- [106] 李斌、张铁锋、杨楠、李寿琴. 改良西门子工艺物料平衡的计算与分析 [J]. 化工管理, 2020, (34) : 3.
- [107] 刁周玮, 石磊. 中国光伏电池组件的生命周期评价 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(5) : 9.
- [108] 王震. 促进生命周期方法的发展 [J]. 产业与环境(中文版), 2003, (Z1) : 38-40.
- [109] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5) : 6.