

分类号: X701.3

单位代码: 10335

密 级: _____

学 号: 21027013

浙江大学

硕士学位论文



中文论文题目: 燃煤电厂烟气脱硫工艺生命周期评估

英文论文题目: LCA of desulfurization technologies
applied in coal-fired power plants

申请人姓名: 王 红

指导教师: 蒋 啸 高工

合作导师: 高 翔 教授

专业名称: 动力工程(专业学位)

研究方向: 燃煤烟气脱硫

所在学院: 能源工程学系

论文提交日期 2012 年 6 月

燃煤电厂烟气脱硫工艺生命周期评估



论文作者签名: 王红

指导教师签名: 蒋中

论文评阅人 1: 匿名

评阅人 2: 匿名

评阅人 3: 匿名

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 施浩勋 教授级高工

委员 1: 吴梦锡 教授级高工

委员 2: 樊建人 教授

委员 3: 李晓东 教授

委员 4: 韩旭光 教授

委员 5: 王飞 教授

答辩日期: 2012. 6. 4

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：王红 签字日期：2012年6月18日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：王红 导师签名：蒋峰

签字日期：2012年6月18日 签字日期：2012年6月19日

致 谢

光阴荏苒，求是园的六年时间转眼接近了尾声，回望这些年，一个个片段掠过脑海。这些年遇到了许许多多的良师益友，陪着我成长，帮着我度过失落的时光，感谢我生命中的贵人，那些恩情无法言语，一辈子铭记于心。

感谢我的导师蒋啸高工，蒋老师的勤奋努力和无私奉献深深触动了我。特别感谢我的导师高翔教授，感谢高老师对我的栽培，能得到高老师的肯定是对我工作最大的鼓励，高老师积极向上的人生态度和精益求精的做事方法也使我备受感染，得以使我积极面对今后生活工作中碰到的困难和问题。特别感谢我的企业导师孙琦明教授级高工给予我教育和指导，让我对实际工程有了更深刻的理解。特别感谢吴学成副教授给予我的指导和帮助，吴老师缜密的思维和严谨的科学态度使我的学术研究更为顺利。特别感谢陈有根高工在方案设计、数据分析和论文写作各方面对我的指导。

感谢热能所的岑可法院士、倪明江教授、骆仲泱教授、施正伦研究员、周劲松教授、方梦祥教授、王树荣教授、程乐鸣教授、王勤辉教授、邱坤赞副教授、余春江副教授和肖刚副教授在我攻读硕士学位期间给予我的关心和帮助。

感谢丁红蕾博士、钟毅博士、徐甸硕士生、吴卫红工程师、郑成航博士、宋浩博士生、毛程奇博士生、陈余土博士生、崔力文硕士生、曹飞飞博士生、刘璐博士生、郑智展硕士生、郑贤明本科生、史建勇本科生在我科研的过程中给予我的帮助。特别感谢张涌新硕士生和翁卫国高工在本研究数据收集过程中给予的大力支持和帮助。特别感谢梁晓烨博士生、郭龙硕士生、董隽硕士生、李文娟硕士生，在软件学习方面，不厌其烦的给予我指导和帮助。

感谢苏秋风女士、黄贵芝女士、龚滨玲女士、王诗依女士在我日常科研生活中给予的关心和帮助。

衷心感谢陪我度过研究生时光的办公室同学：刘少俊博士生、杜学森博士生、高峰硕士生、杜振硕士生、付银成硕士生、许希博士生、纪培栋博士生、高金龙硕士生、郭凯凯硕士生。感谢各位在我陷入低谷的时候，对我的鼓励和安慰；在我无助的时候，给我依靠；在我迷茫的时候，为我开导和指引。是你们给了我度过困难的勇气，我们之间的深厚友谊永远不会忘记。感谢我的好朋友许奇钢、张莉莉、李尤和林肖对我学习生活的关心与帮助，为我的研究生生活增添了光彩。

在我人生前进的道路上改变了很多事情，但一直未曾改变的是我家人对我的支持与关怀，感谢我的父母和弟弟，你们的笑容是我奋斗的动力，家永远是我休憩的港湾。你们，让我有勇气向前！

摘 要

SO₂是燃煤电厂排放的主要大气污染物之一，为实现SO₂减排，以石灰石石膏湿法和循环流化床半干法等脱硫技术和装备得到了应用和普及。但治理设施脱硫设备在建设运行等过程中，都涉及到了资源、能源消耗，也会有新的环境污染产生。为评估燃煤电厂SO₂控制工艺的环境影响性，本文采用了生命周期评估方法对石灰石石膏湿法和循环悬浮式半干法两套工艺进行了分析比较。以脱除1tSO₂作为两种脱硫工艺的功能单位，评估比选工艺的物耗、能耗及污染物排放情况。

本文将评估分为建设阶段和运行阶段两个部分，并整理计算了各阶段的能源消耗清单、材料水资源消耗清单以及污染物排放清单。首先对装置建设阶段进行了分析，在明确整套系统设备所需的各种材料及重量之后，通过查询gabi软件数据库中的基础数据对材料生产、运输所需的能耗、原材料和污染物排放进行了统计，进一步计算了能耗产生的污染物排放。类似的对工艺设备运行阶段进行了相应的清单分析。统计各阶段数据清单，获得了比选工艺一年的总能耗量，铁矿石、矿物资源、煤炭、石油、天然气、石灰石等原材料和水资源的消耗及CO₂、CO、NO_x、SO₂等大气污染物、废水、固废排放清单。

本文选择了EDIP 97和EDIP 2003评价体系对比选工艺清单进行了分析。在分析过程中考虑了能耗、资源消耗及各种气体对环境温室效应、酸化、富营养化、光化学臭氧合成方面的影响。

研究结果表明：两种脱硫控制工艺在环境酸化改善上取得了明显的成效，酸化得到了很好的控制，安装脱硫装置意义重大。两种工艺环境影响主要来自于运行阶段，相比而言建设阶段占比很小。循环悬浮式半干法工艺在功能单位能耗、污染物排放方面要少于石灰石石膏湿法工艺。这与石灰石石膏湿法运行能耗大，耗水量大有着密切的关系。原材料消耗特别是石灰石消耗循环悬浮式半干法要大于石灰石石膏湿法，这是由于半干法的钙硫比相对较大，需要的石灰石量多且石灰石在加工成消石灰的过程中存在着一定的损耗。因此，两种工艺可在相应阶段进行控制优化，力求做到环境更友善，能以最小的资源和环境代价解决更多的大气污染问题。

关键字：脱硫技术、生命周期评估、环境影响、能耗、物耗、污染物排放

Abstract

SO₂ is a main pollutant in the flue gas exhausted from fossil fuel combustion in power station, which is removed by desulfurization equipment. In order to control SO₂, the process will bring potential issues of material consumption, energy consumption and environment impact. In this study, wet limestone-gypsum and circulatory suspension type semidry de-SO₂ technologies were analyzed using the technique of life cycle assessment (LCA) to identify the environmental impact potential, with 1t SO₂ as a functional unit.

The two de-SO₂ technologies were quantified over two life cycle phases: construction and operation in the paper. Firstly, construction process was analyzed. By using gabi software, lists of databases during the raw material acquisition, production and transportation processes were analyzed. In the same way, lists of operation process could be acquired. Summarizing the relevant lists, raw materials (iron ore, mineral resources, coal, oil and nature gas etc), water resource and air pollutants(CO₂, CO, NO_x, SO₂)were identified.

The paper used evaluation system EDIP 97 and EDIP 2003 to link the lists to environmental impact potential. We considered impact category of global warming, acidification, nutrient enrichment, photochemical ozone formation, waste water and solid waste.

We found that by using the de-SO₂ technologies, acidification was well controlled. The environmental impact potential of construction process was much smaller than that of operation process. On the energy consumption and environment impact, circulatory suspension type semidry technology was better, because of wet limestone-gypsum's high energy and water consumptions. And on the material consumption, wet limestone-gypsum technology was better, because of semidry technology's higher Ca/S and the conversion efficiency of CaCO₃ to slaked lime. So, the technologies should take steps to reduce environment burden at relevant stages.

Key words: desulfurization technology, life cycle assessment, environment impact, energy consumption, material consumption, pollutant emission

目次

致 谢 I

摘 要 III

Abstract.....IV

目 次 V

1 绪论..... 1

1.1 选题背景及研究意义..... 1

1.1.1 选题背景..... 1

1.1.2 研究的目的、意义..... 3

1.2 课题研究的相关情况..... 4

1.2.1 研究对象概述——脱硫技术概述..... 4

1.2.2 研究方法概述——生命周期评估综述..... 5

1.2.3 研究现状..... 8

1.3 课题研究内容与技术路线..... 11

1.3.1 课题研究内容..... 11

1.3.2 研究开展技术路线..... 12

2 生命周期评价目的和范围的确定..... 13

2.1 燃煤电厂脱硫工艺LCA应用的技术关键..... 13

2.1.1 LCA基本概念的定义..... 13

2.1.2 产品和服务系统与基本流..... 14

2.2 燃煤电厂烟气脱硫工艺的生命周期..... 15

2.3 生命周期评估范围的确定..... 16

2.4 脱硫系统的功能和功能单位..... 16

2.4.1 功能..... 16

2.4.2 工艺的功能单位..... 16

2.5 燃煤电厂脱硫系统的边界..... 16

2.6 脱硫系统的服务年限..... 17

2.7 生命周期评估研究对象的确定..... 17

2.7.1 石灰石石膏湿法脱硫工艺..... 17

2.7.2 循环悬浮式半干法脱硫工艺..... 18

2.8 本章小结..... 19

3 比选工艺LCA的清单分析程序和工艺分析..... 21

3.1 生命周期评估的清单分析程序..... 21

3.2 比选方案的基本参数识别..... 22

3.2.1 石灰石石膏湿法工艺的基本参数识别..... 22

3.2.2 循环悬浮式半干法工艺的基本参数识别..... 23

3.3 本章小结..... 23

4 比选工艺建设阶段清单分析..... 25

4.1 能源消耗清单..... 25

4.1.1 建设阶段设备材料生产能耗..... 26

4.1.2 建设阶段设备材料运输能耗..... 28

4.1.3 建设阶段总能耗清单..... 28

4.2 材料和水资源消耗清单..... 29

4.2.1	主要设备材料的原材料消耗清单	29
4.2.2	能源生产资源消耗清单	31
4.3	污染物排放清单	32
4.3.1	主要设备材料生产过程的污染物排放	32
4.3.2	能源生产的污染物排放清单	37
4.3.3	运输过程中污染物排放清单	37
4.4	本章小结	38
5	比选工艺运行阶段清单分析	39
5.1	运行阶段能耗清单	39
5.1.1	运行阶段设备运行能耗	39
5.1.2	运行材料生产能耗	41
5.1.3	运行材料运输能耗	42
5.1.4	运行阶段总能耗清单	42
5.2	材料和水资源消耗清单	42
5.2.1	运行材料资源消耗清单	42
5.2.2	能源生产资源消耗清单	43
5.3	污染物排放清单	43
5.3.1	能源生产的污染物排放清单	44
5.3.2	运行材料生产污染物排放清单	45
5.3.3	运行材料运输污染物排放	45
5.4	本章小结	46
6	比选工艺生命周期环境影响评价和解释	47
6.1	环境影响评价方法	47
6.1.1	生命周期环境影响评价概述	47
6.1.2	生命周期环境影响评价类型和评价体系的选择	47
6.1.3	生命周期环境影响评价分类和影响潜值	48
6.2	比选工艺生命周期解释	50
6.2.1	比选工艺的生命周期能耗分析	50
6.2.2	比选工艺的生命周期物耗分析	51
6.2.3	比选工艺生命周期污染物排放分析	54
6.3	本章小结	60
7	全文总结和展望	61
7.1	全文总结	61
7.2	未来研究工作展望	62
	参考文献	63

1 绪论

1.1 选题背景及研究意义

1.1.1 选题背景

我国是煤炭生产大国，2010 年能源生产总量为 296916 万吨标煤，其中原煤占 76.5%。^[1]2010 年全年我国能源消费总量达 32.5 亿吨标准煤，比 2009 年增长 5.9%，其中煤炭消耗占世界煤炭消费总量的 48.2%，成为世界上煤炭消耗最大的国家。^[2]我国的能源赋予条件及经济水平和科技发展程度等因素决定了我国能源消费结构以煤炭为主。在今后相当长的一段时间内，我国以煤为主的能源格局并不会发生变化，煤炭的消耗量还会继续增加。^[3]一次能源的结构决定了我国电力行业以火力发电为主，^[4]而燃煤机组占火电机组的比例超过 97%。

燃煤电厂排放的大气污染物是造成我国区域大气污染的重要因素。 SO_2 是大气中主要污染物之一，是衡量大气是否遭到污染的重要标志。世界上有很多城市发生过 SO_2 危害的严重事件，使很多人中毒或死亡。在中国的一些城镇，大气中 SO_2 的危害较为普遍而又严重。 SO_2 主要来源于煤和石油的燃烧，浓度高时使人呼吸困难，甚至死亡。

SO_2 具有酸性，且会与空气中的其他物质反应，生成亚硫酸盐和硫酸盐颗粒等物质。 SO_2 对人类健康的影响主要是通过呼吸进入人体肺部，与呼吸器官发生作用，会引起甚至加重呼吸系统的问题。进入人体的这些颗粒物聚集到肺部，会引起呼吸系统方面的疾病，呼吸发生困难，严重的甚至会引起死亡现象。 SO_2 往往被飘尘吸附， SO_2 和飘尘的产生的协同作用使其对人体的危害更大。^[5]长期生活在大气受到污染的环境中，在 SO_2 和粉尘的协同效应作用下，会使肺泡纤维增生。若增生范围影响进一步扩大，会使纤维断裂，形成肺气肿问题。

SO_2 是一种剧毒污染物，对人类和环境等各方面造成了一定的影响，2010 年，全国 SO_2 排放量达到了 2185.1 万吨。^[6]作为 SO_2 排放重要源头，近几十年燃煤电厂 SO_2 的排放成为了关注了焦点。

我国 SO_2 的排放控制标准日益严格，2011 年 3 月，国家在《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中明确提出了“十二五” SO_2 减排 8% 的约束性指标；^[7]2011 年 7 月颁布的《火电厂大气污染物排放标准》（GB13233-2011）要

求自 2012 年 1 月 1 日起,所有新建火电机组 SO_2 排放浓度不大于 100 mg/m^3 。现有火电机组 SO_2 排放浓度不大于 200 mg/m^3 。^[8] SO_2 作为我国污染减排的重点工作从未放松。

为减少 SO_2 排放,火电行业和工业锅炉应用了一些 SO_2 控制技术,其中燃煤电厂烟气脱硫是指从煤炭燃烧排放的废气中去除硫氧化物的过程,是目前国际上广泛采用的脱硫方法^[9]。目前,国际上有数百种脱硫方法,其应用主要取决于锅炉容量的大小、燃烧设备燃烧方式的不同、使用燃料的类型和煤种硫分的多少、脱硫效率、脱硫剂的不同选择及电厂所在的区域位置、副产品的利用状况等因素。烟气脱硫按工艺特点可将脱硫技术分为湿法、干法和半干(半湿)法^[10]。湿法烟气脱硫技术是用含有吸收剂的溶液或浆液在湿状态下脱硫和处理脱硫产物,该法具有脱硫反应速度快、设备简单、脱硫效率高^[11]等优点,其中石灰石石膏湿法是世界上普遍使用的商业化技术,所占比例在 90%以上。但系统庞大,结构复杂,存在腐蚀严重、运行维护费用高及易造成二次污染等问题^[12]。而半干法脱硫反应在湿状态下进行,而脱硫产物可在干态下进行处理,因此兼具有湿法和干法的优势,不仅脱硫反应速度快、效率高,而且不会排出污水废酸、干态的脱硫产物也比较易于处理^[13],半干法越来越受到人们的关注。

脱硫装备是脱除 SO_2 、控制其危害的重要治理设施,大幅减少了燃煤电厂每年排向大气的 SO_2 总量,减轻了环境压力。以往人们评价脱硫装备的环境改善作用往往偏重考虑其对污染物的减排量。事实上,脱硫设备的控制功能是以产生新的环境污染资源消耗为代价的。为了处理 SO_2 需要付出大量的能耗、物耗、土地等宝贵的资源,同时还会产生大量的废气、温室气体、固废、水废等新的环境污染。

传统的技术评估一般采用技术经济分析的方法,该方法主要是分析技术本身的成熟程度、实际应用的可行性、可操作性及设备安装和运行过程中的经济性。但是,该分析方法也存在一定的局限性,无法全面分析产品工艺的能耗、物耗和环境的影响性。生命周期评估(LCA)方法即是从原材料获取到成品再到工艺运行整个生命周期过程来分析能耗、物耗和污染物排放情况,综合评估分析从“摇篮”到“坟墓”整个生命周期过程中的环境影响,可弥补传统评价方式所存在的局限性和片面性。^{[14][15][16][17]}从区域和全球可持续发展的高度对污染物控制技术

进行环境影响评估和完善化分析,转变对大气污染物控制工艺的评估观念。因此,必须用新的观点(即生命周期评价方法)更客观地评价燃煤电厂 SO_2 控制工艺的环境负荷性,研究其整个生命周期过程及各个环节阶段进行系统性的过程分析。

1.1.2 研究的目的、意义

大气污染物控制工艺实施过程中会对环境造成负面的影响,本课题以燃煤电厂主要大气污染物之一 SO_2 的控制技术作为研究目标,以石灰石石膏湿法和循环悬浮式半干法作为研究对象,采用生命周期评估方法(LCA)对其进行识别的评价。

生命周期评估的概念自 20 世纪 80 年代产生以来,作为一项全新的环境管理评估体系得到了不断的发展并在多个领域应用。随着区域性与全球性环境污染问题的日益严重,随着人们环境保护意识的逐渐增强,随着全球可持续发展思想普及和各国可持续行动计划的深入推进,实现可持续发展已成为了全世界的呼声。^[18]国家政策制定部门越来越重视制定合理的环境政策来实现可持续的发展,转变环境管理方式;提供环境友好型的产品也成为了消费者对企业的必然要求;多个方面的因素促使企业转变生产方式和管理理念,将环境问题考虑到产品生产过程中,倒逼企业转型升级,朝清洁生产和可持续发展的方向努力。

环境是一个复杂的网络系统,很多相互作用关系人们无法一眼望穿和预见,在实施之后才发现问题。众多现实案例也表明初看起来不错的方案措施,通过分析实践才发现事实并不是这样,我们也为此付出了环境代价。科学和全面的产品技术环境管理方法——生命周期评价就在这样的大背景下应运而生了。^[19]

该课题的开展可为完善燃煤电厂烟气脱硫技术评估提供可借鉴的理念支撑。对比不同脱硫工艺的环境负荷情况,评价工艺的环境性,哪个对环境更友善,是否是环境友好型的烟气净化项目。

通过分析脱硫技术整个生命周期各个环节阶段的资源消耗和环境影响,为脱硫技术的进一步发展和改进提供方向和技术依据。

此外,脱硫技术 LCA 评估的开展还可为今后其他大气污染物控制技术生命周期评估提供开展思路。因此,对燃煤电厂脱硫技术开展 LCA 评估具有十分重要的意义。

1.2 课题研究的相关情况

1.2.1 研究对象概述——脱硫技术概述

石灰石石膏法以石灰石作为脱硫剂，来脱除烟气中的 SO₂。首先，烟气经进口挡板门进入脱硫增压风机，再经过烟气换热器（GGH）后进入脱硫塔，石灰石浆液与烟气中的 SO₂ 反应，吸收塔部分的浆液循环泵使石灰石浆液在吸收塔中循环流动，烟气脱除 SO₂ 的后通过除雾器除去带有的小水滴，最后通过烟气换热器提升温度后，排放进入大气。脱硫后的浆液含有亚硫酸钙和硫酸钙物质，由氧化空气泵提供的氧化空气发生氧化反应，生成的石膏浆料经过石膏处理系统旋流器、脱水机等设备生成石膏。 [20][21] [22]

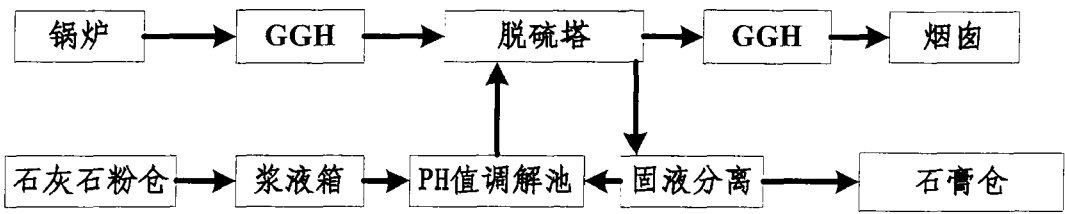
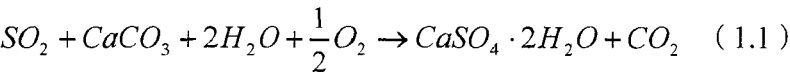


图 1.1 石灰石石膏湿法典型工艺流程

烟气中的 SO₂ 的水溶解性比较好，与水滴接触时，会分解成 H⁺和 HSO₃⁻或 SO₃²⁻，遇到吸收液中吸收剂产生的 Ca²⁺，则反应生成 Ca(HSO₃)₂ 或 CaSO₃，而生成的 CaSO₃ 极难溶解在水中，这类化学反应原理会不断推动 SO₂ 的溶解，进一步发生化学反应。烟气中的 SO₂ 和吸收液的吸收剂反应生成石膏，脱除了 SO₂ 气体。 [21]主要的化学反应机理为：



半干法烟气脱硫工艺应用较为广泛的主要有两种：喷雾干燥法和烟气循环悬浮式工艺，本文选择循环悬浮式作为研究对象。循环悬浮式脱硫工艺的运行机组为循环流化床原理，进入吸收塔的烟气与工艺水接触得到增湿，增湿后的烟气与吸收剂消石灰混合反应，循环泵使吸收剂在吸收塔内的多次循环，烟气与吸收剂的接触时间增加，是高脱除率的基础，而吸收剂通过这种形式也可得到了足够充分的使用 [20][21]，通过物理接触和化学反应，可脱除烟气中的 SO₂，脱硫终产物是干粉混合物脱硫灰，产物不仅不会造成无二次污染，甚至可作为资源再利用。

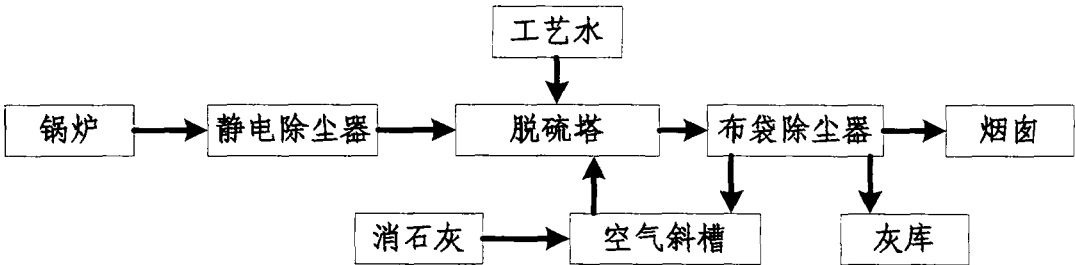
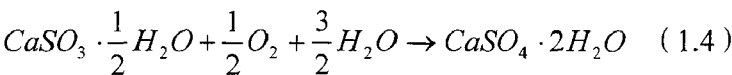
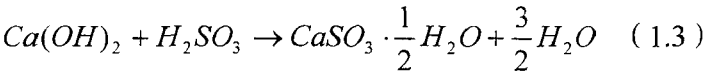
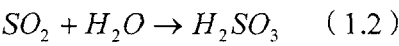


图 1.2 循环悬浮式半干法典型工艺流程

循环悬浮式脱硫塔内发生的化学反应比较复杂，但一般还是认为燃煤烟气、吸收剂和工艺水在同一时间进入脱硫塔内，主要化学反应原理为：



1.2.2 研究方法概述——生命周期评估综述

(1) LCA 定义

产品的生命周期评价（从摇篮到坟墓）如图 1.3 所示包括从原材料的开采和生产开始到制造、加工、使用 and 废弃物的管理^{[23][24]}。表 1.1 给出了几种代表性生命周期分析定义的表述及各种定义的共同性。

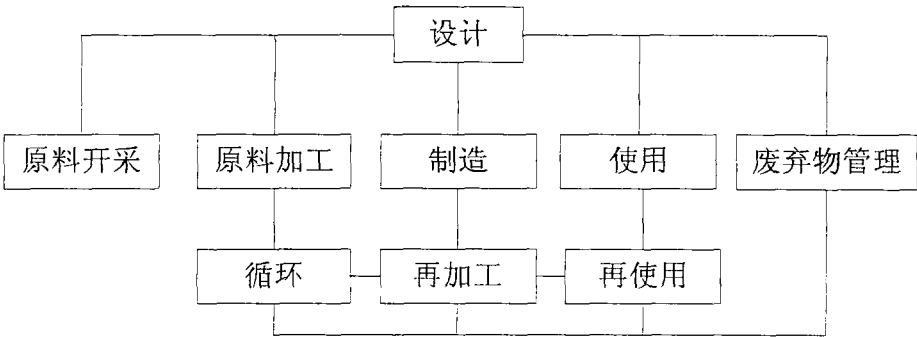


图 1.3 LCA 设计理论图

表 1.1 生命周期分析定义

机构	LCA 定义
美国环保署（EPA）	一种概念和方法，通过分析特定产品、生产工艺或者活动的整个生命周期过程，从而评估产品或者活动的环境影响情况。
ISO14040 标准	从原材料获取到成品,使用和抛弃整个产品的生命周期(摇篮到坟墓)

	分析环境状况和潜在影响。
欧盟	产品生命周期分析是在对产品、生产过程或活动从原料获取到其最终处置进行调查的基础上，定量产品的环境负荷的方法。
共同性	强调整个生命过程的所有的环境影响，这就与其它各种类型的环境影响评价从性质上区别开来。

产品生命周期分析不仅评价考虑生产加工过程中产生的各类环境影响问题，还考虑了产品的原材料资源和能源消耗情况，还将产生的各类环境污染问题与全球及区域性的环境问题联系在一起考虑，通过这样的结果，人们可以清楚的了解到日常活动和生产方式与人类生存环境之间的联系^[23]。

(2) LCA 技术框架

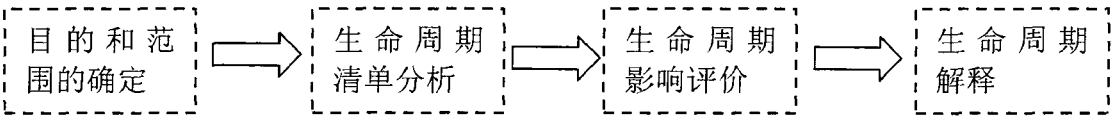
LCA 是一门用来评估产品、过程或者系统的环境因素和潜在影响的技术。国际环境毒理学与化学会(SETAC)将生命周期评价基本结构归纳为设定分析目标及范围，各类数据清单分析，评估潜在的环境影响，分析数据和影响和改善评估^{[25][26][27]}。

(3) LCA 的作用

在需求的前提下，我们现在为适应未来的需要，常常会面对一些障碍，例如：社会压力、政府及管理机构的障碍、其他一些不确定的阻碍以及缺少生产工艺的测量工具。这些问题仅仅依靠我们的直觉有时候是无法解决问题的，而 LCA 就是这么一种系统的研究方法用来比较产品或政策。

(4) 工作程序和内容

LCA 程序可概括为：



a、目的和范围的确定

在进行产品生命周期分析开始前，需要根据其应用方向和应用意图，对研究的目的和范围作出规定^[28]。在开展某项 LCA 研究之前，首先应明确的是研究目的，为什么要开展该项研究，可能的应用范围，会有哪些潜在的用户，是否要将得到的结论公开。

进行 LCA 分析，为实现全面详尽的研究、保证可靠的研究价值、满足研究目的，必须要合理设定明确的研究范围。同时也应该考虑到，在研究过程中，根据实际收集数据资料的情况，可能需要对研究边界进行反复修正。

b、生命周期清单分析

生命周期清单分析主要提供：

- 产品和工艺设备整个生命周期过程中所涉及到的从原材料开采、制造、产品运输到使用，以及回收处理或回收再使用各个阶段中的会涉及到的资源和能源需求；
- 大气污染物排放、水污染、固废污染物等资料清单，用以环境影响评估和完善全面分析。

清单分析一般的工作步骤为过程分析、收集数据，最终生成各类清单等^[28]。

c、生命周期影响评价

评估的详细程度与种类的选择以及使用的方法皆取决于所设定的研究目的与范围。生命周期影响评估的方法目前仍处于发展阶段，通常评估步骤如表 1.2 所示。

表 1.2 生命周期评估步骤^[29]

评估步骤	定义	特点
影响评估的分类	将清单分析所得到的数据，归纳分成数个影响类别。各阶段所使用的能源/资源及污染物，经分类及整理后，可作为影响因子。	具有明显的模糊性，在定义影响范围时必须视分析研究目的与目标而定
特征化	利用量化的方法，对不同影响类别的影响因子造成的影响予以定量评价及综合	按照影响类型建立清单数据模型
影响评估的量化	在该阶段主要给不同的影响类别予以权值，计算各自的贡献率。	存在许多不可转换的特性。
评估发展情况	影响评价的方法学和理论框架尚在发展之中，各种影响类别模型也还处于不同的形成阶段	

d、生命周期解释

分析解释过程需考虑的问题^[30]：

- 分析包括定量和定性两方面可采取的改进办法；

➤ 评析的结果提供给决策者，供他们参考。

e、生命周期评估数据库

目前，用于生命周期评估的数据库主要有 ecoinvent、simapro 和 gabi 软件，本文选择了 gabi 软件的数据库，gaibi 软件提供了产品的单位耗量、排放量、评估标准等数据。

1.2.3 研究现状

生命周期评估是一种用来评价环境影响的客观全面的方法，可应用于产品、生产工艺或人类活动所产生的环境负荷，该方法主要是通过量化分析资源消耗、能源消耗以及各类污染物排放情况来辨别环境影响结果。它主要是为了评价环境影响性，寻求更优的过程，以减少对环境的负面影响以及如何实现该目的而开展的。这种评价由始至终的贯穿在产品、生产工艺和活动的生命周期过程中，包括获取和加工原材料，原材料制造加工成产品，将产品进行运输和销售，使用或再利用以及养护产品，废物循环利用和无法利用后最终废物的处理抛弃。^[31]LCA 评估广泛应用于各行各业。

美国中西部资源研究所（MRI）对可口可乐公司的饮料玻璃包装盒和塑料包装盒的比较，使用了最初的原材料采掘到最终的废弃物处理，进行全过程的跟踪与定量分析的研究方法，涉及了玻璃、钢铁、铝、纸和塑料等工业部门和相应的支持工业部门，分析了 40 多种材料，使塑料包装更优，抛弃了过去长期使用的玻璃包装瓶，转而采用至今仍然在使用的塑料包装瓶，这是 LCA 第一个应用案例，由 EPA 公布了有关的研究报告，促使科学界开始考虑产品生产标准。^[32]

LCA 在能源行业得到了充足的利用，很多研究者将该评估方法应用到各类技术方法上，为行业发展和技术改进提供了意见和建议，有些甚至影响了政府的决策。

清洁能源领域某个非常著名案例是 LAVE 等人^[33]对美国加州政府“零排放汽车”（电动汽车）的推广政策的评价，从“零排放汽车”整个生产使用过程的研究考虑，研究了电动汽车所需电的来源，铅蓄电池的制造，铅的生产和循环利用过程，结果显示会导致更多了铅污染，该措施无法到达政府预期减少污染物排放的目的，报告给政府政策提供建议。

生命周期评估的方法在可再生能源行业应用的比较广泛。研究者 Cherubini, F^[34]等人对基于能源消耗和温室气体排放的生物质燃料系统的关键因素、变化范围和规范进行了研究。文中提到 LCA 是一项得以评估环境影响情况的科学方法,但在实际计算过程中,即使是两种相同的生物质系统由于原材料类型与管理、技术转化使用、系统边界和能源系统参照系等原因,很有可能得出不同的结果。由于上述原因文章给出了相关值的变化域而不是确切的结果。Gnansounou, E^[35]等人对生物乙醇与汽油的混合燃料进行了生命周期评估,对不同的混合比例进行了分析。研究结果表明参照系、功能单位和混合比例的不同都会对结果产生显著的影响,并对影响程度进行了分析。此外, Pehnt, M^[36]用动态趋近的方法对可再生能源技术进行了生命周期评估,结果表明对于所有的可再生能源链,初始能源资源的输入和温室气体的排放,相对于传统系统都是非常低的。技术进一步的发展还可改善系统的环境影响,例如提高能源的转化率、改变排放情况和延长系统寿命等。对光伏发电系统进行了生命周期评估,研究者 Stoppato, A^[37]考虑了从硅土材料开采到仪表装配整个过程中的物质流和能量流,多晶硅板的生产考虑了最先进的技术过程。结果表明最重要的过程是金属硅材料转变成太阳能硅材料以及仪表板的生产加工过程。前者需要大量的能源消耗,即使该过程考虑的是最高的转化效率;后者使用了铝和玻璃材料,该过程也是高耗能阶段。

LCA 在污染物控制技术方法也得到了有效的应用。研究者 Lombardi, L^[38]用 LCA 方法对电力行业几种 CO₂ 减排技术进行了比较,研究过程集中在减排系统的设备安装、运行和拆除三个阶段的 CO₂ 排放。结果表明对于比选技术而言,最重要的是运行操作阶段,建设及拆除过程的影响因素是微不足道的,结果也显示 CO₂ 捕集技术正面环境效应十分显著。Chiueh 等人^[39]研究的脱除水体中硝酸盐的 5 种催化技术的环境影响 LCA 评估进行了目的和范围的确定、生命周期清单分析和生命周期影响评价三个方面进行剖析。用 Eco-indicator 99 模型评估生命周期清单得到 5 种催化技术对环境系统的影响,包括人类健康、生态系统质量、资源三大方面。根据数据表得到了 5 种催化技术在生物呼吸系统、气候变化、辐射、臭氧层、土地使用、矿物质和化石燃料这几个方面的影响,从而评估得到技术的环境性能情况。以环境影响性最高的催化技术最为参数,统计了其他几种技术的环境影响情况,使观众更加直观的了解各种技术的对比情况。文中还通过

运用评价模型评估了 5 种催化技术在人类健康、生态系统质量、资源三大方面影响主要物质的影响权重。

将 LCA 技术运用于大气污染物控制技术比较少见。Golonka、Brennan^[40]和英国萨利大学的研究者 Vyzī、Azapagic^[41]曾分别在 1996 和 1998 年用 LCA 技术鉴定最佳可行性的环保技术，研究报告中涉及到了烟气脱硫技术。

研究者 Joseph H 等人^[42]指出大气污染物控制技术对环境保护的贡献会在技术实施的过程中被抵消掉一部分，比如额外的电力需求、发电效率的降低、CO₂ 排放的增加以及技术产生的副产物的处置。来自于烟气通过脱硫装置、脱硝装置以及颗粒物脱除装置等污染物控制装备运行所需要克服的附加压降，例如 石灰石浆液注入脱硫塔和在脱硫塔里循环和静电除尘器、布袋除尘器系统运行都需要耗费大量的电能。污染物控制系统包括脱硫装置、脱硝装置和颗粒物脱除装置所累积的额外的电力需求占总电力系统的百分比高达 9%。^{[43][44][45][46][47]}为弥补耗费的发电容量，必然会导致对环境影响的增加。污染物控制系统同样会增加 CO₂ 的排放，燃煤锅炉 CO₂ 排放量一般为 1.3t/h/MW，对一个容量为 300MW，利用率为 0.65 的基本机组，污染物控制系统的运行每年会额外增加 200000tCO₂ 的排放。^[42]燃煤电厂烟气污染物脱除同样会带来副产物，有些可以进入市场在销售，有些就只能抛弃。例如燃烧含硫量为 4%的煤的锅炉，用只配有泥浆脱水装置的湿法石灰石洗涤器脱除 SO₂，每燃烧一吨煤就会产生 1200 磅的废弃物。^[48]这些副产物往往需经过额外的处置过程才能满足再使用规格或抛弃要求。

1979 年美国 EPA 开展的工业锅炉烟气中 NO_x 控制技术评估^[49]，涉及了 LCA 内容，报告考虑了不同燃料锅炉、不同锅炉容量以及不同的脱硝率，能量损耗的情况。EPA 开展的针对 SO₂ 控制技术研究的报告^[50]研究了几种烟气脱硫技术能量损耗情况。

表 1.3 烟气脱硫技术能量损耗表

SO ₂ 控制技术	能源损耗（不包括再热）	能源损耗（包括再热）
石灰石膏法	0.9-1.8	2.4-3.5
钠洗涤法	0.5-0.8	2.0-2.6
双碱法	0.5-0.6	2.0-2.3
喷雾干燥法	0.5-0.8	0.5-0.8

韦尔曼-洛德法	1.6-6.2	3.2-7.9
---------	---------	---------

NO_x/SO₂ 多脱技术评估报告^[51]中也提到了工艺对大气、水体和土壤的影响。华南理工大学马晓茜等人^[52]研究了国内选择性催化还原(SCR)技术的资源消耗和环境影响,该文研究了 SCR 技术的原料制备、运输过程,设备安装过程及运行过程中资源的需求和污染物的排放,并分析了各个过程污染物排放对温室效应、土壤酸化、光化学烟雾等环境影响潜能。

综上所述, LCA 在工业产品和工艺技术的评估分析都得到了广泛的应用,为 LCA 在能源行业的应用打下良好的基础,生命周期评估方法应用于能源行业包括可再生能源的发展、污染物控制技术应用等方面都体现了蓬勃发展的趋势。虽然目前运用到大气污染物处理工艺的评估相对较少,但从仅有的一些案例研究中已经显示了 LCA 作为一种决策支持系统从资源和环境的角度对污染物处理系统进行评估的巨大潜力和作用。

1.3 课题研究内容与技术路线

1.3.1 课题研究内容

LCA 全方位、全过程确定燃煤电厂脱硫系统整个生命周期所产生的环境影响,将其影响与能源资源的消耗、环境污染和全球性区域性的环境影响等许多与人类生存和发展相关的重大问题联系起来。

本研究对脱硫工艺进行 LCA 研究的技术关键主要在于如何将 LCA 方法学正确的应用到处理工艺并进行工艺分析。例如,如何把脱硫工艺确定为 LCA 的产品系统或产品和服务系统;如何定义和区分处理器材、设备、装置、处理工艺和处理技术,以及它们在 LCA 中的地位;如何定义脱硫工艺的生命周期;如何定义脱硫技术的功能、功能单位和基本流等。

本课题研究内容涉及以下四个方面:

(1) 脱硫工艺分析目标范围确定

通过对燃煤电厂燃煤烟气脱硫工艺的分析,确定研究目标和边界条件,识别主要大气污染物的排放,并分别分析各自的来源和产生原因,为下一步工作的开展奠定基础。

(2) 获取脱硫整个工艺的清单

根据典型的脱硫工艺特点,做出合理的假设,获取工艺原材料开采运输制造

过程、建筑施工过程、运行维护过程的资源消耗和污染物排放清单。包括投入的资源—能源清单和排放到环境中的污染物清单。

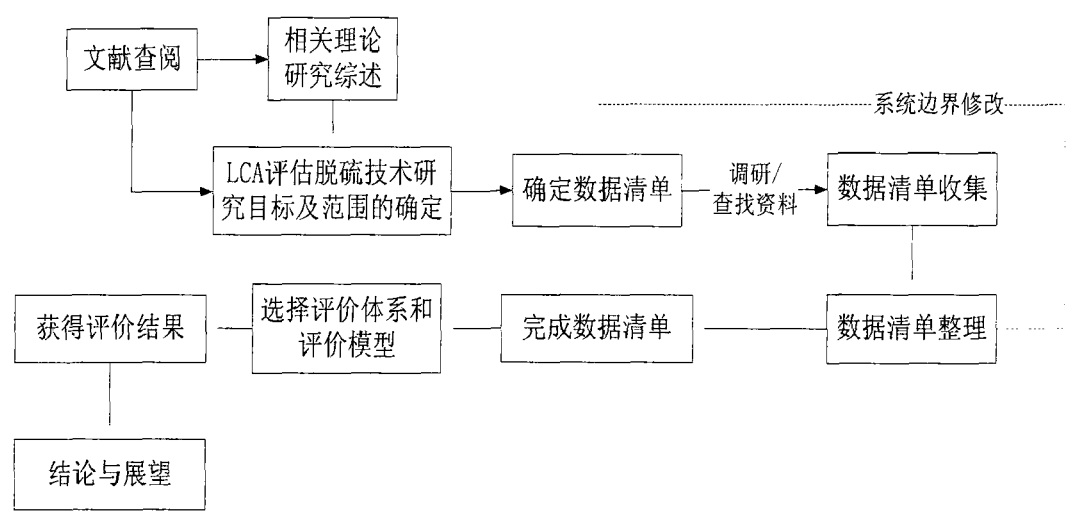
(3) 生命周期环境影响评价

将上一阶段清单所得的数据进行特征化、权重赋值，以技术性定量或定性方式评估工艺整个系统及各过程资源消耗及排放重要的显著与潜在性环境影响。包括温室气体排放、酸雨、营养化、光化学烟雾和烟尘及灰尘 5 个方面。

(4) 脱硫工艺生命周期解释

将清单分析和影响评估中的发现进行综合评价，分析比较各个过程的资源消耗及能耗、主要污染物排放种类，分析排放来源，系统地评估产品和工艺的整个生命周期内削减能源消耗、原材料使用以及环境释放的需求与机会。对比两种脱硫环境负荷情况，评价其工艺的环境性。

1.3.2 研究开展技术路线



2 生命周期评价目的和范围的确定

2.1 燃煤电厂脱硫工艺 LCA 应用的技术关键

根据 ISO14040《环境管理—生命周期评价—原则与框架》^[23]、ISO14041《环境管理—生命周期评价—目标与范围确定及存量分析》^[28]、ISO14042《环境管理—生命周期评价—生命周期影响评价》^[30]、ISO14043《环境管理—生命周期评价—生命周期影响解释》^[31]和 ISO14044《环境管理—生命周期评价—需求与指导》^[53]等生命周期评价国际标准中的规定对燃煤电厂烟气脱硫工艺进行 LCA 研究,各标准对 LCA 的开展进行了详细的说明和规定,ISO14062 标准分析了实际案例^[54]。

对脱硫工艺进行 LCA 研究首先要把脱硫工艺确定为 LCA 的产品系统或产品和服务系统,定义和区别脱硫处理器材、设备、装置、脱硫工艺,以及它们在 LCA 中的地位,定义脱硫工艺的生命周期;定义脱硫工艺的功能、功能单位和基本流等。由于将 LCA 运用于燃煤电厂 SO₂ 脱除工艺的评估分析在国内较少,因此本节对燃煤电厂脱硫工艺 LCA 应用的关键技术进行了分析与说明,为以下展开的 LCA 奠定理论基础。

2.1.1 LCA 基本概念的定义

按照研究者杨健^[18]的城镇污水处理工艺的生命周期评价论文中的表述,将之运用到本研究中,同样作为污染物控制系统,燃煤电厂脱硫技术也可以分为两个基本层次:(1)脱硫处理设备、器材、装置等和(2)脱硫处理工艺或工艺过程。论文采用了以下的定义。

设备形状比较小,但其构造可能很复杂也可能简单,构造繁简情况不一定,它具有一定功能的、由各种器材构成的,在燃煤电厂脱硫技术中会使用的到。例如给料器、风机、除雾器、旋流器、搅拌设备、过滤器等。而器材也具有一定功能但结构可能比较简单和形状也相对小巧一些。例如管道、阀门、保温材料、法兰、联轴器、挡板、防腐材料、脱硫剂、钢板、皮带等。装置是由器材和设备两类组成,设备已具有了污染物处理能力。例如脱硫塔、石膏处理系统、工艺水处理系统等。燃煤电厂脱硫技术由以上三类有机协调组成,具有污染防治功能。石灰石石膏湿法和循环悬浮式半干法脱硫这两类工艺都可按照设计要求使燃煤电

厂的 SO_2 排放浓度达到排放标准。

2.1.2 产品和服务系统与基本流

根据 ISO14040 的定义：产品系统是通过物质和能量联系起来的，具有一种或多种特定功能的单元过程的集合。^[22]在标准中，“产品”单独使用时可同时包括产品系统和服务系统。产品系统分析的影响主要是泛指，而服务系统则主要分析具体的对象，但两者并不是孤立的、完全分开的，它们互相之间存在着一定的联系。研究者杨健^[18]对产品流、基本流和服务系统在污水处理评估中做了详细的阐述，将该理论方法应用到大气污染物控制领域，按本领域的情况进行分析应用，可得到本研究的分析。

具体而言，燃煤电厂烟气脱硫工艺的产品系统和基本流与产品的是不一样的。产品系统是指从系统边界外和其他系统向研究系统输入基本流和产品流，其间经过了一系列的转化加工，系统再向环境和其他系统输出基本流和产品流。^[18]燃煤电厂烟气脱硫工艺是燃煤电厂排放的烟气作为输入，经过处理脱除 SO_2 后向大气排放达到排放要求的清洁烟气。

LCA 的基本流是指最原始的物质或能量，进入研究系统之前没有人为因素的影响；而离开所研究的系统，进入环境以后，人类也不再对其产生影响。^[18]根据本文确定的研究范围，燃煤电厂烟气脱硫工艺的基本流包含：大气、原材料、资源、脱硫剂、能量、占用的土地等；废气、气体污染物、废能、废渣、废水和改变的土地利用方式等。

脱硫工艺技术建成的脱硫系统可以净化烟气、脱除 SO_2 ，排放的烟气满足相关排放要求；它可以改善人类居住环境，有利于人类生存健康，是一种保护环境的环保设备。但为了实现这种服务功能，系统需要有良好运行管理；而运行管理本身就是服务。^[18]以石灰石石膏湿法脱硫为例 LCA 的产品和服务系统见图 2.1。

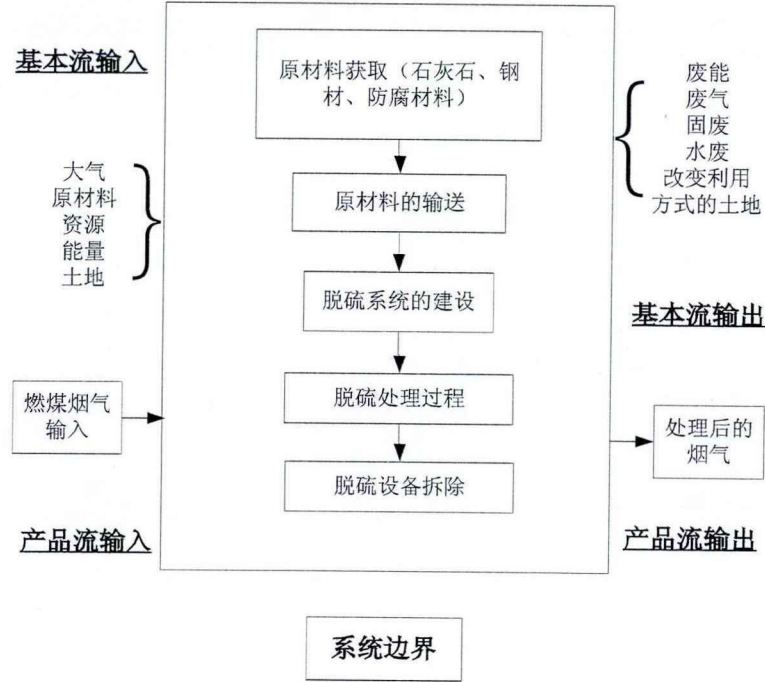


图 2.1 石灰石石膏湿法脱硫系统 LCA 的产品和服务系统图

2.2 燃煤电厂烟气脱硫工艺的生命周期

本文运用 LCA 对燃煤电厂烟气脱硫工艺进行分析。脱硫系统作为一个产品和服务系统的生命周期包含从脱硫剂的生产、脱硫剂的运输、脱硫剂的储存、脱硫系统建设和脱硫系统长期运行的全过程。燃煤电厂脱硫工艺的生命周期如图 2.2 所示。

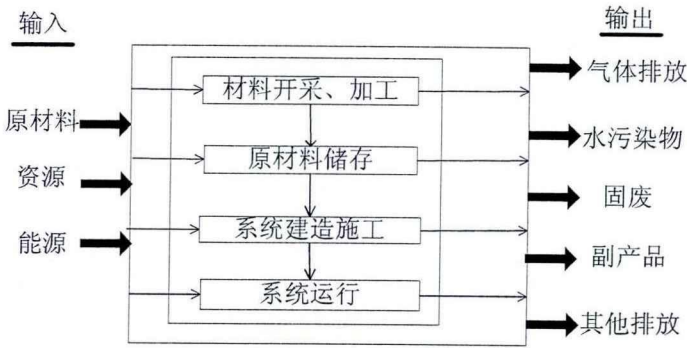


图 2.2 燃煤电厂脱硫工艺的生命周期

2.3 生命周期评估范围的确定

在定义生命周期评估范围的时候，需要考虑并且说明的有产品或服务系统的功能和功能单位，界定的产品或服务系统及其界限，评估分析所做的假设以及数据收集分析所存在的局限性，分配流程、评价影响类型和评价解释所使用的评价方法学，最终形成研究报告类型等。

2.4 脱硫系统的功能和功能单位

2.4.1 功能

燃煤电厂脱硫工艺的功能是处理燃煤电厂烟气中硫氧化物使之达到国家或地区的排放标准。

2.4.2 工艺的功能单位

在生命周期评估中，确定功能单位是必须的，功能单位是对产品系统输出功能的量度，其基本作用是在进行 LCA 时提供一个统一计量输出和输入和基准。

功能单位必须有明确的计量单位并且是可测量的，以保证 LCA 分析结果的可比性。一旦功能单位确定了，所有的能量流和质量流就都标准化了。本文以燃煤电厂脱硫系统作为研究对象，系统的功能单位为减排 1tSO₂。

2.5 燃煤电厂脱硫系统的边界

燃煤电厂脱硫系统是由各种具有特定功能的操作和过程按照一定的流程构成的一个整体系统。例如，对于本文将要研究的石灰石石膏法脱硫系统而言，可分为石灰石传送单元、浆液制备单元、供排水单元、脱硫单元、脱硫浆液氧化单元、石膏脱水干燥单元；半干法脱硫工艺主要包括烟气系统、吸收塔系统、吸收剂储存及输送系统、工艺水系统、再循环灰系统和压缩空气系统。研究中主要对主要的处理单元过程进行分析，而忽略那些对结果影响不大的其他输入输出。

上述两个工艺系统的产品流为输入燃煤电厂烟气，输出处理后的烟气、废气、大气污染物、水废和固废；基本流包括由环境输入两个系统的石灰石、钢铁、水等原材料和资源、电力、煤、石油、天然气、风能、水能等能源和土地资源等，输出的基本流包括废能、废气、大气污染物、废水、废渣和改变了利用方式的土地等。

2.6 脱硫系统的服务年限

我国环保部《火电厂烟气脱硫工程技术规范》中要求, 石灰石石膏法和半干法主体设备设计使用不低于 30 年。^[55]因此, 本文中按照工艺运行周期为 30 年来考虑。

2.7 生命周期评估研究对象的确定

本文旨在对两种燃煤电厂烟气脱硫工艺进行生命周期评估, 如前文所述, 石灰石石膏湿法作为最成熟的工艺之一, 在世界各地都有广泛的应用, 并取得了丰富经验。而循环流化床经过这几十年的发展, 进行了众多的尝试, 目前该技术在我国也得到了长足的发展, 并拥有了一大批现实案例。由于各自的工艺特点, 目前石灰石石膏湿法主要应用于大容量机组, 而循环悬浮式半干法主要应用于小型机组, 由于案例收集的局限性, 本文选择了两种现实应用较广泛的机组容量。文中两种脱硫工艺的基础数据由相应单位提供。

两个实际应用案例分别为: 位于南方城市的 2×600MW 燃煤超临界机组烟气石灰石石膏湿法脱硫装置和 2×150t/h 高温高压循环流化床锅炉的循环悬浮式半干法烟气脱硫装置作为研究对象。

2.7.1 石灰石石膏湿法脱硫工艺

该脱硫装置工程采用了某公司的石灰石-石膏湿法脱硫全套核心技术, 基本设计和吸收塔的详细设计, 以及关键环节(如工艺参数设定、系统流程、施工和调试方案等)和必要的措施方案、文件资料等都经过了详细的确认, 以确保提供的烟气脱硫装置成熟、可靠。

石灰石石膏工艺系统主要由石灰石浆液制备系统、烟气系统、SO₂ 吸收系统、排空及浆液抛弃系统、石膏脱水系统、工艺水系统、废水处理系统、杂用和仪用压缩空气系统等组成。吸收剂采用石灰石粉, 化浆制成石灰石浆液。

烟气经烟道进入吸收塔后, 经过由多层喷淋层组成的吸收段, 在该阶段与雾化的浆液在整个吸收塔的截面充分均匀地接触和传质, 烟气中的 SO₂、SO₃、HF 和 HCl 等酸性气体被高效的吸收, 与此同时烟气温度通过这个过程也降到饱和状态。^[56] 烟气离开吸收段, 会连续流经两层锯齿形除雾器, 烟气所含浆液水滴得以除去。穿过两级除雾器后, 经洗涤和净化

的烟气通过出口锥筒流出吸收塔。而 SO₂ 在吸收区被吸收后，在位于吸收塔底部的储液区即吸收塔浆液池，会与吸收剂发生氧化中和反应，并最终形成产物石膏浆液。达到一定浓度要求的石膏浆液从吸收塔浆液池排出，通过石膏排出泵打入石膏脱水系统进行进一步处理。吸收塔配有再循环浆液泵，每台泵对应相应的喷淋层。除雾器位于喷淋层上部，配备有在线自动化冲洗系统，水源来自其冲洗水泵母管。吸收塔浆液池收集了吸收塔浆液以及需要喷淋到吸收塔中除雾器的冲洗水。通过吸收塔浆液池中的侧入式搅拌器搅拌，使浆液池中的固体颗粒保持悬浮状态。氧化空气系统提供的是把脱硫反应中生成的亚硫酸钙 (CaSO₃·1/2H₂O) 氧化成硫酸钙 (CaSO₄·2H₂O) 所需的氧化空气。氧化风机为吸收过程提供氧化空气，喷水增湿后的氧化空气被送入吸收塔浆液池内。氧化空气出口都在搅拌器附件的高度紊流区，这样可以使空气和浆液得到充足够的混合，保证高氧化率。

石灰石石膏湿法装置可用率：整套装置的可用率在正式移交后的一年中大于 97%。

脱硫装置的可用率定义：可用率 = $\frac{A - B - C}{A} \times 100\%$ (2.1)

- A: 脱硫装置统计期间可运行小时数。
- B: 脱硫装置统计期间强迫停运小时数。
- C: 脱硫装置统计期间强迫降低出力等效停运小时数。

2.7.2 循环悬浮式半干法脱硫工艺

浙江大学独立开发的循环悬浮式半干法烟气净化技术^{[57][58]}在锅炉尾部利用循环流化床技术进行烟气净化，脱除烟气中的大部分酸性气体、重金属、二噁英、细颗粒，使烟气中的有害成分达到排放要求。半干法兼有干法与湿法的一些特点，兼具有反应速度快和脱硫效率高等一些湿法脱硫的优势，同时又有无污水排放和脱硫产物易处理的干法脱硫的特点，而且投资相对较低，设备可靠性高，运行费用较低。^[59]因此它的适用性很广，在许多国家普遍使用。为了保护电厂周围的生产、生活环境并使锅炉排放的烟气达到地方及国家的排放标准，针对两台循环流化床锅炉，以一炉一塔的形式在炉后配套循环悬浮式半干法烟气净化+布袋除尘器脱硫。

本工程在两台循环流化床锅炉尾部各设置一套脱硫系统。空预器出口原烟气经过一电场电预除尘器进行初步除尘后进入吸收塔进行脱硫反应,除去烟气中的酸性物质及重金属。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 原料经过称重计量后送入吸收塔并经雾化水增湿,流态化的含湿物料和烟气中的 SO_2 、氯化氢等酸性物质在吸收塔中发生化学反应,脱除掉大部分的 SO_2 、氯化氢等。烟气在位于吸收塔底部文丘里管加速的作用下,进入了循环流化床体,其中存在着物料,气流的作用下使气固两相产生了激烈的湍动与充分的混合接触,在气流的带动下,不断上升,在这个过程中会不断有絮状物形成,絮状物向下掉落,而在激烈的湍动中又不断解体再次被气流带动上升,这个过程使气固两相间的相对运动速度高达单颗粒物质速度的数十倍;而吸收塔顶部结构根据强化絮状物的返回而设计的,因此塔内颗粒的床层密度得到了进一步的提高。这种循环流化床气固两相流原理,可以大大强化气固间的传质和传热作用,是高脱除率得以实现的根本保证。在烟气在上升过程中,颗粒一部分随烟气被带出吸收塔,一部分因自重重新回流到循环流化床内,进一步增加了流化床的床层颗粒浓度并延长吸收剂的反应时间。净化后的含尘烟气经吸收塔的顶部出口进入袋式除尘器除去大部分烟尘,由除尘器除下的烟尘大部分经过空气斜槽循环进入吸收塔,少量经布袋除尘器下仓泵输送至灰库外排。

整套脱硫系统主要包括烟气及吸收塔系统、灰循环系统、吸收剂存储及输送系统、工艺水系统、压缩空气系统。

2.8 本章小结

本章重点是确定 LCA 研究的目的和范围,为评估烟气脱硫工艺的环境影响性,选择了两种具有典型的脱硫工艺,用 LCA 方法评价两种比选方案所产生的能源、资源和环境影响。这是全面环境影响评估观念转变,突破了以往偏重考虑大气污染物控制技术经济性,在真正意义上实现了对控制工艺的整个生命周期作出全面的评价,并比较分析了两种工艺的环境影响情况。

燃煤电厂烟气脱硫工艺系统是由各种具有特定功能的单位操作和单元过程按一定流程构成的作业系统。本章明确了系统的边界并以此作为输入输出计算的基础。输入各个处理系统的产品流为燃煤电厂烟气,输出系统产品流为处理后的烟气;由环境输入系统的基本流包括材料资源(如矿物材料、水资源)、能源(如

煤炭、石油、电力等)、水资源、空气等,输出系统的基本流是废能、废气、废水、废渣等。

本文确定了脱除 1tSO_2 作为两种不同脱硫工艺的 LCA 分析功能单位,用以工艺对比,两种燃煤电厂烟气脱硫设备的运行年限都按 30 年计。

3 比选工艺 LCA 的清单分析程序和工艺分析

在确定了生命周期评估的目的范围以及系统的功能单位等基本概念之后,根据 ISO14040 标准《环境管理—生命周期评估—原则和框架》和 ISO14041《环境管理—生命周期评估—目的和范围的确定和清单分析》的规定,将进入比选的脱硫工艺的整个生命周期过程中所有的能流、物流以及所有的污染物的排放的数据进行识别和量化。事实上,通过一个完整的清单分析之后,比选工艺的社会、经济、环境性能就比较明显了,因此数据清单的分析过程非常重要。

假设说明:由于本文研究的实际案例对象尚在运行过程中,没有设备拆除过程的实际数据,目前也没有权威的公开的相似设备拆除过程中的数据,因此忽略了两套工艺拆除过程的环境影响。通过参考别的评估案例发现,拆除阶段主要耗费的是电力和人力,两套工艺系统拆除情况相近,且拆除阶段的影响在整个工艺过程中占比较小,因此该过程的忽略是可接受的。

根据前文对两种脱硫工艺处理燃煤电厂烟气中 SO_2 的分析结果,最终本文将燃煤电厂脱硫系统从“摇篮”到“坟墓”的生命周期可分为两个主阶段,系统施工建设阶段(包括建造材料的开采及加工制造过程)和系统生产运行阶段(包括脱硫剂的生产制造运输过程)。

3.1 生命周期评估的清单分析程序

ISO14041 标准中对产品工艺生命周期清单分析的数据收集确认处理方式和计算开展程序步骤进行了规定说明:

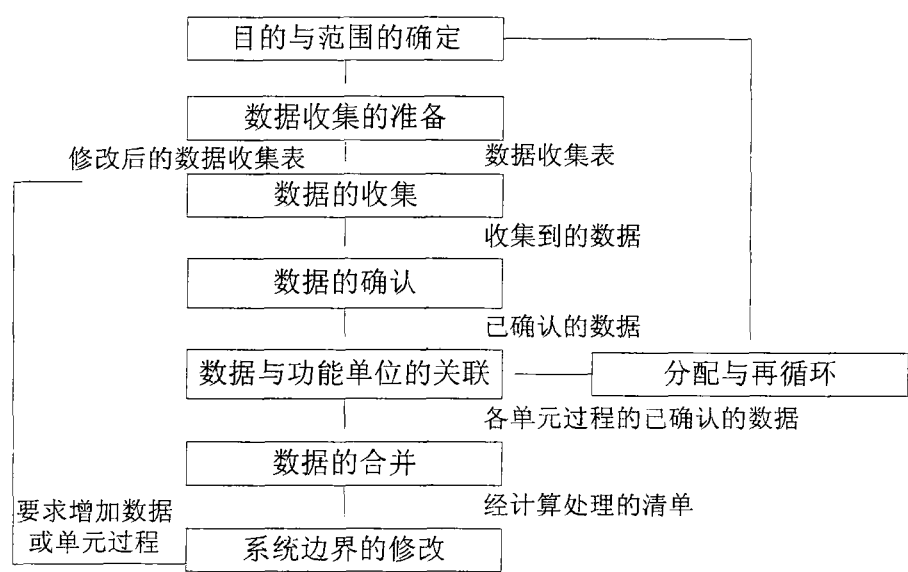


图 3.1 生命周期清单分析步骤图

3.2 比选方案的基本参数识别

本文分析研究中，比选方案的工艺参数主要来自于设计公司提供的工程技术资料，同时参考了国家相关政策标准以及设计规范要求。工艺系统建设运行过程中，所需要的资源和能源消耗与工程布置的合理性、设备器材的恰当选择以及实际运行操作规范性息息相关。

3.2.1 石灰石石膏湿法工艺的基本参数识别

在识别石灰石石膏法脱硫法的工艺参数时，主要参考某 2×600MW 燃煤超临界机组的湿式石灰石—石膏法烟气脱硫装置。主要依据的设计规范、标准和规定是：《火电厂烟气脱硫工程技术规范 石灰石/石灰－石膏法》(HJ/T 179-2005)、《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)、《火力发电厂设计技术规程》(DL5000-2000)、《恶臭污染物排放标准》(GB14554-03)、《工业企业噪声控制设计规范》(GBJ87-85)、《钢结构设计规范》(GB17-88)、《火力发电厂施工组织大纲设计规定》(DL/T 659-1998) 等。

表 3.1 石灰石石膏法工艺参数

额定处理烟气量	Nm ³ /h	3603600
入口 SO ₂ (6% O ₂ , 标态, 干基)	mg/Nm ³	2110
出口 SO ₂ (6% O ₂ , 标态, 干基)	mg/Nm ³	103

年运行时间	小时	7000
-------	----	------

因此，该石灰石石膏法每年减排 SO₂ 50627t ((2110-103) *3603600*7000)。

3.2.2 循环悬浮式半干法工艺的基本参数识别

在识别循环悬浮式半干法脱硫法的工艺参数时，主要参考某 2×150t/h 高温高压循环流化床锅炉的循环悬浮式半干法烟气脱硫装置。主要依据的设计规范、标准和规定是：《小型火力发电厂设计规范》GB/50049-94、《火力发电厂劳动安全和工业卫生设计规程》（ DL5053-1996 ）、《火力发电厂建筑设计规程》（ DL/T5094-1999 ）、《火电厂大气污染物排放标准》（ GB13223-2003 ）、《大气污染物排放标准》（ GB 20426-2006 ）、《火力发电厂建筑设计规程》（ DL/T5094-1999 ）、《环境空气质量标准》（ GB3095-1996 ）、《火力发电厂汽水管道设计技术规定》（ DL/T5054-1996 ）、《火力发电厂采暖通风与空气调节设计技术规定》（ DL/T 5035-2004 ）等。

表 3.2 循环悬浮式半干法工艺参数

额定处理烟气量	Nm ³ /h	314630
入口 SO ₂ （ 6 % O ₂ ，标态，干基）	mg/Nm ³	2205
出口 SO ₂ （ 6 % O ₂ ，标态，干基）	mg/Nm ³	220
年运行时间	小时	7000

因此，该半干法每年减排 SO₂ 4371t ((2205-220) *314630*7000)。

3.3 本章小结

两种比选方案的 LCA 目的和范围确定后，本章进入了清单分析阶段。清单分析是整个 LCA 的基础，也是核心内容，该部分设计到了所研究的比选方案整个生命周期内物流、能流和污染物排放的识别和量化。本章讨论和确定了比选方案 LCA 清单分析程序和对两种比选工艺进行了实际分析。

ISO14041 标准中明文规定工艺参数的选择需依据相关国家政策标准和设计规范和权威资料，因此本文选择了两个设计符合有关规定的脱硫工艺的现实应用案例，并在计算过程中进行了专家咨询，使计算比较结果客观有价值。

石灰石石膏湿法和循环悬浮式半干法的参数数据分别来自于 2×600MW 燃煤

超临界机组烟气石灰石石膏湿法脱硫装置和 2×150t/h 高温高压循环流化床锅炉的循环悬浮式半干法烟气脱硫装置这两套现实应用装置,系统装置的设计遵循了《火电厂烟气脱硫工程技术规范 石灰石/石灰-石膏法》(HJ/T 179-2005)、小型火力发电厂设计规范》(GB/50049-94)、《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)、《火力发电厂设计技术规程》(DL5000-2000)等国家标准和设计规范,保证了参数合理规范。

4 比选工艺建设阶段清单分析

本章根据第3章工程分析确定的比选方案的工艺参数,对其生命周期建设阶段进行LCA清单分析。建设阶段的清单分析分为三个部分:能源消耗清单、材料和水资源消耗清单和污染物排放清单。

本章假设说明:

(1) 由于实际数据收集过程的限制,本阶段忽略了两套设备安装的环境影响清单,虽然两个工艺的设备大小有区别,由于安装过程主要方式两种工艺相似,且设备运行寿命为30年,设备安装过程中的环境影响折算到每年之后占比很小。因此该过程尽管存在一定的区别,但对整个阶段的清单影响却不大。

(2) 本章将设备折算成主要构成材料进行清单分析。脱硫工艺设备主要是脱硫塔和烟气管道,而将它们折算成构成材料进行分析是合理的,其余的泵和风机各家厂家生产制造过程环境影响差别大,也没有标准的制造过程环境影响数据供参考,且部分设备还涉及到国外进口,个体之间存在差异,故将设备进行了材料折算。

(3) 由于数据收集的局限性,对两套工艺系统次要及辅助设备进行了简化和忽略。

(4) 本章的材料生产、运输过程的单位能耗、物耗及污染物排放和能源生产过程的单位污染物排放基础数据都来自于gabi软件数据库,gabi软件是德国研究开发的,提供的数据与我国国情并不完全符合,但由于我国尚未建立权威的基础数据库且本文主要是对比选工艺的比较,不注重绝对值,因此既然两套系统引用了同样的基础数据库,其结果是可比的。

4.1 能源消耗清单

燃煤电厂烟气脱硫工艺的能耗通常来自电力、煤、燃料油和天然气。这些能源的价格和利用效率有着非常大的区别。本研究进行LCA清单分析时,必须采用统一的能量单位表达不同形式的能量,才能在同一基准上进行各类清单数据的迭加计算和比较。本文参考文献推荐的典型方法,电能以火力发电方式作为能源消耗计算的基础,根据我国目前实际情况,平均供电标煤煤耗为 $333\text{g/kwh}^{[60]}$,1千克标准煤产生 29260000J ,因此 1kwh 相当于 9.8MJ 。

建设阶段能耗主要由各种设备材料生产能耗和运输能耗两部分组成。

4.1.1 建设阶段设备材料生产能耗

石灰石——石膏湿法脱硫工艺主要包括烟气系统、吸收塔系统、石膏浆处理系统、工艺水系统、石灰石浆液系统、排水系统、压缩空气系统和废水处理系统。其中吸收塔系统主要包括吸收塔、泵和风机；石膏浆处理系统主要包括泵、搅拌器和真空皮带机；工艺水系统主要包括水箱和水泵；石灰石浆液系统主要包括球磨机、搅拌器、循环泵和浆液箱等；排水系统主要包括事故浆液箱、浆液泵和搅拌器；压缩空气系统主要包括储气罐和空压机；废水处理系统主要包括风机、水槽、污水泵、清水泵、计量泵、排水泵和循环泵等。

统计各系统所包括的部件的材料消耗量，根据设备 30 年的运行寿命，通过折算得到每年的材料消耗量。查询 gabi 软件数据库可获得各类材料的生产制造过程的单位能源，材料质量年耗量与单位能耗的乘积即为材料的能耗，并最终得到了系统主要设备材料年总能耗 41738.56MJ，统计结果如表 4.1 所示。

表 4.1 石灰石石膏湿法各系统主要设备材料能耗清单

名称	主要材料	材料数量 (kg)	年耗量 (kg)	单位能耗 (MJ/kg)	能耗 (MJ)
烟气系统	钢板	351436.52	11714.55067	0.328881	3852.693138
	无缝钢管	47266.78	1575.559333	0.328881	518.1715291
	型钢	219196.26	7306.542	0.328881	2402.98284
吸收塔系统	碳钢	571000	19033.33333	0.817896	15567.2872
石膏浆处理系统	铸铁	21900	730	3.253099	2374.76227
	碳钢	2050	68.33333333	0.817896	55.88956
工艺水系统	铸铁	6200	206.6666667	3.253099	672.3071267
石灰石浆液系统	碳钢	417000	13900	0.817896	11368.7544
	铸铁	4352	145.0666667	3.253099	471.9162283
排水系统	碳钢	110600	3686.666667	0.817896	3015.30992
	不锈钢	1800	60	6.229627	373.77762
压缩空气系统	铸铁	80	2.666666667	3.253099	8.674930667
废水处理系统	不锈钢	1200	40	6.229627	249.18508

	防腐塑料	1110	37	4.436498	164.150426
	碳钢	1400	46.66666667	0.817896	38.16848
	铸铁	5575	185.8333333	3.253099	604.5342308
总计		1762166.56	58738.88533		41738.56498

半干法脱硫工艺主要包括烟气系统、吸收塔系统、吸收剂储存及输送系统、工艺水系统、再循环灰系统和压缩空气系统。其中吸收塔系统包括吸收塔及吸收塔喷嘴；吸收剂储存及输送系统包括消石灰仓、螺旋给料机、给料阀和插板阀；工艺水系统包括工艺水箱和水泵；再循环灰系统包括灰斗斜槽、再循环斜槽、插板阀、截流阀、控制阀、流化风机和流化风加热器；压缩空气系统主要是各类空气罐。统计各系统所包括的部件的材料消耗量，计算原理与表 4.1 相同，统计结果如表 4.2 所示。

表 4.2 循环悬浮式半干法各系统主要设备材料能耗清单

名称	主要材料	材料数量 (kg)	年耗量 (kg)	单位能耗 (MJ/kg)	能耗 (MJ)
烟气系统	无缝钢管	3815.74	127.191	0.328881	41.83081
	不锈钢	1051.9	35.0633	6.229627	218.4314
	碳锰钢	4234.3	141.143	0.817896	115.4405
	碳钢	132013.3	4400.44	0.817896	3599.105
吸收塔系统	碳钢	60000	2000	0.817896	1635.792
吸收剂储存及输送系统	碳钢	4310	143.667	0.817896	117.5043
工艺水系统	碳钢	687	22.9	0.817896	18.72981
	不锈钢	480	16	6.229627	99.67403
再循环灰系统	碳钢	2046	68.2	0.817896	55.78050
	普通钢板	172	5.73333	0.328881	1.885584
	不锈钢	100	3.33333	6.229627	20.76542
	灰铸铁	2240	74.6667	3.253099	242.8980
压缩空气系统	碳素钢	4505	150.167	0.817896	122.8207

总计		215655.2	7188.51		6290.658
----	--	----------	---------	--	----------

4.1.2 建设阶段设备材料运输能耗

脱硫设备建设过程中，材料的运输有火车和卡车两种运输方式，其中火车运输分为内燃机车运输和电力机车运输。卡车和内燃机车的动力燃料皆为柴油。考虑材料运输能耗时，铁路运输需考虑内燃机和电力机车的综合能耗。内燃机车单位柴油能耗为 319.42362KJ/(t.km)，电力机车单位能耗 165.4 KJ/(t.km)，铁路运输的单位综合能耗 242.41057KJ/(t.km)，公路运输的单位柴油耗量 0.022 kg/(t.km)，能耗为 1011.21247KJ/(t.km)。

现假定脱硫设备所用材料运输的 30%由卡车运输，70%由火车运输，运输距离为 100 km。^[61]

石灰石石膏湿法卡车能源消耗考虑柴油消耗，运输重量为 528649.968kg，柴油耗能 53457.74MJ。火车运输重量为 1233516.592kg，运输总路程为 100km。火车运输耗能 29901.7 MJ，其中柴油耗能 19700MJ。因此运输石灰石石膏法湿法脱硫设备材料共需耗能 83359MJ，折算到每年为 2778.6MJ。

循环悬浮式半干法卡车运输重量为 64696.566kg，柴油耗能 6542.1967MJ。火车运输重量为 150958.64kg，运输总路程为 100km。火车运输耗能 3659.4MJ，其中柴油耗能 2410MJ。因此运输整套半干法脱硫设备材料共需耗能 10201.6MJ，折算到每年为 340MJ。

4.1.3 建设阶段总能耗清单

建设阶段总能耗即为设备材料生产能耗和运输能耗的汇总，根据 4.1.1 和 4.1.2 的统计结果可得到表 4.3 的数据。

表 4.3 建设阶段总能耗清单

项目	设备材料生产年能耗 (MJ)	材料运输年能耗 (MJ)	总年能耗 (MJ)
石灰石石膏湿法脱硫设备	41738	2778.6	44516.6
循环悬浮式半干法脱硫设备	6290.7	340	6630.7

4.2 材料和水资源消耗清单

4.2.1 主要设备材料的原材料消耗清单

由 4.1 节的内容可知，设备材料主要有铸铁、不锈钢、钢管、钢板、型钢、碳钢、防腐塑料这几类，gabi 软件数据库提供了各类材料生产制造所消耗的原材料种类和单位数量，上节确定的设备材料消耗量乘以设备材料的单位资源消耗量可得到各类原材料的消耗量，通过汇总，最终获得了比选设备材料资源消耗量，表 4.5 所示。

表 4.4 主要设备材料的单位资源消耗清单

序号	材料名称	主要原材料名称	数量（kg/kg 材料）
1	铸铁	铁矿石	3.422874
		矿物材料	0.011722
		钢铁废料	1.049622
		煤炭	0.273994
		原油	0.012
		天然气	0.014614
		石灰石	0.038389
		石英砂	0.185361
		空气	2.329068
		水资源	3.046
2	不锈钢	铁矿石	12.34368
		矿物材料	0.4014004
		钢铁废料	0.8047249
		煤炭	0.7835959
		原油	0.2100129
		天然气	0.1997178
		石灰石	0.3230888
		石英砂	0.1797259
		空气	6.869097

		水资源	79.23364
3	钢管、钢板、型钢	铁矿石	6.779777
		矿物材料	0.071851
		煤炭	0.896863
		原油	0.011599
		天然气	0.047473
		石英砂	0.035911
		空气	1.492632
		水资源	9.889551
4	碳钢	铁矿石	9.869391
		矿物材料	0.09102
		煤炭	0.615224
		原油	0.049257
		天然气	0.034617
		石灰石	0.366607
		石英砂	0.016766
		空气	1.001186
		水资源	9.611353
		耐腐材料	0.012537
5	防腐塑料	水资源	47.18528
		煤炭	0.125332
		原油	0.827862
		天然气	0.703605
		石灰石	0.000239
		空气	0.181315
		生物质	0.010784

表 4.5 比选设备材料资源消耗量

序号	原材料名称	石灰石石膏湿法年消耗量	循环悬浮式半干法年消耗
----	-------	-------------	-------------

		(kg)	量 (kg)
1	铁矿石	507775.1	70188.45132
2	矿物材料	4878.54	662.7104914
3	钢铁废料	1413.737	122.1523093
4	煤炭	41503.67	4443.628878
5	原油	2115.232	355.0408594
6	天然气	2314.009	258.0396879
7	石灰石	13548.39	2559.745923
8	石英砂	1608.97	144.5202657
9	空气	71173.89	7680.676006
10	水资源	568557.3	72425.11272
11	生物质	0.399008	0
12	耐腐材料	460.5467	86.8375305

4.2.2 能源生产资源消耗清单

根据上节所讨论可知确定的本阶段石灰石石膏湿法年能耗量为 44516.6MJ，其中需耗电 4293.7kwh；循环悬浮法半干法年能耗量 6630.7MJ，其中需耗电 646.15 kwh。由于电能是二次能源，需要一次能源生产转化得到，本文电能以火力发电方式作为能源消耗计算的基础，进一步计算可得出能源生产的原料消耗。由于柴油耗量占总能耗的比例很小，因此柴油对环境的影响在本分析中忽略。

根据我国实际情况，平均供电煤耗为 333g/kwh，能源生产单位资源消耗量清单如表 4.6 所示。

表 4.6 比选设备能源生产资源消耗量清单

序号	资源名称	数量 (kg/kwh)	石灰石石膏湿法总量 (kg)	循环悬浮式半干法总量 (kg)
1	标煤	0.333	1429.8	215.16795
2	水资源	10.31233	44278	6663.31203
3	空气	5.17991	22241	3346.998847
	合计		1429.8	215.16795

4.3 污染物排放清单

建设阶段的污染物排放主要来自于主要设备材料生产过程的污染物排放、能源生产过程的污染物排放和运输过程中的污染物排放。

4.3.1 主要设备材料生产过程的污染物排放

根据确定的石灰石石膏法和循环悬浮式半干法脱硫设备材料数量，查询 gabi 软件数据库可得出生产加工过程中的各类污染物排放情况，设备材料数量与单位污染物排放量的相乘可得到各类污染物的年排放总量。

表 4.7 比选工艺材料资源污染物排放量清单

材料名称	污染物类型	污染物名称	数量 (kg/kg 材料)	石灰石石膏 湿法年排放 总量 (kg)	循环悬浮式 半干法年排 放量 (kg)	材料名称	污染物 类型	污染物名称	数量 (kg/kg 材料)	石灰石石膏湿 法年排放总量 (kg)	循环悬 浮式半 干法年 排放总 量 (kg)
铸铁	大气污 染物	废气	2.612728	3318.773326	195.0924	不锈钢	大气污 染物	废气	5.027576	502.7576	273.5001
		粉尘	0.002007	2.549357631	0.149863			粉尘	0.00367	0.367031	0.199665
		CO ₂	1.22575	1556.9881	91.52675			CO ₂	3.079156	307.9156	167.5061
		CO	0.001552	1.971401616	0.115888			CO	0.016246	1.624627	0.883797
		NOx	0.000961	1.220693913	0.071758			NOx	0.008897	0.88968	0.483986
		CH ₄	0.000978	1.242287874	0.073027			CH ₄	0.006392	0.6391728	0.34771
		SO ₂	0.000688	0.873920304	0.051373			SO ₂	0.047264	4.72636	2.57114
		HCl	7.99E-06	0.010149162	0.000597			HCl	0.000466	0.0465536	0.025325
		H ₂ S	1.05E-06	0.001333745	7.84E-05			H ₂ SO ₄	0.000535	0.0535335	0.029122
		氯化物	0.002098	2.664948834	0.156658			NH ₃	0.000212	0.0211966	0.011531
		碳氢化合物	1.24E-05	0.015750889	0.000926			碳氢化合	0.000658	0.065842	0.035818

		CO	0.02371	488.3469272	3.151059						CO	0.017188	631.40118	1150.333
		NOx	0.00322	66.3212613	0.427938						NOx	0.003661	134.486835	245.0179
		CH ₄	0.006308	129.9237628	0.838333						CH ₄	0.00151	55.46985	101.059
		SO ₂	0.003918	80.69773347	0.520702						SO ₂	0.002483	91.213005	166.1785
		NH ₃	1.10E-05	0.226563315	0.001462						HCl	1.13E-05	0.4151055	0.756269
		NM VOC	0.00019	3.91336635	0.025251						NM VOC	0.000219	8.044965	14.6569
		废水	9.1441	188337.9644	1215.251						废水	4.109315	150955.687	275022.1
		COD	0.000167	3.439643055	0.022194						COD	0.000121	4.444935	8.098107
		BOD	5.85E-06	0.12049049	0.000777						BOD	1.15E-05	0.4224525	0.769655
		氯化物	0.0059	121.5203235	0.78411						氯化物	0.009475	348.064125	634.1286
	水体污染 物	硫酸盐	0.000819	16.86866864	0.108845	水体污 染物					钠盐	0.003203	117.662205	214.3656
		铵盐	4.04E-05	0.832105266	0.005369						硝酸盐	4.51E-06	0.16567485	0.301839
		硝酸盐	7.16E-05	1.474721214	0.009516						碳酸盐	1.63E-05	0.5987805	1.090902
		含氮物质	0.000153	3.151289745	0.020334						硫酸盐	6.80E-06	0.249798	0.4551
		废料	0.26236	5403.741029	34.86764						废料	0.107266	3940.41651	7178.938
		固废									固废			

材料名称	污染物类型	污染物名称	数量 (kg/kg 材料)	石灰石石膏 湿法年排放 总量 (kg)	循环悬浮式 半干法年排 放总量 (kg)
防腐塑料	大气污染物	粉尘	0.000694	0.02569102	/
		CO ₂	1.687417	62.4344386	
		CH ₄	0.016309	0.6034195	
		SO ₂	0.00503	0.18610249	
		NOx	0.003787	0.14011138	
		NM VOC	0.00049	0.01813026	
	水体污染物	VOC	0.000161	0.00597335	
		硫酸盐	0.0005	0.01848361	
		COD	0.000197	0.00729437	
	固废	氯化物	0.000142	0.00526547	
		废料	0.0138	0.5106	

4.3.2 能源生产的污染物排放清单

查询 gabi 软件数据库可得单位能源生产污染物排放量数据,和前文确定的能耗的相乘可计算出能源生产的污染物年排放清单。

表 4.8 比选工艺能源生产的污染物排放清单

名称	污染物名称	数量 (kg/kwh)	石灰石石膏湿法 年排放总量 (kg)	循环悬浮式半 干法年排放总 量 (kg)
大气污染物	废气	6.130942	26324.42567	3961.51
	粉尘	1.95E-04	0.8372715	0.126
	CO ₂	1.04015	4466.092055	672.093
	CO	0.000416	1.7861792	0.2688
	NO _x	0.002074	8.9051338	1.34012
	CH ₄	0.001109	4.7617133	0.71658
	SO ₂	0.006884	29.5578308	4.4481
	NH ₃	5.78E-06	0.024817586	0.00373
	NM VOC	7.32194E-05	0.314382138	0.04731
水体污染物	废水	8.680381	37270.9519	5608.83
	氯化物	0.003859	16.5693883	2.49349
	氟化物	0.001109	4.7617133	0.71658
	硫酸盐	0.00094	4.036078	0.60738
	COD	0.000414135	1.77817145	0.26759
	BOD	3.45966E-08	0.000148547	2.2E-05
	钙盐	0.000369	1.5843753	0.23843
	氯化物	0.000171	0.7342227	0.11049
	铵盐	2.26E-06	0.009703762	0.00146
固废	废料	0.002928085	12.57231856	1.89198

4.3.3 运输过程中污染物排放清单

在运输过程中,有内燃机车、电力机车和卡车,其中电力机车无污染物排放,考虑内燃机车和卡车运输过程中的污染物排放情况。通过查询 gabi 软件得到了

两种运输方式的各类污染物排放，由上文确定的运输质量与单位污染物排放量的乘积即得到了运输过程中各类污染物年排放总量。

表 4.9 比选工艺运输过程中污染物排放清单

污染物名称	内燃机车运输			卡车运输		
	数量 (kg/kg 货物)	石灰石石膏湿 法年排放总量 (kg)	循环悬浮 式半干法 年排放总 量 (kg)	数量 (kg/kg 货物)	石灰石石膏 湿法年排放 总量 (kg)	循环悬浮 式半干法 年排放总 量 (kg)
CO ₂	0.00221	45.475645	5.5653419	0.00700	123.3869333	15.100178
CO	1.25E-05	0.2569826	0.0314497	1.37E-05	0.241416879	0.0295447
粉尘	2.09E-06	0.0429675	0.0052584	1.47E-06	0.025903855	0.0031701
甲烷	1.39E-08	0.0002858	3.497E-05	6.99E-08	0.001231755	0.0001507
NO _x	3.83E-05	0.7873948	0.0963619	6.22E-05	1.096067874	0.1341375
NM VOC	4.31E-06	0.0886076	0.0108439	2.76E-06	0.048635809	0.0059520
SO ₂	2.09E-06	0.0429675	0.0052584	2.21E-07	0.003894389	0.0004765

4.4 本章小结

本章为比选工艺的建设阶段清单分析，分为能源消耗清单、材料水资源消耗清单以及污染物排放清单。比选工艺设备年限为 30 年。能源消耗清单包括设备材料生产年能耗、材料运输年能耗，并得到了比选工艺一年的总能耗量；材料水资源消耗清单包括设备原材料水资源消耗和能源生产过程中资源消耗清单，通过相应的计算得到了铁矿石、矿物资源、煤炭、石油、天然气、石灰石等消耗量；污染物排放清单包括设备材料生产过程中、能源生产过程中和设备材料运输过程中污染物的排放清单，得到了 CO₂、CO、SO₂ 等大气污染物排放量和废水、固废的排放情况。

5 比选工艺运行阶段清单分析

在建设阶段结束之后，本章进入工艺运行阶段的清单分析。分析过程与第4章类似，同样考虑比选方案的能耗、物耗和污染物排放。

本章假设说明：

- （1）两套设备运行状况由实际案例统计而来，由于数据收集的局限性，可能存在某些设备未统计入内。
- （2）两种脱硫工艺的脱硫产物石膏和脱硫灰作为资源，可进一步综合利用。
- （3）gabi 软件的引用说明同第4章。

5.1 运行阶段能耗清单

运行阶段能耗清单包括设备运行能耗清单、运行材料生产能耗和运行材料运输能耗。

5.1.1 运行阶段设备运行能耗

统计比选工艺的各类耗能设备及单位容量，如表 5.1 和表 5.2 所示。

表 5.1 石灰石石膏湿法脱硫主要工艺设备功率清单

序号	系统名称	设备名称	数量	单位容量 (KW)	容量 (kw)
1.1	烟气系统	低压密封风机	4台	11	44
1.2		高压密封风机	4台	11	44
1.3		电加热器	2台	90	180
1.4		高压电加热器	2台	120	240
1.5		低压电加热器	2台	90	180
2.1	吸收塔系统	循环泵	6台	800	4800
2.2		石膏排出泵	4台	30	120
2.3		排水坑搅拌器	2个	4	8
2.4		排水坑泵	2台	22	44
2.5		吸收塔搅拌器	8个	35	280
2.6		氧化风机	4套	250	1000

3.1	石膏浆处理系统	废水旋流器给料泵	2台	15	30
3.2		浓浆箱搅拌器	1个	11	11
3.3		石膏浓浆泵	2台	22	44
3.4		滤液排水坑泵	2台	22	44
3.5		滤液排水坑搅拌器	1个	7.5	7.5
3.6		真空皮带机	2套	15	30
3.7		真空泵	2台	180	360
3.8		冲洗水泵	4台	11	44
4.1	工艺水系统	工艺水泵	2台	90	180
4.2		除雾器冲洗水泵	4台	45	180
5.1	石灰石浆液系统	湿式球磨机	2套	320	640
5.2		石灰石浆液循环泵	4台	25	100
5.3		石灰石浆液循环箱搅拌器	2个	2.2	4.4
5.4		石灰石浆液箱搅拌器	1个	37	37
5.5		石灰石浆液泵	4台	22	88
5.6		石灰石排水坑泵	1台	11	11
6.1	排水系统	事故浆液箱搅拌器	3个	37	111
6.2		事故浆液泵	1台	30	30
7	废水处理系统	废水泵	2台	22	44
8	仪控系统			35	35
9	照明系统			35	35
	合计				9005

考虑到各装置的运行的有效时间,取平均换算系数 0.8,因此总容量为 7204kw (不计增压风机)。系统需年运行 7000h, 由此可知年电耗为 50428000kwh, 即 494194400MJ。

表 5.2 循环悬浮式半干法脱硫工艺主要设备功率清单

序号	系统名称	设备名称	数量	单位容量 (kw)	容量 (kw)
1.1	再循环灰系统	再循环斜槽流化风机	4台	4	16
1.2		再循环斜槽流化风加热器	2台	45	90
1.3		灰斗斜槽流化风机	4台	22	88
2.1	吸收剂储存及 输送系统	消石灰仓顶布袋除尘器	2台	0.75	1.5
2.2		消石灰螺旋给料机	2台	2.2	4.4
2.3		星型给料阀	2个	1.1	2.2
3	工艺水系统	喷嘴供水水泵	6台	5.5	33
4	仪控系统			7	7
5	照明系统			7	7
	合计				249.1

考虑到各装置的运行的有效时间，取平均换算系数 0.8，因此总能耗为 199.28kw（不计引风机和除尘器），半干法系统年电耗为 1394960kwh，即 13670608MJ。

5.1.2 运行材料生产能耗

石灰石石膏湿法脱硫工艺运行材料主要包括石灰石和工艺水。工艺用水每小时平均耗水量约为 268t，石灰石消耗量平均值为 13.33t/h，石灰石作为原材料，本文中不考虑原材料的生产能耗。工艺水年耗量与单位能耗的乘积即为每年的生产能耗。

表 5.3 石灰石石膏湿法工艺运行材料生产能耗清单

序号	名称	年耗量 (kg)	单位能耗 (MJ/kg)	年能耗 (MJ)
1	工艺水	1876000000	0.003482	6532232

半干法脱硫工艺运行材料主要包括工艺水和消石灰。该半干法脱硫系统内工艺水主要用于吸收塔喷嘴供水，吸收塔下级与上级喷嘴的供水量分别由吸收塔中部及出口处的温度计控制，依据喷淋后的烟气温度来调节喷水量多少，工艺水每小时平均耗水量约为 6.68t，则年耗量为 46760t。

消石灰仓内的消石灰粉经过计量后由星型给料机输送落入吸收塔，与塔内烟

气以高传质的速度混合反应，脱除烟气中的酸性气体。系统根据排出烟气中的SO₂含量来控制吸收剂的用量，控制手段通过螺旋给料机变频实现。该系统消石灰耗量为 1.1t/h，则年耗量为 7700000kg。与表 5.3 计算方法相似得到了消石灰和工艺水的年能耗。

表 5.4 半干法脱硫工艺运行材料生产能耗清单

序号	名称	年耗量（kg）	单位能耗（MJ/kg）	年能耗（MJ）
1	消石灰	7700000	0.019215	147955.5
2	工艺水	46760000	0.003482	162818.32
	合计			310773.82

5.1.3 运行材料运输能耗

现假定脱硫设备运行材料中工艺水电厂自制，不考虑运输。假设运行材料由卡车从外地运入，运输距离为 30 km。

石灰石石膏湿法脱硫工艺中运输石灰石卡车能源消耗考虑柴油消耗，运输重量为 93310t，卡车运输能耗为 1011.21247KJ/(t.km)，则柴油耗能 2830092MJ。

循环悬浮式半干法脱硫工艺中的运输消石灰卡车能源消耗考虑柴油消耗，运输重量为 5390t，卡车运输能耗为 1011.21247KJ/(t.km)，则柴油耗能 233590MJ。

5.1.4 运行阶段总能耗清单

比选工艺运行阶段总能耗即为设备运行能耗、运行材料生产能耗和运输能耗的汇总见表 5.5。

表 5.5 比选工艺运行阶段总能耗清单

工艺	设备运行能耗（MJ）	材料生产能耗（MJ）	材料运输能耗（MJ）	年总能耗（MJ）
石灰石石膏湿法 脱硫设备	494194400	6532232	2830092	503556724
半干法脱硫设备	13670608	310773	233590	14214971

5.2 材料和水资源消耗清单

5.2.1 运行材料资源消耗清单

根据上文可知石灰石石膏湿法脱硫工艺和循环悬浮式半干法运行材料消耗

情况，查询 gabi 软件数据库可知生产 1kg 工艺水需消耗 1.017852kg 水资源，1kg 消石灰需要消耗 1.47 kg 石灰石，与年运行 7000 小时相乘可计算资源年耗量，如表 5.6 所示。

表 5.6 运行材料资源消耗清单

工艺	名称	单位耗量	年耗量（kg）
石灰石石膏湿法	石灰石	13.33t/h	93310000
	水资源	272.78t/h	1.9E+09
循环悬浮式半干法	石灰石	1.13kg/h	11319000
	水资源	6.8t/h	4.8E+07

5.2.2 能源生产资源消耗清单

根据上节所讨论可知的本阶段年耗电量 51094554kwh，根据 gabi 软件数据库资料，年耗电量与单位资源消耗量的乘积可计算出能源生产中资源年消耗量，如表 5.7 所示。

表 5.7 运行阶段能源生产资源消耗量清单

序号	资源名称	数量（kg/kwh）	石灰石石膏湿法 年总量（kg）	循环悬浮式半干 法年总量（kg）
1	标煤	0.333	17014486.48	475081.443
2	水资源	10.31233	526903902.1	14712302.2
3	空气	5.17991	264665191.2	7390027.38

5.3 污染物排放清单

脱硫工艺运行阶段污染物的输出包括处理后尾气污染物排放、运行阶段能源生产污染物排放、运行材料消耗生产污染物排放和运行材料运输污染物排放。

烟气经过石灰石石膏湿法脱硫装置 SO₂ 浓度从 2110mg/Nm³ 降到 103mg/Nm³，由化学反应方程式可知，脱除 1molSO₂ 会增加 1molCO₂，即年脱除 50627tSO₂ 增加了 34806tCO₂ 排放量，其余气体含量相对变化不大，故不考虑。烟气经过循

环悬浮式半干法脱硫装置 SO₂ 浓度从 2205mg/Nm³ 降到 220mg/Nm³，由化学反应方程式可知，脱除 SO₂ 过程中不会产生新的污染物，其余气体成分同石灰石石膏湿法相似，也不考虑。

5.3.1 能源生产的污染物排放清单

查询 gabi 软件数据库可得单位能源生产污染物排放量数据和前文确定的能耗，两者的乘积可计算出表 5.8 所示每年能源生产的污染物排放清单。

表 5.8 比选工艺能源生产的污染物排放清单

污染物类型	污染物名称	数量（kg/kwh）	石灰石石膏湿法 年排放量总量 （kg）	循环悬浮式半干 法年排放量总量 （kg）
大气污染物	废气	6.130942	313257747	8746837.154
	粉尘	1.95E-04	9963.438	278.200845
	CO ₂	1.04015	53146000	1483951.841
	CO	0.000416	21255.334	593.495136
	NO _x	0.002074	105970.1	2958.915654
	CH ₄	0.001109	56663.86	1582.178139
	SO ₂	0.006884	351734.91	9821.203164
	NH ₃	5.78E-06	295.32652	8.24615838
	NM VOC	7.32194E-05	3741.1126	104.4599946
水体污染物	废水	8.680381	443520196	12384047.84
	氯化物	0.003859	197173.88	5505.523389
	氟化物	0.001109	56663.86	1582.178139
	硫酸盐	0.00094	48028.881	1341.07074
	COD	0.000414135	21160.043	590.8343946
	BOD	3.45966E-08	1.7676978	0.049357966
	钙盐	0.000369	18853.89	526.441599
	氯化物	0.000171	8737.1687	243.960741
	铵盐	2.26E-06	115.47369	3.22427646

固废	废料	0.002928085	149609.2	4177.413955
----	----	-------------	----------	-------------

5.3.2 运行材料生产污染物排放清单

石灰石石膏湿法运行材料包括石灰石和工艺水，循环悬浮式半干法运行材料包括消石灰和工艺水，石灰石作为原材料不考虑生产，工艺水和消石灰在处理过程中不仅需要消耗能源，还伴随着污染物的排放，根据 gabi 软件查询相应的排放数据，与运行材料消耗量的相乘计算得到表 5.9 本过程中污染物年排放量。

表 5.9 比选工艺运行材料生产污染物排放

材料	污染物类型	污染物名称	单位数量（kg）	石灰石石膏 湿法年排放 总量（kg）	循环悬浮式 半干法年排 放总量（kg）
工艺水	大气污染物	废气	0.0406	76165600	1898456
		CO ₂	0.006192	11616192	289537.92
	水体污染物	氯化物	0.001027	1926652	48022.52
		钠盐	0.000605	1134980	28289.8
消石灰	大气污染物	CO ₂	0.0021006	/	1119133.4
		CO	4.11E-06		7022631
		粉尘	4.41E-07		4050.2
		甲烷	2.097E-08		2071.3
		NO _x	1.866E-05		777.7
		NMVOC	8.28E-07		6883.8
		SO ₂	6.63E-08		1262.8

5.3.3 运行材料运输污染物排放

在运行材料运输过程中，根据前文确定的由卡车运输，由前文确定的运输条件查询 gabi 软件可知运输过程中各类污染物排放量，计算可得表 5.10 比选工艺运输过程中年污染物排放清单。

表 5.10 比选工艺运输过程中污染物排放清单

污染物名称	数量（kg/kg 货物）	石灰石石膏湿法年排	循环悬浮式半干法年
-------	--------------	-----------	-----------

		放总量（kg）	排放总量（kg）
CO ₂	0.0021006	196006.986	16174.62
CO	4.11E-06	383.5041	37.401
粉尘	4.41E-07	41.14971	4.0131
甲烷	2.097E-08	1.9567107	0.190827
NOX	1.866E-05	1741.1646	169.806
NMVOC	8.28E-07	77.26068	7.5348
SO ₂	6.63E-08	6.186453	0.60333

5.4 本章小结

本章为比选工艺的运行阶段清单分析，包括能耗、材料水资源消耗和污染物排放。通过比选工艺运行参数和 gabi 软件数据库中的数据，计算得到了本章的清单数据。能耗清单包括设备运行能耗、运行材料生产和运输能耗。材料和水资源消耗清单包括运行材料和能源生产的资源消耗，通过相应的计算得到了铁矿石、矿物资源、煤炭、石油、天然气、石灰石等消耗量。污染物排放清单包括能源生产、运行材料生产和运输过程中污染物排放，得到了 CO₂、CO、SO₂ 等大气污染物排放量和废水、固废的排放情况。计算得到了比选工艺运行一年能耗、物耗和污染物排放量。

6 比选工艺生命周期环境影响评价和解释

6.1 环境影响评价方法

为能更好的理解生命周期清单分析结果的环境意义，同时根据 ISO14040 所规定的生命周期评价的步骤，生命周期评价在目的和范围确定以及清单分析之后，接下来进入的阶段是生命周期影响评价(LCIA)，LCIA 的目的是对产品系统生命周期清单分析的结果进行评价。

6.1.1 生命周期环境影响评价概述

生命周期环境影响评价的目的是将获得的清单分析结果与环境影响类型和类型指标联系起来，从而观察和评估该工艺的环境影响。生命周期环境影响评价同时也可为该工艺的生命周期解释提供十分重要的依据。评估阶段包括数据归一化、数据分组、不同组数据加权以及最后数据质量评价这四个步骤。

6.1.2 生命周期环境影响评价类型和评价体系的选择

各种环境干扰因子都会对环境产生一定的影响，而环境影响分析即是各类影响因子综合作用分析所获得的结果。环境影响类型种类繁多，需要根据保护目标进行相对应的划分。一般而言，资源消耗、生态系统和人体健康等这几类是从保护目标角度出发进行划分的，而区域性、局地性、全球性影响等是从发生作用的空间尺度的角度出发进行划分的。

随着生命周期评价在各行业日趋广泛的应用，其方法体系也在不断发展。目前，国内外常用的 LCA 方法体系主要有：Environmental Design of Industrial Products 1997 (EDIP 97)、Environmental Priority Strategies in Product Development 2000(EPS 2000)、Ecoindicator 99、Centre of Environmental Science 2001(CML 2001)、IMPACT 2002+和 Environmental Design of Industrial Products 2003(EDIP 2003)体系。各种体系分析内容等相关情况如表 6.1 所示。

表 6.1 生命周期影响评价方法体系 [62][63][64][65] [66][67]

方法	出版信息(作者, 年份)	内容
EDIP 97	Wenzel 等, 1997 年	包括全球变暖、富营养化、酸化、臭氧消耗、人体毒性、生态毒性等潜在影响 7 个类型
EPS 2000	Steen 等, 1999 年	一种环境审计方法, 主要包括生物多样性、产品、

		人类健康、资源和美学价值等描述环境变化的影响类型。
Ecoindicator 99	Goedkoop 等，1999 年	考虑酸化、生态毒性、水体富营养化、土地的占领、土地占用、致癌物质、气候变化、电离辐射、臭氧层损耗、呼吸系统的影响、化石燃料和矿物开采。
CML 2001	Guinee 等，2001 年	考虑材料资源和能源的消耗以及产生的环境污染和伤害。
IMPACT 2002+	Jolliet 等，2003 年	利用以 CML 中间点为基础的指标和基于损害的方法 Ecoindicator 99。
EDIP 2003	Hausehild 等，2005 年	是 EDIP97 改进的方法，计算出的影响结果，它的环境相关性比较高。

以上几种方法体系在欧美等一些国家已得到了广泛的应用，并建立了完善的数据库，针对不同行业或不同产品的评价都取得了令人满意的结果。从表也可以看出不同影响类型划分方案均有所侧重，需要根据所处地所面临的主要生态环境问题进行综合考虑。由于环境影响主要考虑资源消耗及各种气体对环境的影响，包括温室效应、酸化、富营养化、光化学臭氧合成 4 个方面，其余排放量对环境影响较小，因此本文采用 EDIP 97 和 EDIP 2003 评价体系。本文中温室气体排放引起的全球变暖属于全球性环境问题，会影响动植物分布，还会加剧自然气象灾害的产生次数和程度，而且发展中国家的所受的影响可能比发达国家的影响大；另外，臭氧层消耗也包括在全球性问题中，臭氧层消耗对人类产生的影响非常大，不仅会增加皮肤癌和角膜炎的发病率，严重的状况，人的免疫力也会受到损伤；光化学臭氧合成则属于地区性的环境污染问题，会造成区域性的人类动物呼吸道疾病，也会引起农业产量减少；酸化也是地区性环境问题之一，它主要是会对生态系统产生较大的影响；同样的，富营养化也属于地区性环境问题，会对水体造成污染，从而影响了水生动植物的生存环境。

6.1.3 生命周期环境影响评价分类和影响潜值

分类是一个将清单分析的结果划分到影响类型的过程。由于清单分析的结果，环境交换因子之间经常存在非常复杂的因果联系，单独使用某一影响因子难以完

全表述对生态系统和人类环境所造成的环境影响。一般假设环境干扰因子与环境影响类型之间是一种线性的关系,当然从某种程度上来说这是一种简化方法。本研究工艺中各种污染物都需经过分类划分到相应的环境影响类型中,有时一种污染物会对应多种环境影响类型。

为了对各类污染物排放影响进行环境评估,需要对数据进行分析、定量化和统一化。每类环境排放影响通常都以某种物质为参考,计算其他污染物的相对值。本文考虑的4个方面的环境影响,温室效应采用 CO_2 、酸化采用 SO_2 、富营养化采用 NO_3^- 、光化学臭氧合成采用 C_2H_4 。产品环境影响潜值指的是整个产品系统整个生命周期过程中所有环境排放所产生环境影响的总和。

6.2 比选工艺生命周期解释

生命周期解释是生命周期评价的最后一个步骤，生命周期解释主要是通过通过对 LCI 和 LCIA 的结果所提供的相关信息进行分析识别、分类量化、结果检验和评价，最终得出某些结论，并进一步提供某些环境更友善的改进意见和建议，完成 LCA 研究报告。

6.2.1 比选工艺的生命周期能耗分析

比选工艺的能耗构成、总能耗和相对比例见表 6.2，同时根据总能耗和 SO₂ 年减排量，计算可得功能单位脱除 1tSO₂ 的能耗值。

表 6.2 比选工艺生命周期的能耗比较

序号	名称	石灰石石膏湿法工艺（MJ）		循环悬浮式半干法工艺（MJ）	
		年能耗	功能单位能耗	年能耗	功能单位能耗
1	设备材料生产能耗	41738	0.824422	6290.7	1.43919
	设备材料运输能耗	2778.6	0.054884	340	0.077785
	建设阶段能耗	44516.6	0.879306	6630.7	1.516976
2	设备运行能耗	494194400	9761.479	13670608	3127.57
	运行材料生产能耗	6532232	129.0266	310773.82	71.09902
	运行材料运输能耗	2830092	55.90084	233590	53.44086
	运行阶段能耗	480575724	9492.479	14214971.82	3252.11
	合计	503601240.6	9947.286	14221602.52	3227.439
	相对能耗		100%		33%

由图 6.1 可以看出，两个比选工艺，石灰石石膏湿法工艺的能耗明显高于循环悬浮式半干法工艺，这是由于石灰石石膏湿法系统复杂，设备运行能耗高，且湿法耗水量大，也导致作为运行材料的工艺水生产能耗高。

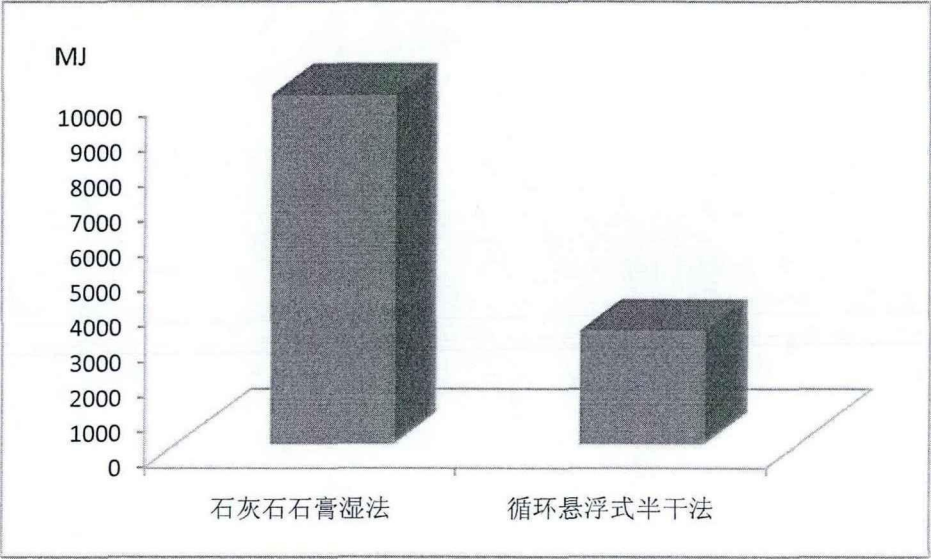


图 6.1 比选工艺的功能单位能耗对比图

从图 6.2 可以看出，对两个比选工艺而言，最主要的能耗均来自于设备运行能耗，即机械设备运行的能耗，如反应器、各类泵与风机等，运行材料消耗的能耗较少。相对于运行阶段的能耗，比选工艺在建设阶段的能耗较少。

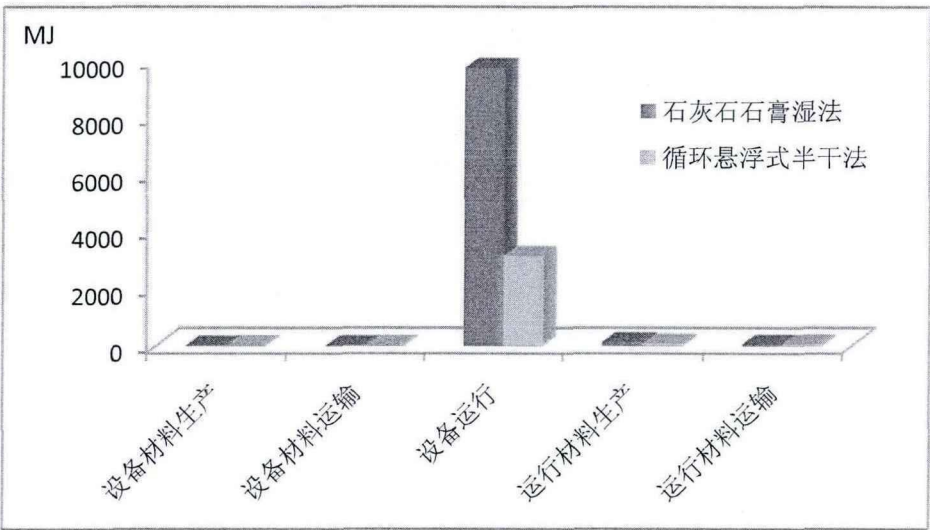


图 6.2 比选工艺各阶段功能单位能耗图

6.2.2 比选工艺的生命周期物耗分析

比选工艺生命周期内的物耗包括设备材料原材料消耗、运行材料资源消耗和能源生产资源消耗三大类。

比选工艺在生命周期内的功能单位材料消耗见表 6.3，从表 6.3 和图 6.3 中可以看出，原材料功能单位耗量循环悬浮式半干法消耗量要大于石灰石石膏湿法，两种工艺消耗量最大的是石灰石，其次是煤炭，共占总量的 99%以上。循环悬浮式半干法石灰石功能单位耗量大于石灰石石膏湿法，这是由于半干法脱硫剂消石灰是由石灰石加工而得，在生产过程中存在加工转化效率，同时半干法的脱硫效率低于湿法，多种因素导致石灰石功能单位耗量上升；而煤炭消耗量湿法大于半干法，这与湿法能耗大密切相关。

表 6.3 比选工艺生命周期的材料消耗

序号	原材料名称	石灰石石膏湿法消耗量(kg)	功能单位消耗量(kg)	循环悬浮式半干法消耗量(kg)	功能单位消耗量(kg)
1	铁矿石	507775.1	10.0297292	70188.451	16.05776
2	矿物材料	4878.54	0.096362415	662.71049	0.151615
3	钢铁废料	1413.737	0.027924566	122.15231	0.027946
4	煤炭	17057419.95	336.9233798	479740	109.7552
5	原油	2115.232	0.04178071	355.04086	0.081226
6	天然气	2314.009	0.045707014	258.03969	0.059034
7	石灰石	93323548	1843.355292	11321560	2590.153
8	石英砂	1608.97	0.031780868	144.52027	0.033063
9	生物质	0.399008	7.88133E-06	0	0
10	耐腐材料	460.5467	0.009096859	86.837531	0.019867
	合计	110945813	2190.561		2716.339
	相对物耗		100%		124%

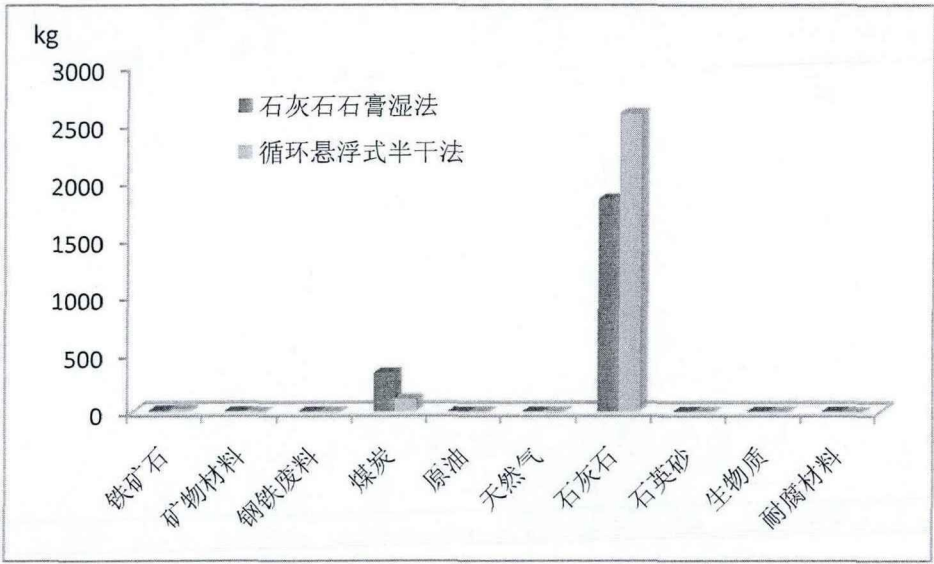


图 6.3 比选工艺各类原材料消耗

从图 6.4 可看出，运行阶段原材料消耗远大于建设阶段。

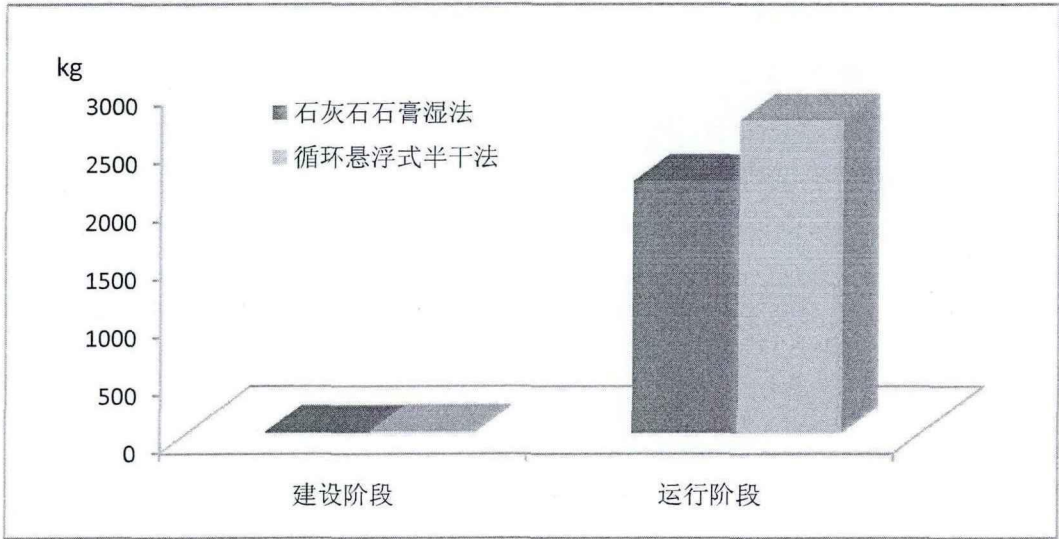


图 6.4 比选工艺各阶段原材料消耗

两种比选工艺的水资源消耗主要来自于建设生产的耗水量、运行材料的耗水量和能源生产的耗水量三个部分。由表 6.4 和图 6.5 可知运行材料和能源生产过程中水耗占比较大，相对而言，建设阶段的水耗很少。水资源作为运行材料工艺水的生产来源，湿法功能单位耗量远大于半干法，这是由工艺特点决定的。

表 6.4 比选工艺生命周期的水资源消耗比较

序号	名称	石灰石石膏湿法工艺 (kg)		循环悬浮式半干法工艺 (kg)	
		年耗水量	功能单位耗	年耗水量	功能单位耗水量

			水量		
1	建设生产	568557.3	11.23032	72425.113	16.56946
2	运行材料	1.91E+09	37726.9	4.8E+07	1.1E+04
3	能源生产	526948180	10408.44	14718965	3367.41
	合计	2436976737	48146.58	63668644	14566
	相对水耗		100%		30%

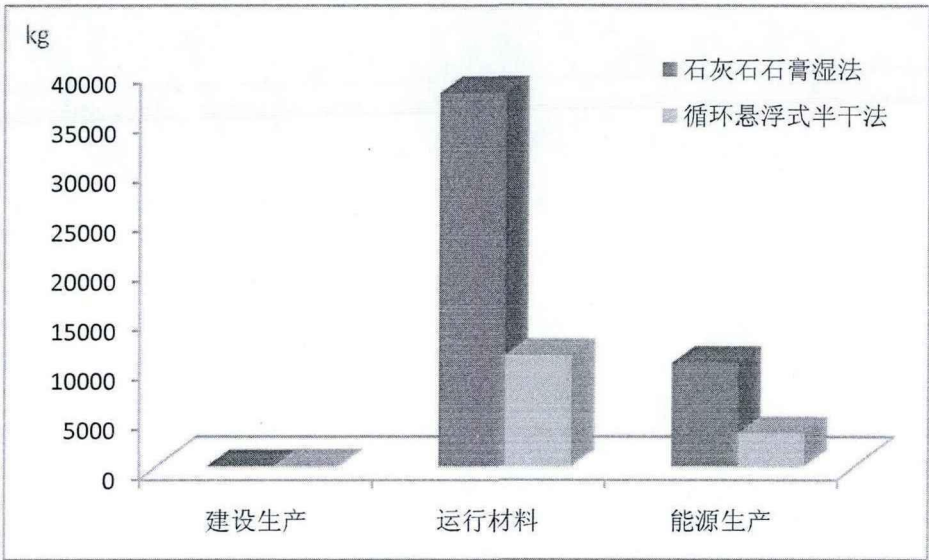


图 6.5 比选工艺生命周期水资源消耗比较图

6.2.3 比选工艺生命周期污染物排放分析

(1) 比选工艺生命周期大气污染物排放分析

比选工艺的大气污染物主要按照四个方面进行考虑：温室效应、酸化、富营养化、光化学臭氧合成。本研究中影响温室效应的物质有 CO₂、CO、CH₄、NO_x 和 NMVOC；影响酸化的物质有 HCl、H₂S、NO_x、硫酸盐、SO₂ 和 NH₃；影响富营养化的物质有铵盐、钙盐、硝酸盐、NO_x 和 NH₃；影响光化学臭氧合成的物质有 CH₄、CO 和 NMVOC。通过折算得到 4 方面影响的环境影响。

表 6.5 石灰石石膏湿法脱硫工艺大气污染物排放环境影响

	排放物质	建设阶段排放量 (kg)	运行阶段排放量 (kg)	总排放量 (kg)	功能单位排放量 (kg)	环境影响当 量因子	环境影响潜值 (kg)	合计
温室效应 影响（以 CO ₂ 为参考 物）	CO ₂	116025.7	115585199.3	115701225	1972.866	1	1972.866	2684.236
	CO	1125.629	21638.83856	22764.46756	0.449651	2	0.899301	
	CH ₄	192.6417	56665.8171	56858.4588	1.123086	25	28.07714	
	NO _x	213.8472	107711.2696	107925.1168	2.13177	320	682.1664	
	NM VOC	12.42809	3818.373267	3830.801357	0.075667	3	0.227001	
	HCl	0.471808	0	0.471808	9.32E-06	0.88	8.2E-06	
酸化影响 潜值（以 SO ₂ 为参考 物）	H ₂ S	0.001334	0	0.001334	2.63E-08	1.88	4.95E-08	9.071935
	NO _x	213.8472	107711.2696	107925.1168	2.13177	0.7	1.492239	
	硫酸盐	22.13758	48028.88076	48051.01834	0.949118	0.65	0.616927	
	SO ₂	207.3018	351741.0962	351948.398	6.951792	1	6.951792	
	NH ₃	0.251381	295.3265221	295.5779031	0.005838	1.88	0.010976	
	铵盐	0.846166	115.473692	116.319858	0.002298	4.43	0.010178	
富营养化 影响潜值	Ca(NO ₃) ₂	1.584375	18853.89043	18855.47481	0.372439	0.7	0.260707	3.17006

(以 NO ₃ ⁻ 为参照物)	硝酸盐	1.672496	0	1.672496	3.3E-05	I	3.3E-05	
	NOx	213.8472	107711.2696	107925.1168	2.13177	1.35	2.877889	
	NH ₃	0.251381	295.3265221	295.5779031	0.005838	3.64	0.021252	
光化学臭氧合成影响潜值 (以 C ₂ H ₄ 为参照物)	CH ₄	192.6417	56665.8171	56858.4588	1.123086	0.007	0.007862	0.028918
	CO	1125.629	21638.83856	22764.46756	0.449651	0.03	0.01349	
	NMVOC	12.42809	3818.373267	3830.801357	0.075667	0.1	0.007567	

表 6.6 循环悬浮式半干法脱硫工艺大气污染物排放环境影响

排放物质	建设阶段排放量 (kg)	运行阶段排放量 (kg)	总排放量 (kg)	功能单位 排放量 (kg)	环境影响 当量因子	环境影响潜值 (kg)	合计
温室效应 影响（以 CO ₂ 为参考 物）	CO ₂	12294.81	8812295	8824589.81	2018.895	1	2018.895
	CO	123.5332	630.8961	754.4293	0.172599	2	0.345198
	CH ₄	12.43485	5632.569	5645.00385	1.291467	2.5	32.28668
	NO _x	27.91221	5200.022	5227.93421	1.19605	320	382.736
	NM VOC	1.606261	111.9948	113.601061	0.02599	3	0.077969
	HCl	0.0793316	0	7.93E-02	1.81E-05	0.88	1.6E-05
酸化影响 潜值（以 SO ₂ 为参考 物）	H ₂ S	7.84E-05	0	7.84E-05	1.79E-08	1.88	3.37E-08
	NO _x	27.912213	5200.022	5227.9342	1.19605	0.7	0.837235
	硫酸盐	1.1173187	2603.871	2.60E+03	0.595971	0.65	0.387381
	SO ₂	24.795546	10599.51	1.06E+04	2.430635	1	2.430635
	NH ₃	0.0051966	8.246158	8.25	0.001888	1.88	0.003549
富营养化	铵盐	0.0070856	3.224276	3.231361577	0.000739	4.43	0.003275
							1.709173
							3.658816

影响潜值 (以 NO ₃ ⁻ 为参照物)	Ca(NO ₃) ₂	0.2384294	526.4416	526.6800294	0.120494	0.7	0.084346	
	硝酸盐	0.0582166	0	0.058216555	1.33E-05	1	1.33E-05	
	NOx	27.912213	5200.022	5227.934213	1.19605	1.35	1.614667	
	NH ₃	0.0051966	8.246158	8.251354647	0.001888	3.64	0.006871	
光化学臭 氧合成影 响潜值 (以 C ₂ H ₄ 为参 照物)	CH ₄	12.434852	5632.569	5645.003852	1.291467	0.007	0.00904	0.016817
	CO	123.53322	630.8961	754.4293188	0.172599	0.03	0.005178	
	NMVOC	1.6062612	111.9948	113.6010612	0.02599	0.1	0.002599	

由于各个环境影响类型的环境负荷程度不同，折算涉及到当量因子，而我国尚未发布权威的折算因子，因此本文不对各个环境影响类型进行折算。从表 6.5、6.6 和 6.7 可以发现石灰石石膏法工艺的各类环境影响要大于循环悬浮式半干法。两套工艺大气污染物环境影响主要是 CO₂ 气体引起的温室效应，酸化、富营养化和光化学臭氧合成的影响占比都很小，酸化得到了明显的改善，脱硫控制工艺在环境酸化改善上取得了明显的成效。

表 6.7 比选工艺大气污染物排放环境影响清单

环境影响类型	石灰石石膏湿法（kg）	循环悬浮法半干法（kg）
温室效应	2684	2434
酸化	9	3.65
富营养化	3.17	1.7
光化学臭氧合成	0.029	0.02

如图 6.6 所示，对比选工艺各阶段 CO₂ 排放情况进行分析可发现，石灰石石膏法 CO₂ 排放主要在运行阶段的能源生产过程、运行材料生产过程和运行过程，这是由于该湿法能耗大，导致能源生产过程中 CO₂ 排放量增加，而运行过程中 CO₂ 的排放是由于石灰石与 SO₂ 反应过程中生成的。循环悬浮式半干法工艺 CO₂ 的排放量在运行材料生产阶段远大于石灰石石膏湿法是由于最为半干法运行材料的脱硫剂消石灰，在生产过程中会排放出 CO₂，而湿法脱硫剂为石灰石。

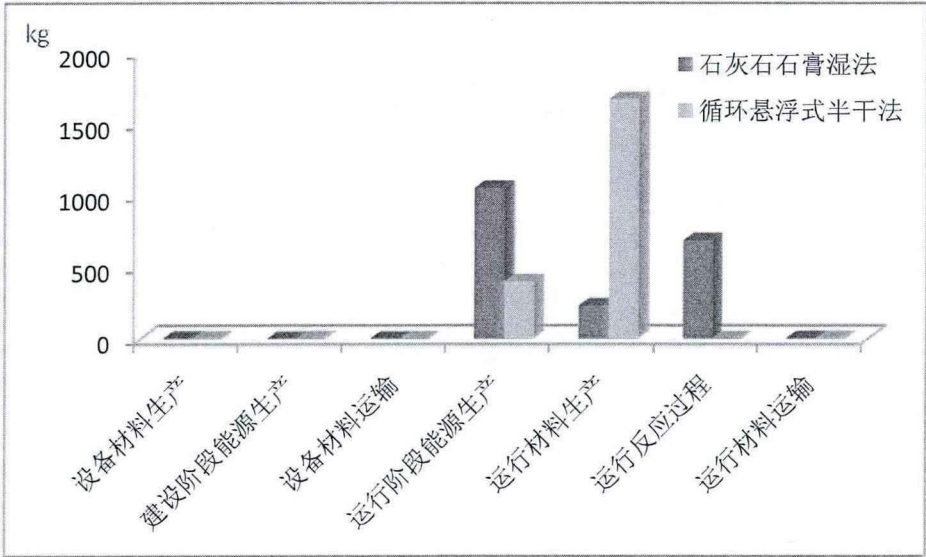


图 6.6 比选工艺各阶段 CO₂ 排放情况

(2) 比选工艺生命周期废水、固废排放分析

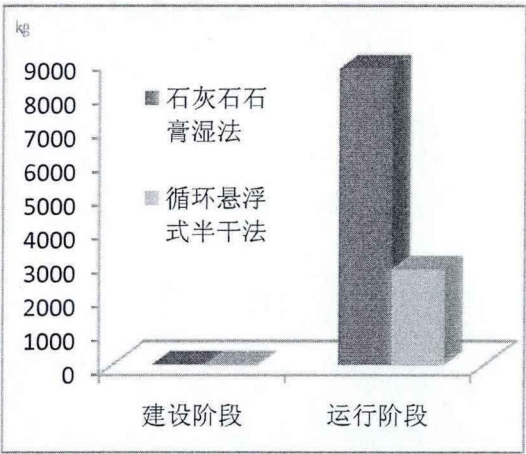


图 6.7 比选工艺废水排放情况

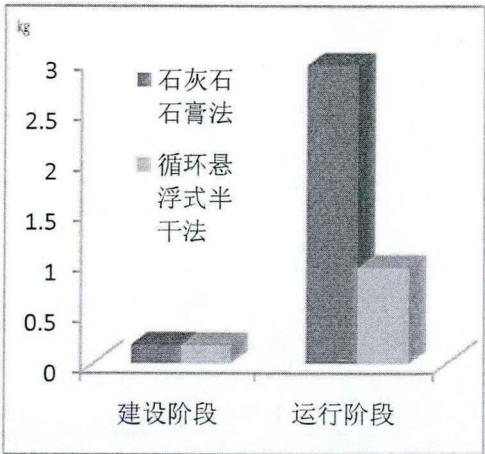


图 6.8 比选工艺固废排放情况

由图 6.7 和图 6.8 看出，石灰石石膏法废水和固废排放量都大于循环悬浮式半干法，这与工艺系统能耗物耗大小有关，且相对于建设阶段，运行阶段排放量占比大。从功能单位排放的绝对值来讲，废水的排放量远大于固废的排放。

6.3 本章小结

本章对比选工艺进行了生命周期解释，对工艺生命周期清单和环境影响评价结果进行了概括、讨论和分析。通过数据分析发现，发现两种工艺都是运行阶段环境影响占比大，而对于功能单位环境影响来说，容量的不同主要体现在建设阶段，这也表明了虽然两套工艺在机组容量存在差异，依然是可比的，关键还是运行状况和系统特点决定了工艺的环境影响。循环悬浮式半干法工艺在功能单位能耗、污染物排放、环境影响综合指数上优于石灰石石膏湿法工艺，但物耗尤其是石灰石消耗要大于石灰石石膏湿法。酸化得到了明显的改善，两种脱硫控制工艺在环境酸化改善上取得了明显的成效。

7 全文总结和展望

7.1 全文总结

本文进行了燃煤电厂石灰石石膏湿法和循环悬浮式半干法烟气脱硫工艺的生命周期评估,评价两种比选方案所消耗的能源、资源和产生环境影响。突破了以往偏重考虑大气污染物控制技术经济性,在真正意义上实现了对控制工艺的整个生命周期全面的评价。确定了比选工艺 LCA 研究的目的和范围的,比选工艺设备年限为 30 年,并以脱除 1tSO₂ 作为两种不同脱硫工艺的功能单位。由于本文 LCA 重在分析工艺环境影响性,对工艺的经济性、技术成熟度和脱除效率等方面不作评述。LCA 为全面评估工艺提供了环境影响方面的指标。

将评估分为建设阶段和运行阶段两个大范围,并整理计算了各阶段的能源消耗清单、材料水资源消耗清单以及污染物排放清单。能源消耗清单包括生产能耗、运输能耗和运行能耗,得到了比选工艺一年的总能耗量。材料水资源消耗清单包括设备生产、能源生产和运行材料的资源消耗,通过相应的计算得到了铁矿石、矿物资源、煤炭、石油、天然气、石灰石等消耗量。污染物排放清单包括生产过程中、能源生产和运输过程中污染物的排放,计算获得了 CO₂、CO、NO_x、SO₂ 等大气污染物排放量和废水、固废的排放情况。

采用 EDIP 97 和 EDIP 2003 评价体系对比选工艺的能耗、物耗、污染物排放清单进行分析,将分析结果与环境影响类型指标联系起来,从而评估和比较比选工艺的环境影响性。考虑了能耗、资源消耗及各种气体对环境温室效应、酸化、富营养化、光化学臭氧合成方面的影响。通过对清单数据进行归一化处理,得到了可比的环境影响潜值。

通过分析发现:

- 1、脱硫控制工艺在环境酸化改善上取得了明显的成效,酸化得到了明显的改善。因此安装脱硫装置脱除 SO₂ 对酸化的控制具有十分重要的意义。
- 2、循环悬浮式半干法工艺在功能单位能耗、污染物排放环境影响综合指数上优于石灰石石膏湿法工艺。
- 3、循环悬浮式半干法物耗特别是石灰石消耗要大于石灰石石膏湿法。

4、两种工艺环境影响主要来自于运行阶段，相比而言建设阶段占比很小，因此系统良好的运行对整套工艺的环境友好型的影响意义重大。

大气污染物控制技术为保护人类生活环境减少污染物排放方面作出了巨大的贡献，若两种工艺能在各自环境影响较大的阶段进一步发展和改进，力求做到环境更友善，能以最小的资源和环境代价解决更多的大气污染问题，为我国节能减排领域做出更多的贡献，那将是一件功在当代利在千秋的伟大事业。完整的系统的 LCA 需要大量的全面的各行各业生产加工制造等数据支持，在我国建立与完善 LCA 数据库系统是今后开展 LCA 并真正选择出最清洁最环保最可持续发展工艺的重要基础，通过国内外数据库的基础数据的对比，也能使我们发现在我国生产上环境影响方面的优劣，有利于推动我国各个行业环境友好型工作的开展。

7.2 未来研究工作展望

1、生命周期评价是一项符合可持续发展理念的评价体系，工艺的环境影响性涉及到方方面面，对工艺的分析可进一步全面和深入；

2、进一步对同一类脱硫工艺不同的设备、煤种、运行等参数进行生命周期评估，比较各参数的环境影响潜值，为工艺优化提供参考和建议；

3、生命周期评估理念评估不同脱硫技术和不同大气污染物控制技术，探讨控制技术的环境影响性。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 2011: p. 7-2.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2010 年国民经济和社会发展统计公报. 2011,2
- [3] 赵瑜. 中国燃煤电厂大气污染物排放及环境影响研究. 清华大学博士学位论文, 2008.4
- [4] 毕玉森, 陈国辉. 控制电厂锅炉 NO_x 排放的对策和建议. 中国电力, 2004.6
- [5] 马勇. 二氧化硫现状与控制分析. 中国电力教育 2010 年管理论丛与技术研究专刊, 2010
- [6] 国家环保部. 全国环境统计公报(2010 年) 2012.1.18
- [7] 国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要. 2011.3
- [8] 国家环境保护部, 国家质检总局. 火电厂大气污染物排放标准 (GB13233-2011) 2011.7
- [9] 郭予超. 我国火电厂烟气脱硫现状及展望. 华东电力. 2001.9
- [10] 张海燕, 许星. 国外烟气脱硫技术的发展与我国的现状. 有色金属设计. 2003
- [11] 孔华. 石灰石湿法烟气脱硫技术的试验和理论研究. 浙江大学博士学位论文 2001
- [12] 周月桂, 章明川, 范卫东, 范浩杰, 于娟. 一种新型半干法烟气脱硫方法的机理分析. 燃料化学学报. 2004.12
- [13] 王乃华. 新型半干法烟气脱硫的实验及机理研究. 浙江大学博士学位论文. 2001
- [14] UdodeHaes H A, Heijungs R. Life-cycle assessment for energy analysis and management[J]. Applied Energy, 2007, 84(7-8): 817-827
- [15] Enrico Benetto, Patrick Rousseaux, Jacques Blondin. Life cycle assessment of coal by-products based electric power production scenarios[J]. Fuel, 2004, 83(7-8): 957-970.
- [16] Caspersen N I, Sørensen A. Improvements of products by means of life cycle assessment: high pressure cleaners[J]. Journal of Cleaner Production, 1998, 6(3-4): 371-380.
- [17] Ally J, Pryor T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(2): 401-411.
- [18] 杨健. 城镇污水处理工艺的生命周期评价 同济大学 博士学位论文. 2001.9
- [19] Nordic Council of Ministers. Product Life Cycle Assessment—Principles and Methodology, Svendk-Nordk Bogimport Copenhagen. 1992
- [20] 胡名操. 环境保护实用数据手册. 机械工业出版社. 1990.4
- [21] 蒋文举. 烟气脱硫脱硝技术手册. 化学工业出版社. 2007
- [22] 郝吉明. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册. 化学工业出版社. 2005.2

- [23] ISO. ISO14040 standard: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework 1997
- [24] DOE Lawrence J. Hill Donald B. Hunsaker T. The Principles of Life-Cycle Analysis 1996.5
- [25] Sonnemann Guido, Leeuw Bas de. Life cycle management in developing countries: state of the art and outlook. *Int J Life Cycle Assess* 2006;11(special issue 1):123–6.
- [26] JOLLIET O, BRENT A, GOEDKOOPT M, et al. The LCIA framework. SETAC-UNEP, life cycle initiative [M]. Swiss: Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, 2003.
- [27] Klöpffer Walter. The role of SETAC in the development of LCA. *Life Cycle Assess* 2006;11:116–22
- [28] ISO. ISO14041 standard: Environmental management—Life cycle assessment—Goal and scope definition and inventory analysis 1998
- [29] ISO. ISO14042 standard: Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact assessment 2000
- [30] ISO. ISO14043 standard: Environmental management—Life cycle assessment—Life cycle impact interpretation 2000
- [31] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M], 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [32] JEROEN B, GUIN 'EE. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 90–96
- [33] LAVE, LB HENDRICKSON, CT .Battery innovation and e-cars. *Science*. 1995.12
- [34] Cherubini, Francesco; Bird, Neil D; Cowie, Annette; Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations , *RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING*, 2009.7
- [35] Gnansounou, E, Dauriat, A, Villegas, J. Panichelli, L Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. *BIORESOURCE TECHNOLOGY* .2009.11
- [36] Pehnt, M. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *RENEWABLE ENERGY*, 2006.6
- [37] Stoppato, A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation, *ENERGY*, 2008.2
- [38] Lombardi, L Life cycle assessment comparison of technical solutions for CO₂ emissions reduction in power generation, *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT* 2003.6
- [39] Pei-Te Chiueh, Yu-Hung Lee, Chih-Yi Su, Shang-Lien Lo. Assessing the environmental

- impact of five Pd-based catalytic technologies in removing of nitrates. *Journal of Hazardous Materials* 192 (2011) 837–845
- [40] K.A. Golonka, D.J. Brennan, Application of Life Cycle Assessment to process selection for pollutant treatment: A case study of sulphur dioxide emissions from Australian metallurgical smelters, *Trans. IChemE*, vol. 74, Part B, May, (1996), pp. 105±119.
- [41] E. Vyzi, A. Azapagic, Life Cycle Assessment as a tool for identifying the Best Practicable Environmental Option (BPEO), Research report, University of Surrey, 1998.
- [42] Energy-efficient air pollution controls for fossil-fueled plants. Technology assessment. Joseph H. Sayrer Ph.D. P.E. Senior Project Manager, 1991
- [43] R.J. Keeth, D.L. Baker, P.E. Tracy, G.E. Ogden, P.A. Ireland. Economic Evaluation of Flue Gas Desulfurization Systems Volume 1. Prepared by United Engineers and Constructors for the Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI GS-7193. February, 1991
- [44] R.J. Keeth, D.L. Baker, P.E. Tracy, G.E. Ogden, P.A. Ireland, C.N. Von Thun. Economic Evaluation of Flue Gas Desulfurization Systems, Volume 2. Prepared by United Engineers and Constructors for EPRI, EPRI GS-1793. January, 1992.
- [45] C.P. Robie, P.A. Ireland. Technical Feasibility and Cost of Selective Catalytic Reduction NO_x Control. Prepared by United Engineers and Constructors for EPRI, GS7266. May, 1991.
- [46] R.P. Donovan. Proceedings: Ninth Particulate Control Symposium, Volume 1: Electrostatic Precipitators. Prepared by Research Triangle Institute for EPRI, TR100471. April, 1992.
- [47] R.P. Donovan. "Proceedings: Ninth Particulate Control Symposium Volume 2 Bag-houses and Advanced Particulate Control Technologies. Prepared by Research Triangle Institute for EPRI, TR-100471. April, 1992.
- [48] M.A. Elliott. Chemistry of Coal Utilization, Second Supplementary Volume. John Wiley, 1981, p. 1473.
- [49] EPA technology assessment report for industrial boiler applications: NO_x flue gas treatment. EPA-600/7-79-178g. 1979.12
- [50] Technology Assessment report for industrial boiler applications: flue gas desulfurization, interagency Energy/Environment R&D Program Report, 1979.11;
- [51] Commercial demonstration of the NO_x/SO₂/NO_x removal flue gas cleanup system, clean

- coal technology program.1995.7
- [52] Zengying Liang ,Xiaoqian Ma, HaiLin, Yuting Tang The energy consumption and environmental impacts of SCR technology in China. *Applied Energy* 88 (2011) 1120–1129
- [53] ISO ISO14044 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines 2006.7
- [54] ISO ISO 14062 In theory and practice—ecodesign procedure. *Life Cycle Assess* (2010) 15:777–784;
- [55] 国家环保总局. 火电厂烟气脱硫工程技术规范. 石灰石/石灰石膏法. HJ/T 179-2005
- [56] 林永明. 大型石灰石—石膏湿法喷淋脱硫技术研究及工程应用. 中国科学院上海冶金研究所. 2000
- [57] 王乃华, 骆仲泐, 高翔, 岑可法. 新型半干法烟气脱硫试验研究. *动力工程* 2003.8
- [58] 骆仲泐, 高翔, 方梦祥, 施正伦, 程乐鸣, 周劲松, 王勤辉, 倪明江, 岑可法. 循环悬浮式半干法烟气净化装置 发明专利 00131524, 2002.5
- [59] 高翔, 刘海蛟. 循环悬浮式半干法脱硫技术的实验研究. *动力工程*. 2006.10
- [60] 火力发电网. http://www.chinatpg.com/InfoDetails_81252.html . 2011.11
- [61] Zou Zhiping, Ma Xiaoqian. Life cycle assessment on the solar thermal power generation[J] . *Regenerative Energy* , 2004(2): 12-15
- [62] WENZEL H. HAUSCHILD M. Environmental assessment of products Lond, Chapman and Hall, 1997
- [63] GOEDKOOPT M. SPRIENSMA R. The Ecoindicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment[M] The Netherlands: PR6 onsuhanst. Amemfoofl. 1999.
- [64] STEEN B. A systematic approach to environmental priority strates in product development(EPS)[M]. Sweden: Chalmers University of Technology. 1999.
- [65] J GUINEE J B, GORREE M, HEIJUNGS R, et al. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards[M].The Netherlands: Spatial Planning and Environment(VROM)and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag mad Leiden, 2001.
- [66] JOLLIET O, MARGNI M, CHARI, ESR, eta1. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology[J] 2003, 8(6): 324330.

- [67] HAUSCHILJM. Background for spatial differentiation in LCA impact assessment: The EDIP 03 methodology[M]. Denmark: Institute full Product Development Technical University of Denmark. 2005.