

中文图书分类号: X773; TQ177.3

密 级: 公开

UDC: 691; 628.477

学 校 代 码: 10005



硕 士 学 位 论 文

MASTERAL DISSERTATION

论 文 题 目: 纸面石膏板的生命周期评价

论 文 作 者: 马丽丽

学 科: 材料科学与工程

指 导 教 师: 龚先政 教授

论文提交日期: 2012年6月

UDC: 691; 628.477
中文图书分类号: X773; TQ177.3

学校代码: 10005
学 号: S200909041
密 级: 公 开

北京工业大学工学硕士学位论文

题 目: 纸面石膏板的生命周期评价

英文题目: THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF
PLASTERBOARD

论 文 作 者: 马丽丽
学 科 专 业: 材料科学与工程
研 究 方 向: 生态环境材料
申 请 学 位: 工学硕士
指 导 教 师: 龚先政教授
所 在 单 位: 材料科学与工程学院
答 辩 日 期: 2012年6月
授 予 学 位 单 位: 北京工业大学

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，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，也不包含为获得北京工业大学或其它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了谢意。

签 名： 马丽丽

日 期： 2012 年 6 月 18 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： 马丽丽

日 期： 2012 年 6 月 18 日

导师签名： 龚先政

日 期： 2012 年 6 月 18 日

摘要

脱硫石膏是火电厂发电的副产物，是近年来排放量逐渐增多的固体废弃物。利用脱硫石膏生产纸面石膏板能够避免因堆积造成的土地使用，2008年我国脱硫石膏排放量为3336万t，若全部用于生产石膏板，则能节约土地6250亩，同时还能节约宝贵的天然石膏资源，节省企业的运输成本，符合我国可持续发展战略和循环经济理念，具有重要的现实意义。国内对脱硫石膏的研究主要集中在脱硫技术以及石膏产品性能上，有大量文献从石膏的物理化学性能以及经济角度论证了利用脱硫石膏替代天然石膏生产石膏板的可行性，但对于以脱硫石膏生产石膏板的整个生命周期的环境负荷状况，与传统的石膏板环境负荷对比的优劣势，及具体的环境负荷优势的体现还未见报道。

本文运用生命周期评价(LCA)方法，对天然石膏纸面石膏板和脱硫石膏纸面石膏板进行了研究，得到了两种原料石膏板生命周期环境负荷清单。其中，能耗分别为 $28.9\text{MJ}/\text{m}^2$ 和 $28.2\text{MJ}/\text{m}^2$ ，主要发生在煅烧和干燥阶段，占到两种石膏板生命周期总能耗的73.5%和81.9%； CO_2 为主要污染物排放，分别为 $2.43\text{kg}/\text{m}^2$ 和 $2.41\text{kg}/\text{m}^2$ ，主要来源于煅烧和干燥阶段的能源使用。

通过构建适用于纸面石膏板生命周期影响评价方法，从温室气体效应(GWP)、酸化效应(AP)、光化学烟雾效应(POCP)、人体健康损害效应(HT)及不可再生资源耗竭效应(ADP)五个方面开展了环境影响评价。两种石膏板的环境影响大小均为 $\text{GWP} > \text{AP} > \text{POCP} > \text{HT} > \text{ADP}$ 。对于天然石膏板，温室气体效应是最主要的环境影响类型，占天然石膏板环境负荷总量的44.4%，其次是酸化效应，为35.7%。天然石膏板生命周期最大环境负荷项为 CO_2 的排放，它对天然石膏板环境影响的贡献为41.6%，其次是 SO_2 的排放，为38.8%。对脱硫石膏板，温室气体效应占脱硫石膏板环境负荷总量的47.9%，酸化效应为36.7%。脱硫石膏板生命周期主要的环境负荷项是 CO_2 的排放，它对脱硫石膏板环境影响的贡献为43.6%，其次是 SO_2 的排放，为42.9%。

对两种原料石膏板生命周期各阶段环境负荷进行深入分析，结果表明，两种石膏板的环境热点工序均为生石膏煅烧阶段和石膏板干燥阶段，两工序的主要环境负荷为温室效应和酸化效应，化石燃料的燃烧是石膏板环境负荷的主要责任者。

在此基础上，本论文对两种原料石膏板的五种环境负荷进行了对比分析。结果表明，天然石膏板生命周期的环境负荷总量比脱硫石膏板高出6%。其中人体健康损害效应高出了72%，不可再生资源消耗效应高出了76%。

论文最后对两种石膏板的生产工艺过程进行了分析，提出了一些从技术上

和污染物预防措施角度的改进建议，以期为提高石膏板的环境性能提供帮助。

关键词：脱硫石膏；天然石膏；纸面石膏板；生命周期评价

Abstract

FGD gypsum is a by-product derived from flue gas desulfurization (FGD) systems at electric power plants. It is a gradually increasing solid waste emission in recent years. It is a good way to avoid the accumulation of land in use of FGD gypsum production of plasterboard. For example, if all the FGD gypsum emission in 2008(33.36 million ton)can be used in production of plasterboard,6250 acres of land will be saved. At the same time, using FGD gypsum can also save valuable natural gypsum resources, and save the cost of transport, in line with China's strategy of sustainable development and circular economy concept, has a important practical significance. The study of FGD gypsum is mainly focus on the performance of desulphurization technology and the properties of the products. There is a lot of literature demonstrated the feasibility of the use of FGD gypsum to replace the natural gypsum from the physical and chemical properties as well as economic point of view. However, the advantages and disadvantages compared with conventional gypsum throughout the life cycle environmental load condition, and specific manifestation of the environmental advantages of FGD gypsum plasterboard has not been reported.

This study got two inventories of environmental load of the two kinds of gypsum plasterboard by the way of life cycle assessment. The energy consumption was 28.9MJ/m² and 28.2MJ/m² respectively for the natural gypsum plasterboard and FGD gypsum plasterboard. The calcining and drying stages accounted for 73.5% and 81.9% of the total energy consumption of the two kinds of gypsum plasterboard's life cycle; The major pollutants of the two kinds of gypsum plasterboard was CO₂, accounted for 2.43kg/m² and 2.41kg/m², and mostly of them came from the calcining and drying stages of energy use.

Building on the available method for the gypsum plasterboard, this paper analyzed environmental impact of the two gypsum plasterboard from the Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Photochemical Oxidation Potential (POCP), Human Toxicity (HT) and A-biotic Depletion Potential (ADP).The results showed that the environmental impact of the two gypsum plasterboard was GWP>AP>POCP>HT>ADP. For natural gypsum plasterboard, the mainly two environmental impacts were the global warming effect and acidification effect which accounted for 41.6% and 35.7% respectively of the total environmental

load of natural gypsum plasterboard. The largest load of natural gypsum plasterboard was the emission of CO₂, which had 41.6% contribution to the environmental impact of natural gypsum plasterboard, the second largest environmental load was the emission of SO₂ which accounted for 38.8%. For FGD gypsum plasterboard, The global warming effect and acidification effect accounted for 47.9% and 36.7% respectively of the total environmental load of FGD gypsum plasterboard. The two largest load of FGD gypsum plasterboard were the emission of CO₂ and SO₂, which accounted for 43.6% and 42.9%.

Based on the research above, the two kinds of natural gypsum plasterboard and FGD plasterboard of the environmental impact were compared. The results showed that the total life cycle environmental load of the natural gypsum plasterboard. was 6% higher than the FGD gypsum plasterboard Among them, human toxicity effect increased by 72% and a-biotic depletion effect increased by 76%.

Finally, this paper analyzed production process of the two gypsum plasterboard which had a larger environmental impact, and took some suggestions to improve the environmental impact of them from the technical and pollution prevention angles, in order to improve the environmental performance of the two gypsum plasterboard.

Key words: FGD gypsum, natural gypsum, gypsum plasterboard, life cycle assessment

摘 要.....	I
Abstract	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 国外纸面石膏板的发展概况.....	1
1.1.2 国内纸面石膏板的发展状况.....	2
1.1.3 电厂脱硫概述.....	3
1.2 国内外石膏板生命周期研究.....	4
1.3 论文选题依据.....	6
1.4 课题来源与研究内容.....	7
1.4.1 课题来源.....	7
1.4.2 研究内容.....	7
第 2 章 评价方法体系的构建与选取	9
2.1 LCA 的方法学框架.....	9
2.1.1 目的与范围的确定.....	10
2.1.2 生命周期清单分析.....	10
2.1.3 影响评价.....	11
2.1.4 结果解释.....	11
2.2 影响评价模型及方法的确定.....	11
2.2.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择.....	11
2.2.2 分类.....	12
2.2.3 特征化.....	13
2.2.4 选择性步骤.....	16
2.3 本章小结.....	16
第 3 章 天然石膏纸面石膏板的生命周期分析	17
3.1 目的与范围的确定.....	17
3.1.1 研究目的.....	17
3.1.2 研究范围.....	17
3.2 数据收集与整理.....	18
3.2.1 电力清单的更新.....	18
3.2.2 石膏板生产过程原料消耗.....	25

3.3 纸面石膏板清单分析	26
3.4 生命周期影响评价	30
3.4.1 分类	30
3.4.2 特征化	30
3.4.3 归一化	31
3.5 结果解释	31
3.6 本章小结	34
第 4 章 脱硫石膏纸面石膏板的生命周期分析	35
4.1 目的与范围的确定	35
4.1.1 研究目的	35
4.1.2 功能单位与研究范围	35
4.2 脱硫石膏的回收	36
4.2.1 石灰石—石膏湿法脱硫技术	36
4.2.2 脱硫石膏的环境负荷清单编制与分析	38
4.3 原料运输	41
4.4 石膏板生产阶段	41
4.5 功能单位脱硫石膏板的生命周期清单	43
4.6 特征化和归一化	44
4.7 结果解释	44
4.8 本章小结	47
第 5 章 两种原料石膏板的环境行为比较	49
5.1 天然石膏和脱硫石膏的性能和质量	49
5.2 污染物排放与能耗比较	50
5.3 各种环境影响类型的比较	51
5.4 纸面石膏板环境负荷改进潜力分析	52
5.4.1 石膏板生产技术的改进	52
5.4.2 污染物预防措施改进	52
5.5 本章小结	53
结论与展望	55
参 考 文 献	57
攻读硕士学位期间所发表的学术论文	61
致 谢	63

第1章 绪论

近几十年来,由于科学技术飞跃进步,工业生产发展迅速,五光十色的产品在满足人们各种需求,提高人们生活质量的同时也带来了一系列环境问题,如资源枯竭、土地荒漠化、淡水资源短缺、气候变化异常等。人们发现,早期的面向污染源的末端环境控制模式的局限性日渐突出,寻求一种满足经济、资源、环境可持续发展要求的环境管理模式成为人们关注的热点。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是近年来提出的面向产品的环境管理方式,它关注的是从产品原材料的获取和处理、产品的加工与生产、产品的使用、废弃产品的最后处理等整个生命周期过程对环境的影响,从而找出减少或消除这些影响的措施和方法。这是一种适合材料可持续发展的全新的环境管理模式。

1.1 研究背景

1.1.1 国外纸面石膏板的发展概况

石膏胶凝材料是传统的三大胶凝材料之一。它的原料可用天然石膏和副产石膏,主要成分是二水硫酸钙和无水硫酸钙。石膏建筑材料重量轻、防火、并具有一定的隔声、保温和呼吸功能,其制品的安装为干作业,施工文明、快速。石膏的加工能耗也很低,仅为水泥的1/4,石灰的1/3。石膏建筑材料被公认为是一种生态建材、健康建材。新西兰的一份建筑物生命周期分析研究报告表明,在各种每千克建筑材料中,石膏板的温室气体效应只有0.340kg当量CO₂,酸化效应也只有0.00099kg当量SO₂^[1]。

目前许多国家已将纸面石膏板大量用于室内非承重隔墙和吊顶。全世界纸面石膏板企业约有250家以上,总产量超过56亿m²。美国是第一个生产和使用石膏板的国家,石膏板在其国家发展迅速,1999年石膏板产量已达到27亿平方米左右。目前,全世界一半的墙体生产能力在美国。日本的石膏板用量也很大,是世界上应用脱硫石膏最好且最早的国家。由于其国内矿产资源匮乏,日本在1997年就几乎全部使用工业副产石膏生产纸面石膏板和纤维石膏板。90年代以后,日本每年的石膏板产量为6亿平方米左右。欧洲一些国家的石膏板产量发展也比较迅速,英国、德国和法国每年的石膏板产量都在2亿平方米以上。若按人均消费石膏板量计算,加拿大为13.5m²/(人·年),美国为8.1m²/(人·年),日本和法国也在4.5m²/(人·年)^[2,3]。目前,发达国家石膏板的年产量仍在逐年增长,石膏板生产规模也在向大型化发展,生产速度和生产技术都达

到了新的突破。

1.1.2 国内纸面石膏板的发展状况

我国具有及其丰富的天然石膏资源矿产，已经探明的石膏产量居世界第一位，截止 2008 年底，我国已探明的石膏产量为 695.9 亿吨，主要分布在华东、中南和西南长江流域一带。其中品位在 65%~85%的石膏占到总储量的 89%^[4]。表 1-1 是 2005 年我国石膏不同矿石品级及所占百分比。我国石膏工业虽然起步较晚，基础较差，但发展速度很快，特别是实行改革开放以来，增长幅度最为明显，1995 年石膏产量猛增到 2659 万吨，第一次超过了美国，成为世界石膏第一生产大国^[2]。

我国的纸面石膏板产业起步较晚，从 20 世纪 70 年代开始自行设计、制造年产 400 万 m² 石膏板生产线，并在 1978 年第一次从国外引进了年产 2000 万 m² 纸面石膏板生产线。90 年代以后，在国家大力推广轻型建筑体系的政策扶持下，以及建筑节能政策的推动下，纸面石膏板出现了迅猛增长的势头。尽管目前石膏板行业在我国尚属初步发展阶段，由于它所具有的一系列优越性能，在建材领域中的地位会逐步稳固，使用比例会逐步增大，成为不可缺少的建筑材料。石膏板行业如同朝阳工业将继续蓬勃发展，按人均消费纸面石膏板来看，我国为 0.7m²/（人·年），仅为加拿大的 8.6%，日本的 15.5%，如果人均消费纸面石膏板达到美国的水平，则纸面石膏板的年产量将达 105 亿 m²^[2]。

表 1-1 我国 2005 年石膏矿石不同品级的储量及所占百分比^[5]

Table 1-1 Different grade gypsum miner reserves and percentage in China

地矿石 平均品位 (%)	已探明储量的矿产地/亿吨				已利用和可供近期利用的矿产地/亿吨			
	石膏		硬石膏		石膏		硬石膏	
	探明 储量	百分 比	探明 储量	百分比	保有 储量	百分比	保有 储量	百分比
55-65	6	3	19	5	6	4	3	8
>65-75	129	65	309	84	74	56	—	—
>75-85	47	24	4	1	44	33	3	8
>85-95	12	6	33	9	9	7	26	75
>95	3	2	4	1	—	—	4	9
合计	197	100	369	100	133	100	36	100

随着我国国民经济的发展和新型墙体材料的大力推广，以及生产技术的进步和化学石膏的推广应用，我国的纸面石膏板必将得到进一步的发展。图 1-1 为 2001~2008 年我国石膏板产量图，从图中可以看出，到 2008 年，我国石膏板产量已经突破 10 亿平方米，达到 11.38 亿平方米^[4]。

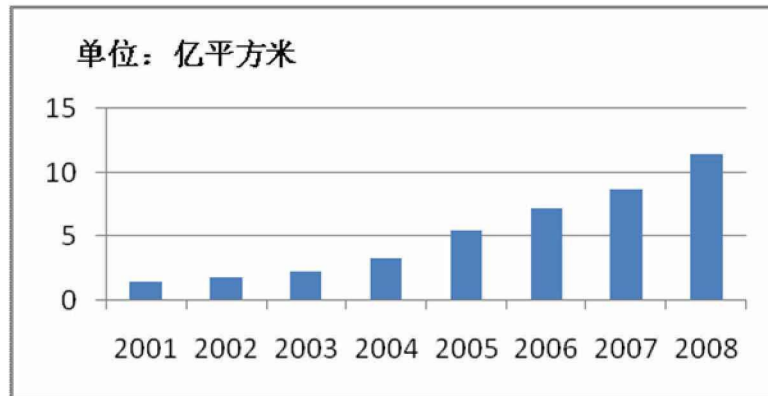


图 1-1 2001~2008 年我国石膏板产量

Fig.1-1 Plasterboard production from 2001-2008 in China

1.1.3 电厂脱硫概述

21世纪以来,几大高能耗、高物耗行业如火电、建材、化工等用煤急剧增长,2008年,火力发电煤13.4亿吨,占到全国煤炭消耗27.4亿吨的53.28%^[6]。煤炭消耗仍是我国能源消耗的主要构成部分,并且这种结构在今后相当长时间内不会改变。燃煤过程直接排放大量的SO₂,不仅会产生大气环境污染,导致酸雨,给生态环境和社会经济带来严重的影响和破坏,而且严重的危害人类的身体健康。且随着我国火电装机容量的递增,SO₂的排放也在不断增加。加强环境保护工作是我国实施可持续发展战略的重要保证,加大火电厂SO₂的控制力度显得非常紧迫和必要。表1-2为我国2004~2008年火力发电燃煤SO₂排放强度表^[6-10]。从表中可知,我国的SO₂的减排措施已有了成效,2008年火力发电量较2004年增长了56%,原煤消耗增长了41.8%,SO₂排放量只增长了5.5%,07年,SO₂排放量开始出现负增长,08年燃煤排放强度降为105.33t/万t,较04年降低了25.7%。

表 1-2 2004~2008 年我国火力发电-燃煤消耗 SO₂ 排放的统计数据

Table1-2 The data of power generation, coal-fired consumption and sulfur dioxide emission

from 2004 to 2008

年份	火力发电量 (亿 kWh)	燃煤 消耗量(亿 t)	SO ₂ 排放量(万 t)	发电耗煤 强度(g/kWh)	燃煤排放 强度(t/万 t)
2004	17955.9	9.445	994.9	526.03	105.33
2005	20473.4	10.561	1167.2	515.82	110.52
2006	23696.0	12.025	1204.1	507.45	100.14
2007	27229.3	13.192	1147.1	484.49	86.95
2008	28030	13.4	1050	478.06	78.3

新中国成立 60 年来,尤其是改革开放 30 年以来,中国经济取得了举世瞩目的辉煌成就,中国的电力工业也迅猛发展。电力工业装机容量从 2001 年的 3.38 亿千瓦发展到 2008 年底的 7.93 亿千瓦,其中火电装机占 76.05%,达到 6.03 亿千瓦^[5]。中国的电力环保事业也取得了长足进步,中国只用 8 年的时间完成了国外 30 年时间发展起来的脱硫产业,已成为全球最大的烟气脱硫市场。大量廉价、质优的脱硫石膏成为许多大型石膏板企业和水泥企业争相抢夺的优质资源,脱硫石膏的资源化利用,可以节省处理脱硫渣的处理费用以及减少土地占用带来的环境问题,同时能够带来良好的社会效应和经济效应^[11]。

目前,世界范围内的火电厂脱硫技术工艺多种多样,达数百种之多,按脱硫工艺在燃烧过程中所处位置不同,可分为燃烧前脱硫、燃烧中脱硫、燃烧后脱硫^[12]。燃烧后脱硫即是烟气脱硫(Flue Gas Desulphurization, FGD),是目前世界上唯一大规模商业应用的脱硫方式。

(1) 燃烧前脱硫主要是指洗煤、煤的液化和气化。洗煤仅能脱去煤中较少一部分的硫,它只能作为脱硫的一种辅助手段;煤液化和气化脱硫效果很好,是解决煤炭作为今后能源的主要途径,但其费用成本太高,无法与天然气及石油竞争。

(2) 燃烧中脱硫主要是循环硫化床锅炉。这是近年来在国际上发展起来的新一代高效、低污染清洁燃煤技术,具有投资省、燃料适应性广等优点,循环流化床锅炉发展迅速,并逐渐得到商业推广,但是由于这种技术受锅炉容量的限制,主要应用在 135MW 以下的机组。

(3) 燃烧后脱硫即是烟气脱硫,是目前唯一大规模商业化应用的脱硫方式。烟气脱硫技术有很多,主要有石灰石-石膏湿法、旋转喷雾干燥法、炉内喷钙加尾部烟道增湿活化烟气脱硫工艺,海水烟气脱硫工艺等。

我国的电厂采用烟气脱硫起步较晚,采用工艺先进、耗资巨大的湿法石灰/石灰石-石膏脱硫工艺更是从 20 世纪 90 年代才开始的。随着环保意识的增强和相关环保法规的颁布实施,电厂脱硫势在必行。截止 2008 年底,中国火电脱硫装机容量达到 3.39 亿千瓦,约占火电装机总容量的 60%^[13]。中国脱硫产业已逐步完成技术国产化,形成了以石灰石-石膏为主导,氨法,氧化镁法等其为补充的多种烟气脱硫工艺技术格局。

1.2 国内外石膏板生命周期研究

国外很早就将 LCA 方法应用于工业企业及产品过程的生命周期环境影响分析。早在 1977 年,瑞典就开展了两个项目,促进了 LCA 的发展^[14]。随后,日

本于也在1995年开始对一些典型材料进行生命周期评价,并提出一个发展产品的生命周期影响评价的LCA工程五年计划^[15,16]。1998年,世界上第一本系统介绍LCA方法及概念的图书在西班牙开始出版^[17]。1993年,意大利就有专门的学术机构和研究人员运用LCA对产品进行生命周期评价^[18]。德国曾对本国的建材和包装材料等物质进行了物质流动和环境负荷的物质流分析,为指导本国的工业经济材料及产品生产的环境协调发展提供参考依据。一些对能源、交通、水、土地等LCA的基础研究也为材料的LCA的发展提供了动力^[19-21]。许多发达国家国际组织都涉入材料的环境协调性评价,包括金属材料、包装材料等多种材料^[22,23]。

国外对纸面石膏板的生命周期研究开展较早。2008年GBMA(澳大拉西亚石膏制造委员会)对澳大利亚和新西兰的石膏板有过系统的LCA分析^[24],研究石膏板从“摇篮到大门”的生命周期过程,对石膏板从天然石膏的开采,原料的生产,运输过程、石膏板的生产,以及护面纸和添加剂(淀粉)的生产进行了系统的分析,得出结论:石膏板是一种无毒害的建筑材料,每千克石膏板的综合能耗为5.66MJ。

2008年英国的WRAP(Waste and Action Programme)对该国普通石膏板(A型,1200mm×2400mm×12.5mm)的环境排放进行了生命周期分析评价^[25],通过对石膏板生命周期的各个阶段进行分析,包括废石膏板的回收过程,找出石膏板生命周期CO₂排放最集中的环节,发现石膏板原料(天然石膏和合成石膏)的生产过程,以及石膏板生产和废弃的阶段对CO₂排放贡献最大。一张普通石膏板的生命周期CO₂的排放为12kgCO₂当量,但若将石膏板的原料中加入10.5~25%的废石膏板时,石膏板整个生命周期中的CO₂排放量降低,这对降低全球温室效应起到了积极的作用。同时,该项目还研究了运输距离对石膏板回收过程的能耗和环境影响,发现废石膏板再利用的环境负荷会因运输距离的减少而降低,该项目建议集中建立大的石膏板回收站以降低运输过程的产生的能耗及污染物排放。

欧洲科学与技术协会、环境与原材料协会对纸面石膏板进行了生命周期评价,利用GaBi软件给出了纸面石膏板的生命周期清单并进行了生命周期影响分析^[26],但是由于不同地域的生产技术水平存在差异,欧洲科学与技术协会给出的报告只能作为参考,并不能代表中国的实际水平。

国外对电厂安装脱硫设备的使用寿命评价也有较早的研究。Sate Sampattagu等^[27]利用EIO模型对泰国褐煤厂安装FGD系统进行了生命周期评价分析,得出结论,火电厂安装FGD的生态效益和经济效益远远超过了安装系统内部的所造成消极环境影响,建议泰国所有的火电厂都应安装FGD系统以保证电力工业的可持续发展。Rachael A.^[28]用物理手段检验了脱硫石膏在不同条件下的物理特性证明脱

硫石膏的可用性,并用LCA方法计算了脱硫石膏从获取、使用以及废弃过程的环境排放和能源消耗。Prakaypun.W^[29]也研究了不同添加剂对天然石膏板和脱硫石膏板的力学性能的影响,认为在可控的范围内,脱硫石膏能和天然石膏具有一样的甚至更好的力学性能。

国内对脱硫系统的生命周期分析也已经有所研究,有文献^[30]报道用LCA和LCC的方法对中国丰城火电厂安装脱硫系统进行评价,研究表明,安装脱硫系统后,火电厂因燃煤造成的污染物排放降低了97%,脱硫系统的主要费用消耗在设备的投资、运行和维护上。李友平^[31]从经济、技术和环境三方面建立了燃煤电厂烟气脱硫技术指标体系,对各种FGD技术进行了综合评价,为燃煤电厂烟气脱硫技术的选择提供依据和指导。

国内对脱硫工艺方面以及脱硫费用的分析方面的研究已经非常成熟,这些研究成果对本文开展以脱硫石膏制备纸面石膏板的研究很有帮助。孔华^[32]博士在其论文中对脱硫吸收剂的沉降特性和SO₂在石灰石浆液中吸收的物性参数做了一个详细的讨论,结论表明烟气中CO₂浓度对SO₂的吸收容量基本无影响,吸收剂中的添加剂只能加快SO₂的吸收速率,但对SO₂的最终吸收容量影响不大。毛树标^[5]也在其博士论文中综合论述了烟气脱硫石膏的综合利用,讨论了脱硫石膏作为石膏板原料的经济性和市场前景分析,发现脱硫石膏同天然石膏相比具有较大的价格优势和竞争力,在人口密度较大且离石膏产地较远的城市,脱硫石膏用作石膏板更具有现实意义。田明明^[33]建立的模糊评价模型对脱硫石膏的环境影响、经济效益和技术性能三个方面进行综合后评价,得出定量的结果,为今后烟气脱硫项目的立项,建设及运行提供科学依据。张均刚^[34]通过大量实验探索改进脱硫工艺,提高脱硫效率的方法。孙晶^[35]在其论文中对火电厂湿法脱硫废水处理技术做了一系列试验研究,设计处理湿法烟气脱硫废水的工艺处理系统,并预算了处理废水的经济投资。朱元龙^[36]详细研究了烟气化学吸收的气液平衡,物料平衡,为进一步开展的研究工作提供了很好的借鉴作用。

1.3 论文选题依据

我国早在20世纪50~60年代开始利用工业废渣进行水泥工业的生产,随着经济的发展,工业的进步,工业废渣的种类和数量在不断增加,除矿渣外,粉煤灰、电石渣、脱硫石膏等相继进入建材生产领域。据不完全统计,2000年建材工业利用各类工业固体废弃物2亿多吨,占当年全国工业固体废弃物利用总量的50%以上;2004年全国综合利用各种工业废渣3.6亿吨,可节约7200万吨标准煤,节约土地110万亩^[37],同时带来可观的社会效益和企业经济效益。

我国燃煤发电厂大多采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺，脱硫石膏的产量将随着石灰石/石膏湿法烟气脱硫装置的不断建设而加速增加。据统计，2008年，脱硫石膏的排放量已占到了工业固体废物产生总量的 2%^[13]。利用脱硫石膏生产纸面石膏板，可以减少脱硫石膏的堆场投资和维护费用以及占用土地所带来的环境污染，同时可以节约天然石膏资源，减少天然石膏开采量，保护生态环境。这也符合国家提出的节能减排，建设资源节约型、环境友好型社会的要求。

纸面石膏板是一种环保、节能、绿色建材，这已经成为一种共识，但是无论从行业标准还是企业生产手册，考虑更多的是石膏板的生产过程的污染排放和能源、资源消耗，即是以“清洁生产”的概念来评价石膏板，而忽略了与产品相关的其他环节。国内目前以 LCA 为理论方法来开展石膏板生命周期的相关研究分析还未见报道，而通过 LCA 分析研究石膏板材料在生产过程中能源、资源以及环境损害方面的潜在负荷，找出两种原料生产纸面石膏板各个工序的环境热点，对企业改进生产工艺，节约资源和能源，减少污染物排放都有重要的意义；同时利用环境影响分析结果指出两种材料在环境方面的优势，引导人们进行绿色消费，提高环保意识，为我国绿色建材的发展提供动力。本论文开展的研究填补了国内石膏板 LCA 研究的空白，丰富了建材行业生命周期数据库，同时对国家和工业，特别是对纸面石膏板行业中的远景规划，以及相关产业的调整提供有力数据支持。

1.4 课题来源与研究内容

1.4.1 课题来源

本课题依托国家“十一五 863 计划项目”（材料全生命周期环境负荷研究及应用示范，基金号为 2007AA03Z432）、国家科技支撑计划（基金号为 2011BAJ04B06，2011BAC04B06）。将生命周期评价方法引入我国纸面石膏板生产行业，研究两种不同原料（脱硫石膏、天然石膏）生产纸面石膏板生命周期的环境负荷影响。

1.4.2 研究内容

本文的主要研究内容分为以下几个部分：1) 探寻可靠的数据及计算方法计算出两种石膏板产品的生命周期清单；2) 分析、评价纸面石膏板在其生命周期过程各工序环节中涉及的资源、能源及环境排放问题；3) 比较两种石膏板典型生产工艺过程各工序过程的环境行为的差异，为我国石膏板行业污染物排放的控制提出相关的建议措施。

预期目标是计算出我国纸面石膏板行业层面生命周期过程的环境负荷，包括天然石膏板和脱硫石膏板的各个工序的资源、能源消耗和环境排放，找出两种原料石膏板的相应环境热点工序，提出可行的改进措施和建议。为我国石膏板行业的污染物排放标准的制定以及可持续发展提供参考依据，同时，以脱硫石膏生产纸面石膏板作为固废利用 LCA 的案例分析，也将推动 LCA 的方法学框架研究的向前发展，进一步完善我国建材行业 LCA 数据库。

第2章 评价方法体系的构建与选取

一种产品从原料开采开始，经过原料加工、产品制造、产品包装、运输和销售，然后经消费者使用、回收和维修，最终再循环或作为废弃物处理和处置，整个过程称为产品的生命周期。生命周期评价是针对这一过程的一种评价方法。它评价的思想力图在源头预防和减少环境问题，而不是问题出现后再去解决，它关注的是产品的生产、销售、消费和回收过程等过程以及在产品的功能、能耗和排污之间寻求合理的平衡。它是鉴定产品环境性能的评价工具，对产品或服务“从摇篮到坟墓”的全过程评价，强调分析产品或行为在生命周期各阶段对环境的影响，它是一种开放性的评价体系，针对不同的产品系统，可以应用不同的技术和方法。

2.1 LCA 的方法学框架

1990年由国际环境毒理学与化学学会（SETAC）首次主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会，并首次提出了“生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）”的概念^[38]。该研讨会将LCA定义为一种分阶段的评价方法，并将LCA方法的实施框架为三角形模型，此后的几年里，LCA的相关研究都以此为基础展开，并取得了大量的研究成果。图2-1为ISO（国际标准化组织）新定义的LCA技术框架。

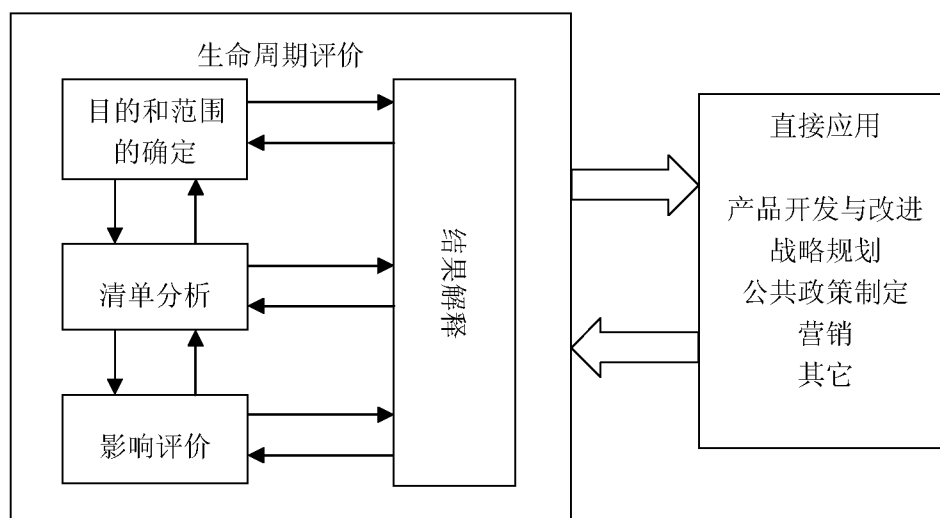


图 2-1 生命周期评价技术框架

Fig.2-1 The technique framework of life cycle assessment

随着 LCA 方法的进一步发展, LCA 整体技术框架出现了新的变化。1997 年, ISO 颁布了《环境管理—生命周期评价原则和框架》标准 (ISO14040), 将生命周期评价的技术框架在原来 SETAC 框架基础上做了一些改动, 包含目的与范围的确定 (Goal and Scope Definition)、清单分析 (Invention Analysis)、影响评价 (Impact Assessment) 和结果解释 (Life Cycle Interpretation) 等四个组成部分^[39]。

2.1.1 目的与范围的确定

要进行生命周期评价, 首先要明确评价的目的与范围 (Goal and Scope Definition), 它是生命周期评价的第一步, 直接关系到评价工作和研究结果的准确与否。LCA 的研究目的主要有环境绩效评定和工艺改进分析。根据研究的目的来确定研究的范围, 为了实现生产和产频系统环境负荷评价的可行性, 必须对实际的产品系统寿命周期做一些限制, 即确定系统的边界。同时, 为了定量的描述产品系统各方面的情况, 就必须一定的功能为基准, 即选取功能单位。本文在比较天然石膏板和脱硫石膏板生命周期环境的负荷时, 是以生产 1m^2 的石膏板产品为基准的。需要说明的是, LCA 本身是一个反复的过程, 在进行研究的过程中, 必要时可以对研究的范围进行修改。

2.1.2 生命周期清单分析

LCI (Life Cycle Inventory, LCI) 是生命周期评价中最重要的部分, 也是环境影响评价的基础。它是一份关于研究系统的输入和输出的数据清单, 通过对研究对象资源和能源的消耗以及污染物的排放数据进行收集、量化和汇编, 为后面的评价和解释提供数据基础。清单分析有助于研究人员综合的认识相互关联的产品系统确定研究目的和范围, 并能够通过量化分析产品系统的化境输入输出数据, 识别产品系统中环境负荷突出的单元过程, 以进行目标的改进。

基于生命周期的技术框架而言, 生命周期清单分析是目前 LCA 中发展最为完善的一部分。数据收集时应避免数据的重复计算或断档, 并保证收集数据的有效性, 遇到数据缺口时, 尽量寻求替代数据予以填补, 并通过敏感型分析来确定替代数据的重要性。当出现多产品系统及再循环过程时, 要考虑根据既定的程序将物流、能流和环境排放等合理地分配到各个产品。分配参数可以采用物质干重、化学计量和反应热等, 在找不到明确的物理分配方法时, 也可采用产品的经济价值进行分配。本课题研究中, 脱硫石膏既是火电厂发电的副产物又是石膏板的原料, 当计算其作为原料时应当分担的环境负荷时, 采用了脱硫石膏与电的经济价值比作为分配因子。

2.1.3 影响评价

LCIA (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) 是将生命周期清单结果模型化, 并用类型参数来精简和解释生命周期清单结果, 以更能了解该产品系统环境影响程度。根据 ISO14040 的规定^[40], 影响分析阶段的一般程序是选用不同影响类型参数将清单结果进行汇总, 此外还可以进行指标结果的归一化, 分组或加权等可选要素。LCIA 技术含量高、难度大, 被认为是目前为止生命周期影响评价中发展最不完善的一个环节。有关本课题中相关评价的模型将在本章 2.2 中作详细的论述。

2.1.4 结果解释

结果解释是将清单分析和影响评价的结果进行归纳, 得到与产品系统有关的结论或建议件是生命周期结果解释。它是系统的评估在产品、工艺或活动的整个生命周期内减少资源、能源消耗和环境排放的需求与可能性, 主要包括在清单研究结果上重大问题的识别; 通过完整性、敏感性和一致性检查, 对 LCA 或清单结果进行评估; 形成结论, 提出建议和最终报告。

2.2 影响评价模型及方法的确定

生命周期分析是将清单中输入输出数据划归到相应的影响类型, 并根据选择的类型参数得出结果, 它通过对清单结果进行定性或定量排序, 评估各种排放数据对产品所造成的环境影响, 为下一步的生命周期解释阶段提供信息。

结合纸面石膏板行业特点, 本论文中针对石膏板生命周期评价步骤包括影响类型、类型参数和特征化模型的选择、分类和特征化。同时对可选要素的选择, 论文中只选择进行归一化分析。

2.2.1 影响类型、类型参数和特征化模型的选择

目前, 国际上没有统一的影响分类方法, 一般来讲, 环境影响类型的既可以选用传统类型如酸化效应、人体健康损害、富营养化等, 也可以由决策者根据实际情况选用能够代表特殊问题的影响类型。但总的来说, 所选择的影响类型能够符合 LCA 的研究和目的, 并能全面反映产品系统的环境问题。

根据本论文的研究内容, 根据环境影响类型确定的原则, 选择目前国际上基本认同的影响类别和类型参数, 包括人体健康损害 (Human Toxicity, HT)、酸化效应 (Acidification Potential, AP)、温室效应 (Global Warming Potential, GWP)、光化学烟雾 (Photochemical Oxidation Potential, POCP) 和不可再生资源消耗 (A-biotic Depletion Potential, ADP), 与石膏板生命周期相关的影响类

型和类型参数如下表 2-1 所示。

表 2-1 纸面石膏板生命周期相关的影响类型和类型参数

Table 2-1 Impact category and category indicator for the gypsum plasterboard

环境影响类型	类型参数
酸化效应(AP)	kg (SO ₂ 当量)
人体健康损害(HT)	kg (1,4-二氯苯当量)
温室效应(GWP)	kg (CO ₂ 当量)
光化学烟雾(POCP)	kg (乙烯当量)
不可再生资源消耗(ADP)	kg (铍当量)

2.2.2 分类

与本研究相关的环境影响类别被确定以后,就将在生命周期清单中会造成那些影响的环境负荷或污染排放因子归类到该环境影响类别之下,这种定性的过程称作分类。SETAC^[23]建议将涉及的环境类型分为生态健康、人类健康、资源消耗等,在每一类下又有许多子类如生态影响下的全球变暖、臭氧层破坏、酸化效应等。分类时,不同的因子可能引发相同的环境影响,而一个因子也能引发数类的环境影响,此时,需要采用合理的分配机制将环境负荷分配到不同的影响类型下,一般采用串联机制(如 NO_x 在光化学效应和酸化效应以分配系数 1 计算环境影响)、并联机制(如 NO_x 在酸化效应和人体健康损害效应以分配系数 0.5 计算环境影响)。但是在实际操作中,如果对分类没有特殊的要求,可以对其进行简化处理。本论文中对涉及多个环境影响类型的环境负荷项目时,一律采用串联机制进行分配,即假设它们的分配系数均为 1.0。与纸面石膏板相关的环境影响分类如表 2-2 所示。

表 2-2 纸面石膏板的环境影响类型分类

Table 2-2 Classification of environment impact categories of plasterboard

环境影响类型	环境负荷项目
酸化效应	NO _x , SO ₂
人体健康损害	NO _x , SO ₂ , 颗粒物
温室效应	CO ₂ , CH ₄
光化学烟雾	CO, NO _x , SO ₂ , NMVOC
不可再生资源消耗	原煤, 原油, 天然气, 石灰石, 天然石膏

2.2.3 特征化

特征化就是选择一种衡量环境影响的方式、透过特定评估工具的应用,将不同的负荷或排放因子在各形态环境问题中的潜在影响加以分析,并量化成相同的形态或是同单位的大小。它是以环境过程中的有关科学知识为基础,将每一种影响大类中的不同环境影响类型进行汇总,得到量化指标的定量过程。例如可以将各种温室效应气体的效应量,全部以CO₂的当量来表示,或者将不同的产生酸化效应的气体的酸化性用相对的酸化风险来表示等。

特征化是定量分析的一步,实际应用中主要是建立特征化模型,即是用相关的物理、化学、生物和毒性数据来描述与清单参数相关的潜在影响,然后将这种信息与分类的清单数据联系起来描述每一影响种类的潜在的或实际的影响。目前国际上常用的特征化计算模型主要有以下几种^[23]:

(1) 负荷评估模型 (Loading Assessment) 在这类模型中,环境影响是根据清单分析中相关资料的物理量的大小来评价的。此类模型中,各影响因子所造成的环境影响重要性相同,特征化的方式通过是否有影响、影响相对大小、或是“越少越好”等来表现。

(2) 当量评价模型 (Equivalency Assessment) 这类模型是根据某一当量因子作为转换的基础,汇总得到以基准物质量为单位的环境影响潜力大小。如我们根据纸面石膏板产品生命周期全过程所排放的二氧化碳和甲烷量,就可以根据两种温室气体间的当量关系进行汇总,最后得到总的全球变暖潜力的大小。这种方法建立在科学研究的基础上,其结果不受时间和地理因素的影响,同一种压力因子,无论其暴露途径、地点等条件有何不同,它所能产生的潜在环境影响都认为是一样的。临界体积法和生态稀缺值法都属于当量评价模型。

(3) 毒性和持续性及生物积累性评估模型 (Toxicity Persistence and Bioaccumulation) 这类模型是根据产品在生命周期中排放的污染物的化学特性,如致癌性和可燃性等为基础来汇总清单数据,进行定性评估。但是这种方法有一定的局限性,目前主要适用于人体健康影响评估。

(4) 总体暴露效应模型 (Generic Exposure/Effect Assessment) 一般在这种模型中,通过分析某些特殊物质的排放所导致的暴露和效应来评估潜在的环境影响,有时,背景浓度的考察也会被考虑在内。与其他计算模型相比,这种模型简单明了,对每类环境影响专题皆可得到总体性的效应值,同时,对于非专业背景的环境管理决策者而言,这种模型所得的结果更容易让其了解产品活动的环境影响情况。

(5) 点源暴露效应模型 (Site-Specific Exposure/Effect Assessment) 与总体暴露效应模型不同,点源暴露效应模型排放物的汇总必须将特定位置的背景浓

度考虑在内。这类模型是以相关区域或场所的影响信息为基础，分析一些特殊物质的排放所导致的特定位置的环境影响，来确定产品系统实际的影响。

以上的五种计算模型方法似乎给予 LCA 评估方式很大的选择空间，其实不然。负荷评价模型只是应用了“小即是好”的原则，它汇总了清单中的数据，却没有分析产品系统输入输出所造成的环境负荷。毒性和持续性及生物积累性评估模型和总体暴露效应模型在应用范围上和准确性上有较大的局限性；点源暴露效应不适用多流程的生命周期分析，更多的适合用在环境影响评估（EIA）中。当量评价模型是目前 LCA 研究中广泛应用的计算模型，本论文在对纸面石膏板环境影响进行特征化研究时，采用的是当量评价模型。

与本文石膏板生命周期相关的各类环境影响类型的计算公式^[37]如下：

（1）温室效应 大气中的 CO₂ 和其他温室气体的增加一般来说会产生全球变暖的影响，从而提高全球平均气温和引起气候的变化。影响特征化是以 CO₂（系数为 1.0）最为参照物，按其当量系数进行计算。采用下式（2-1）计算：

$$IR_{GWP} = \sum_i GWP_i \times m_i \quad (2-1)$$

式中， IR_{GWP} ——温室效应的特征化参照结果；

GWP_i —— i 物质相对于 CO₂ 的温室效应特征化因子；

m_i —— i 物质的排放量；

（2）酸化效应 污染物中的 SO₂ 和氢氧化物的释放可能对导致酸性降雨产生一定的作用和贡献。影响特征化是以 SO₂（系数为 1.0）作为参照物，按其当量系数进行计算。采用式（2-2）计算：

$$IR_{AP} = \sum_i AP_i \times m_i \quad (2-2)$$

式中， IR_{AP} ——酸化效应的特征化参照结果；

AP_i —— i 物质相对于 SO₂ 的酸化效应当量因子；

m_i —— i 物质的排放量；

（3）人体健康损害 那些能够长期引起人体毒害，有损人类健康状况的物质。影响特征化是以 1,4-二氯苯（系数为 1.0）作为参照物，按其当量系数进行计算。采用式（2-3）计算：

$$IR_{HT} = \sum_i HT_i \times m_i \quad (2-3)$$

式中， IR_{HT} ——人体健康损害的特征化参照结果；

HT_i —— i 物质相对于 1,4-二氯苯的人体健康损害效应当量因子；

m_i —— i 物质的排放量；

(4) 光化学烟雾形成 大气中的自由基、碳氢化合物与氮氧化物通过光化学反应产生该类环境影响。影响特征化是以化合物乙烯(系数为1.0)作为参照物,按其当量系数进行计算。采用式(2-4)进行计算:

$$IR_{POCP} = \sum_i POCP_i \times m_i \quad (2-4)$$

式中, IR_{POCP} ——光化学烟雾形成的特征化参照结果;

$POCP_i$ —— i 物质相对于乙烯的光化学臭氧形成效应当量因子;

m_i —— i 物质的排放量;

(5) 不可再生资源消耗 一些非生命的资源如矿石、化石燃料资源消耗的影响潜势推荐采用式(2-5)进行计算:

$$IR_{ADP} = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (2-5)$$

式中, IR_{ADP} ——不可再生资源消耗的特征化结果;

ADP_i ——不可再生资源 i 的消耗潜力,即资源消耗的特征化因子;

m_i ——不可再生资源 i 的消耗量;

石膏板生命周期中环境影响类型的特征化因子采用在世界范围内广泛应用的数值见表2-3所示。不可再生资源消耗特征化因子采用相关文献^[41]修正CML模型后的矿产资源耗竭特征化因子。

表 2-3 环境影响特征化因子

Table2-3 The characteristic coefficient for environment impact

环境影响类型	HT	ADP	GWP	AP	POCP
特征化基准	kg-(1,4)-二氯苯	kg-铈	kg-CO ₂	kg-SO ₂	kg-C ₂ H ₄
CO ₂	—	—	1.00E+00	—	—
SO ₂	9.60E-02	—	—	1.00E+00	4.80E-02
CH ₄	—	—	2.10E+01	—	—
CO	—	—	—	—	2.70E-02
NO _x	1.20E+00	—	—	7.00E-01	2.80E-02
颗粒物	8.20E-01	—	—	—	—
NMVOC	—	—	—	—	4.16E-01
原煤	—	5.69E-08	—	—	—
原油	—	1.42E-04	—	—	—
天然气	—	1.18E-07	—	—	—
天然石膏	—	1.90E-07	—	—	—
石灰石	—	3.16E-06	—	—	—

2.2.4 选择性步骤

为了全面体现产品系统的环境影响，比较和衡量不同影响类型的环境损害，LCIA 阶段的可选要素包括加权、分组和归一化等选择性步骤。用加权或分级的方法对生命周期清单分析和特征化结果进行处理能够更好的量化产品的环境影响，本文选择将环境影响类型特征化结果进行加权和归一化处理。加权按照等权重（即各种环境影响类型的权重系数均取 1）加权处理。指标结果归一化便于对所研究系统中每一项指标结果的相对值的了解，使来自于不同影响目录的影响值具有可比较性。该步骤是以类型参数计算结果除以选定的基准值来加以转换。本文采用的归一化基准值是国际上推荐采用的世界范围内的归一化基准值^[42]，如下表 2-4 所示，矿产资源耗竭的归一化基准值采用相关文献^[41]修正的 CML 模型后的结果，为 2.14×10^{10} kg 镉当量。

表 2-4 国内外的归一化基准值

Table2-4 Factors for normalization with the annual extent of the baseline impact categories

环境影响类型	单位	归一化基准
酸化效应 (AP)	kg(SO ₂ 当量)·yr ⁻¹	2.99E+11
人体健康损害 (HT)	kg(1,4-二氯苯当量)·yr ⁻¹	4.98E+13
温室效应 (GWP)	kg(CO ₂ 当量)·yr ⁻¹	3.86E+13
光化学烟雾 (POCP)	kg(C ₂ H ₄ 当量)·yr ⁻¹	4.55E+10

2.3 本章小结

本章主要对生命周期评价方法的技术框架进行了总结论述，提出了适合我国石膏板行业的生命周期评价方法体系。确定了石膏板生命周期中主要的考虑的五种环境影响类型是温室效应、酸化效应、不可再生资源耗竭、光化学烟雾以及人体健康损害效应。选择环境影响计算模型中的当量评价模型，采用国际上通用的特征化计算方法和各种环境影响类型的当量因子，并选择了清单数据归一化和等权加重处理，作为对产品不同环境影响类型的对比手段。

第3章 天然石膏纸面石膏板的生命周期分析

我国是石膏板生产和出口大国,从1999年开始,我国石膏板的需求量以每年平均25%以上的速度递增,2006年全国石膏板产量达7.14亿平方米,石膏板出口量达3.72亿千克^[43]。石膏板作为一种环保节能的新型墙体材料,是替代黏土砖的最佳产品,已经成为许多公用建筑隔墙与吊顶的首选材料。随着我国新型墙体材料的市场需求加大,石膏板行业将是个具有旺盛生命力的朝阳行业,在今后几年内一直蓬勃发展。若能定量研究纸面石膏板生命周期的环境负荷,将对我国石膏板工业可持续发展之路提供参考依据。

3.1 目的与范围的确定

3.1.1 研究目的

研究目的是计算以天然石膏为原料的石膏板企业生产单位平方米石膏板产品的环境负荷状况。通过对石膏板进行生命周期分析,定量的给出材料生命周期各个阶段的环境负荷,找出以天然石膏为原料生产纸面石膏板的主要环境影响类型及主要环境负荷阶段,得出我国2008年纸面石膏(天然石膏)板行业的环境负荷的平均水平。

3.1.2 研究范围

目前全国90%的石膏板皆由大中型企业生产,因此根据研究的目的,结合中国石膏板行业的实际情况,研究产能2000万平方米以上石膏板企业纸面石膏板生产过程中的物能消耗和环境影响。以目前最常用产品尺寸(1200×2400×9.5mm)为研究对象,功能单位选取为1平方米9.5mm厚的普通石膏板。研究范围是纸面石膏板生产过程的物质、能源消耗和主要污染物的排放,包括纸面石膏板生产的主要原料和能源消耗,涉及天然石膏、煤、电的消耗以及石膏板生产过程中气体的排放,系统边界如图3-1。涵盖纸面石膏板原材料开采到产品生产的生命周期过程,涉及破碎、粉磨、煅烧、成型、干燥各个工序过程。原材料的运输过程也在研究的范围内,由于国内石膏板的回收再利用未形成规模,本论文不考虑石膏板的再循环利用问题及石膏板的废弃过程。

石膏板制造过程的所需要的护面纸和粘合剂等外加剂用量较少,小于总质量的5%,且涉及该类原料的相关数据无法在现有的统计资料中获取,因此,护面纸和外加剂的生产和使用过程对纸面石膏板生命周期造成的环境影响亦不在本章的考虑范围中。

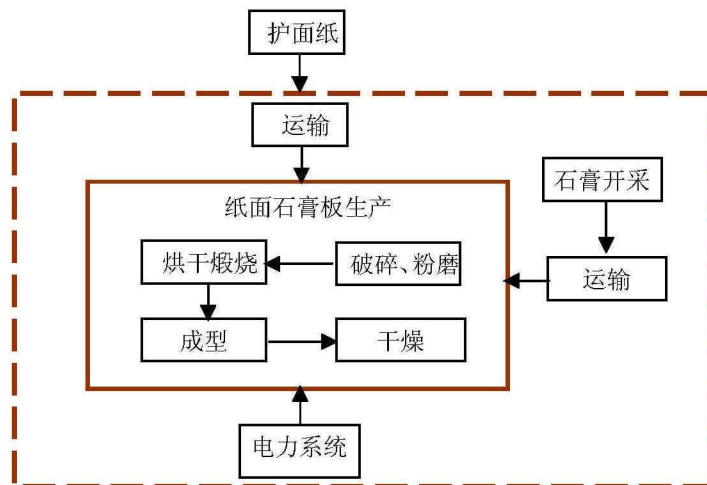


图 3-1 天然石膏板的系统边界

Fig.3-1 The system boundary of natural gypsum plasterboard

3.2 数据收集与整理

纸面石膏板生命周期清单由资源、能源消耗和污染物排放构成。资源消耗是指原材料的消耗包括天然石膏、拌合水、护面纸、添加剂的消耗，能源消耗包括原煤的消耗以及电力的消耗。污染物排放包括直接排放和间接排放：直接排放是指系统运转过程中污染物的排放，包括石膏板生产的整个过程的排放；间接排放是指原材料以及能源生产过程中产生的污染物排放，如天然石膏开采阶段、能源的生产阶段、原料与能源的运输阶段造成的排放。

石膏板生产过程中，煅烧和干燥阶段主要能源消耗为原煤，为了降低生产过程的污染物的排放，石膏板生产厂家一般选用低硫煤（含硫量小于 0.6%），同时使用除尘效率在 99%的袋式除尘器除尘，保证石膏板生产过程排出的废气对大气环境影响降到最低。燃煤过程的各种气态污染物的排放因子参照文献 [41,44]中的方法计算，所得结果如表 3-1 所示。

表 3-1 燃煤过程直接排放

Table3-1 The direct emission due to the combustion of coal

污染物	单位	数值	污染物	单位	数值
CO ₂	kg/kg	1.70E+00	CO	kg/kg	3.14E-03
SO ₂	kg/kg	9.90E-03	CH ₄	kg/kg	2.09E-04
NO _x	kg/kg	7.56E-06	颗粒物	kg/kg	1.05E-03

3.2.1 电力清单的更新

石膏板生产过程能源消耗比较简单，主要是燃煤和二次能源电力。相关文

献^[45]编制了 2002 年我国单位电力生产及售电清单，为我国开展其它相关 LCA 研究奠定了基础。但在其考虑的研究范围中，电厂脱硫装置安装率只有 2%，随着国家对环保政策的大力执行，2008 年我国火电厂脱硫装置率达到 60%，因此继续使用 2002 年的电力清单计算本课题有关的数据是不准确的。本节通过收集、整理 2008 年电厂发电的相关统计数据，对 2008 年的电力清单进行了修正，包括 2008 年火电厂的单位发电清单和 2008 年电力工业单位售电清单。

3.2.1.1 化石能源消耗 由 2008 年中国能源平衡表^[46]可得到中国火力发电的实物能源消耗情况，见表 3-2 所示。

表 3-2 2008 年火力发电的燃料消耗

Table3-2 Fuels consumption by thermal power plants in 2008

	燃煤品种	单位	消耗量
燃煤	原煤	万 t	132516.65
	洗精煤	万 t	26.14
	其他洗煤	万 t	2808.93
燃气	天然气	亿 m ³	109.41
	焦炉煤气	亿 m ³	89.23
	其他煤气	亿 m ³	100.85
燃油	原油	万 t	8.87
	汽油	万 t	0.12
	柴油	万 t	185.13
	燃料油	万 t	347.53

在计算资源消耗和污染物排放时，要对原煤和原油在加工过程中的多种产品进行分配。以各种能源产品在其总发热值中所占比重作为分配原则。热值的计算采用平均低位发热量。表 3-3 为各种能源的平均低位发热量^[47]。

表 3-3 各种能源的平均低位发热量

Table3-3 Average low heat value of various energy

能源名称	单位	平均低位发热量	能源名称	单位	平均低位发热量
原煤	kJ/kg	20908	煤油	kJ/kg	43070
洗精煤	kJ/kg	26344	柴油	kJ/kg	42652
其他洗煤	kJ/kg	9575	液化石油气	kJ/m ³	50179
焦炭	kJ/kg	28435	炼厂干气	kJ/m ³	46055
原油	kJ/kg	41816	天然气	kJ/m ³	37238
燃料油	kJ/kg	41816	焦炉煤气	kJ/m ³	17354
汽油	kJ/kg	43070	其他煤气	kJ/m ³	16970

(1) 洗选煤的物流分配 表 3-4 为 2008 年中国洗选煤的投入产出表, 以平均低位发热量为分配基准, 计算得到洗精煤和其他洗煤的分配系数为 0.897, 0.103, 从而计算出 2008 年我国每生产 1kg 洗精煤需要消耗 1.33kg 原煤, 每生产 1kg 其他洗煤需要消耗 0.494kg 原煤。

表 3-4 2008 年中国选洗煤投入产出表

能源品种	单位	投入量	产出量
原煤	万 t	57236.88	—
洗精煤	万 t	—	38496.23
其他洗煤	万 t	—	11982.80

(2) 炼油工业的物流分配 表 3-5 为中国炼油工业的投入产出表。以柴油、汽油等在所有产出成品油总发热量中所占比重作为分配原则, 原油裂解的各种产品分配系数如下图 3-2 所示。

表 3-5 中国炼油工业的投入产出

能源品种	单位	投入量	产出量
原油	万 t	34095.32	—
汽油	万 t	—	6347.18
煤油	万 t	—	1158.90
柴油	万 t	—	13409.15
燃料油	万 t	—	1737.40
液化石油气	万 t	—	1914.78
炼厂干气	万 t	—	1096.03

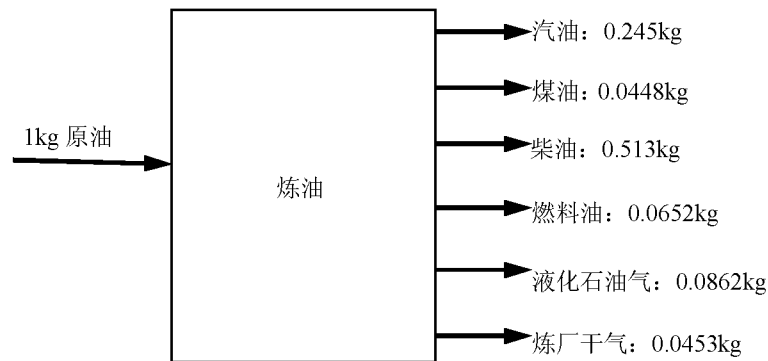


图 3-2 2008 年中国炼油工业次级能源的分配关系

Fig.3-2 Allocation for petroleum refineries industry of China in 2008

由图 3-2 计算得到的原油提炼下游产品的基本物质流如图 3-3 所示,可知每得到 1kg 汽油和 1kg 煤油均需要消耗 1.32kg 原油;得到 1kg 柴油则需要消耗 1.30kg 原油;而生产 1kg 的燃料油、液化石油气和炼厂干气则分别消耗原油 1.28kg, 1.54kg, 1.41kg。

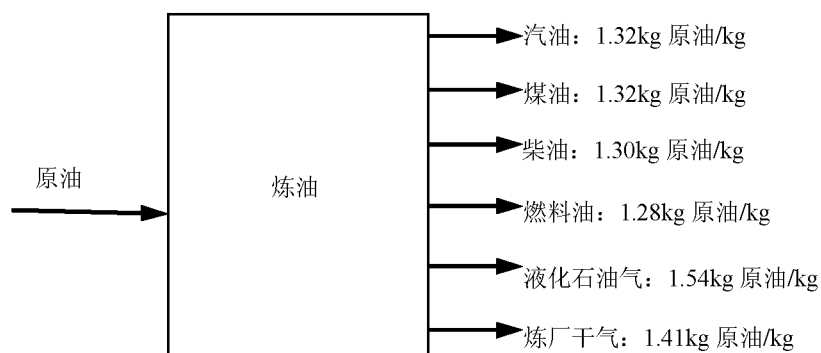


图 3-3 2008 年中国炼油工业的物质流

Fig.3-3 The material flow of China petroleum refineries industry

(3) 炼焦工业的物流分配 表 3-6 为 2008 年中国炼焦工业的投入产出表。将表中的洗精煤和其他洗煤按照上文计算的分配系数折算成原煤,得到 2008 年中国炼焦工业的基本输入情况如表 3-6 所示。

表 3-6 2008 年中国炼焦工业的投入产出

Table3-6 Primary input and output of coking industry in China

能源品种	单位	投入	产出量
原煤	万 t	5616.13	—
洗精煤	万 t	35752.75	—
其他洗煤	万 t	92.78	—
折合原煤总计	万 t	53324.92	—
焦炭	万 t	—	32031.50
焦炉煤气	亿 m ³	—	613.11
其它煤气	亿 m ³	—	5.56

采用与相同的分配基准,在焦炭、焦炉煤气与其他煤气进行分配。得到三者之间的分配系数分别为 0.895, 0.105, 0.000927,从而可计算出 2008 年我国炼焦工业中的焦炭、焦炉煤气与其他煤气的初级能源消耗总量,如表 3-7 所示。

表 3-7 2008 年中国炼焦工业产品的初级能源消耗

Table3-7 Primary energy consumption by coking product in China

能源品种	单位	折合原煤消耗
焦炭	万 t	47702.96
焦炉煤气	万 t	5572.54
其他煤气	万 t	49.42

(4) 炼气工业的物流分配 表 3-8 为 2008 年中国炼气工业的能源消耗和次级能源的投入产出。按照前面计算出的原煤、原油分配系数，对表中的洗精煤、其它洗煤进行原煤折合，对燃料油进行原油折合，得到的表如表 3-8 所示。

表 3-8 2008 年中国制气工业的投入产出

Table3-8 Primary input and output of gas works industry in China

能源品种	单位	投入/产出量	能源品种	单位	投入/产出量
输入项目			输入项目		
原煤	万 t	587.29	天然气	亿 m ³	6.04
洗精煤	万 t	639.92	输出项目		
折合原煤	万 t	1440.38	焦炭	万 t	94.82
燃料油	万 t	2.03	焦炉煤气	亿 m ³	15.66
折合原油	万 t	2.60	其它煤气	亿 m ³	155.00

采用平均低位发热量为分配基准，炼气工业中，焦炭、焦炉煤气和其他煤气之间的分配系数分别为 0.0850，0.0857，0.829。进一步计算可得 2008 年我国制气工业中各种产品的初级能源消耗总量，见表 3-9。

表 3-9 2008 年中国制气工业产品的初级能源消耗

Table3-9 Primary energy consumption by gas works product in China

能源品种	折合原煤消耗	折合原油消耗	折合天然气消耗
	(万 t)	(万 t)	(亿 m ³)
焦炭	122.44	0.221	0.513
焦炉煤气	123.42	0.223	0.518
其他煤气	1194.53	2.15	5.01

由表 3-6—表 3-9 中的相关数据可得 2008 年中国焦炭、焦炉煤气和其它煤气生产的初级能源消耗强度，见表 3-10 所示。

表 3-10 2008 年中国焦炭和煤气生产的初级能源消耗

Table3-10 Primary energy consumption of coking and coal gas industry in China

能源品种	单位	原煤消耗强度	原油消耗强度
焦炭	kg/kg	1.49	6.87×10^{-6}
焦炉煤气	kg/m ³	9.06×10^{-1}	3.54×10^{-5}
其它煤气	kg/m ³	7.75×10^{-1}	1.34×10^{-3}

通过上述各项次级能源转化成初级能源的因子的分析，将 2008 年火力发电的燃料消耗转化为初级资源的消耗形式，合并后的资源消耗清单结果见表 3-11。

表 3-11 2008 年火力发电的资源消耗清单

Table3-11 Fuels consumption by thermal power plants in China

燃料品种	单位	消耗量
原煤	万 t	135528.1
天然气	亿 m ³	112.63
原油	万 t	696.61

3.2.1.2 污染物直接排放 由电力年鉴^[6]可知，2008 年火力发电 SO₂ 的排放量为 1050 万吨，NO_x 的排放量为 810.324 万吨。烟尘排放总量为 330 万吨。其它气体排放按排放因子乘以总量的计算方法进行估算。结合本研究考虑的环境影响类型，本文对发电过程的重金属排放及水电、核电发电过程的放射性物质排放不予考虑。火力发电矿石燃料各气体的排放因子如下表 3-12 所示^[48]。

表 3-12 火力发电化石燃料的气体排放因子

Table3-12 Emission factors for fossil fuels in thermal power plants

项目	单位	CO ₂	CO	CH ₄	NMVOC
原煤	kg/kg	1.71E+00	2.22E-03	1.67E-05	5.23E-04
原油	kg/kg	3.01E+00	1.46E-02	1.67E-04	8.36E-05
天然气	kg/m ³	2.06E+00	1.71E-03	2.23E-04	1.49E-04

根据表 3-11 和表 3-12 中的相关数据可以得到 2008 年我国电力工业火力发电的主要气态污染物排放总量，如表 3-13 所示。

表 3-13 2008 年我国电力工业气态污染物排放总量(t)

Table3-13 Air pollutants emitted from thermal power plants in China(t)

排放量	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	NMVOC	烟尘
原煤	2.32E+09	—	—	3.00E+06	2.26E+04	7.09E+05	—
原油	2.10E+07	—	—	1.02E+05	1.16E+03	5.82E+02	—
天然气	2.32E+07	—	—	1.93E+04	2.51E+03	1.68E+03	—
合计	2.36E+09	1.05E+07	8.10E+06	3.12E+06	2.63E+04	7.11E+05	3.30E+06

3.2.1.3 燃料生产与运输的环境排放 与火电厂发电过程相关的几种燃料的生产与运输过程的气态污染物排放数据参考相关文献^[48]。具体数据如表 3-14 所示。

表 3-14 几种燃料生产与运输的气态污染物排放

Table 3-14 Air pollutants emitted during the production and transportation of fuels

排放量	单位	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	NM VOC	烟尘
原煤	kg/kg	2.72E-02	7.36E-04	1.22E-03	1.96E-04	4.45E-03	1.88E-04	3.24E-04
原油	kg/kg	2.73E-01	9.63E-04	2.05E-03	7.00E-03	2.54E-03	4.83E-04	1.32E-04
天然气	kg/m ³	6.61E-01	9.36E-04	1.29E-03	3.23E-04	6.71E-03	4.91E-04	3.01E-05

3.2.1.4 电力工业清单 2008 年，全国发电量为 34510 亿 kWh，火电发电量为 28030 亿 kWh，全国供电量为 30438 亿 kWh^[5]。结合以上分析，可以得到 2008 年我国火电厂单位发电与全国单位售电的能源消耗和环境排放清单，如表 3-15，3-16 所示。

表 3-15 2008 年我国单位火力发电生命周期清单

Table3-15 Life cycle inventory of 1kWh electricity production in thermal plant

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	原煤	kg/kWh	4.84E-01	污	NO _x kg/kWh	3.49E-03
	原油	kg/kWh	2.49E-03	染	CO kg/kWh	1.23E-03
	天然气	m ³ /kWh	4.02E-03	物	CH ₄ kg/kWh	2.19E-03
污染物排放	CO ₂	kg/kWh	8.59E-01	排	NM VOC kg/kWh	3.48E-04
	SO ₂	kg/kWh	4.11E-03	放	颗粒物 kg/kWh	1.33E-03

表 3-16 2008 年全国单位售电的生命周期清单

Table3-16 Life cycle inventory of 1kwh electricity using in China

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	原煤	kg/kWh	4.44E-01	污	NO _x kg/kWh	3.20E-03
	原油	kg/kWh	2.28E-03	染	CO kg/kWh	1.13E-03
	天然气	m ³ /kWh	3.69E-03	物	CH ₄ kg/kWh	2.01E-03
污染物排放	CO ₂	kg/kWh	7.88E-01	排	NM VOC kg/kWh	3.19E-04
	SO ₂	kg/kWh	3.77E-03	放	颗粒物 kg/kWh	1.22E-03

将 2008 年单位售电清单结果与 2002 年^[49]比较，发现单位售电煤耗降低 13g。环境排放方面，各种污染物的排放均有降低，其中比较明显的是 SO₂ 和 NO_x，这与我国火力发电脱硫、脱硝技术的推广有很大关系。2002 年我国脱硫发电机组不到 2%，脱硝技术刚刚起步，2008 年，我国脱硫设备在火电厂的覆盖率已经达到 60%。脱硝技术也开始形成规模，烟气脱硝装置在 2007 年底已达到装机容量为 1125 万 KW^[49]，占 07 年发电设备总装机容量的 1.58%。

3.2.2 石膏板生产过程原料消耗

研究的对象是按照国标要求生产的普通纸面石膏板，具有倒角形棱边，规格尺寸为 $1200\times 2400\times 9.5\text{mm}$ ，具有相对固定配方，各项指标均满足国家要求。根据纸面石膏板国家标准^[50]规定，9.5mm厚石膏板板材的面密度不得高于 9.5kg/m^2 。近年来，我国的石膏板企业积极推进技术创新，由实际工厂调研的结果显示，9.5mm厚的石膏板单位面积质量在 $6.8\sim 7.2\text{kg/m}^2$ 左右。生产石膏板所需的各种原料和各项指标要求主要有如下几项：

(1) 石膏 用作生产石膏板的天然石膏品位较高，一般在75~85%左右。经过 $120\sim 220^\circ\text{C}$ ^[3]高温煅烧后的建筑石膏含自由水小于5%，无毒、无味、无公害，是一种理想的绿色建筑材料。本研究中，每平方米9.5mm厚普通石膏板投入的石膏原料为7kg。

(2) 水膏比 水膏比是指调和水与建筑石膏的比值，它直接影响石膏料浆的稠度、凝结时间及产品的强度，合适的水膏比是正常稳定生产的首要条件之一。对于品位在80%左右的建筑石膏，其水膏比控制在75%~80%左右，对于品位大于85%的石膏，其水膏比要大于80%^[3]。本文以水膏比为80%计算拌合水的量为 4.72kg/m^2 。

(3) 护面纸 护面纸占纸面石膏板重量不到5%，而纸面石膏板的强度60%^[51]以上由护面纸承担，护面纸并且还影响石膏板的表面平整度、板的边部形状等。因此，对护面纸的定量、均匀性、强度、透气度、吸水性等都有严格的要求。

石膏板中护面纸主要是用废旧报纸，纸板，重新利用回收后制成，以废纸为原料的造纸过程可以大幅度节水，排出的废水量很少^[52]。有报道^[53,54]以废纸为原料的纸板厂，则可以做到零废水排放。利用废纸再生造纸不仅可大大降低单位产品的电耗和气耗，促进了能源的合理利用，同时也减少了 CO_2 和 SO_2 的排放，废纸制浆基本上没有大气污染。目前用于石膏板的护面纸一般为 0.19kg/m^2 ^[51]，约占石膏板重量的5%，用量较少且环境负荷较小，其生产过程的环境影响对纸面石膏板的生命周期的环境影响可以忽略。

(4) 外加剂 纸面石膏板所用的添加剂种类较多，涉及到多种有机材料和无机材料，其加入量各不相同。总体而言，添加剂的用量都很少，占建筑石膏用量的1%~2%^[3]。因此，不考虑添加剂的使用对纸面石膏板造成的环境影响。

(5) 废料 石膏板生产过程中，不可避免的产生石膏废渣，包括湿废渣和干废渣。在实际应用中，湿废渣可直接投入原料中继续使用，而干燥后的石膏芯与纸板牢牢的粘接在一起，分离困难、经济成本高、浪费资源，企业一般将其做废弃处理，或作石膏板堆垛的踩脚使用。不管是干渣还是湿渣的回用，一

般加入的比例不能超过石膏原料的 2%^[3]，否则会影响其后石膏板的煅烧质量和石膏板的配料及生产过程。

3.3 纸面石膏板清单分析

由石膏板的研究范围及图 3-1 所示的纸面石膏板的系统边界,对天然石膏板的生命周期各个过程进行阐述:

(1) 天然石膏开采 我国石膏矿资源丰富,石膏的平均品位较高,目前有石膏开采矿山 500 多个,全国 70%的石膏矿山为地下开采^[2]。2008 年石膏矿石产量为 4533 万吨^[13]。

国内天然石膏矿开采的相关统计数据比较匮乏,对石膏开采的生命周期清单只能进行估算。石膏开采的生命周期排放包括石膏开采过程产生的直接排放和因挖掘与运输工具所引起的间接排放。由 Ecoinvent2.0 数据库中的相关资料得到石膏开采的生命周期排放清单,计算结果如表 3-17 所示。

表 3-17 石膏开采的生命周期清单

Table3-17 Life cycle inventory for gypsum production

环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	石膏	kg	1.01E+00
	原煤	kg/kg	4.36E-04
	原油	kg/kg	5.61E-04
	天然气	m ³ /kg	3.45E-06
污染物排放	CO ₂	kg/kg	2.22E-03
	SO ₂	kg/kg	5.13E-06
	NO _x	kg/kg	2.11E-05
	CO	kg/kg	8.60E-06
	CH ₄	kg/kg	1.86E-06
	NM VOC	kg/kg	2.95E-07
	颗粒物	kg/kg	1.62E-03

(2) 原料的运输 原料运输过程主要有两部分,一是天然石膏开采后运往石膏板厂进行再加工。二是护面纸经纸浆厂运往石膏板厂。护面纸的运输距离取全国平均运输距离,天然石膏的运输距离取矿物建筑材料平均运输距离。2008 年全社会公路货运量为 191.68 亿吨,公路货物周转量为 32868.19 亿吨公里^[55],矿物建筑性材料货运量比重为 19.4%,货物周转量比重为 8.1%^[56],由此可得 2008 年全国公路平均运距为 171.48 公里,矿物性建筑材料的平均运距为 71.59 公里。运输清单的计算参考相关文献^[57]的清单结果进行计算,如表 3-18 所示。

表 3-18 原料运输过程的生命周期清单

Table3-18 Life cycle inventory of transportation for raw materials

环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	原煤	kg/t.100km	1.73E-01
	原油	kg/t.100km	4.78E+00
	天然气	kg/t.100km	2.87E-04
污染物排放	CO ₂	kg/t.100km	1.21E+01
	SO ₂	kg/t.100km	1.30E-02
	NO _x	kg/t.100km	2.04E-01
	CO	kg/t.100km	1.01E-01
	CH ₄	kg/t.100km	2.00E-03
	NM VOC	kg/t.100km	5.88E-02
	颗粒物	kg/t.100km	2.63E+01

(3) 生石膏破碎、粉磨 从矿山开采来的矿石先为了满足生产需要的粒径,需要进一步再加工。传统的石膏破碎与粉磨,一般采用颚式破碎和雷蒙磨,单位产品电耗较高,吨产品高达 25kwh/t^[58]。表 3-19 为石膏破碎粉磨过程的输入输出清单。

表 3-19 石膏破碎粉磨的输入输出清单

Table3-19 The input and output of gypsum crushing and grinding process

环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	石膏	kg	1.00E+00
	原煤	kg/kg 石膏	1.11E-02
	原油	kg/kg 石膏	5.70E-05
	天然气	m ³ /kg 石膏	9.23E-05
污染物排放	CO ₂	kg/kg 石膏	1.97E-02
	SO ₂	kg/kg 石膏	9.43E-05
	NO _x	kg/kg 石膏	8.00E-05
	CO	kg/kg 石膏	2.83E-05
	CH ₄	kg/kg 石膏	5.03E-05
	NM VOC	kg/kg 石膏	7.98E-06
	颗粒物	kg/kg 石膏	3.05E-05

(4) 石膏的煅烧 石膏的煅烧是将二水石膏加热脱水形成熟石膏粉的过程,主要有干法和湿法两大类,二水石膏转化为半水石膏的温度范围是 120-220℃。我国独创的应用流体化技术煅烧石膏的高效专用设备—沸腾炉现已在工厂中得到广泛实际应用,煅烧天然石膏热耗约为 22 万 kcal/吨产品^[2]。表 3-20 为石膏煅烧的输入输出清单。

表 3-20 石膏煅烧的输入输出清单

Table3-20 The input and output of gypsum calcining process

环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	石膏	kg	1.00E+00
	原煤	kg/kg 石膏	4.40E-02
	原油	kg/kg 石膏	3.78E-05
	天然气	m ³ /kg 石膏	2.26E-09
污染物排放	CO ₂	kg/kg 石膏	7.93E-02
	SO ₂	kg/kg 石膏	4.80E-04
	NO _x	kg/kg 石膏	2.54E-05
	CO	kg/kg 石膏	1.44E-04
	CH ₄	kg/kg 石膏	4.19E-04
	颗粒物	kg/kg 石膏	8.61E-05

(5) 石膏板的成型 成型是按照一定配合比配好的原料经过成型机完成湿板成型，形成一定宽度和厚度的湿板。石膏板的成型方式主要有辊压式和挤出式，目前国内大部分企业使用的是辊压式成型，成型过程主要耗电，根据实际调研的数据显示，生产每平方米石膏板成型过程约耗电 0.484kWh/m²，成型好的湿板经过轨道输送到干燥机进行干燥。表 3-21 为功能单位石膏成型过程的资源消耗和环境排放清单。

表 3-21 功能单位石膏板成型过程的资源消耗和环境排放

Table3-20 The input and output of gypsum plasterboard forming process

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	石膏	kg/m ²	7.00E+00	SO ₂	kg/m ²	1.82E-03
	原煤	kg/m ²	2.15E-01	污 NO _x	kg/m ²	1.55E-03
	原油	kg/m ²	1.10E-03	染 CO	kg/m ²	5.47E-04
	天然气	m ³ /m ²	1.79E-03	物 CH ₄	kg/m ²	9.73E-04
	石灰石	kg/m ²	6.52E-03	排 NMVOC	kg/m ²	1.54E-04
污染物排放	CO ₂	kg/m ²	3.81E-01	放 颗粒物	kg/m ²	5.90E-04

(6) 石膏板的干燥 干燥是石膏板生产的最大能耗工序。如何提高干燥机的热效率，降低这一环节能耗也是石膏板企业面临的重大课题。国内石膏板企业多采用的是以煤为燃料，导热油为传热介质的干燥机，干燥过程以外扩散为主，采用高温高湿快速干燥。能耗一般在 4.19~5.03×10³kJ/kg 水，先进指标在 3.35~3.78×10³kJ/kg 水^[3]。本文将一般指标和先进指标进行求平均值，得干燥过程的平均能耗为 4.072×10³kJ/kg 水。干燥过程游离水的蒸发量应为拌合水的量与结晶水的差值。表 3-22 为石膏板干燥过程的输入输出清单。

表 3-22 功能单位石膏板干燥过程的输入输出清单

Table3-22 The input and output of gypsum plasterboard drying process

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值		
资源能源输入	石膏	kg/m ²	7.00E+00	污	SO ₂	kg/m ²	7.70E-03
	原煤	kg/m ²	7.04E-01	染	NO _x	kg/m ²	4.07E-04
	原油	kg/m ²	6.05E-04	物	CO	kg/m ²	2.30E-03
	天然气	m ³ /m ²	3.61E-08	排	CH ₄	kg/m ²	6.71E-03
污染物排放	CO ₂	kg/m ²	1.27E+00	放	颗粒物	kg/m ²	1.38E-03

将纸面石膏板生命周期过程中的各个阶段的数据进行整理，得到 1m² 纸面石膏板的生命周期清单，如表 3-23 所示。

表 3-23 功能单位纸面石膏板的生命周期清单

Table3-23 The Life cycle inventory of gypsum plasterboard

环境负荷项	单位	石膏 开采	原料 运输	破碎 粉磨	煅烧	成型	干燥	合计	
资源 能源 输入	原煤	kg/m ²	3.05E-03	9.87E-04	7.77E-02	3.08E-01	2.15E-01	7.04E-01	1.31E+00
	原油	kg/m ²	3.93E-03	2.73E-02	3.99E-04	2.65E-04	1.10E-03	6.05E-04	3.36E-02
	天然气	m ³ /m ²	2.42E-05	1.64E-06	6.46E-04	1.58E-08	1.79E-03	3.61E-08	2.46E-03
	天然石 膏	kg/m ²	7.00E+00	7.00E+00	7.00E+00	7.00E+00	—	—	7.00E+00
	护面纸	kg/m ²	—	4.04E-01	—	—	—	—	4.04E-01
	外加剂	kg/m ²	—	—	—	—	5.90E-02	—	5.90E-02
	拌合水	kg/m ²	—	—	—	—	4.72E+00	—	4.72E+00
污 染 物 排 放	CO ₂	kg/m ²	1.55E-02	6.90E-02	1.38E-01	5.55E-01	3.81E-01	1.27E+00	2.43E+00
	SO ₂	kg/m ²	3.59E-05	7.42E-05	6.60E-04	3.36E-03	1.82E-03	7.70E-03	1.37E-02
	NO _x	kg/m ²	1.48E-04	1.16E-03	5.60E-04	1.78E-04	1.55E-03	4.07E-04	4.00E-03
	CO	kg/m ²	6.02E-05	5.76E-04	1.98E-04	1.01E-03	5.47E-04	2.30E-03	4.69E-03
	CH ₄	kg/m ²	1.30E-05	1.14E-05	3.52E-04	2.93E-03	9.73E-04	6.71E-03	1.10E-02
	NM VOC	kg/m ²	2.07E-06	3.35E-04	5.59E-05	—	1.54E-04	—	5.47E-04
能 耗	颗粒物	kg/m ²	1.13E-02	1.50E-01	2.14E-04	6.03E-04	5.90E-04	1.38E-03	1.64E-01
	总计	MJ/m ²	2.29E-01	1.16E+00	1.67E+00	6.45E+00	4.61E+00	1.47E+01	2.89E+01
	比例	%	7.94E-03	4.03E-02	5.77E-02	2.24E-01	1.60E-01	5.11E-01	1.00E+00

由表 3-23 可知，以天然石膏为原料生产石膏板的过程中主要气体排放是 CO₂，为 2.43kg/m²。干燥过程的 CO₂ 排放量较高，为 1.27kg/m²，占到了 CO₂ 排放总量的 50.6%。其他排放量较大的污染物为颗粒物和 SO₂，分别为 0.164kg/m²、0.0137kg/m²。颗粒物主要排放阶段在原料的运输阶段和石膏矿石的开采阶段，分别占到排放总量的 91.4%，6.89%。

以天然石膏生产纸面石膏板的总能耗为 $28.9\text{MJ}/\text{m}^2$ ，折合标准煤为 $0.985\text{kgce}/\text{m}^2$ 。其中，干燥过程的能耗为 14.7MJ ，占石膏板生产总能耗的 51.1% 。其次是煅烧和成型阶段，分别占到石膏板生命周期总能耗的 22.4% 和 16.0% 。整个石膏板生产阶段的能耗占到了总能耗的 95.2% 。

3.4 生命周期影响评价

清单分析结果仅反映石膏板生命周期过程所涉及各类环境消耗和污染物排放的大小。为了更清晰的表现出与纸面石膏板生产的能源、资源消耗以及污染物排放相关的环境问题，应将清单结果分配到不同的环境影响类型中，将所选择的环境问题特征化，并能够使用类型参数来特征化与解释生命周期清单结果。

3.4.1 分类

根据生命周期评价的技术框架，将纸面石膏板生命周期的资源消耗和污染排放清单数据归入到不同的环境影响类型中。本文采用在国际上已基本达到共识的影响类型、类型参数和环境负荷分类。并采用目前在 LCA 中得到广泛应用的当量评价模型，将石膏板清单中所涉及的污染物划归到第 2 章 2.2.1 确定的五种环境影响类型中。

3.4.2 特征化

根据分类好的环境影响类型及选用的计算模型，把生命周期清单的相关数据转化为相应的环境影响指标称作特征化。与本研究相关环境排放的环境影响特征化因子见第二章表 2-3，多种污染物在不同环境影响类型之间的分配因子采用简化处理，即均设为 1。计算得到天然石膏板特征化结果见表 3-24。

表 3-24 纸面石膏板生命周期各阶段的特征化结果

Table3-24 Characterization results of plasterboard of different stage

影响类型	单位	石膏开采	运输过程	破碎粉磨	煅烧	成型	干燥
AP	kgSO ₂ 当量	1.40E-04	8.86E-04	1.05E-03	3.48E-03	2.91E-03	7.98E-03
HT	kg(1,4)-二氯苯当量	9.45E-03	1.24E-01	9.11E-04	5.37E-04	2.52E-03	2.36E-03
GWP	kgCO ₂ 当量	1.58E-02	6.92E-02	1.45E-01	6.17E-01	4.01E-01	1.41E+00
POCP	kgC ₂ H ₄ 当量	8.35E-06	1.91E-04	7.60E-05	1.94E-04	2.10E-04	4.43E-04
ADP	kg 铈当量	1.89E-06	3.88E-06	6.12E-08	5.52E-08	1.69E-07	1.26E-07

特征化结果反映了清单结果对各环境影响类型的贡献值大小，2008 年我国石膏板行业产量为 11.38 亿 m^2 ，可由上表得到 2008 年我国石膏板行业的总温室效应影响为 30 亿 kgCO_2 当量，人体健康损害的影响为 1.60 亿 kg1-4 二氯苯当量。

3.4.3 归一化

特征化过程得到了每种环境影响类型的环境负荷值，但是他们表示的仅是绝对总量，为了进一步说明不同影响类型数据的可比性，要对特征化的结果进行归一化，即将每个环境影响类型的环境负荷总量作为基准值，用相应的环境负荷当量除以相对应的排放总量，以得到统一单位的数值。依据第二章 2.3.4 介绍的归一化基准的选取原则，采用表 2.5 确定的归一化基准值以及基于我国本土的矿产资源归一化基准，对天然石膏纸面石膏板进行归一化和等权重加权计算，得到石膏板生命周期过程的人体健康损害效应、光化学效应、酸化效应、温室效应以及不可再生资源消耗的归一化结果，见表 3-25。

表 3-25 纸面石膏板生命周期各阶段的归一化结果

Table 3-25 The normalization results of plasterboard in different stage

影响类型	石膏开采	运输过程	破碎粉磨	煅烧	成型	干燥	合计
AP	4.67E-16	2.96E-15	3.52E-15	1.17E-14	9.72E-15	2.67E-14	5.50E-14
HT	1.90E-16	2.50E-15	1.83E-17	1.08E-17	5.06E-17	4.74E-17	2.81E-15
GWP	4.09E-16	1.79E-15	3.77E-15	1.60E-14	1.04E-14	3.66E-14	6.89E-14
POCP	1.84E-16	4.20E-15	1.67E-15	4.25E-15	4.61E-15	9.74E-15	2.46E-14
ADP	8.82E-17	1.81E-16	2.86E-18	2.58E-18	7.88E-18	5.89E-18	2.89E-16
合计	1.34E-15	1.16E-14	8.98E-15	3.19E-14	2.48E-14	7.30E-14	1.52E-13

3.5 结果解释

归一化结果反映了环境负荷的相对大小，便于石膏板生命周期不同阶段的环境影响及不同的环境影响类型进行比较。图 3-4 为功能单位天然石膏纸面石膏板的归一化结果柱状图。

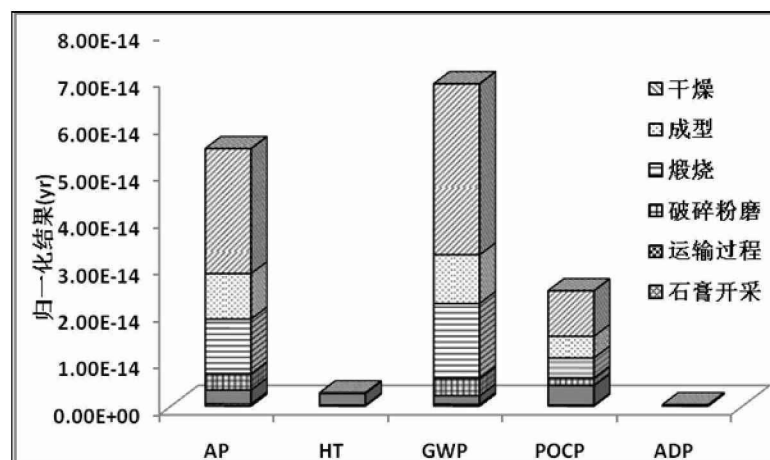


图 3-4 天然石膏板各环境影响类型的归一化结果

Fig.3-4 The normalization results of impact categories of plasterboard

由图 3-4 可知,石膏板生命周期中,五种环境影响类型的相对大小为:GWP>AP>POCP>HT>ADP。纸面石膏板生命周期的主要环境负荷为温室效应,其次是酸化效应和光化学烟雾效应,分别占到总环境效应的 44.4%, 35.7%, 17.9%。结合表 3-22 可知,对温室气体效应贡献最大的是石膏板的生产过程,其中以干燥阶段最为显著,这一阶段产生的温室气体排放占到石膏板生命周期总排放的 52.3%。酸化效应影响也主要来自石膏板的生产过程,其中煅烧、成型和干燥阶段所产生的酸化影响分别占到石膏板酸化影响的 21%、17.6%和 48.2%,干燥过程造成的光学烟雾影响占该类环境影响的 35.1%。运输过程对人体健康损害的贡献最大,占该类环境影响的 88.5%。石膏板生命周期的不可再生资源消耗环境影响主要的两个过程为石膏开采和原料运输。由于原油的不可再生特征化因子较高,使得运输过程的不可再生资源消耗负荷贡献最为显著,为 63.0%。

图 3-5 为生产天然石膏板各阶段环境影响的归一化结果。

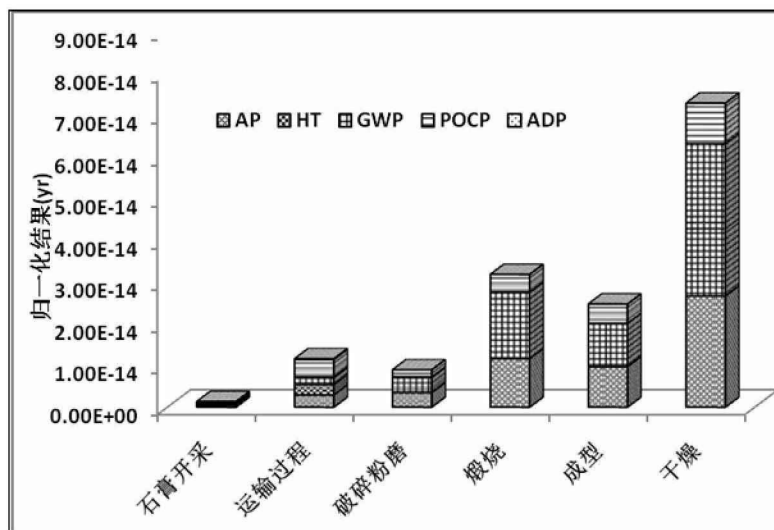


图 3-5 石膏板不同生产阶段的归一化结果

Fig.3-5 The normalization results of plasterboard in different stage

由图 3-5 可知,石膏板生命周期的环境负荷主要集中在石膏板生产过程,这一过程造成的环境影响占到各类环境影响类型的 89.5%,其中煅烧和干燥单元过程的环境影响占到了总环境影响的 67.6%。石膏板生产过程的主要能源消耗为原煤和电力,生产过程的能耗最大,能耗大则化石燃料消耗大,燃料燃烧过程产生的废气排放也大,因燃煤造成的 CO_2 排放较多,造成温室效应也就特别显著。运输过程的光化学烟雾效应和人体健康损害效应比较突出,因燃烧柴油释放氮氧化物和因扬尘产生的颗粒物是这两种环境影响集中在这一阶段的两个主要的原因。

图 3-6 为石膏板生命周期过程各气态污染物对其环境负荷归一化的贡献值。

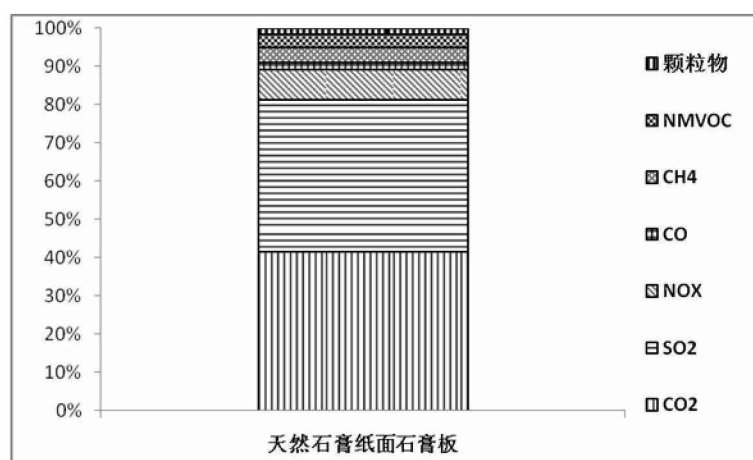


图 3-6 各气态污染物对石膏板环境负荷的贡献

Fig.3-6 The contribution of air pollutants to the plasterboard's environmental impact

由图 3-6 可知，CO₂ 对石膏板环境影响的贡献值最大，为 41.6%，结合石膏板清单表 3-23，天然石膏板生命周期的 SO₂ 排放量仅为 CO₂ 的 0.562%，但其排放对环境影响的贡献值为 38.8%，仅比 CO₂ 低 2% 左右。其他对环境影响较大的环境负荷项为 NO_x，对环境负荷的贡献值为 7.86%。

图 3-7 所示为天然石膏纸面石膏板各生命周期阶段对污染物排放归一化的贡献值。由图可知，CO₂、SO₂、CO、CH₄ 排放造成的环境负荷主要来自干燥过程，各占到该类污染物总环境负荷的 52.3%，56.4%，49% 和 61.1%。干燥过程矿石燃料燃烧的烟气排放是这四种污染物集中在这一阶段的主要原因。因 NO_x 排放造成的环境负荷主要来自原料运输阶段和石膏板成型阶段，分别占 29% 和 38.7%。非甲烷挥发有机物（NMVOC）造成的环境负荷 61.2% 来自于原料运输阶段。颗粒物排放造成的环境负荷 91.8% 来自于原料运输阶段。

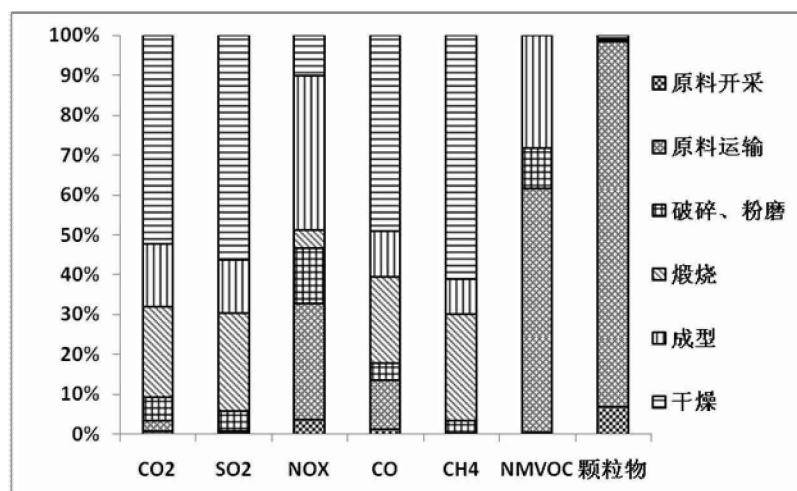


图 3-7 各工序对污染物排放的贡献

Fig.3-7 The contribution of different stage to the air pollutants emission

3.6 本章小结

本文利用生命周期评价的方法对我国纸面石膏板进行了生命周期分析, 计算得到了包括石膏开采、原料运输、石膏破碎、粉磨、石膏煅烧、石膏板成型和干燥在内的各阶段环境排放清单, 并对各个过程的清单结果进行环境负荷量化分析。结果表明: 天然石膏板生命周期的总能耗为 $28.9\text{MJ}/\text{m}^2$, 能耗主要集中在石膏板的生产过程, 其中煅烧和干燥阶段的能耗和占到了总能耗的 73.5%。功能单位的石膏板在原料获取过程、原料运输过程及石膏板生产阶段的 CO_2 排放量分别为 $1.55 \times 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2$, $6.90 \times 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2$, 和 $2.34\text{kg}/\text{m}^2$, 生产过程中干燥工序的 CO_2 排放量达到 $1.27\text{kg}/\text{m}^2$, 煅烧工序的 CO_2 排放量达到 $5.55 \times 10^{-1}\text{kg}/\text{m}^2$ 。天然石膏纸面石膏板生命周期的五种主要环境影响类型是温室气体效应、酸化效应、光化学烟雾效应、人体健康损害效应及不可再生资源耗竭效应。其中, 温室气体效应是最主要的环境影响类型, 占天然石膏板环境负荷总量的 44.4%, 其次是酸化效应, 为 35.7%。天然石膏板生命周期最大环境负荷项为 CO_2 的排放, 它对天然石膏板环境影响的贡献为 41.6%, 其次是 SO_2 的排放, 为 38.8%。

第4章 脱硫石膏纸面石膏板的生命周期分析

脱硫石膏是燃煤电厂烟气脱除二氧化硫后的副产物，其主要成分是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，含10%~15%的游离水。每脱除1t SO_2 就会产生2.7吨的脱硫石膏，随着我国脱硫装置的增加，脱硫石膏的量会越来越大。2008年我国脱硫石膏的产生量为3336万t^[13]，这些石膏若不能及时利用，就会造成排放堆积，占有土地，造成二次污染。脱硫石膏的品位高，杂质少，有报道^[59]脱硫建筑石膏的强度要高于建筑石膏，使用脱硫石膏代替天然石膏生产纸面石膏板，将是一条利用脱硫石膏的重要途径。同时，脱硫石膏作为废物利用，能够大大减少土地面积的占用，节省企业运输成本，得到国家相应的免税政策优惠。

4.1 目的与范围的确定

4.1.1 研究目的

从节能、经济的角度考虑，越来越多的石膏板企业使用脱硫石膏为原料生产纸面石膏板。根据实际调研的数据显示，全国较大的纸面石膏板生产企业如北京某企业，在其全国的22个石膏板分厂中，使用脱硫石膏为原料的占到总数的90%左右。本章的研究目的是利用生命周期评价的工具找出以脱硫石膏为原料生产纸面石膏板的环境负荷和环境热点，为进一步比较生产两种石膏板的环境行为提供参考依据。

4.1.2 功能单位与研究范围

以脱硫石膏为原料的纸面石膏板生命周期系统边界如图4-1所示。

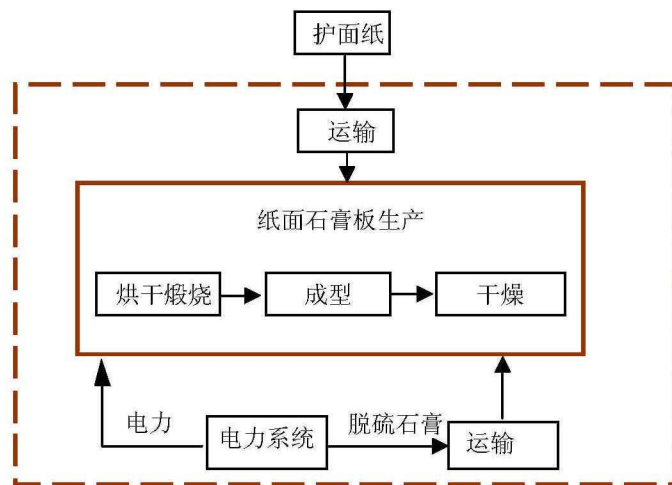


图 4-1 脱硫石膏纸面石膏板生命周期系统边界

Fig.4-1 The system boundary of FGD gypsum plasterboard

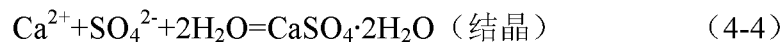
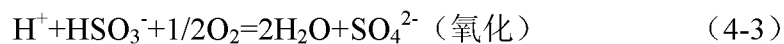
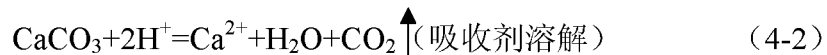
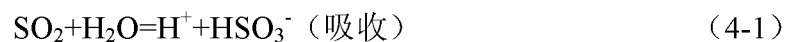
根据研究的目标, 为了便于与天然石膏板的生命周期分析结果进行比较, 选取年产能为 2000 万平方米及以上的大中型石膏板企业, 假设生产两种相同尺寸不同原料的石膏板初始配方相同, 以常用尺寸 (1200×2400×9.5mm) 石膏板为研究对象, 研究功能单位为 1m² 石膏板产生的环境负荷。研究范围包括脱硫石膏的回收, 原料的运输, 石膏烘干煅烧, 石膏板成型和石膏板干燥。

4.2 脱硫石膏的回收

4.2.1 石灰石—石膏湿法脱硫技术

石灰石/石灰—石膏湿式洗涤法脱硫工业是最典型的湿法脱硫工艺, 也是世界上技术最为成熟、应用最多的工艺, 特别是在美国、德国和日本, 应用该工艺的机组容量约占电站脱硫装机总容量的80%以上, 应用的单机容量已达100万KW^[2]。我国烟气脱硫设施中有90%为石灰石/石灰-石膏湿法脱硫^[60]。

石灰石/石灰—石膏湿法脱硫过程是在吸收塔中进行的, 送入吸收塔的吸收剂—经破碎粉磨配制成浆液的石灰石或石灰与经烟气再热器冷却后进入吸收塔的烟气接触混合, 烟气中的二氧化硫 (SO₂) 与吸收剂浆液中的碳酸钙 (CaCO₃) 以及鼓入的空气中的氧气 (O₂) 发生化学反应, 生成二水硫酸钙 (CaSO₄·2H₂O), 即石膏; 脱硫后的烟气经过除雾器除去雾滴、烟气再热器加热升温, 后经烟囱排入大气。该工艺的化学反应式如下:



脱硫过程中各项操作及工艺控制既会影响脱硫效率, 也会影响脱硫石膏的质量。影响因素主要有如下几项:

(1) 石灰石质量 我国环保行业标准规定^[61]: 石灰石中碳酸钙含量应高于90%, 白云石含量不应高于2%。实际应用中, 石灰石的粒径应在2mm以下^[62]为宜。

(2) 燃煤含硫量 燃煤含硫量应在设计值以内, 如果超过设计值, 则由于吸收塔能力不够, 而严重影响脱硫效率。根据火电厂大气污染物排放标准^[63], 我国现有燃煤发电锅炉 SO₂ 排放浓度限值为 200mg/m³, 火电厂应严格控制燃煤含硫量, 保证脱硫设备正常运行, 降低大气污染的排放强度。

(3) 石膏浆液的密度 石膏浆液的密度要适中, 当石膏浆液中石膏的浓度低于饱和浓度时, 不会有石膏结晶; 大于饱和浓度时, 会形成部分晶核并逐渐

长大，当浓度度过大时，形成大量晶核使晶体颗粒反而变小。实践证明石膏浆液密度应控制在 $1080\sim 1150\text{kg/m}^3$ [2]。

(4) 反应的 PH 值 石灰石-石膏湿法脱硫工艺中，PH 值的控制对反应很重要，否则会生成污垢，造成设备和管道的堵塞。根据国内外湿法脱硫工程技术的试验和运行结果表明 [2,60]，采用石灰石-石膏湿法脱硫后，为避免堵塞，循环石灰石浆液 PH 值应控制在 $5.5\sim 7.0$ ，石膏浆液的 PH 值一般控制在 $4.6\sim 5.9$ 。

(5) 氧化风量 必须设计合适的氧化风量值，一般会根据浆液中亚硫酸盐的浓度计算理论空气量，再乘以一个系数，系数取 $1.8\sim 2.5$ 。

(6) 水源 进入吸收塔的水源有工艺水、各种回收水等，这些水应经过重金属离子、COD、氯离子等处理过程，否则水中污染物会影响石膏的质量。

(7) 锅炉运行情况 锅炉不完全燃烧产物不但会影响电除尘效率，造成粉尘量增大，而且还会包裹在石灰石和亚硫酸盐晶体表面，阻止反应进行，降低石膏品质。

一套完整的湿法脱硫工艺系统通常包括烟气系统、吸收剂制备系统、 SO_2 吸收氧化系统（吸收塔系统）、石膏脱水系统和废水处理系统。其中，吸收塔系统是脱硫系统核心，在这里完成一系列化学反应如 SO_2 的脱除、中间产物的氧化以及副产物石膏的结晶全在吸收塔中完成，其他系统是脱硫系统的辅助系统，主要为核心系统提供服务，而且可根据实际要求，进行简化或者取消。图 4-2 为石灰石（石灰）石膏湿法脱硫工艺流程图。

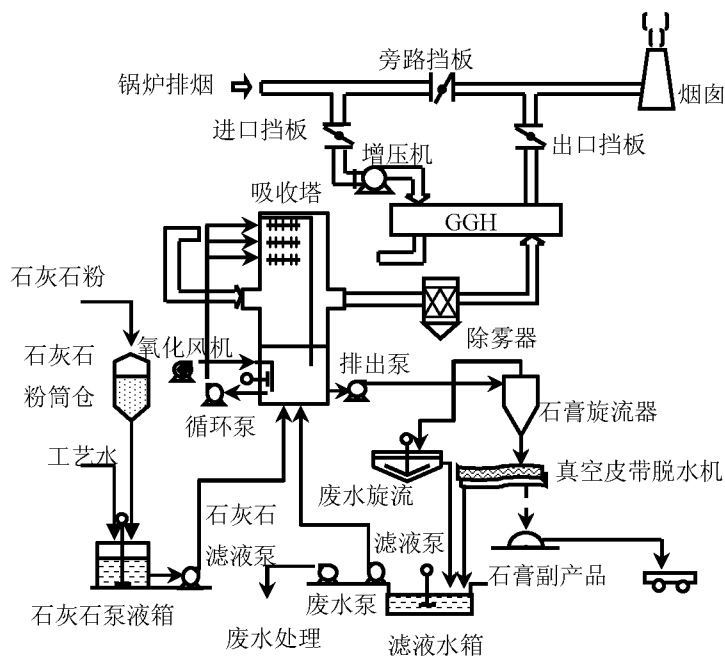


图 4-2 石灰石-石膏湿法脱硫工艺图

Fig.4-2 Limestone-gypsum wet desulfurization process

4.2.2 脱硫石膏的环境负荷清单编制与分析

脱硫石膏的环境负荷应当包括两个方面，一是脱硫石膏运往石膏板厂的运输过程的环境负荷，这部分距离采用实际调研的数据，取 10km，采用公路运输，运输清单的计算参照相关文献^[57]进行计算。运输的货物量应以含 10%的游离水的量计算。二是脱硫石膏由固体废弃物转变为可用的资源与上游主产品共同分担的环境负荷。

4.2.1.1 脱硫石膏生产的环境负荷清单 当废弃物变为可用的副产品时，应当按照一定的分配基准将物流、能流和环境排放合理的分配到各个产品中。当利废原料的利用率不足 100%时，在计算环境影响时，只有被利用的需要参与分配，此时还需要再乘以废弃物的综合利用率。按经济价值因子进行分配是本文的一个思路。每度电的价格为 0.5 元（北京地区）考虑，每吨脱硫石膏的价格为 100 元^[64]，2008 年我国脱硫石膏废物产生量为 3336.0 万 t，综合利用量为 2624 万 t，脱硫石膏的利用废物利用率为 78.65%^[13]。按以上相关量计算，脱硫石膏的经济价值分配因子为 0.264%，电在电厂的经济价值分配因子为 99.74%。此关系对于资源消耗和环境排放均适用。脱硫石膏作为利废产品时，脱硫系统就具有了两种功能，既对电厂进行烟气脱硫又产生了可用的废弃物，应当用确定的分配基准对这两种功能进行分配，即是利用上文所说的经济价值分配因子进行分配。

(1) 石灰石的开采 在石灰石-石膏湿法脱硫工艺中，石灰石是用来脱除 SO₂ 的反应剂。按照火电厂烟气脱硫行业标准规定，为了保证脱硫石膏的综合利用及减少废水排放量，用于脱硫的石灰石中 CaCO₃ 的含量应高于 90%。为了保证 SO₂ 被完全脱除，吸收剂制备系统的出力应按实际石灰石消耗的 150%选择^[61]。石灰石粉的细度应根据石灰石的特性和脱硫系统与石灰石粉磨系统综合优化确定。对于燃烧中低含硫量燃料煤质的锅炉，石灰石粉的细度应保证 250 目 90%过筛率；当燃料中高含硫量煤质时，石灰石粉的细度宜保证 325 目 90%过筛率。石灰石的开采清单参照相关文献^[65]中的相关数据计算，如表 4-1 所示。

表 4-1 1kg 石灰石开采的生命周期清单

Table4-1 Life cycle inventory of limestone production

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	石灰石	kg	1.03E+00	NO _x	kg/kg 石灰石 5.66E-05	
	原煤	kg/kg 石灰石	2.37E-03	污	CO	kg/kg 石灰石 1.41E-04
	原油	kg/kg 石灰石	9.48E-04	染	CH ₄	kg/kg 石灰石 1.42E-05
	天然气	m ³ /kg 石灰石	4.11E-05	物	NM VOC	kg/kg 石灰石 2.74E-05
污染物排放量	CO ₂	kg/kg 石灰石	6.93E-03	排 放	颗粒物	kg/kg 石灰石 4.96E-03
	SO ₂	kg/kg 石灰石	2.83E-05			

(2) 石灰石运输 石灰石运往电厂的运输距离参考 2008 年无机非金属矿物的平均运输距离, 取 71.59km。石灰石运往电厂的输入输出清单参照相关文献^[57]计算。

火电厂的二氧化硫排放量一般按照物料平衡法^[66]进行计算, 公式如 4-5 所示。

$$G_{SO_2} = 2B \cdot F \cdot S(1 - N_{SO_2}) \quad (4-5)$$

式中, G_{SO_2} ——二氧化硫排放量, kg;

B——耗煤量, kg;

F——煤中硫转化成二氧化硫的转化率(火力发电厂锅炉取 0.90);

S——煤中的全硫份含量, %;

N_{SO_2} ——脱硫效率, %; (电厂脱硫 $N_{SO_2}=95\%$)

中国动力煤的平均含硫量为 1.15%^[45], 按此计算, 火电厂单位发电未经脱硫设备的 SO_2 排放量为 $1.002 \times 10^{-2} \text{kg}$ 。2008 年单位火电发电 SO_2 的直接排放为 $3.75 \times 10^{-3} \text{kg}$, 可知, 2008 年单位火电 SO_2 的平均脱除量为 $6.27 \times 10^{-3} \text{kg}$, 脱除的 SO_2 与石灰石反应生产脱硫石膏。化学反应式如下:



按上式反应及前文提及的石灰石过量因子, 脱除单位电力产生的二氧化硫需石灰石 $1.47 \times 10^{-2} \text{kg}$, 直接排放二氧化碳 $4.31 \times 10^{-3} \text{kg}$, 生成的脱硫石膏量为 $1.68 \times 10^{-2} \text{kg}$ 。

根据已投运的大量脱硫系统统计, 脱硫系统的电耗占到厂发电量的 1%-1.5%, 取平均值为 1.25%^[60]。

由以上的相关分析及确定的分配因子可得生产单位脱硫石膏的输入输出清单, 如表 4-2 所示。

表 4-2 脱硫石膏生产的环境负荷清单

Table4-2 The environmental load inventory of gypsum production

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值	
石灰石	kg/kg	2.94E-03	SO_2	kg/kg	1.26E-03	
SO_2	kg/kg	-1.25E-03	污	NO_x	kg/kg	9.32E-06
资源能源输入	原煤	kg/kg	染	CO	kg/kg	3.70E-06
	原油	kg/kg	物	CH_4	kg/kg	5.53E-06
	天然气	m^3/kg	排	NM VOC	kg/kg	1.07E-06
污染物排放	CO_2	kg/kg	放	颗粒物	kg/kg	7.33E-05

由确定的分配基准修正火电发电清单和全国售电清单，如表 4-3 所示。

表 4-3 修正后的电力清单

Table 4-3 Modified inventory of power industry

项目	名称	单位	修正的发电清单	修正的售电清单
资源能源输入	石灰石	kg/kWh	1.47E-02	1.35E-02
	原煤	kg/kWh	4.84E-01	4.44E-01
	原油	kg/ kWh	2.55E-03	2.34E-03
	天然气	m ³ / kWh	4.02E-03	3.69E-03
污染物排放	CO ₂	kg/ kWh	8.64E-01	7.92E-01
	SO ₂	kg/ kWh	4.11E-03	3.77E-03
	NO _x	kg/ kWh	3.49E-03	3.21E-03
	CO	kg/ kWh	1.23E-03	1.13E-03
	CH ₄	kg/ kWh	2.19E-03	2.01E-03
	NM VOC	kg/ kWh	3.49E-04	3.20E-04
	颗粒物	kg/ kWh	1.68E-03	1.54E-03

4.2.1.2 脱硫石膏环境负荷清单 根据以上的数据和分析，可以计算出回收功能单位脱硫石膏的环境负荷清单，如表 4-4 所示。

表 4-4 回收脱硫石膏的环境负荷清单

Table4-4 The environmental load inventory of reclyed FGD gypsum

环境负荷项	单位	脱硫石膏回收		合计	
		原料运输	原料生产		
资源能源输入	石灰石	kg/kg	—	2.94E-03	2.94E-03
	SO ₂	kg/kg	—	-1.25E-03	-1.25E-03
	原煤	kg/kg	1.90E-05	1.22E-03	1.24E-03
	原油	kg/kg	5.26E-04	1.91E-05	5.45E-04
	天然气	m ³ /kg	3.16E-08	1.02E-05	1.02E-05
污染物排放	CO ₂	kg/kg	1.33E-03	3.06E-03	4.39E-03
	SO ₂	kg/kg	1.43E-06	1.26E-03	1.26E-03
	NO _x	kg/kg	2.24E-05	9.32E-06	3.17E-05
	CO	kg/kg	1.11E-05	3.70E-06	1.48E-05
	CH ₄	kg/kg	2.20E-07	5.53E-06	5.75E-06
	NM VOC	kg/kg	6.47E-06	1.07E-06	7.54E-06
	颗粒物	kg/kg	2.89E-03	7.33E-05	2.96E-03

由表 4-4 可知，脱硫石膏由废弃物变为一种可利用的资源后，其分担了上游主产物的环境负荷，但由于脱硫石膏的分配特征值远小于上游流程的主产物，所以上游流程的主产物仍保留了绝大部分的环境负荷。

4.3 原料运输

生产脱硫石膏纸面石膏板涉及的运输过程主要包括两个方面：一是经脱水后含游离水约为 10%的脱硫石膏到石膏板厂的运输过程，二是护面纸运往石膏板厂的过程。脱硫石膏的运输负荷计算已在前一节中计算过，不再赘述。护面纸的运输距离取 2008 年全国平均运输距离，为 171.48km。运输清单参照相关文献^[57]中的计算模型进行计算。

4.4 石膏板生产阶段

以脱硫石膏为原料生产纸面石膏板的生产阶段主要包括原料的烘干煅烧、石膏板的成型、石膏板的干燥过程，按系统边界和研究范围逐一进行解析。

(1) 原料的烘干煅烧 脱硫石膏从电厂洗涤和真空脱水后，含游离水 10%左右，煅烧前必须进行烘干处理，否则会因石膏粉游离水过高而使粉料结块堵塞煅烧设备并导致使产品煅烧不均匀。我国大部分石膏板企业采用的是沸腾炉煅烧，在煅烧脱硫石膏时，另加一套气流烘干设备，这样煅烧含自由水为 10%的脱硫石膏时，吨产品干燥煅烧总能耗为 28~29 万 kcal^[2]，即为 1.19MJ/kg 生石膏。表 4-5 为脱硫石膏烘干煅烧的排放清单。

表 4-5 脱硫石膏烘干、煅烧输入输出清单

Table4-5 The input and output of desulfurization gypsum drying and calcining process

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值		
资源能源输入	石膏	kg	1.00E+00	污 染 物 排 放	SO ₂	kg/kg	6.17E-04
	原煤	kg/kg	5.68E-02		NO _x	kg/kg	3.28E-05
	原油	kg/kg	4.88E-05		CO	kg/kg	1.84E-04
	天然气	m ³ /kg	2.92E-09		CH ₄	kg/kg	5.42E-04
污染物排放	CO ₂	kg/kg	1.02E-01	颗粒物	kg/kg	1.11E-04	

(2) 石膏板的成型 以脱硫石膏为原料生产石膏板的成型过程与天然石膏板相似，即以辊压或挤出成型，以实际调研的数据为参考，成型过程的电耗为 0.484kwh/m²。石膏板成型过程的输入输出清单如表 4-6 所示。

表 4-6 石膏板成型过程的资源消耗和环境排放

Table4-6 The input and output of desulfurization gypsum plasterboard forming process

环境负荷项	单位	环境负荷值	环境负荷项	单位	环境负荷值		
资源能源输入	石膏	kg/m ²	7.00E+00	SO ₂	kg/m ²	1.82E-03	
	原煤	kg/m ²	2.15E-01	污	NO _x	kg/m ²	1.55E-03
	原油	kg/m ²	1.13E-03	染	CO	kg/m ²	5.47E-04
	天然气	m ³ /m ²	1.79E-03	物	CH ₄	kg/m ²	9.73E-04
	石灰石	kg/m ²	6.53E-03	排	NM VOC	kg/m ²	1.55E-04
污染物排放	CO ₂	kg/m ²	3.83E-01	放	颗粒物	kg/m ²	7.45E-04

(3) 石膏板的干燥 干燥过程直接影响石膏板产品最终质量。它是将满足料浆流动性和成型需要的游离水分从板芯中蒸发出去。只有当板中的游离水全部排出，石膏板才具有最大强度。选择正确的热工制度是提高企业生产能力、控制石膏板质量、降低成本的关键。

国内外广泛采用辊道式干燥机，对流式干燥，国内石膏板企业大多使用煤或重油为燃料，加热循环空气进行干燥，干燥机的能耗一般用蒸发 1kg 水所需热量来表示，国内一般在 1000-1200kca/kg 水左右，先进指标在 800-900kcal/kg 水，在使用热回收系统后，可降低能耗 10%左右。本章中脱硫石膏板的水膏比为 80%，按脱硫石膏投入量为 7kg/m²（除去游离水）计算，建筑石膏与拌合水的量分别为 5.9kg/m²，4.72kg/m²，干燥过程反应生成的结晶水的量为 1.1kg/m²，功能单位的石膏板在干燥阶段需蒸发的游离水的量为 3.62kg。参考企业调研结果，中国大多数石膏板企业采用以煤为燃料，热风干燥的方法，计算功能单位石膏板干燥阶段的清单排放如表 4-7 所示。

表 4-7 功能单位脱硫石膏板干燥阶段排放清单

Table4-7 The input and output of desulfurization gypsum plasterboard drying process

环境负荷项	单位	环境负荷值	
资源能源输入	脱硫石膏	kg	7.00E+00
	原煤	kg/m ²	7.04E-01
	原油	kg/m ²	6.05E-04
	天然气	m ³ /m ²	3.61E-08
污染物排放	CO ₂	kg/m ²	1.27E+00
	SO ₂	kg/m ²	7.70E-03
	NO _x	kg/m ²	4.07E-04
	CO	kg/m ²	2.30E-03
	CH ₄	kg/m ²	6.71E-03
	颗粒物	kg/m ²	1.38E-03

4.5 功能单位脱硫石膏板的生命周期清单

表 4-8 为功能单位脱硫石膏纸面石膏板生命周期清单。由表可知，以脱硫石膏为原料生产纸面石膏板的生命周期过程中，石膏板的总能耗为 28.2MJ/m²。石膏板生产过程的矿石燃料消耗最多，能耗最大，占到生命周期总能耗的 70.5%，其中，干燥过程的能耗占到总能耗的 37.6%。石膏板生命周期的能源消耗主要是原煤和电力。

表 4-8 脱硫石膏纸面石膏板生命周期清单

Table4-8 Life cycle inventory of FGD gypsum plasterboard

环境负荷项	单位	脱硫石膏回收	原料运输	烘干煅烧	成型	干燥	总计	
资源输入	原煤	kg/m ²	8.68E-03	1.20E-04	3.98E-01	2.15E-01	7.04E-01	1.33E+00
	原油	kg/m ²	3.82E-03	3.31E-03	3.42E-04	1.13E-03	6.05E-04	9.20E-03
	天然气	m ³ /m ²	7.14E-05	1.99E-07	2.04E-08	1.79E-03	3.61E-08	1.86E-03
	石灰石	kg/m ²	2.06E-02	—	—	6.53E-03	—	2.71E-02
	护面纸	kg/m ²	—	4.04E-01	—	—	—	4.04E-01
	SO ₂	kg/m ²	-8.78E-03	—	—	—	—	8.78E-03
	外加剂	kg/m ²	—	—	—	—	—	5.90E-02
	拌合水	kg/m ²	—	—	—	—	—	4.72E+00
污染物排放	CO ₂	kg/m ²	3.07E-02	8.38E-03	7.14E-01	3.83E-01	1.27E+00	2.41E+00
	SO ₂	kg/m ²	8.86E-03	9.01E-06	4.32E-03	1.82E-03	7.70E-03	1.39E-02
	NO _x	kg/m ²	2.22E-04	1.41E-04	2.30E-04	1.55E-03	4.07E-04	2.55E-03
	CO	kg/m ²	1.04E-04	7.00E-05	1.29E-03	5.47E-04	2.30E-03	4.31E-03
	CH ₄	kg/m ²	4.03E-05	1.39E-06	3.79E-03	9.73E-04	6.71E-03	1.15E-02
	NM VOC	kg/m ²	5.28E-05	4.07E-05	—	1.55E-04	—	2.48E-04
颗粒物	kg/m ²	2.07E-02	1.82E-02	7.77E-04	7.45E-04	1.38E-03	4.18E-02	
能耗	总计	MJ/m ²	3.44E-01	1.41E-01	8.34E+00	4.61E+00	1.47E+01	2.82E+01
	比例	%	1.22E-02	5.00E-03	2.96E-01	1.64E-01	5.23E-01	1.00E+00

功能单位石膏板生命周期的主要气态污染物排放是 CO₂，总量为 2.41kg/m²，其次是颗粒物和 SO₂，分别为 0.0418kg/m²，0.0139kg/m²。能耗大的过程废气排放相应也大，干燥过程排放的 CO₂ 占到总量的 52.8%；颗粒物的排放主要集中在脱硫石膏回收阶段和护面纸的运输阶段，这两过程的排放占到总排放量的 93.1%；功能单位石膏板 SO₂ 的排放总量较小，原因是石膏板厂采用低硫煤作为燃料来降低燃煤排放的 SO₂ 对环境的影响。

4.6 特征化和归一化

以脱硫石膏为原料生产纸面石膏板生命周期过程的主要环境影响类型与天然石膏板相同，分别为 GWP, HT, ADP, POCP, AP。根据确定的环境影响类型对脱硫石膏板清单结果进行特征化、归一化和等权重加权计算处理，结果如表 4-9，表 4-10 所示。

表 4-9 脱硫石膏纸面石膏板特征化结果

Table4-9 Characterization results of FGD gypsum plasterboard in different stage

影响类型	单位	脱硫石膏回收	原料运输	烘干、煅烧	成型	干燥
AP	kgSO ₂ 当量	2.38E-04	1.08E-04	4.48E-03	2.91E-03	7.98E-03
HT	kg(1,4)-二氯苯当量	1.72E-02	1.51E-02	1.33E-03	2.65E-03	2.36E-03
GWP	kgCO ₂ 当量	3.15E-02	8.41E-03	7.94E-01	4.03E-01	1.41E+00
POCP	kgC ₂ H ₄ 当量	3.50E-05	2.32E-05	2.49E-04	2.10E-04	4.43E-04
ADP	kg 铈当量	6.08E-07	4.70E-07	7.12E-08	1.94E-07	1.26E-07

表 4-10 脱硫石膏板纸面石膏板归一化结果

Table4-10 The normalization results of FGD gypsum plasterboard in different stage

影响类型	脱硫石膏生产	原料运输	烘干煅烧	成型	干燥	合计
AP	7.96E-16	3.60E-16	1.50E-14	9.72E-15	2.67E-14	5.26E-14
HT	3.46E-16	3.03E-16	2.67E-17	5.31E-17	4.74E-17	7.77E-16
GWP	8.17E-16	2.18E-16	2.06E-14	1.05E-14	3.66E-14	6.86E-14
POCP	7.68E-16	5.10E-16	5.46E-15	4.62E-15	9.74E-15	2.11E-14
ADP	2.84E-17	2.20E-17	3.33E-18	9.04E-18	5.89E-18	6.86E-17
合计	2.76E-15	1.41E-15	4.10E-14	2.48E-14	7.30E-14	1.43E-13

进行归一化和加权计算后发现，五种主要的环境影响类别中，矿产资源耗竭和人体健康损害的环境影响潜值最小，其中矿产资源耗竭占到总环境影响的 0.048%。温室气体效应的贡献率最大，占总环境影响的 47.9%，其次为酸化效应和光化学烟雾效应，分别占到总环境影响的 36.7%和 14.7%。

4.7 结果解释

图 4-3 为脱硫石膏纸面石膏板各生产阶段归一化结果柱状图。从图中可以看出，以脱硫石膏生产纸面石膏板的环境影响主要集中在石膏板的生产过程，其中，煅烧和干燥过程的环境负荷最为突出。结合表 4-8 可知，这两个过程也

是石膏板生命周期能耗较大的阶段，能耗高便化石燃料消耗大，产生的气体排放大，温室气体效应和酸化效应在这两个过程都比较突出。脱硫石膏作为利废原料，分配了电厂脱硫过程的一部分环境负荷。石膏板生产过程主要以煤为燃料，燃煤过程的烟气排放是造成的环境负荷的主要原因。功能单位石膏板生命周期各个阶段的矿产资源消耗均不明显。

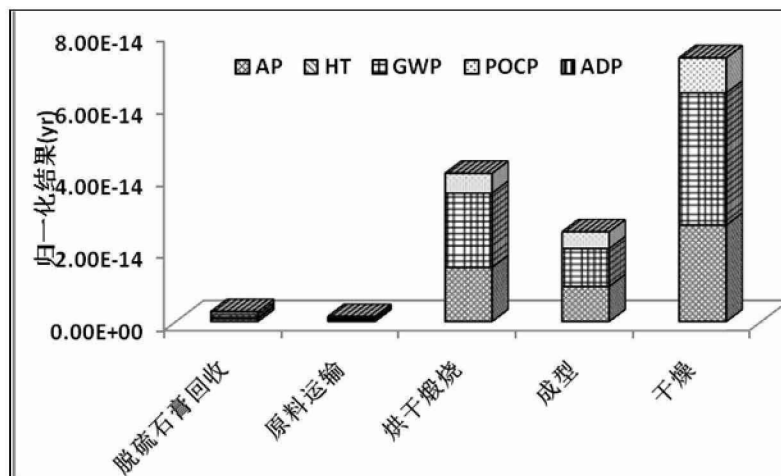


图 4-3 脱硫纸面石膏板各生产阶段归一化结果

Fig.4-3 The normalization results of desulfurization gypsum plasterboard in different stage

图 4-4 所示为脱硫石膏板生命周期各环境影响分类的归一化结果。由图可知，石膏板生命周期各种环境影响的大小依次为： $GWP > AP > POCP > HT > ADP$ 。生产脱硫石膏板的过程中，温室气体效应和酸化效应是其主要的环境负荷类型，其次是光化学烟雾效应。由于石膏板生命周期中能源结构的影响，温室效应和酸化效应突出的过程主要是石膏板的生产过程。

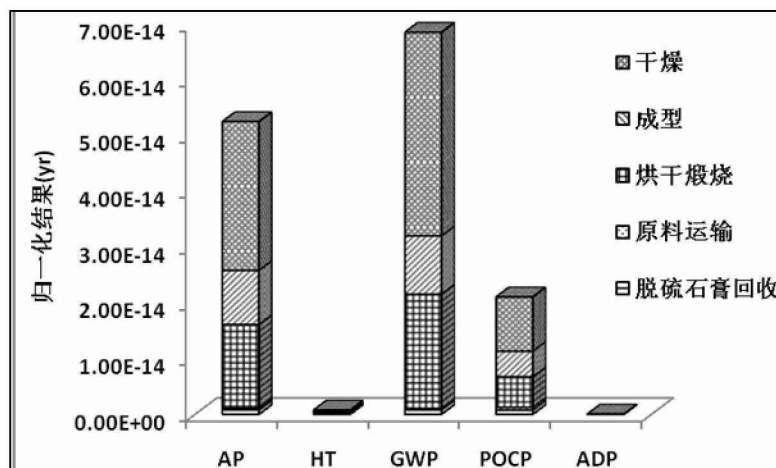


图 4-4 不同环境影响类型的归一化结果

Fig.4-4 The normalization results of impact categories of FGD plasterboard

图 4-5 所示为脱硫石膏板生命周期过程各气态污染物对其环境负荷归一化的贡献值。由图可知，CO₂ 的排放量对石膏板环境负荷总量的贡献值最大，为 42.6%，其次是 SO₂ 和 NO_x，分别占到总环境负荷的 42.9%和 5.31%。

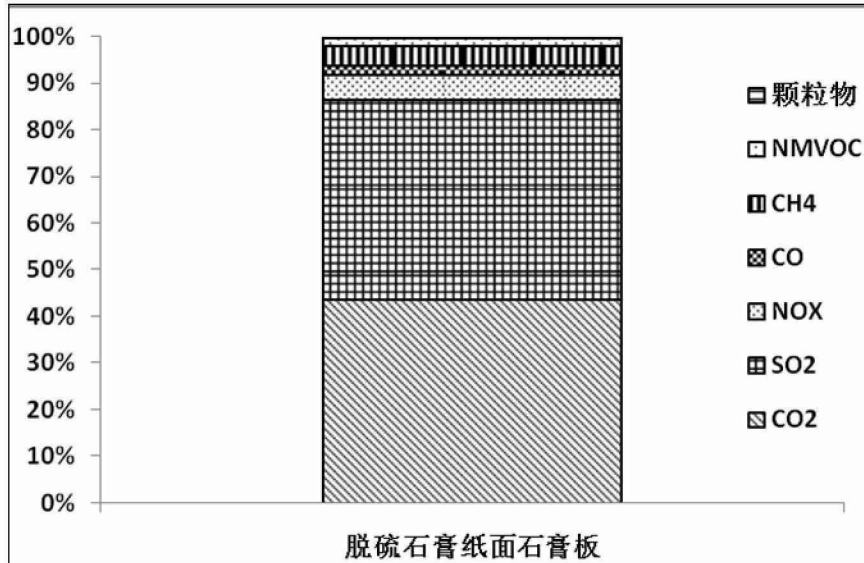


图 4-5 各气态污染物对石膏板环境负荷归一化的贡献

Fig.4-5 The contribution of air pollutants to the plasterboard's environmental impact

图 4-6 所示为脱硫石膏板生命周期各阶段对气体排放物归一化贡献值。由图可知，因颗粒物排放造成的环境影响主要来自脱硫石膏回收过程和原料运输过程，共占到了该类污染物总环境影响的 93.1%。NO_x 和 NMVOC 主要来自石膏板成型过程中电力消耗的间接排放，两种气体在这一阶段的环境影响分别占到该环境项影响的 60.8%，62.4%。

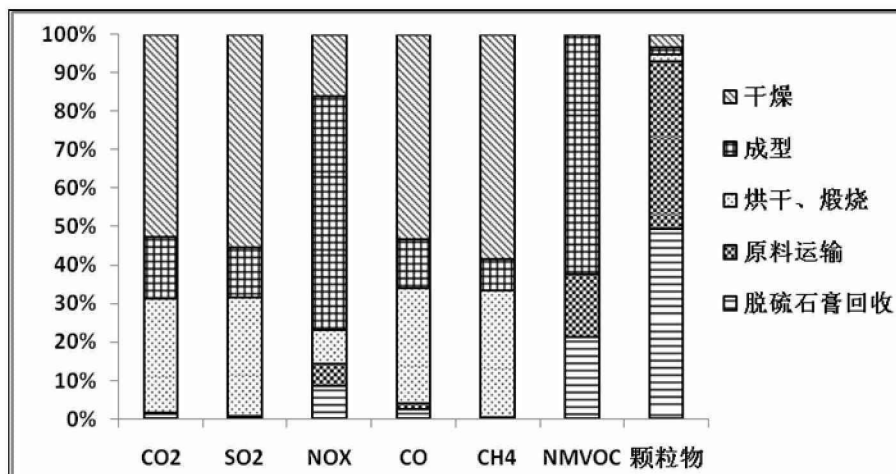


图 4-6 各工序阶段对污染物排放归一化的贡献

Fig.4-6 The contribution of different stage to the air pollutants emission

4.8 本章小结

本文利用生命周期评价的方法对以脱硫石膏生产纸面石膏板进行了生命周期分析,计算得到了脱硫石膏回收、原料运输、脱硫石膏烘干、煅烧、石膏板成型和干燥在内的各阶段环境排放清单,并对各个过程的清单结果进行环境负荷量化分析。结果表明:脱硫石膏板生命周期总能耗 $28.2\text{MJ}/\text{m}^2$,能耗主要集中在石膏板的生产过程,其中煅烧工序和干燥工序的能耗占到石膏板总能耗的 81.9% ,而脱硫石膏回收的能耗只占到生产石膏板总能耗的 1.22% 。功能单位的石膏板在脱硫石膏回收、原料运输及石膏板生产过程的 CO_2 排放量分别为 $3.07\times 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2$, $8.38\times 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^2$, $2.37\text{kg}/\text{m}^2$ 。其中干燥工序的 CO_2 排放为 $1.27\text{kg}/\text{m}^2$,煅烧工序的 CO_2 排放为 $7.14\times 10^{-1}\text{kg}/\text{m}^2$ 。脱硫石膏板的五种主要环境影响类型与天然石膏板相同,温室气体效应是最显著的环境影响类型,占脱硫石膏板环境负荷总量的 47.9% ,其次是酸化效应,为 36.7% 。脱硫石膏板生命周期主要的环境负荷项是 CO_2 的排放,它对脱硫石膏板环境影响的贡献为 43.6% ,其次是 SO_2 的排放,为 42.9% 。

第5章 两种原料石膏板的环境行为比较

天然石膏和脱硫石膏的主要成分均为二水硫酸钙，其物理、化学特性具有共同的规律，经过转化后可以得到五种形态和七种变体，经过煅烧后得到的熟石膏粉和石膏制品在水化动力学、凝结特性、物理性能上并无显著的差别^[67]。主要差异表现在原始形态、机械性能和杂质成分方面，导致其脱水特性、易磨性及煅烧后的熟石膏粉在力学性能、流变性等宏观特征有所不同。

5.1 天然石膏和脱硫石膏的性能和质量

脱硫石膏的主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，杂质主要来源是吸收剂带来的杂质以及未反应完全的亚硫酸钙和煤燃烧未除尽的灰尘。从外观看来，脱硫石膏是含水量为 10%左右的潮湿松散的白色微黄细小颗粒，品位较高含较多的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 Fe^{3+} 等水溶性离子。我国的脱硫石膏白度较低，一般小于 60%，不适合生产雕塑等有白度要求的产品。欧洲的脱硫石膏白度都超过 80%，PH 值为 5~9。天然石膏与之相比，外观呈块状，化学成分与脱硫石膏相差不大，杂质主要以粘土类矿物为主。表 5-1 为天然石膏和脱硫石膏的化学成分表。

表 5-1 天然石膏和脱硫石膏的化学成分 (%)

Table5-1 The composition of natural gypsum and FGD gypsum (%)

类型	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CaO	MgO	SO_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Loss	Na_2O	K_2O	Cl ⁻
脱硫石膏	93.78	30.89	1.30	43.62	2.15	0.86	0.29	0.24	21.04	0.10	0.29	0.04
天然石膏	78.34	33.61	1.00	36.72	3.37	0.97	0.58	1.64	23.91	0.06	0.21	0.01

表 5-2 为天然石膏和脱硫石膏的颗粒粒径分布表。脱硫石膏是潮湿的粉状，未经破碎时颗粒级配不好，颗粒分布主要集中在 30-60 μm ，没有细粉，比表面积小，勃氏比表面积只有天然石膏粉磨后的 40~60%^[2]。用于生产建筑石膏的脱硫石膏应进行改性粉磨，增加细颗粒比例，提高比表面积。天然石膏是块状，经粉碎后是不规则颗粒，颗粒剂级配较好，粗、细颗粒都有。

表 5-2 天然石膏和脱硫石膏颗粒粒径分布 (%)

Table5-2 Particle size distribution of natural gypsum and FGD gypsum (%)

粒度/ μm	>90	70~90	45~70	32~45	24~32	16~24	12~16	<12
脱硫石膏	0.05	0.10	13.4	39.07	22.03	10.48	3.69	10.02
天然石膏	1.55	6.11	15.05	36.21	18.17	6.47	9.69	21.80

5.2 污染物排放与能耗比较

由第三章和第四章对天然石膏纸面石膏板和脱硫石膏纸面石膏板的生命周期清单结果的分析,对石膏板污染物排放进行汇总分析,得到生产功能单位两种石膏板主要气态污染物排放总量如表 5-3 所示。

表 5-3 两种原料石膏板的气态污染物排放

Table5-3 The air pollutants emission of two kinds of plasterboard

类型	单位	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	NMVOC	颗粒物
天然石膏板	kg/m ²	2.43E+00	1.37E-02	4.00E-03	4.69E-03	1.10E-02	5.47E-04	1.64E-01
脱硫石膏板	kg/m ²	2.41E+00	1.39E-02	2.55E-03	4.31E-03	1.15E-02	2.48E-04	4.18E-02

图 5-1 是功能单位的两种石膏板气态污染物排放柱状图。结合表 5-3 可知,两种石膏板的主要气体污染物均为 CO₂、SO₂ 及颗粒物。其中天然石膏板的 CO₂ 排放比脱硫石膏板高出 1%, NO_x、NMVOC 和颗粒物的排放均比脱硫石膏板显著,原因是生产脱硫石膏板减少了原料的开采过程和原料的运输距离,进而减少了这两个过程造成的环境影响。

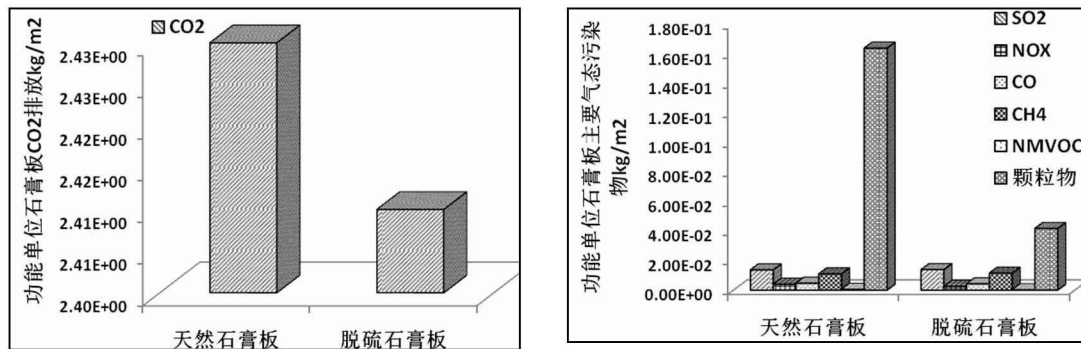


图 5-1 功能单位的两种石膏板气态污染物排放

Fig.5-1 The main air pollutants emission of two raw materials plasterboard

表 5-4 为功能单位的两种原料石膏板生命周期各阶段的能源消耗。

表 5-4 功能单位石膏板生命周期各阶段的能源消耗(MJ)

Table.5-4 The energy consumption in different stage of the two plasterboard (MJ)

名称	原料获取	原料运输	破碎、粉磨	煅烧	成型	干燥	合计
天然石膏板	2.29E-01	1.16E+00	1.67E+00	6.45E+00	4.61E+00	1.47E+01	2.89E+01
脱硫石膏板	3.44E-01	1.41E-01	—	8.34E+00	4.61E+00	1.47E+01	2.82E+01

由表 5-4 可知,生产天然石膏板比生产脱硫石膏板的能耗高出 2%。天然石膏板以开采的石膏为原料,运输距离大,而脱硫石膏板则是利用电厂发电

的固体废弃物为原料，就近利用，同时利废原料具有产品的性质，分配了脱硫过程的部分环境负荷。石膏板生产阶段，天然石膏需要破碎、粉磨，增加了电耗，但脱硫石膏含有 10% 的游离水，煅烧前必须进行烘干，增加了去除附着水的热耗，二者相抵，能耗差别不大。

5.3 各种环境影响类型的比较

表 5-5 为两种石膏板环境影响分类进行归一化和等权重加权后的计算结果。由表可知，天然石膏板生命周期的环境总负荷比脱硫石膏板高出 6%。

表 5-5 两种原料石膏板的归一化结果

Table 5-5 The normalization results of the two kinds of gypsum plasterboard

影响类型	天然石膏纸面石膏板	脱硫石膏纸面石膏板
AP	5.50E-14	5.26E-14
HT	2.81E-15	7.77E-16
GWP	6.89E-14	6.86E-14
POCP	2.46E-14	2.11E-14
ADP	2.89E-16	6.86E-17
合计	1.52E-13	1.43E-13

图 5-2 为两种石膏板环境影响分类的归一化结果对比图。

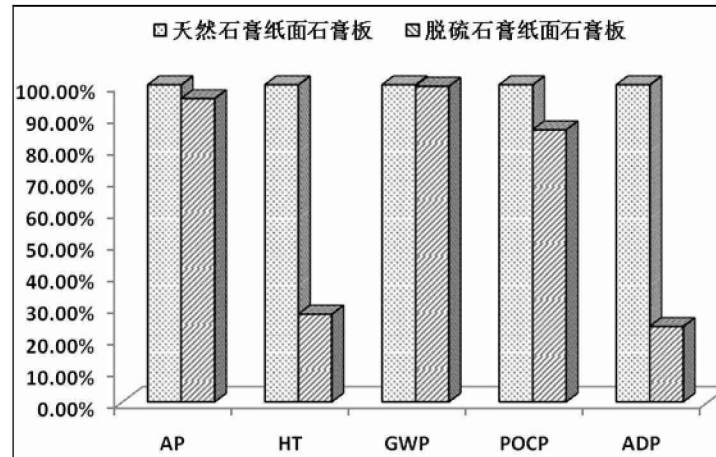


图 5-2 石膏板环境影响分类的归一化结果对比

Fig. 5-2 Comparison between normalization results of environmental impacts

由图 5-2 可知，两种石膏板的环境影响分类中，脱硫石膏板的各项环境影响值均比天然石膏板低，其中人体健康损害效应比天然石膏板低 72% 左右，不可再生资源消耗效应低 76% 左右，使用脱硫石膏生产纸面石膏板反映了利用废

物原料节约不可再生资源的优势。脱硫石膏一般是就近使用，还节省了运输能耗，进而减少了运输过程对人体健康损害效应的贡献。

5.4 纸面石膏板环境负荷改进潜力分析

5.4.1 石膏板生产技术的改进

从两种石膏板各工序能耗表中可以发现，石膏板干燥是两石膏板生命周期能耗较大的过程，高能耗带来高排放、高污染。因此，如能制定合理的干燥工艺，提高干燥机的工作效率将大大降低石膏板的环境负荷。

国外干燥机一般使用清洁能源进行直接热风干燥，能耗先进指标为 $3.14\sim 3.18\times 10^3\text{KJ/kg}$ 水，若国内的干燥机达到这个干燥技术水平，则石膏板节省的能耗为 3.30MJ/m^2 ，减少温室气体效应 0.268kgCO_2 当量/ m^2 。

我国石膏板行业发展初期，煅烧常使用炒锅、回转窑等耗能大，热效率低的设备，使得石膏板生产的综合能耗较大，近十年来，我国积极推进技术创新，自主研发了适合我国石膏板行业的煅烧设备，如高温热风直接加热快速干燥煅烧设备-斯德炉、间接加热连续设备沸腾炉、混烧式流化态 FC-分室石膏煅烧系统以及专门用于干燥工业副产石膏的气流干燥机，这些煅烧设备热效率高，效果好、能耗低，技术水平已达到国内先进。但这些设备多以煤为燃料，气体污染排放重，若能改用清洁能源作燃料，则可大大降低因燃煤而导致的环境负荷。

一些使用天然石膏的中小型企业破碎、粉磨石膏大多采用颚式破碎机和雷蒙磨，破碎周期长，研磨效率低，设备庞大，能耗高，若使用新型鄂破机进行破碎，达到同等破碎要求下，产量可提高一倍，配合柱磨机进行粉磨，生产能耗低，适合石膏板生产线采用。有些企业采用粉碎、煅烧一体化设备—气流煅烧磨，该设备研磨效率比普通的研磨设备高出 50%，煅烧磨中形成的高温气体对石膏粉以热传导、对流和热辐射三种方式构成，传热效果好，热效率高，可达 80%。使用这种设备生产的建筑石膏质量好，能耗低，研磨效率高，制备的建筑石膏较低，对环境没有明显的不利影响^[67]。

5.4.2 污染物预防措施改进

针对不同的污染物采取不同的预防措施也可降低石膏板生产工序对环境的污染。石膏煅烧和石膏板干燥过程产生的 SO_2 、烟尘采用炉内干法脱硫加静电除尘，处理后的烟气经 40 米的烟囱高空排放，也可采用直接使用低硫煤降低 SO_2 的直接排放。石膏板配料、锯边过程产生的粉尘和颗粒物采用袋式除尘器，除尘效率为 99%。生产过程产生的固体废弃物中，原料粉尘可经回收再利用，燃煤过程产生的粉煤灰和烟尘等可经回收后作建材掺合料外售，减少因材料堆

积产生的环境影响。

5.5 本章小结

本章采用生命周期评价方法对天然石膏纸面石膏板和脱硫石膏纸面石膏板进行了对比分析，主要对两种石膏板的资源、能源消耗及环境排放进行了分析比较，对比了两种原料石膏板各生产工序的主要环境影响类型的异同点及环境负荷的大小，讨论了两种原料石膏板的环境热点。结果表明：生产脱硫石膏板的环境负荷比天然石膏板小6%左右，环境负荷的减小主要体现在人体健康损害和不可再生资源耗竭效应上，利用脱硫石膏生产纸面石膏板可有效减少废弃物堆积造成的土地使用，同时节约了天然石膏资源，又间接的减少了因开采石膏造成的土地使用。两种原料石膏板的环境热点工序主要在石膏板的生产阶段，其中以燃煤为燃料的石膏煅烧和石膏板的干燥工序的环境负荷较为突出。

本章还对两种原料石膏板的环境负荷改进潜力进行了分析讨论，从石膏板生产技术角度和污染物的预防角度提出一些参考建议。

结论与展望

本文运用生命周期评价方法对我国建筑材料纸面石膏板进行了分析和研究。以年产 2000 万平方米石膏板的企业为研究对象,以生产 1m^2 的石膏板为功能单位,对纸面石膏板原料获取、原料运输、石膏板生产三个过程的资源、能源以及环境排放进行了定性和定量的研究。论文所得结论如下:

(1) 计算得到以天然石膏和脱硫石膏为原料生产纸面石膏板的生命周期清单,清单结果表明 CO_2 排放是他们生命周期的主要污染物,分别为 $2.43\text{kg}/\text{m}^2$ 和 $2.41\text{kg}/\text{m}^2$,主要来源于煅烧和干燥阶段的能源使用。

(2) 天然石膏板生命周期的总能耗为 $28.9\text{MJ}/\text{m}^2$,能耗主要集中在石膏板的生产过程,其中煅烧和干燥阶段的能耗和占到了总能耗的 73.5%。功能单位的石膏板在原料获取过程、原料运输过程及石膏板生产阶段的 CO_2 排放量分别为 $1.55\times 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2$, $6.90\times 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2$, 和 $2.34\text{kg}/\text{m}^2$,生产过程中干燥工序的 CO_2 排放量达到 $1.27\text{kg}/\text{m}^2$,煅烧工序的 CO_2 排放量达到 $5.55\times 10^{-1}\text{kg}/\text{m}^2$ 。天然石膏纸面石膏板生命周期的主要环境影响类型是温室气体效应,占天然石膏板环境负荷总量的 44.4%,其次是酸化效应,为 35.7%。天然石膏板生命周期最大环境负荷项为 CO_2 的排放,它对天然石膏板环境影响的贡献为 41.6%,其次是 SO_2 的排放,为 38.8%。

(3) 脱硫石膏板生命周期总能耗 $28.2\text{MJ}/\text{m}^2$,能耗主要集中在石膏板的生产过程,其中煅烧工序和干燥工序的能耗占到石膏板总能耗的 81.9%,而脱硫石膏回收的能耗只占到生产石膏板总能耗的 1.22%。功能单位的石膏板在脱硫石膏回收、原料运输及石膏板生产过程的 CO_2 排放量分别为 $3.07\times 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^2$, $8.38\times 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^2$, $2.37\text{kg}/\text{m}^2$ 。其中干燥工序的 CO_2 排放为 $1.27\text{kg}/\text{m}^2$,煅烧工序的 CO_2 排放为 $7.14\times 10^{-1}\text{kg}/\text{m}^2$ 。脱硫石膏板的五种主要环境影响类型与天然石膏板相同,温室气体效应是最显著的环境影响类型,占脱硫石膏板环境影响总量的 47.9%,其次是酸化效应,为 36.7%。脱硫石膏板生命周期主要的环境负荷项是 CO_2 的排放,它对脱硫石膏板环境影响的贡献为 43.6%,其次是 SO_2 的排放,为 42.9%。

(4) 两种石膏板的环境影响大小均为 $\text{GWP}>\text{AP}>\text{POCP}>\text{HT}>\text{ADP}$ 。天然石膏板的各项环境负荷均比脱硫石膏板大,其环境负荷总量比脱硫石膏板高 6%,其中较为显著的是人体健康损害效应和不可再生资源消耗效应,分别高出 72% 和 76%。

本论文对两种原料石膏板进行了生命周期清单分析和生命周期影响评价,得到了两种原料石膏板的生命周期清单和环境负荷结果,为我国建材行业提供

了纸面石膏板的 LCA 数据。但是研究仍有一些不足，因此未来的研究重点是：

建立本地化的矿石开采数据库，获得更贴近我国实际情况的数据，完善纸面石膏板原料开采的基础清单；收集相关数据对石膏板的使用阶段和废弃阶段进行生命周期研究，使材料的整个生命周期过程得以完善；利用土地模型进行石膏板土地使用的讨论，完善纸面石膏板生命周期的研究。

参 考 文 献

- [1] BARNARA N, ANDREW A. Adopting and adapting overseas LCA data and methodologies for building materials in New Zealand[R]. Report for the Ministry of Agriculture and Forestry, 2006:3.
- [2] 郭泰民. 工业副产石膏应用技术[M]. 北京:中国建材工业出版社. 2010:32-179.
- [3] 岳文海. 石膏建筑材料[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2003:357-404.
- [4] 中国矿业年鉴编委会. 中国矿业年鉴 2010[M]. 北京:地震出版社, 2010:46.
- [5] 毛树标. 烟气脱硫石膏综合利用分析[B]. 浙江:浙江大学博士论文. 2005:4-20.
- [6] 中国电力年鉴编辑委员会. 2009 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2009:57-59.
- [7] 中国电力年鉴编辑委员会. 2005 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:67-73.
- [8] 中国电力年鉴编辑委员会. 2006 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2006:56-64.
- [9] 中国电力年鉴编辑委员会. 2007 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2007:58-59.
- [10] 中国电力年鉴编辑委员会. 2008 中国电力年鉴[M]. 北京:中国电力出版社, 2008:52-55.
- [11] CALLIA W. B, ANGELA S. L. A life cycle comparison of disposal and beneficial use of coal combustion products in Florida[J]. Int J LCA, 2008, 13 (3):202 – 211.
- [12] 刘汉忠, 门亚东, 杨杰, 等. 湿法除尘脱硫的技术路线及技术关键[J]. 环境保护科学, 1998, 24(1):1-3.
- [13] 中国环境年鉴编辑委员会. 2009 中国环境年鉴[M]. 北京:中国环境年鉴社, 2009:198.
- [14] PAUL F. The roots of LCA in Switzerland—continuous learning by doing[J]. Int. J LCA, 1997, 2(3):131-134.
- [15] MASATAKA Y. Activities of the LCA—society of Japan(JLCA) and development towards the future. [J] Int. J LCA, 1998, 3(2):69-70.
- [16] NOBUHIKO N. Current LCA database development in Japan—results of the LCA project[J]. Int. J LCA, 2004, 9(6):355-359.
- [17] PRER F, RITA P. Analisis del ciclo de vida—Life Cycle Assessment in Spanish[J]. Int. J LCA, 1998, 3(1):56.
- [18] ANTONIO G, GIAN L B. LCA activities in Italy[J]. Int. J LCA, 1998, 3(2):68.
- [19] YASUNARI M, MICHAEL. B. Development of Life cycle inventories for electricity grid mixes in Japan. [J]Int. J. LCA, 2000, 5(5):295– 305.
- [20] TUOMAS M, TUOMAS H, RIINA A. Land use indicators in life cycle

- assessment[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2012(17):277 – 286.
- [21] RUBY P, ALVIN B. A Diagnostic model for green productivity assessment of manufacturing processes[J]. *Int J LCA*, 2004, 9(6): 379 – 386.
- [22] LI G Q, NIE Z R, ZHOU H M. An Accumulative Model for the Comparative Life Cycle Assessment Case Study: Iron and Steel Process. [J] *Int J LCA*, 2002, 7(4):225 – 229.
- [23] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京:化学工业出版社, 2003, 122-124.
- [24] FISHER K. Life Cycle Assessment of plasterboard[J]. *Environmental Resources Management*, 2008, 4:27.
- [25] SCION G. Sustainability in the Australian and New Zealand Gypsum Board Industry[R]. Report for The Gypsum Board Manufacturers of Australasia, 2006:3-5.
- [26] Scientific and Technical Committee, Environment and Raw Materials European. Life Cycle Assessment on plasterboard:European Environmental Declaration— Explanatory Note[R]. 2010:10-15.
- [27] SATE S. Life cycle considerations of the Flue Gas Desulphurization system at a Lignite-Fired power plant in Thailand[J]. *Int J LCA*, 2004, 9(6) :387 – 393.
- [28] Rachael A. An Evaluation of Flue Gas Desulfurization gypsum for abandoned mine land reclamation[D]. Columbus: Univ. of Ohio State 2009:70-93.
- [29] PRAKAYPUN W, JINAWATH S. Comparative effect of additives on the mechanical properties of plasters made from flue-gas desulfurized and natural gypsums[J]. *Materials and Structures*, 2003, 36: 51-58.
- [30] XU R. Integrating LCA and LCC study of FGD system at a thermal power plant in China[J]. *Journal of software*, 2010, 5(12) :1425-1434.
- [31] 李友平. 燃煤电厂烟气脱硫技术综合评价及专家系统研究[D]. 成都:四川大学硕士学位论文, 2005, 16-24.
- [32] 孔华. 石灰石湿法烟气脱硫技术的试验和理论研究[D]. 浙江:浙江大学博士论文. 2005, 35-45.
- [33] 田明明. 大型火电机组石灰石—石膏湿法 FGD 工艺分析及其后评价[D]. 武汉:武汉理工大学硕士论文. 2007, 11.
- [34] 张均刚. 中小型燃煤锅炉及工业炉窑烟气除尘脱硫设备的研究[D]. 武汉:武汉理工硕士学位论文. 2004, 45-78.
- [35] 孙晶. 火电厂湿式烟气脱硫废水处理技术的实验研究[D]. 北京:华北电力大学硕士论文. 2007, 63-68.
- [36] 朱元龙. 中国大型燃煤电站烟气脱硫技术应用及比较性研究[D]. 北京:北京清华大学硕士论文, 2004:40-56.
- [37] 左铁镛. 循环型社会材料循环与环境影响评价 [M]. 北京:科学出版社, 2008:5-11.
- [38] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期方法及应用 [M]. 北京:气象出版

- 社, 2002:34-51.
- [39] ISO14040-2006:Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. 2006.
- [40] ISO14040-2006:Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines. 2006.
- [41] 高峰. 生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用[B]. 北京:北京工业大学博士论文, 2005:8-40.
- [42] JEROEN B. Guinée, Marieke Gorrée, Reinout Heijungs, et al. Life cycle assessment:An operational guide to the ISO standards[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001:48-55.
- [43] 深圳市兴信行咨询有限公司. 2007年版中国石膏板产品研究报告[R]. 2007:23.
- [44] 王玉彬. 大气环境工程师实用手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2003:346-350.
- [45] DI X H, NIE Z R, YU B R. Life Cycle Inventory for Electricity Generation in China Int J LCA 2007, 12(4)217 – 224.
- [46] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2009[M]. 北京:中国统计出版社, 2009:258-263.
- [47] 全国能源基础与管理标准化技术委员. 中华人民共和国国家标准. GB/T2589-2008 综合能耗计算通则[S]. 北京:中国标准出版社, 2008:7-8.
- [48] 狄向华. 资源与材料生命周期分析中若干基础问题的研究[B]. 北京:北京工业大学博士论文, 2005:10.
- [49] 刘孜, 易斌, 高晓晶等. 我国火电行业氮氧化物排放现状及减排建议[J]污染减排. 2008, 402(16):7-10.
- [50] 中国国家标准化管理委员会. GB/T9775-2008 纸面石膏板[S]. 北京:中国标准出版社出版, 2008:5.
- [51] 冯菊莲. 石膏纸板与纸面石膏板技术性能关系探讨[J]. 建筑石膏与胶凝材料, 2003, (1):9-14.
- [52] 陈庆蔚, 张俊, 钱毅, 等. 当代废纸制浆技术[M]. 北京:中国轻工业出版社 2005:45-53.
- [53] 张运展. 现代废纸制浆技术问答[M]. 北京:化学工业出版社, 2009:3-5.
- [54] 赵会芳, 方程冉, 张建英. 废纸再生的环境经济评价[J]. 西部纸业论坛 2005, 2(34):7-8.
- [55] 中国物流与采购联合会. 2009 物流年鉴[M]. 北京:中国物资出版社, 2009:159.
- [56] 中华人民共和国交通运输部. 全国公路水路运输量专项调查资料汇编[M]. 北京:中国经济出版社, 2010:208.
- [57] 马丽萍. 材料生命周期评价基础之道路交通运输本地化研究[D]. 北京:北京工业大学硕士论文. 2007, 56-58.
- [58] 贾同春. 国产石膏板生产线石膏粉制备工艺探讨[J]. 非金属矿, 1995, 108(6):25-28.

- [59] 曹志强. 利用脱硫石膏生产纸面石膏板的工艺技术[J]. 粉煤灰 2009(4):41-42.
- [60] 北京博奇电力科技有限公司. 湿法脱硫系统安全运行与节能降耗[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:182-215.
- [61] 国家环境总局. HJ/T179-2005 火电厂烟气脱硫工程技术规范石灰石/石灰—石膏法[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2005:11-12.
- [62] 赵鹏勃, 王力鹏, 王海涛, 等. 不同粒径石灰石的脱硫效率试验研究[J]. 内蒙古电力技术 2010, 28(5):24-26.
- [63] 环境保护部. 中华人民共和国国家标准. GB13223-2011 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2011:5.
- [64] 张增寿. 脱硫石膏的资源综合利用[J]. 新材料产业, 2007(12):27-30.
- [65] 周和敏. 钢铁材料生产过程环境协调性评价研究[B]. 北京:北京工业大学博士学位论文, 2001:110-120.
- [66] 安洪光. 火力发电厂二氧化硫排放量的计算方法[J]. 华北电力技术, 2000(4):11-12.
- [67] 方文仓, 周建中, 施存有, 等. 脱硫石膏综合利用的关键工艺技术及装备[J]. 新型建筑材料, 2010(12):8-11.

攻读硕士学位期间所发表的学术论文

马丽丽, 龚先政, 高峰, 王志宏. 纸面石膏板生产的资源消耗与环境排放[J].
武汉理工大学学报, 2012, 34(3): 120-123.

致 谢

转眼间，20 余年的学生生活就要接近尾声，在这里，我要感谢所有在我求学路上给予我帮助的人，是你们，给了我披荆斩棘的动力，是你们，燃起了我扬帆起航的信心！

研究生三年，最想感谢的是我的导师龚先政教授，能够在龚老师的悉心指导下完成科研任务是我的荣幸。导师一丝不苟的工作作风，严谨求实的科研态度，踏踏实实的做事风格让我在以后的人生道路上受用良久。同时，导师还在思想上、生活上给我以无微不至的关怀和帮助，在此谨向龚老师致以最诚挚的谢意！

感谢硕士期间所有教授过我知识，所有指导过我的老师们，你们渊博的知识，诲人不倦的态度让我深受感动和启发。特别感谢课题组的王志宏教授和高峰讲师对我课题提供的建议和帮助。感谢王为教授，崔素萍教授，陈文娟老师对我学习和生活上的帮助。

感谢实验室的刘宇博士、孙博学博士、张宇峰博士、李琛博士，沈万霞师姐，是你们慷慨的给予，才使得课题顺利的完成。感谢杨耀坤、丁宁同学对课题的有益探讨和帮助，感谢实验室的师弟、师妹们，是你们的善良和欢笑浇灌了我们的友谊之花。

在此要特别感谢中国建筑材料研究总院，感谢闫浩春高级工程师，闫工在课题数据方面的收集给予了很大的帮助，闫工学无止境的学习态度和雷厉风行的办事风格也会对我今后的学习和工作有很深的影响。

感谢聂祚仁教授提供的良好的科研平台，感谢国家 863 项目和国家科技支撑项目的支持！

最后，感谢我的父母和兄弟姐妹们，感谢我的男朋友，是你们一如既往的支持和鼓励才给了我前进的力量！

马丽丽

2012 年 6 月于北京工业大学