

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2023.06.009

# 玻璃纤维产品的环境影响评价

孟一鸣<sup>1</sup>, 龚先政<sup>1\*</sup>, 周丽玮<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 材料与制造学部 工业大数据应用技术国家工程实验室, 北京 100124;

2. 中国建筑材料联合会, 北京 100831)

**摘要:** 结合我国玻璃纤维产业现状, 采用生命周期评价(LCA)方法对玻璃纤维从“摇篮”到“大门”的资源/能源消耗、污染物排放进行清单编制和环境影响潜力分析。结果表明, 人体致癌毒性(HTPc)、人体非致癌毒性(HTPnc)对环境的影响较大, 分别占53.51%、30.53%。原料熔制阶段对全球变暖效应(GWP)、颗粒物形成(PMEP)、光化学臭氧形成对生态系统的影响(EOFP)、陆地酸化(AP)、人体致癌毒性(HTPc)、人体非致癌毒性(HTPnc)、化石能源耗竭(FFP)的贡献均最大, 分别占78.57%、72.87%、66.00%、78.16%、71.69%、88.90%和78.10%。将生产玻璃纤维整个过程使用的电力改变电力结构时, 碳排放呈一定幅度下降, 7项环境影响指标均下降, 可有效降低环境影响。

**关键词:** 玻璃纤维; 生命周期评价; 碳排放; 绿色化发展

**中图分类号:** TU524; X781.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8965(2023)06-0043-08

## Environmental impact assessment of glass fiber product

MENG Yiming<sup>1</sup>, GONG Xianzheng<sup>1\*</sup>, ZHOU Liwei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, National Engineering Laboratory for Industrial Big Data Application Technology, Beijing 100124; 2. China Building Materials Federation, Beijing 100831)

**Abstract:** Combined with the current situation of glass fiber industry, this study uses the life cycle assessment (LCA) method to investigate the resource and energy consumption and pollutant emission of glass fiber from the “cradle” to the “gate”, compile the inventory, and characterize and normalize the data by using the recipe analysis method. The results show that human carcinogenic toxicity (HTPc) and human non carcinogenic toxicity (HTPnc) have a great impact on the environment, accounting for 53.51% and 30.53%, respectively. The ingredient melting phase contributes greatly to global warming potential (GWP), fine particulate matter formation (PMEP), photochemical ozone formation on terrestrial ecosystems (EOFP), terrestrial acidification (AP), HTPc, HTPnc, fossil resource scarcity (FFP), accounting for 78.57%, 72.87%, 66.00%, 78.16%, 71.69%, 88.90%, and 78.10%, respectively. When the power structure in the whole process of producing glass fiber is changed, the carbon emission shows a certain decrease, and the seven environmental impact indicators are reduced, which can effectively reduce the environmental impact.

**Keywords:** glass fiber; life cycle assessment; carbon emissions; greenization development

## 0 引言

近年来, 我国的玻璃纤维纱产量快速增长。根据中国玻璃纤维工业协会统计数据, 2021年我国玻璃纤维产量达到624万吨, 占世界总产量的一半以上<sup>[1]</sup>。玻璃纤维由于抗拉强度高、绝缘性好的特性被应用于增强复合材料、绝缘及保温隔热材料, 应用范围的扩展和下游行业的市场容量提升是玻璃纤维行业增长的直接原因<sup>[2]</sup>。目前, 玻璃纤维产业已形成从玻璃纤维、玻璃纤维制品到玻璃纤维复合材料

的完整产业链, 图1为2020年中国玻璃纤维下游需求结构, 玻璃纤维的下游需求主要在建筑材料、交通运输及电子电器等领域, 近些年还在能源环保领域得以应用。

玻璃纤维也是制备复合材料最丰富和最常用的纤维, 是工业中应用最广泛的纤维<sup>[3]</sup>。但是玻璃纤维工业是一种能耗较高且资源消耗较大的产业, 每生产1t玻璃纤维所消耗的原料和燃料成本占总成本的61%左右, 且排放大量的SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>等有毒有害气体, 因此能源和原料的利用效率对玻璃纤维生产成本会造成较大影响<sup>[4]</sup>。

**基金项目:** 国家重点研发课题(2022YFC3901701)

**第一作者:** 孟一鸣(1999-), 硕士研究生, 主要从事材料生命周期评价与生态设计研究。mym135@emails.bjut.edu.cn

**通讯作者:** 龚先政, 研究员/教授, 研究方向为生态环境材料、生命周期分析与生态设计。gongxianzheng@bjut.edu.cn

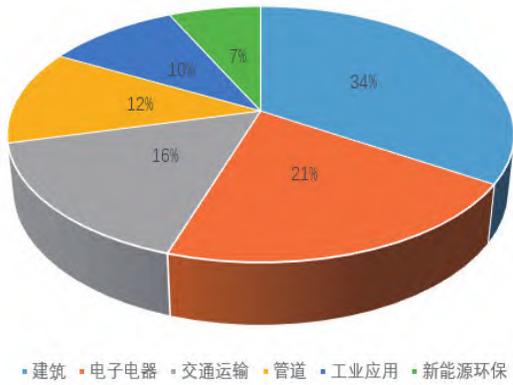


图1 2020年中国玻璃纤维下游需求结构(%)

Fig.1 Downstream demand structure of glass fiber in China in 2020 (%)

目前,与玻璃纤维有关的生命周期研究集中在建材行业和节能环保领域的玻璃纤维复合材料方面。2012年,欧洲玻璃纤维生产者协会发布了关于连续玻璃纤维产品的生命周期评价(LCA)报告,该报告涉及无捻粗纱(合股和直接无捻粗纱)和短切原丝(干法和湿法短切原丝),结果表明,对所有产品来说,大部分的能耗、不可再生资源的消耗、温室气体排放量的增加和酸化都来自玻璃熔制阶段,与之相比,生产用户所需产品的下游工序(如涂浸润剂、拉丝和络纱、短切等)只在LCA结果中起到有限的作用<sup>[5]</sup>。蔡晓萍等<sup>[6]</sup>针对常用的9类规格型号叶片(主要原材料为玻璃纤维),选取酸化、富营养化、温室效应和光化学臭氧合成等4个指标进行生命周期环境影响评价和对比分析,结果表明,其中以GWP指标为例,随着风机装机容量持续大幅增长及风机叶片大量生产使用,预计2030年和2060年仅风机叶片碳排放总量(以CO<sub>2</sub>当量计)累计可达到2.3×10<sup>7</sup>t和2.0×10<sup>8</sup>t。但通过使用碳-玻纤维复合材料,回收利用退役风电叶片,可显著降低环境影响。Chunheng Zhou等<sup>[7]</sup>利用LCA方法评估红麻纤维增强水泥墙板(KFRC)的环境状况,将其与传统的玻璃纤维增强水泥产品(GFRC)进行比较,结果显示,红麻纤维代替玻璃纤维作为水泥墙板的加固材料,无论是结构性能还是保温性能,都显著降低了对环境的影响。尽管玻璃纤维的质量含量为2%,水泥的质量含量为38%,但按单位质量计算,玻璃纤维的生产、使用和处置对环境的影响远大于水泥。Hermansson等<sup>[8]</sup>研究发现,从玻璃纤维增强复合材料(GFRP)到碳纤维增强复合材料(CFRP)的转变可能增加对气候的影响和能源使用,这主要是能源密集型碳纤维生产过程的结果。Yuan Yao等<sup>[9]</sup>建

立了一种新的材料、能量、火用和碳流数学模型,与国内80600t/y玻璃纤维炉的运行数据进行了验证,获得了与玻璃生产相关的CO<sub>2</sub>排放量、主要贡献者、减排潜力和经济影响。

本文通过研究玻璃纤维生产过程的生命周期清单,采用生命周期评价方法分析玻璃纤维产品的各单元过程的环境影响,辨识各个阶段环境影响贡献,并预测2020年到2030年生产玻璃纤维产品的碳排放潜力,提出降低环境负荷碳排放可行的解决方案,为玻璃纤维产业发展提供参考。

## 1 研究对象和研究方法

生命周期评价又称为环境影响评价或环境协调性评价,是一种针对产品在生命周期中的能源输入、资源输入、污染物输出所造成的潜在环境影响进行整合汇编并评价的方法<sup>[10-11]</sup>,一般包括目标与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4部分内容<sup>[12]</sup>。

### 1.1 系统边界、功能单位及主要数据来源

本研究选取生产1t玻璃纤维产品作为功能单位(单丝直径小于9μm),将玻璃纤维产品的系统边界分为原料开采、运输和配料(原料获取)、原料熔制、玻璃液的拉丝成型和浸润剂的涂覆(纤维成型)、原丝烘干、加工包装和废弃回收6个阶段。由于玻璃纤维产品的用途较为多样,且使用过的玻璃纤维产品较难回收,因此本研究不考虑产品的使用阶段和使用后的废弃回收阶段。本研究的系统边界如图2所示。

我国玻璃纤维企业大多采用池窑拉丝法,基于山东某玻璃纤维企业及其上游原料供应商的调研,以池窑拉丝法为例对玻璃纤维生产工艺流程进行分析。此外,生产数据还来源于国家行业标准<sup>[13-14]</sup>、文献[15]、[16]及产品生产工艺规范等。

本研究采用的原料和辅料主要有叶蜡石、石灰石、石

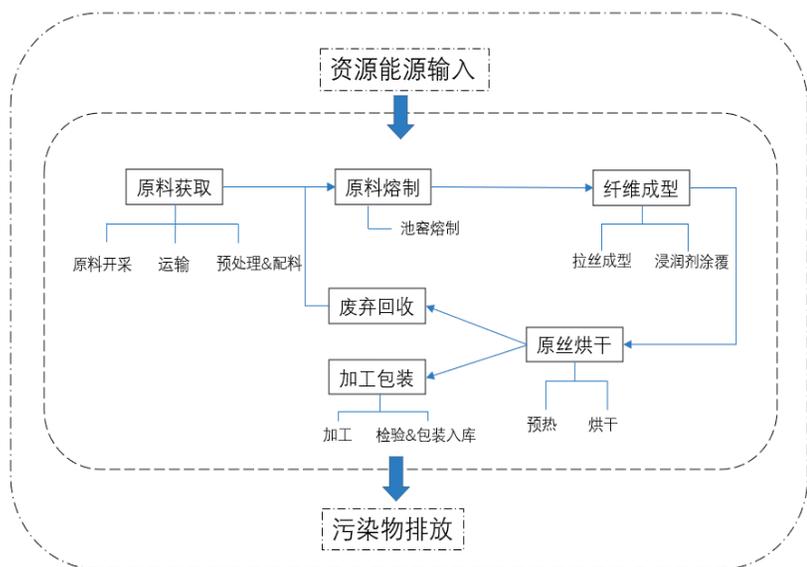


图2 玻璃纤维产品生产的系统边界

Fig.2 System boundary of glass fiber product production

英砂、硼钙石、高岭土、萤石、芒硝和淀粉型浸润剂等。原料获取主要涉及叶蜡石、石灰石、硼钙石和高岭土等矿物原料开采、加工及运输,原材料获取阶段的生命周期排放包括开采和生产过程中的直接排放和因挖掘与运输工具引起的间接排放。石英砂、硼钙石、萤石、芒硝清单数据来源于Eco-invent数据库,石灰石、高岭土、叶蜡石等清单数据、电力、天然气等能源生产与材料运输背景数据等来源于北京工业大学材料产品生命周期评价基础数据库<sup>[17]</sup>。不同厂家的浸润剂配方不同,本研究选取淀粉型浸润剂,主要组成是改性淀粉、油类(氢化植物油)、阳离子软化剂(硬脂酸)、增塑剂(聚乙二醇)、辅助成膜剂(水溶性环氧树脂)等,数据

来源于Eco-invent数据库。

本研究采取某玻璃纤维生产企业的回收处理工艺对玻璃纤维废丝进行回收,得到的粉末回炉重造,玻纤生产过程中会产生两种玻璃纤维废丝,一种是不含浸润剂的玻璃纤维废丝,回收工艺包括粉碎粉磨和除尘处理,数据为调研结果,另一种是含浸润剂的玻璃纤维废丝,由于浸润剂热分解温度低,分解后残余物少,所以容易在热清洗工序中去除,回收工艺流程可从长废丝的收集开始,包括清捡除铁、粉碎、清洗、烘干、筛分收尘等环节,数据来自于张丽娟<sup>[18]</sup>的研究。

表1 生产吨玻璃纤维的生命周期编目清单

Tab.1 Life cycle inventory for production of 1 ton glass fibers

环境负荷项目	单位	原料获取	原料熔制	纤维成型	原丝烘干	加工包装	废弃回收	总计	
能源输入	原煤	kg	3.43E+01	5.99E+02	1.50E+01	2.92E+01	1.30E+01	2.62E+00	6.93E+02
	原油	kg	1.76E+00	2.04E+02	9.99E-02	1.16E+01	8.65E-02	3.91E+00	2.21E+02
	天然气	m <sup>3</sup>	4.59E+01	1.87E+01	2.46E-01	9.82E-01	2.13E-01	-4.20E+00	6.18E+01
资源输入	叶蜡石	t	3.45E-01						3.45E-01
	石灰石	t	3.30E-01						3.30E-01
	石英砂	t	2.20E-01						2.20E-01
	硼钙石	t	1.73E-01						1.73E-01
	高岭土	t	2.51E-01						2.51E-01
	萤石	t		2.95E-02					2.95E-02
	芒硝	t		6.28E-03					6.28E-03
	改性淀粉	t			1.18E-02				7.17E-03
	氢化植物油	t			6.56E-04				1.43E-02
	植物油乳化剂	t			2.28E-03				
	水性环氧树脂	t			1.18E-03				7.46E-03
	聚乙二醇	t			5.90E-03				
	冰醋酸	t			1.05E-03				
	偶联剂	t			1.31E-03				
阳离子软化剂	t			3.94E-04					
新鲜水	t	2.73E-02	1.64E-01	3.09E+00		2.64E-01	-2.67E-03	3.54E+00	
气体排放	CO <sub>2</sub>	kg	1.22E+02	4.00E+02		2.28E+01		1.89E+01	5.64E+02
	CH <sub>4</sub>	kg	8.76E-03	7.13E-03		4.07E-04		-3.06E-04	1.60E-02
	N <sub>2</sub> O	kg	3.87E-03	7.13E-04		4.07E-05		-3.23E-04	4.30E-03
	CO	kg	3.43E-01	2.07E-01		1.18E-02		-1.76E-02	5.44E-01
	SO <sub>2</sub>	kg	2.00E-01	1.22E-01		2.55E-03		-1.92E-02	3.05E-01
	No <sub>x</sub>	kg	1.39E+00	2.28E-01		8.13E-03		-9.51E-02	1.53E+00
	NM VOC	kg	1.21E-01	1.64E-01	1.27E-01	6.54E-02		8.12E-04	4.78E-01
	PM	kg	1.10E-01	1.11E-02		6.35E-04	8.62E-02	2.24E-02	2.30E-01
	As	kg	1.37E-05	7.13E-07		4.07E-08		-1.28E-06	1.32E-05
	Cd	kg	8.74E-08	6.42E-09		3.66E-10		-8.04E-09	8.61E-08
	Cr	kg	1.16E-06	9.27E-08		5.29E-09		-1.06E-07	1.15E-06
	Hg	kg	6.03E-07	3.85E-06		2.20E-07		2.37E-07	4.91E-06
	Ni	kg	1.72E-06	9.27E-08		5.29E-09		-1.61E-07	1.66E-06
	Pb	kg	1.20E-05	7.85E-08		4.48E-09		-1.17E-06	1.09E-05
	V	kg	1.98E-05	0.00E+00		0.00E+00		-1.93E-06	1.79E-05
	Zn	kg	1.65E-05	5.21E-06		2.97E-07		-1.21E-06	2.08E-05
水体排放	COD	kg	5.11E-04	0.00E+00		0.00E+00		-4.99E-05	4.61E-04

1.2 清单分析结果

通过对某玻纤生产企业的数  
据调研及整合后得到玻璃纤维生  
产企业生产 1t 玻璃纤维的输入与  
输出清单(见表 1)。

2 生命周期影响评  
价

本文采用 ReCiPe2016 方法  
作为研究工具。目前,国际上提  
出了许多影响评价模型的解决方  
案,主要有工业产品环境设计法  
(EDIP)、环境优化级方法(EPS)、  
生态指数法(CML2001)、生态稀  
缺法(Eco-Indicator)、ReCiPe 等。  
ReCiPe2016 方法吸取了 CML、  
Eco-Indicator99 等方法的优点,  
是一种结合了中间点评价模型和  
终点评价模型的评价方法体系,  
包括 17 种中间点环境影响类型和 3 种终点环境影响类型,  
是近年来国内外广泛应用的环境影响评价方法之一<sup>[19]</sup>。

根据决定环境影响类型的原则和玻璃纤维产品环境  
热点,选取全球变暖潜力(GWP)、颗粒物形成潜力(PMFP)、  
化石能源稀缺性(FFP)、陆地酸化(AP)、臭氧形成对生态系  
统的影响(EOFP)、人体致癌毒性(HTPc)、人体非致癌毒性  
(HTPnc)及矿产资源耗竭(SOP)共 8 项环境影响指标,如表

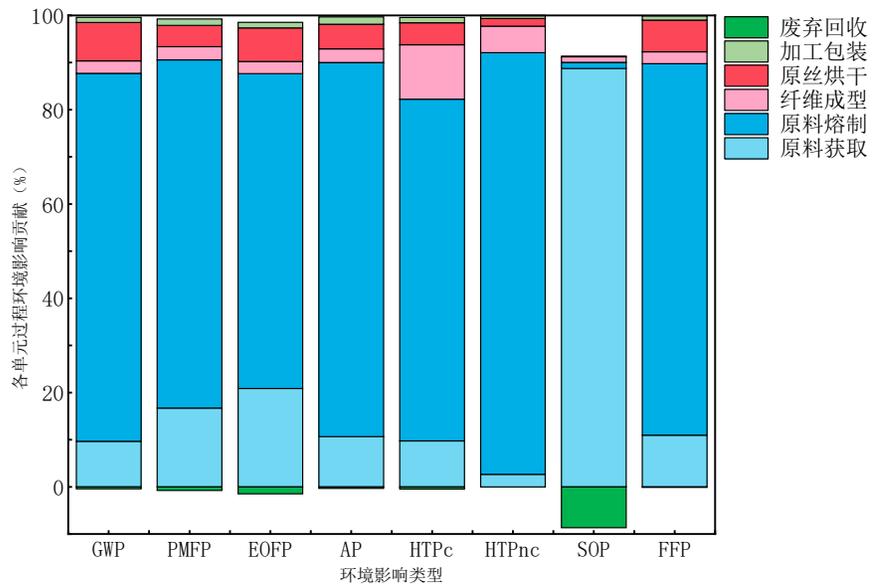


图 3 玻璃纤维生产各单元过程特征化占比

Fig.3 Proportion of characterization of each unit of glass fiber production

2 所示。

2.1 特征化结果

特征化是对环境负荷项目造成的环境影响或环境损害  
进行量化的过程,通过不同环境影响类型对应的特征化因  
子将清单结果换算成通用单位,并将其累加得到量化的指  
标结果。本研究得到的特征化结果及占比如表 3、图 3 所示。

生命周期中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 等气体的排放导致了

表 2 玻璃纤维生命周期评价环境影响类型及单位

Tab.2 T Environment impact types and units of glass fiber life cycle assessment

环境影响类型	单位	环境负荷项目
全球变暖效应 (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O
光化学臭氧形成对生态系统的影响 (EOFP)	kg NO <sub>x</sub> eq	NO <sub>x</sub> 、NMVOC
颗粒物形成 (PMFP)	kg PM <sub>2.5</sub> eq	PM <sub>2.5</sub> 、NH <sub>3</sub> 、NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub>
陆地酸化 (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	SO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、NO <sub>x</sub> 、硫酸雾
人体致癌毒性 (HTPc)	kg 1,4-DCB	As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、Zn
人体非致癌毒性 (HTPnc)	kg 1,4-DCB	As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、V、Zn
矿产资源耗竭 (SOP)	kg Cu eq	石灰石
化石能源耗竭 (FFP)	kg oil eq	原煤、原油、天然气

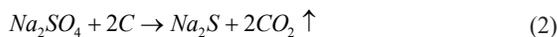
表 3 玻璃纤维生产的特征化结果

Tab.3 Characterization results of glass fiber production

影响类型	原料获取	原料熔制	纤维成型	原丝烘干	加工包装	废弃回收	共计
GWP/(kg CO <sub>2</sub> eq)	2.06E+02	1.80E+03	5.63E+01	1.74E+02	2.29E+01	-8.80E+00	2.25E+03
PMFP/(kg PM <sub>2.5</sub> eq)	7.93E-01	3.50E+00	1.32E-01	2.14E-01	6.50E-02	-3.55E-02	4.67E+00
EOFP/(kg NO <sub>x</sub> eq)	1.87E+00	6.00E+00	2.34E-01	6.39E-01	1.05E-01	-1.32E-01	8.72E+00
AP/(kg SO <sub>2</sub> eq)	1.33E+00	9.90E+00	3.59E-01	6.55E-01	1.92E-01	-3.95E-02	1.24E+01
HTPc/(kg 1,4-DCB)	9.86E-01	7.34E+00	1.17E+00	4.72E-01	1.12E-01	-4.49E-02	1.00E+01
HTPnc/(kg 1,4-DCB)	2.51E+01	8.46E+02	5.31E+01	1.53E+01	5.96E+00	2.79E-01	9.46E+02
SOP/(kg Cu eq)	6.90E+00	9.96E-02	9.26E-02	8.58E-03	0.00E+00	-6.73E-01	6.42E+00
FFP/(kg oil eq)	7.01E+01	5.05E+02	1.62E+01	4.31E+01	5.74E+00	-6.30E-01	6.39E+02

温室效应的产生,生产1功能单位的玻璃纤维的生命周期GWP为2250kg CO<sub>2</sub> eq,原料熔制阶段贡献最大,占78.57%。原料熔制阶段对PMFP、EOFP、AP、HTPc、HTPnc、FFP的贡献均较大,分别占了72.87%、66.00%、78.16%、71.69%、88.90%和78.10%。原料获取阶段对SOP贡献最大,达到88.75%。废弃回收阶段在GWP、PMFP、EOFP、AP、HTPc、FFP和SOP的环境影响贡献为负值,分别减少0.38%、0.74%、1.45%、0.31%、0.44%、8.66%和0.10%的对应环境影响,对HTPnc则贡献0.03%的环境负荷。

根据上述结果可知,原料熔制阶段是玻璃纤维产品全生命周期的环境热点,原因在于该阶段相较于其他阶段能源需求高。由于原料熔点较高,生产需要保持炉窑内1600℃的高温熔化原料,为了保证反应充分进行,玻璃纤维生产采用全氧燃烧技术,需消耗大量的电力、氧气、天然气及蒸汽,且产生大量温室气体、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和NMVOC等气体污染物<sup>[20]</sup>。同时,石灰石、硼钙石等配合料碳酸盐的分解(如式(1)、(2)所示),也产生了大量的二氧化碳。因此,原料熔制阶段对GWP、PMFP、EOFP、AP、HTPnc、FFP等指标的贡献较高。



原料获取阶段除了原料的破碎、混合等电耗带来的环境影响外,叶蜡石、石灰石等原料的开采和运输贡献了该阶段较大的环境影响。原料的开采和运输过程的主要能耗为柴油和电力,造成的环境污染为粉尘、CO和NO<sub>x</sub>等,所以原料获取阶段对PMFP和EOFP指标有一定的贡献。此外,原料获取阶段对SOP的贡献最大,主要是因为该阶段石灰石、砂岩等资源使用。

纤维成型阶段中除拉丝成型等电耗带来的环境影响外,淀粉型浸润剂的生产也贡献了一小部分环境影响。增塑剂(聚乙二醇)、辅助成膜剂(水溶性环氧树脂)和硅烷偶联剂等在生产过程中涉及一系列有机物的排放,因此纤维成型阶段对HTPc等指标有较小的贡献。

由于废弃回收阶段中废丝作为原料被回收利用,减少了叶蜡石等矿石开采破碎产生的环境影响,因此在计算清单时设定为负值,以体现回收再生产生的环境效益。

## 2.2 归一化结果

归一化是通过一个特定的绝对值来计算类型参数的相对值的过程,使得不同的环境影响类型具备可比性,在归一化计算过程中要注意方法的一致性。本研究的归一化结果的各单元过程进一步量化分析见图4、图5。

由图4和图5可以看出,在其生产的6个单元过程中,环境综合影响从大到小依次是原料熔制、纤维成型、原料获取、原丝烘干、加工包装、废弃回收。玻璃纤维生产过程环境影响较严重的是HTPnc、HTPc、FFP和EOFP,主要原因是原料熔制和电力的生产使用。玻璃纤维生产过程对环境的影响由强到弱依次为HTPnc>HTPc>FFP>EOFP>AP>GWP>PMFP>SOP。HTPnc在整个工艺的贡献较高,达到53.51%,该环境影响类型占比较大的主要原因是原料熔制过程中采用纯氧燃烧技术,以纯度大于等于93%的氧气作

为助燃燃料,这一因素占HTPnc的57.52%。HTPnc主要由原料熔制阶段的电力贡献,该阶段使用的电力占整个过程的80%以上,且我国目前的主要供电方式为火力发电,火力发电重金属排放相对较高。

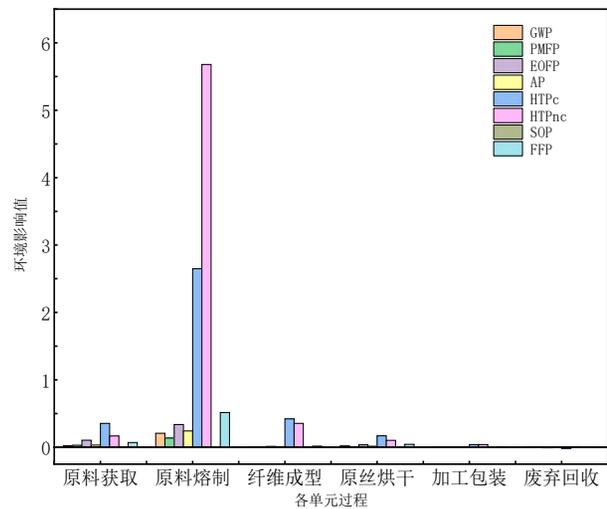


图4 玻璃纤维生产的各单元过程归一化结果对比

Fig.4 Comparison of normalization results of each unit process of glass fiber production

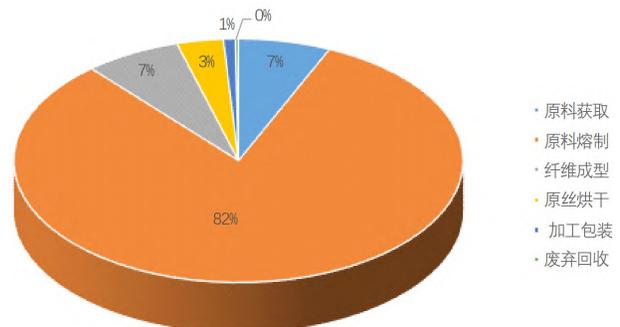


图5 各单元过程的贡献情况

Fig.5 Contribution of each module process

## 3 玻璃纤维生产中远期环境影响评估及改进建议

### 3.1 玻璃纤维生产中远期碳排放时间序列结果分析

当前,实现碳达峰、碳中和是我国工业领域可持续发展的需要。对玻璃纤维生产的碳排放核算和中远期预测是推动该领域实现双碳目标的重要基础。由于单位玻璃纤维生产能耗相对较高,节能减碳是玻璃纤维生产企业面临的重大课题。经前文研究,电力消耗是碳排放的主要来源。因此,本研究依据能源部和中国电力企业联合会等相关部门的预测<sup>[21-22]</sup>,设置2020年、2025年和2030年我国电力结构情景,如表4所示。与基准情景相比,到2030年不可再生能源发电比例会逐步下降。碳排放因子可通过计算平均增长率得出<sup>[23-24]</sup>,即可得出在生产流程和工艺不变的情况下仅改变电力结构的碳排放潜力,图6为2020年到2030年吨玻璃纤

维产品的碳排放潜力。由图6可知,随着电力结构的不断改进,单位玻璃纤维生产的碳排放量逐年降低。2030年吨玻璃纤维产品碳排放与2020年相比下降12.96%。

表4 电力结构预测  
Tab.4 Forecast of power structure

发电类型	2020年电力结构	2025年电力结构	2030年电力结构
	占比/%	占比/%	占比/%
水力发电	17.77	17.72	17.65
风力发电	5.53	8.93	12.50
火力发电	66.88	62.18	55.55
核能发电	4.76	5.45	6.80
光伏发电	3.06	4.50	7.50

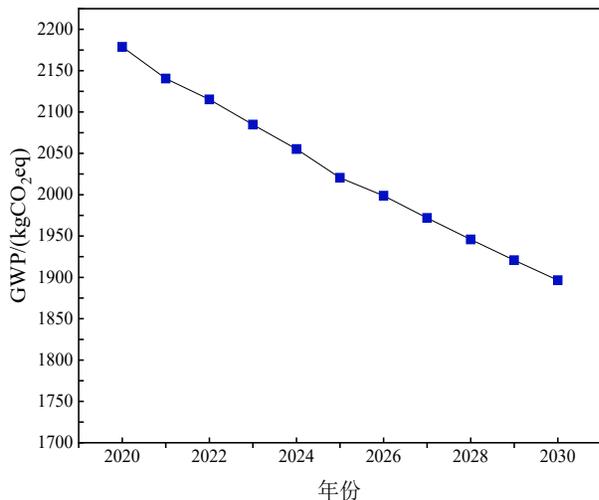


图6 不同电力结构吨玻璃纤维产品碳排放

Fig.6 Carbon emissions of 1 ton glass fiber production in different power structures

3.2 不同电力结构下的玻璃纤维生产环境影响对比

如前文研究,电力是主要的环境影响贡献因素。为进一步探究不同发电方式对玻璃纤维生产的环境影响,从而为玻璃纤维行业节能减碳提供技术及理论支持,采用情景分析方法,在生产流程和工艺不变的情况下,将原来供电方式仅火力发电改为表4中2030年所示发电方式,图7为2030年清洁电力生产玻璃纤维和仅火力发电生产玻璃纤维的各单元归一化结果对比,图8为2030年清洁电力生产玻璃纤维和仅火力发电生产玻璃纤维的特征化结果百分比对比。

由图7和图8可以看出,原料熔制阶段是降低玻璃纤维生产环境影响的主要环节,能源需求量高的原料熔制阶段经电力结构改进后,总环境影响下降为原来的80.93%。其他阶段均有较小幅下降。玻璃纤维生产的电力结构改变后,8个环境影响中间点大部分呈下降态势,其中GWP、PMFP、EOFP、AP、FFP、HTPc和HTPnc等7个环境评价指标均出现不同程度的下降,分别下降到原本的77.48%、81.21%、73.20%、65.43%、76.27%、86.90%和80.0%,而SOP出现上升的情况,增加到原来的108.05%。GWP的下降是由于清洁电力相比仅火力发电产生的CO<sub>2</sub>排放量更低。PMFP、

EOFP和AP的降低是因为清洁电力生产会产生更少的颗粒物、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>。原本对环境影响较大的HTPnc和HTPc的下降原因主要是清洁电力生产时释放的铅、铬等重金属的量明显降低。SOP出现上升情况是因为清洁电力含6.8%核能发电,核能发电消耗了铜、铝和铁等矿产能源,SOP是玻璃纤维生产中对环境影响最小的环境评价指标,且更换清洁电力后SOP上升幅度并不大。因此,玻璃纤维生产更换为清洁电力时,对环境的影响有明显下降。

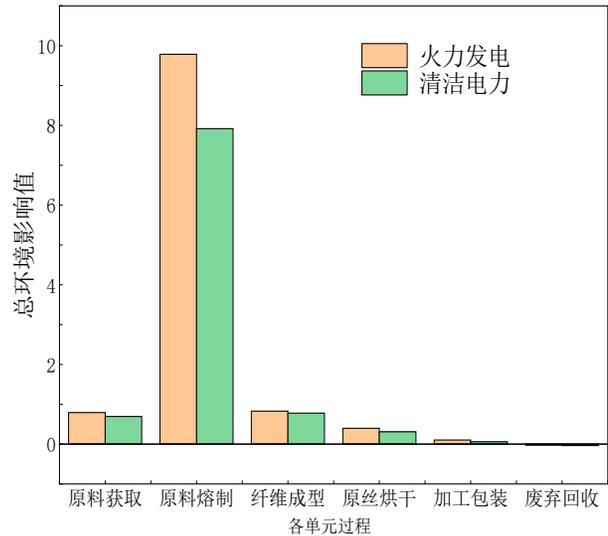


图7 不同电力结构生产玻璃纤维的各单元过程归一化结果对比

Fig.7 Comparison of normalization results of unit process of glass fibers production in different power structures

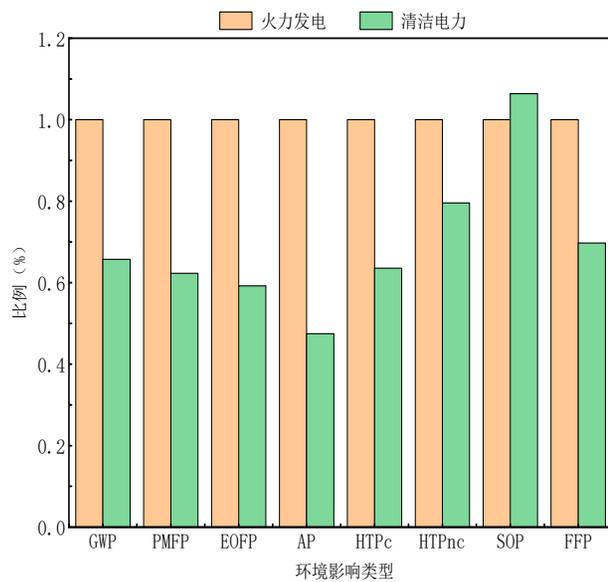


图8 不同电力结构生产玻璃纤维的特征化结果对比  
Fig.8 Comparison of characterization results of glass fiber production in different power structures

### 3.3 改进建议

玻璃纤维的原料熔制阶段能源需求量大,造成大量污染物的排放,从而导致HTPc和HTPnc环境影响较为严重,生产企业应选取使用清洁电力生产玻璃纤维,对节能减排有重大意义。此外,提高能源利用效率,尤其在节电方面可减少玻璃纤维生产的能源消耗,在余热利用方面,挖掘窑炉及通路余热利用技术如热量回收及动力回收技术、蒸汽供应系统冷凝水回收技术、循环水热能回收技术和压缩机热能回收技术等均可减少多次热交换,提高热源的利用效率,达到节能减排效果<sup>[25]</sup>。在尾气处理方面,提高烟气除尘脱硝技术水平,引入废气全干法治理等先进处理技术,处理后的窑炉废气生成氮气和氨,可实现废气无害化处理,与传统处理工艺相比,污染物的去除率更高<sup>[26]</sup>。在熔制工艺方面,提高窑炉的使用效率,采用鼓泡技术、大流量、多分拉漏板、电助熔和顶烧/侧烧/斜烧等不同位置角度的立体燃烧技术,开展氢能替代天然气技术研究,采用天然气和氢气混合气,将纯氧燃烧技术和氢气燃烧技术相结合,逐步实现燃烧过程的CO<sub>2</sub>零排放<sup>[27]</sup>。在原料配方方面,玻璃纤维生产过程中碳酸盐分解产生大量CO<sub>2</sub>,深化玻璃配方研究,开发低碳矿物原辅料代替常规高碳矿物原辅料,采取引入硅灰石等新原料,取消萤石、硼化物等原辅料的使用,也是玻纤工业节能减排的方向之一<sup>[4]</sup>。

## 4 结论

本研究采用生命周期评价方法,对我国池窑法生产玻璃纤维产品进行了环境影响评价,采用清洁电力结构代替的方法有效降低并量化了玻璃纤维生产的环境影响。主要结论如下:

1)原料熔制阶段是玻璃纤维产品全生命周期的环境热点,对GWP、PMFP、EOFP、AP、HTPc、HTPnc、FFP的贡献均最大,分别占78.87%、66.00%、78.16%、71.69%、88.90%和78.10%。这主要是因为原料熔制自身直接排放和熔制过程中消耗的电力产生了大量的温室气体、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和NMVOC等污染物。SOP中原料获取阶段贡献最大,达到88.75%,主要是由于该阶段石灰石的开采破碎引起的。

2)废弃回收阶段在GWP、PMFP、EOFP、AP、HTPc、FFP和SOP的环境影响贡献为负值,分别减少0.38%、0.74%、1.45%、0.31%、0.44%、8.66%和0.10%的对应环境影响,而HTPnc则贡献0.03%的环境负荷,这是因为废弃回收阶段中废丝作为原料被回收利用,减少了叶蜡石等矿石开采破碎产生的环境影响。

3)HTPc、HTPnc是玻璃纤维生产过程最严重的2个环境影响参数。玻璃纤维生产过程对环境的影响由强到弱依次为HTPnc>HTPc>FFP>EOFP>AP>GWP>PMFP>SOP。

4)随着电力结构的不断改进,单位玻璃纤维生产的碳排放量逐年降低。2030年吨玻璃纤维产品碳排放与2020年相比下降12.96%。玻璃纤维的生产由仅火力发电更换为2030年的电力结构时,其中GWP、PMFP、EOFP、AP、FFP、HTPc和HTPnc等7个环境评价指标均出现不同幅度下降,分别下降到原本的65.75%、64.32%、59.22%、47.49%、

63.58%、79.59%和69.73%,而SOP出现上升的情况,增加到原来的106.38%。

### 参考文献

- [1]杨静.我国玻纤用叶蜡石资源保障性分析[J].玻璃纤维,2019(06):5-10.
- [2]徐凤,聂琼,徐红.玻璃纤维的性能及其产品的开发[J].轻纺工业与技术,2011,40(05):40-41.
- [3]RAKESH P, DIWAKAR V, VENKATESH K, et al. A concise report on properties of hybrid composites manufactured from glass and natural fibers[J]. Materials today proceedings, 2020,22:2008-2015.
- [4]刘宇.玻璃纤维行业绿色制造探索[J].能源研究与管理,2018(03):124-126.
- [5]欧洲玻纤协会发布连续玻纤产品生命周期评价报告[J].国外塑料,2012,30(11):17.
- [6]蔡晓萍,段华波,马艺,等.基于生命周期分析的风机叶片环境影响评价[J].深圳大学学报(理工版),2023,40(01):40-47.
- [7]ZHOU C, SHI S Q, CHEN Z, et al. Comparative environmental life cycle assessment of fiber reinforced cement panel between kenaf and glass fibers[J]. Journal of cleaner production, 2018,200:196-204.
- [8]HERMANSSON F, JANSSEN M, SVANSTROM M. Prospective study of lignin-based and recycled carbon fibers in composites through meta-analysis of life cycle assessments[J]. Journal of cleaner production, 2019,223:946-956.
- [9]YAO Y, HE J, CHEN Q, et al. Analysis of energy, exergy and CO<sub>2</sub> emissions in a fiberglass furnace with oxy-fuel combustion[J]. Fuel, 2023,348:128484.
- [10]MOHAMMED F, BISWAS W K, YAO H, et al. Identification of an environmentally friendly symbiotic process for the reuse of industrial byproduct - An LCA perspective[J]. Journal of cleaner production, 2016,112:3376-3387.
- [11]MATTILA T J, PAKARINEN S, SOKKA L. Quantifying the total environmental impacts of an industrial symbiosis - a comparison of process-, hybrid and input-output life cycle assessment[J]. Environmental science & technology, 2010,44(11):4309-4314.
- [12]ISO 14040:2006, Environmental management: Life cycle assessment - Principles and framework[S].
- [13]GB/T 24040-2008,环境管理 生命周期评价 原则与框架[S].
- [14]GB/T 24044-2008,环境管理 生命周期评价 要求与指南[S].
- [15]孙振海,袁美芹.玻璃纤维废丝的处理和利用[J].玻璃纤维,2008(05):4-6.
- [16]张华,曹国荣,钟殷琦.玻璃纤维废丝回收处理工艺的探讨和应用[J].玻璃纤维,2015(02):15-17.

[17]Beijing University of Technology. Material environmental load database –sinocenter[EB/OL]. <http://cnmlca.bjut.edu.cn>.

[18]废玻璃制备泡沫玻璃的环境协调性分析[D]. 北京:北京工业大学,2016.

[19]樊毓杰. 烧结钛铁硼制造流程的环境影响评价[D]. 北京:北京工业大学,2021.

[20]乔磊,王晓磊,陈聪. 玻璃纤维窑炉烟气余热利用的探讨[J]. 节能,2021,40(02):69-70.

[21]中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2021[M]. 北京:中国建材出版社,2021.

[22]2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[EB/OL]. (2021-03-19). <http://www.chinapower.com.cn/tynfd/zcdt/20210320/59388.html>.

[23]典型可再生能源发电的生命周期评价[D]. 北京:北京工业大学,2023.

[24]李明阳,高峰,孙博学,等. 基于目标情景的中国铝生产碳减排与碳达峰分析[J]. 中国有色金属学报,2022,32(01):148-158.

[25]乔磊,王晓磊,陈聪. 玻璃纤维窑炉烟气余热利用的探讨[J]. 节能,2021,40(02):69-70.

[26]阮翠英,何寿喜,许卫平. 玻璃纤维窑炉废气治理技术现状、关键问题和展望[J]. 当代化工研究,2022(07):75-77.

[27]叶轶. 绿色氢燃料开辟新技术和新市场[J]. 玻璃纤维,2022(03):46-48.