

细旦丙纶长丝生命周期分析研究

江建平¹, 许斯佳², 邓 佶¹, 郭熙桃², 柯伟斌¹, 郭清海¹, 邱志明^{2*}

(1. 广东蒙泰高新纤维股份有限公司, 广东 揭阳 515500; 2. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:以细旦丙纶长丝的生产过程作为分析对象,利用生命周期分析(LCA)方法,选取6项环境影响类别包括全球变暖潜值(GWP)、酸化效应潜值(AP)、陆地生态毒性潜值(TETP)、光化学氧化潜值(POCP)、富营养化潜值(EP)、能耗(EC),量化丙纶细旦长丝生产过程的环境影响;将细旦丙纶长丝织造成布、再制成运动装,与涤纶布和锦纶6布及运动装进行LCA对比分析,并对对比分析运动装生产过程的碳排放量。结果表明:相同质量下,3种布在6项环境影响指标中各有优势;相同面积下,细旦丙纶布的6项环境影响类别数值均最小,对环境的影响最小;在6项环境影响类别中,细旦丙纶运动装的各项数值均为最小,其中生产1件运动装的GWP仅为1.92% kg CO₂ eq.;在3种运动装的生产过程中,细旦丙纶运动装生产阶段中碳排放量最高的为织造阶段,占比31%,涤纶运动装和锦纶6运动装生产阶段中碳排放量最高的均是纤维制备阶段,占比分别为35%和41%。

关键词:细旦丙纶长丝 生命周期分析 环境影响 碳排放量

中图分类号:TQ342+.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0041(2022)06-0033-05

聚丙烯纤维俗称丙纶,目前世界各国对丙纶的开发与研究十分积极,其应用领域不断扩大,如医用防护服、纤维织物增强混凝土等^[1]。丙纶具有许多独特的性能,例如质轻、耐酸碱等,但常规丙纶吸湿性极差、粗糙,导致丙纶服装舒适性差。为解决上述问题,细旦丙纶技术应运而生,细旦丙纶制作成的衣物具有柔软、透气和导湿等优点。细旦丙纶是指线密度小于1.0 dtex的丙纶,该类纤维的细小直径优势和丙纶自身的疏水特性,使其具有明显的毛细管效应,从而提高丙纶织物的穿着舒适性。

生命周期分析(LCA)是一种分析评价方法,可用于量化评估产品在整个价值链中的环境影响^[2-3]。从分析方法上看,LCA已被广泛用于纤维的环境效果评价。马俊滨等^[4]利用LCA方法分析量化黑色原液着色聚酯短纤维生产阶段的环境影响。随着全球环境问题的日益突出及我国对碳排放的重视,LCA环境评价方法因其量化分析结果可以指导产品进行优化,可逐步实现节能减排的绿色环保目标,势必逐渐普及。

LCA作为一种日益成熟的分析评估体系,可对细旦丙纶长丝生产过程的环境影响进行量化评价。作者利用LCA分析方法对细旦丙纶长丝的生产过程进行分析计算;为了更直观地评价该过程的环境影响,将常规涤纶长丝和锦纶6长丝的生产过程加入LCA评价体系,进一步将3种长丝

织造为梭织布,制备成运动装,对以上多个生产过程的环境影响进行LCA分析,拟通过量化数据客观对比分析3种纤维材料制备的梭织布及运动装的环境影响指标。

1 LCA分析

按照ISO 14040—2006/Amd 1—2020《环境管理.产品寿命周期评价.原则和框架.修订1》、ISO 14044—2006/Amd 2—2020《环境影响管理.产品寿命周期评价.要求和导则.修订2》和GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》规定的4个步骤即目标与范围定义、清单分析、影响评价、结果解释,对细旦丙纶长丝的生产过程进行LCA分析计算;对细旦丙纶布、涤纶布、锦纶6布的生产过程进行LCA分析计算并对比环境影响;对细旦丙纶运动装、涤纶运动装和锦纶6运动装3种运动装的生产过程进行LCA分析计算并对比环境影响,计算建模软件采用Gabi ts 6.0版本。

收稿日期:2022-07-22;修改稿收到日期:2022-11-06。

作者简介:江建平(1972—),男,工程师,主要从事丙纶长丝生产技术管理、新产品及新技术的研发。E-mail: 286719335@qq.com。

基金项目:揭阳市(扬帆计划)引进创新创业团队和领军人才项目(CXTD2021002)。

* 通信联系人。E-mail:mszqiu@scut.edu.cn。

1.1 目标与范围定义

LCA分析对象分别为细旦丙纶长丝、细旦丙纶布、涤纶布、锦纶6布、细旦丙纶运动装、涤纶运动装和锦纶6运动装。LCA分析其生产过程的环境影响的系统边界如图1、图2所示。

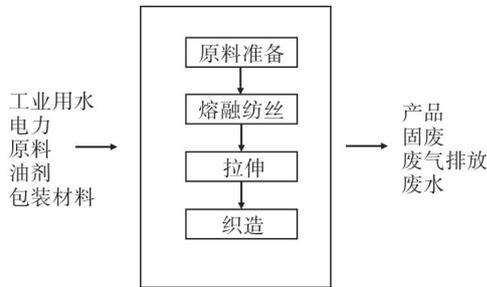


图1 3种纤维布生产过程的LCA系统边界

Fig. 1 LCA system boundary of production process for three kinds of fabric

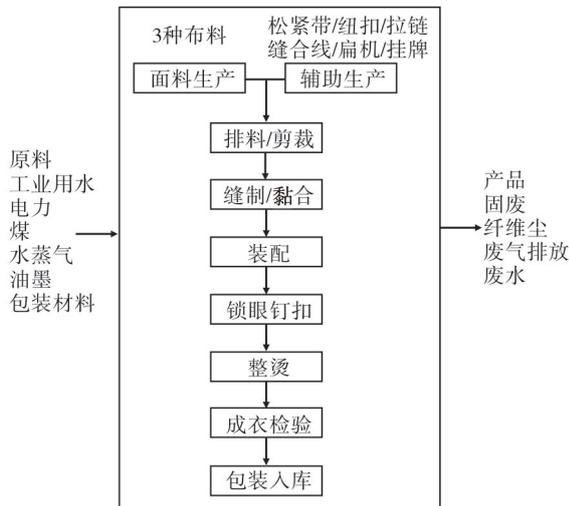


图2 3种运动装生产过程的LCA系统边界

Fig. 2 LCA system boundary of production process for three kinds of sportswear

LCA分析评价选取表1所示的6种环境影响指标。其中,全球变暖潜值(GWP)是定义温室气体相对强度的一种方法,环境影响因子为二氧化碳(CO_2),以 CO_2 当量为标准单位,也就是说 CO_2 的潜能值被定义为1,潜能值越高,对温室效应的贡献就越大^[5-6];酸化效应(AP)主要来源于生产过程中的二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、氨气(NH_3)和氯化氢(HCl)等排放,也包括电力生产过程的间接排放^[7-8];陆地生态毒性潜值(TETP)主要来源于二氯苯(DCB)及铬等重金属^[9-10];光化学氧化潜值(POCP)是用来表征造成光化学烟雾的可能性,在原料生产和电力生产过程中均会

有相关气体释放,以当量乙烯(C_2H_4)作为单位^[11-12];富营养化潜值(EP)来源于进入水体的氮、磷等营养物质,可能由工业废水排放、生活污水排放及农药使用等活动导致^[13];能耗(EC)包括可再生能源与不可再生能源,可用于评价能耗大小。

表1 环境影响类别及环境影响因子

Tab. 1 Environmental impact categories and environmental impact factors

环境影响类别	环境影响因子	单位
GWP	CO_2	kg CO_2 eq.
AP	SO_2	kg SO_2 eq.
TETP	DCB	kg DCB eq.
POCP	C_2H_4	kg C_2H_4 eq.
EP	磷酸盐(PO_4^{3-})	kg PO_4^{3-} eq.
EC	可再生能源与不可再生能源	MJ

1.2 清单分析

细旦丙纶长丝、涤纶长丝和锦纶6长丝的工艺数据为华南地区纤维企业调研数据及清洁生产指标中的一级指标,制作运动装的工艺数据来源于华南地区某服装公司,原料、电力、水等来源于Gabi ts 6.0数据库,优选来源于我国的数据,欧盟和德国的数据作为补充。

细旦丙纶长丝的生产过程主要包括熔融纺丝、多级拉伸后处理。细旦丙纶布的生产过程是在生产长丝的基础上增加一个织造步骤。涤纶布和锦纶6布的生产过程包括原料准备、熔融纺丝、拉伸、织造。运动装由一件T恤和长裤组成,生产过程主要分为两个阶段即布料生产阶段和成衣阶段,布料生产包括纺丝和织造,成衣阶段包括辅料生产、排料剪裁、车缝、装配、锁眼钉扣、整烫、成衣检验和包装入库。

1.3 影响评价

采用软件Gabi ts 6.0提供的CML 2001评价方法,以表1所示的6种环境影响类别及环境影响因子作为评估指标,利用软件计算分析得到环境影响结果。细旦丙纶长丝的产量为100 kg,细旦丙纶布的产量为100 kg,涤纶布和锦纶6布的产量为1 420 kg,运动装的产量均为3 400 kg(细旦丙纶丙纶运动装15 164件,涤纶运动装10 000件,锦纶6运动装12 105件)。为便于比较,将细旦丙纶长丝的环境影响转换为生产1 kg产品所造成的环境影响,LCA结果见表2;将3种纤维布的环境影响均转换为生产1 kg产品所造成的环境影响,LCA结果见表3;将3种运动装的环境影

响均转换为生产 1 件产品所造成的环境影响, LCA 结果见表 4。

表 2 生产 1 kg 细旦丙纶长丝的 LCA 结果
Tab. 2 LCA results of producing 1 kg fine denier polypropylene filament

环境影响类别	参数
GWP/ kg CO ₂ eq.	3.7
AP × 10 ² / kg SO ₂ eq.	0.76
TETP × 10 ² / kg DCB eq.	0.87
POCP × 10 ³ / kg C ₂ H ₄ eq.	1.1
EP × 10 ³ / kg PO ₄ ³⁻ eq.	0.84
EC × 10 ² / MJ	1.1

表 3 生产 1 kg 纤维布的 LCA 结果
Tab. 3 LCA results of producing 1 kg fabric

环境影响类别	参数		
	细旦丙纶布	涤纶布	锦纶 6 布
GWP/ kg CO ₂ eq.	7.5	6.3	11.0
AP × 10 ² / kg SO ₂ eq.	2.0	2.6	2.5
TETP × 10 ² / kg DCB eq.	1.4	1.6	1.3
POCP × 10 ³ / kg C ₂ H ₄ eq.	2.5	3.4	5.0
EP × 10 ³ / kg PO ₄ ³⁻ eq.	2.2	2.1	3.2
EC × 10 ² / MJ	1.6	1.3	2.3

表 4 生产 1 件运动装的 LCA 结果
Tab. 4 LCA results of producing one sportswear

环境影响类别	参数		
	细旦丙纶运动装	涤纶运动装	锦纶 6 运动装
GWP/ kg CO ₂ eq.	1.92	2.45	3.80
AP × 10 ³ / kg SO ₂ eq.	5.76	10.7	9.15
TETP × 10 ² / kg DCB eq.	3.16	3.42	3.22
POCP × 10 ⁴ / kg C ₂ H ₄ eq.	4.76	11.6	15.9
EP × 10 ⁴ / kg PO ₄ ³⁻ eq.	9.66	10.8	15.6
EC/ MJ	48.7	54.0	85.6

1.4 结果解释

由表 2、3 可知,细旦丙纶长丝织造成布会使各项环境影响指标大幅上升,意味着对环境的影响更加剧烈。当产量均为 1 kg 时,将细旦丙纶布与涤纶布和锦纶 6 布相比,根据不同的环境影响类别,三者有不同的表现。因为丙纶的密度是 0.91 g/cm³,涤纶的密度是 1.38 g/cm³,锦纶 6 的密度是 1.14 g/cm³,所以生产相同质量的产品,细旦丙纶布的面积更大,是涤纶布的 1.52 倍、锦纶 6 布的 1.25 倍。假设 3 种布的面积相同,则根据 6 种环境影响类别,细旦丙纶布的环境影响最小。

为了更加直观地比较,将 3 种布制备为夏季运动装,以生产 1 件运动装的环境影响来进行对比。由表 4 的 GWP 数据可得,细旦丙纶运动装的碳排放小于涤纶和锦纶 6 运动装,这与纺丝过程中释放的挥发性气体有关,也与电能和煤等能耗相关,这受我国火电为主的电力结构影响^[4]。根据表 4 的 AP 数据,细旦丙纶运动装的 AP 数值小于涤纶运动装和锦纶 6 运动装,这是因为细旦丙纶运动装的原料是聚丙烯,在熔融纺丝步骤排放的酸性气体很少。根据表 4 的 TETP 数据,细旦丙纶运动装的 TETP 数值仍为最小,但是 3 种运动装的 TETP 数值较为接近,这是因为 3 种运动装在生产过程中都很少排放重金属,主要是来自发电过程的重金属。根据表 4 的 POCP 数据,细旦丙纶运动装的 POCP 数值最小,锦纶 6 运动装的 POCP 数值最高,是因为锦纶 6 在原料生产加工时会有相关气体释放。锦纶 6 含有 N 元素,在生产过程中排放的污水会导致水体富营养化,所以表 4 中锦纶 6 运动装的 EP 数值最高,聚丙烯不含有上述元素,故细旦丙纶运动装的 EP 数值最小。根据表 4 的 EC 数据可知,锦纶 6 运动装生产过程中的能耗最高,细旦丙纶运动装生产过程中的能耗最小。

综上所述,在生产同样数量的 3 种运动装过程中,细旦丙纶运动装对环境的影响最小,在 6 项环境影响类别中均表现出优势。

2 LCA 分析运动装生产过程的碳排放量

近年来,随着“碳达峰”、“碳中和”等概念被提出,我国对碳排放愈加重视。LCA 分析方法可以对产品生命周期的碳排放进行定量计算。采用 Gabi ts 6.0 软件计算得到的 GWP 值可以定量地反映生产过程中各阶段的温室气体排放,其中将单位 CO₂ 排放量为基准值,其他温室气体会自动换算成 CO₂ 当量,因而可将 GWP 值近似作为生产过程的碳排放量,从而反映生产过程对温室效应的贡献。以 3 种面料运动装生产过程的碳排放量为例,生产的 3 种运动装产量均为 3 400 kg,纤维制备阶段包括熔融纺丝步骤和后处理步骤,各生产阶段的碳排放量见表 5。根据表 5 所示 3 种面料运动装各个生产阶段的碳排放量,计算各生产阶段的碳排放量所占的比例,见表 6。

表5 3种运动装各生产阶段的碳排放量

Tab. 5 Carbon emission in each production stage of three kinds of sportswear

运动装	碳排放量/kg CO ₂ eq.						
	纤维制备	织造	排料剪裁	车缝	装配	整烫	包装
细旦丙纶	8 603.31	8 137.46	94.73	6 570.46	3 844.46	1 191.89	700.20
涤纶	8 720.06	5 356.89	62.47	4 067.36	5 070.77	785.95	446.67
锦纶6	18 598.26	6 482.87	75.62	9 517.30	9 768.15	951.43	558.96

表6 3种运动装各生产阶段碳排放量占比

Tab. 6 Proportion of carbon emissions in each production stage of three kinds of sportswear

生产阶段	碳排放量占比,%		
	细旦丙纶运动装	涤纶运动装	锦纶6运动装
纤维制备	23	35	41
织造	31	22	14
排料剪裁	0	0	0
车缝	25	17	21
装配	14	21	21
整烫	4	3	2
包装	3	2	1

由表6可知:细旦丙纶运动装各生产阶段的碳排放量中,织造阶段占比最高,达31%,车缝、纤维制备阶段占比分别为25%、23%,其他生产阶段占比较小;涤纶运动装各生产阶段的碳排放量中,纤维制备阶段占比最高,达35%,织造、装配和车缝阶段占比分别为22%、21%和17%,其他生产阶段占比较小;锦纶6运动装各生产阶段的碳排放量中,纤维制备阶段占比为41%,车缝、装配阶段占比分别为21%、21%。除细旦丙纶运动装外,涤纶运动装和锦纶6运动装均是纤维制备过程为碳排放量最高的生产阶段,可根据此结论进行减碳设计。因此,可将生产锦纶6运动装和涤纶运动装在纤维制备阶段所用的煤换为天然气或者电力,或将火电换为清洁电力等,以此来降低碳排放量^[14]。

3 结论

a. 以3种纤维及其织造布为分析对象,利用LCA分析方法进行分析,得到6个环境影响类别的数值,然后经过数据处理,若在相同质量下对比环境影响,3种布各有优势;若在相同面积下对比,细旦丙纶布的6项环境影响类别数值均最小,对环境的影响最小。

b. 以1件运动装的环境影响作为基准,对3种运动装生产阶段的环境影响进行分析。在6项环境影响类别中,细旦丙纶运动装各项数值均为最小,GWP、AP、TETP、POCP、EP、EC分别为

1.92 kg CO₂ eq.、5.76 × 10⁻³ kg SO₂ eq.、3.16 × 10⁻² kg DCB eq.、4.76 × 10⁻⁴ kg C₂H₄ eq.、9.66 × 10⁻⁴ kg PO₄³⁻ eq.、48.7 MJ,对环境的破坏最小。

c. 在3种运动装的生产过程中,细旦丙纶运动装生产阶段中碳排放量最高的为织造阶段,占比31%,涤纶运动装和锦纶6运动装生产阶段中碳排放量最高的均是纤维制备阶段,占比分别为35%和41%。

参 考 文 献

- [1] 党军亮, 封容, 樊文斐, 等. 纤维掺量对混凝土力学性能和热工性能的影响[J]. 合成纤维工业, 2021, 44(3): 38-41.
- [2] ROY P, NEI D, ORIKASA T, et al. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(1): 1-10.
- [3] 刘瑾, 张明, 张淑斌. 碳纤维复合材料风电叶片全生命周期内的碳排放分析[J]. 合成纤维工业, 2022, 45(3): 41-4.
- [4] 马俊滨, 邢玉静, 余慧玲, 等. 黑色原液着色再生聚酯短纤维的全生命周期分析研究[J]. 合成纤维工业, 2021, 44(6): 1-5.
- [5] 丁绍兰, 单晨. 生命周期评价在塑料研究中的应用进展[J]. 塑料科技, 2010, 38(5): 99-102.
- [6] DU F, WOODS G J, KANG D, et al. Life cycle analysis for water and wastewater pipe materials[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(5): 703-711.
- [7] 张方文. 定向刨花板生命周期评价(LCA)及环境影响评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [8] MONTGOMERY M T, COLLINS G E, BOYD T J, et al. Eco-friendly organic nanotubes encapsulating alkaline phosphatase and ecotoxicology of nanotubes to natural bacterial assemblages in coastal estuarine waters[J]. ACS Omega, 2019, 4(1): 2196-2205.
- [9] 王鹤达. 基于生命周期评价的库布齐沙漠兔产业环境影响及环境效益分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [10] WANG H D, LIU J, LI J H, et al. Comparative life cycle assessment of rex rabbit breeding industry chains: benefits of a circular industry chain[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2022, 27(3): 366-379.
- [11] 李卓霖. 基于LCA的两种护坡建设期的环境影响对比研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [12] MARTÍNEZ HERRERO E, PEREDA PEREDA L, HUIDO-

- BRO FERNÁNDEZ F, et al. An environmental evaluation of a milling machine range: a case study on reconfigurable approach [J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(11): 1513.
- [13] SAMUEL-FITWI B, MEYER S, RECKMANN K, et al. Aspiring for environmentally conscious aquafeed: comparative LCA of aquafeed manufacturing using different protein sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 52: 225–233.
- [14] 闫书琪, 李素梅, 吕鹤, 等. 基于混合 LCA 的新疆地区电力生产水足迹分析及碳中和目标下的变化 [J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3): 294–304.

Life cycle analysis of fine denier polypropylene filament

JIANG Jianping¹, XU Sijia², DENG Ji¹, GUO Xitao², KE Weibin¹, GUO Qinghai¹, QIU Zhiming²

(1. *Guangdong Modern High-Tech Fiber Co., Ltd.*, Jieyang 515500; 2. *School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640*)

Abstract: Taking the production process of fine denier polypropylene filament as the analysis object, six environmental impact categories, namely global warming potential (GWP), acidification effect potential (AP), terrestrial ecotoxicity potential (TETP), photochemical oxidation potential (POCP), eutrophication potential (EP), energy consumption (EC), were selected by using the life cycle analysis (LCA) method to quantify the environmental impact of the production process of fine denier polypropylene filament. The fine denier polypropylene filament and its fabric and sportswear were analyzed and compared with polyester and nylon 6 and their fabrics and sportswears by LCA, as was the carbon emission in the production process of sportswear. The results showed that the three kinds of fabrics had their respective advantages in six environmental impact indicators under the same weight mass; the fine denier polypropylene fabric possessed the lowest values in all the six environmental impact categories and gave the minimal impact on the environment under the same area; the sportswear made of fine denier polypropylene fabric also possessed the lowest values in all the six environmental impact categories, and GWP was only 1.92 kg CO₂ eq. for one piece of sportswear; and in the production process of three kinds of sportswear, the weaving stage had the highest carbon emission in the production stage of fine denier polypropylene sportswear, accounting for 31%, while the fiber preparation stage had the highest carbon emission in the production stage of polyester and nylon 6 sportswears, accounting for 35% and 41% respectively.

Key words: fine denier polypropylene filament; life cycle analysis; environmental impact; carbon emission

(上接第 32 页)

Preparation and properties of PP/PE medical coated nonwovens

ZHAO Bo

(*Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007*)

Abstract: Polypropylene/polyethylene (PP/PE) medical coated nonwovens were prepared by coating molten PE on the surface of PP spunbonded nonwovens by coating composite process prior to cooling and setting using PP spunbonded nonwovens as the base cloth. The micro-morphology and properties of the nonwovens were studied. The results showed that many tiny bubbles can be observed around the fibers in PP spunbonded nonwovens after PE coating, and the surface density, thickness, breaking strength, bursting strength, water contact angle and thermal stability increased, while the tearing strength, air permeability and moisture permeability decreased; the surface density and thickness of PP/PE medical coated nonwovens were positively related to their breaking strength, bursting strength, tearing strength, water contact angle and thermal stability, and negatively related to their air permeability and moisture permeability; and PP/PE medical coated nonwoven was a suitable choice for disposable medical protective clothing due to its hydrophobicity and gas resistance.

Key words: polypropylene; polyethylene; nonwoven; medical; coating composite process; preparation; properties