

# 碳纤维复合材料风电叶片全生命周期内的碳排放分析

刘瑾<sup>1</sup>, 张明<sup>1</sup>, 张淑斌<sup>1, 2</sup>

(1. 江苏恒神股份有限公司, 江苏 丹阳 212314; 2. 哈尔滨工业大学  
化工与化学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 以碳纤维增强复合材料(CFRP)风电叶片为例, 采用全生命周期分析(LCA)方法分析了CFRP叶片全生命周期内的碳排放量, 并与玻璃纤维增强复合材料(GFRP)叶片运行过程中的减排效果进行对比。结果表明: 根据LCA框架, CFRP风电叶片的生命周期过程包括材料生产、部件制备、运行使用、报废4个阶段; 碳纤维制备过程中, 能量消耗强度为286~500 MJ/kg, 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)当量排放量为20~30 kg/kg; 与GRRP相比, 使用CFRP能够减轻叶片质量, 大幅增加叶片长度, 提高输出功率, 每度电的CO<sub>2</sub>排放量减少20%~30%; 从风电叶片全生命周期考虑, 使用CFRP具有非常突出的减排效果。

**关键词:** 碳纤维 复合材料 风机叶片 全生命周期分析 碳排放

中图分类号: TQ342+.742 文献标识码: A 文章编号: 1001-0041(2022)03-0041-04

当前, 全球范围内应对气候变化的压力日趋增大。为了降低以二氧化碳(CO<sub>2</sub>)为主的温室气体排放总量, 作为全球CO<sub>2</sub>排放总量最多的国家之一, 我国将力争在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和, 并出台了相应的具体政策来实现上述目标<sup>[1]</sup>。

碳纤维及其复合材料制品具有轻质、高强的特点, 是实现部件、设备、系统轻量化的理想材料, 是国家大力推动的重点发展领域<sup>[2]</sup>。近年来, 碳纤维在风电领域的用量快速增加, 已经成为改变国内碳纤维市场供需关系的关键因素。碳纤维的生产制备过程需要消耗大量的电能, 随着地方政府双碳政策的逐步制定和落实, 碳纤维生产企业面临着越来越大的双控压力。

全生命周期分析(LCA)是一种对产品、工艺或活动的全过程包括原材料开采、产品生产、运输、使用、废弃物处理所消耗的资源及污染物排放造成的潜在环境影响等进行量化的系统分析方法<sup>[3]</sup>。标准化的LCA方法被广泛应用于清洁生产评估、产品设计和优化、政策制定等领域。

碳纤维通常与树脂等基体复合制备成各种部件后才能得到应用。因此, 单独考察碳纤维生产过程中的碳排放是不全面的, 必须对其整个生命周期内的碳排放情况进行综合考虑, 才能得到相对客观的结论。作者以碳纤维增强复合材料(CFRP)风电叶片为例, 应用LCA方法分析了其

在全生命周期各个过程中的碳排放情况, 对材料制备和运行两个过程进行了重点考察和分析。

## 1 CFRP风电叶片的生命周期过程

LCA框架包括目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4部分各自的作用与彼此联系如图1所示<sup>[4]</sup>。

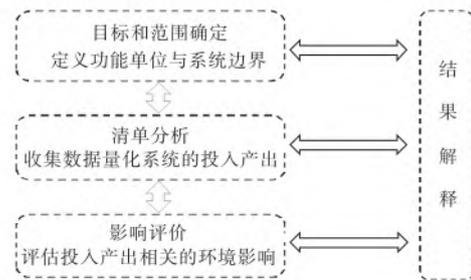


图1 LCA方法框架示意

Fig.1 Framework of LCA method

LCA方法概念清晰简单, 但是将其用于碳纤维领域却存在不少困难, 如系统边界的界定、准确数据的获得、结果的评估等。根据LCA框架, CFRP风电叶片的生命周期过程从材料制备到报废分为4个主要阶段, 如图2所示。

收稿日期: 2022-01-29; 修改稿收到日期: 2022-04-11。

作者简介: 刘瑾(1985—), 女, 工程师, 主要从事碳纤维及其复合材料的研发和应用。E-mail: jin.liu@hscarbonfibre.com。

(1) 材料制备阶段。聚丙烯腈(PAN)原丝经过预氧化、碳化、表面处理和上浆后得到碳纤维,碳纤维与环氧树脂经过拉挤成型制备成拉挤碳板。

(2) 运输组装阶段。拉挤碳板与其他必要的原料组装成为叶片,叶片经运输至风电场后组装为风机。

(3) 运行使用阶段。风机旋转持续输出电能。

(4) 报废阶段。超出服役期的风机按照一定的报废程序进行报废处理或者回收再利用。

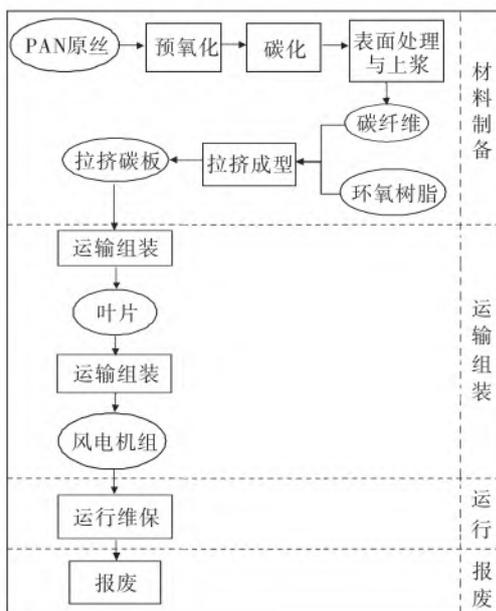


图2 CFRP 风电叶片的生命周期过程  
Fig.2 Life cycles of CFRP wind turbine blade

通过对各个阶段的能量消耗与碳排放情况进行系统考察,可以对 CFRP 风电叶片的潜在减排效果提供系统视角和全局评价。

## 2 CFRP 风电叶片生命周期内的碳排放分析

### 2.1 碳纤维生产过程中的碳排放

碳纤维是指碳质量分数不低于 92% 的纤维材料,市场上常见的 PAN 基碳纤维是以 PAN 原丝为原料,经过预氧化、碳化、表面处理和上浆等过程后得到<sup>[5]</sup>。由于流程长、边界模糊及工艺差别等因素,准确地对碳纤维生产过程中消耗的能量及碳排放量进行测算是一项复杂而困难的工程。最近,日本帝人集团宣布要对其生产的碳纤维产品的碳足迹进行准确测算,这在碳纤维生产领域尚属首次<sup>[6]</sup>。

由于不同供应商生产工艺的差别,以及碳纤

维本身有众多的型号,其性能、包装形式等各有不同,因而在以往的文献中,以单位质量碳纤维产品消耗的能量测算的碳纤维能量消耗强度差别较大。表 1 显示了不同数据来源的碳纤维能量消耗强度和 CO<sub>2</sub> 当量排放量的情况。碳纤维的能量消耗强度在 286~500 MJ/kg,CO<sub>2</sub> 当量排放量在 20~30 kg/kg。能量消耗强度越大,CO<sub>2</sub> 当量排放量就越大,两者之间正相关。

表 1 碳纤维的能量消耗强度和 CO<sub>2</sub> 当量排放量

Tab.1 Energy consumption intensity and CO<sub>2</sub> equivalent emission of carbon fiber

材料	能量消耗强度/ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 当量排放量/ (kg · kg <sup>-1</sup> )	数据来源
碳纤维	286~478	-	文献[7]
碳纤维	482	31.0	文献[8]
碳纤维	404	26.4	文献[9]
碳纤维	301	19.7	文献[10]
碳纤维	400~500	-	文献[11]

### 2.2 CFRP 叶片生产过程中的碳排放

碳纤维与环氧树脂经过拉挤制成拉挤碳板。环氧树脂的能量消耗强度为 76~80 MJ/kg<sup>[12]</sup>,拉挤碳板成型过程中的能量消耗强度为 3.1 MJ/kg<sup>[7-9]</sup>,按照碳纤维质量分数 60% 计算,则可知拉挤碳板的能量消耗强度为 206~332 MJ/kg。拉挤碳板经过运输、组装成叶片后,最后组装为风电机组。运输组装过程的能量消耗强度与制备过程相比,可以忽略不计<sup>[9]</sup>。

进入报废阶段的 CFRP 叶片,如果采用填埋法进行处理,则其能量消耗仅为 1~2 MJ/kg,CO<sub>2</sub> 当量排放量为 0.14 kg/kg<sup>[13]</sup>。

### 2.3 CFRP 叶片运行过程中的减排效果

考察 CFRP 叶片运行过程中的减排效果,需比较风电与传统发电方法的减排量,以及使用碳纤维和玻璃纤维时的减排情况。这是因为在风电领域,碳纤维与玻璃纤维属于竞争关系,两者均可以作为增强材料用于风电叶片的制造。

与玻璃纤维增强复合材料(GFRP)相比,CFRP 更加适合应用于超大型风电叶片,根据美国能源部的统计,随着叶片长度的增加,使用 CFRP 的比例明显增加,50 m 以下的传统叶片中,CFRP 的使用比例为 9%,而长度超过 70 m 的大型和超大型叶片中,CFRP 的使用比例超过 55%<sup>[14]</sup>。

在相同的纤维含量下,CFRP 制备的叶片长度要远大于 GFRP 叶片,例如,当纤维体积分数为

60%时,CFRP叶片可以做到约40 m,而GFRP叶片则可以做到75~80 m。风机功率与叶片长度的平方成正比相关,两者之间的关系满足式(1)<sup>[15]</sup>。

$$P=1.1963L^2+9.9448L-117.03 \quad (1)$$

式中: $P$ 为风机功率; $L$ 为叶片长度。

考虑其他因素综合计算,CFRP叶片每度电的CO<sub>2</sub>排放量比GFRP要减少20%~30%<sup>[16]</sup>。

风力发电被视为清洁能源,是由于与传统火力发电方式相比,生产过程中的碳排放量大幅减少。火力发电的CO<sub>2</sub>排放量一般在720.0~975.3 g/(kW·h)<sup>[15-16]</sup>,而风电的CO<sub>2</sub>排放量则在5~46 g/(kW·h)<sup>[16-20]</sup>。文献数据虽然在一定程度上有所差异,但是整体来看风电相对于火力发电的碳排放量要小两个数量级。

以3 MW的风电机组为例,其实际输出功率以1 MW计算,每台使用CFRP约3 t,若使用GFRP则约6 t,服役期限为20年,计算CFRP、GFRP叶片在制造过程中的CO<sub>2</sub>排放量和总减排量,结果见表2。

表2 CFRP和GFRP叶片的减排效果

Tab. 2 Carbon emission reduction of CFRP and GFRP wind turbine blade

材料	用量/ t	制备过程中CO <sub>2</sub> 排放量/t	服役期内CO <sub>2</sub> 减排量/kt	CO <sub>2</sub> 总减 排量/kt
CFRP叶片	3	59.0~164.0	156	156
GFRP叶片	6	15.6	155	155

从表2可知:对于3 MW的风电机组,与火电相比,在其服役期内可以实现不低于150 kt的CO<sub>2</sub>减排量,远远超出材料制备过程中CO<sub>2</sub>排放量;使用CFRP叶片与使用GFRP叶片相比,CO<sub>2</sub>总减排量超出1 kt。当用于更大功率的风电机组时,使用CFRP叶片的CO<sub>2</sub>减排效果更加显著。

### 3 结论

a. 根据LCA框架,CFRP风电叶片的生命周期过程从材料制备到报废分为4个主要阶段即材料制备、运输组装、运行使用、报废。

b. 碳纤维制备过程中,能量消耗强度为286~500 MJ/kg,CO<sub>2</sub>当量排放量在20~30 kg/kg,两者之间正相关。

c. 3 MW风电机组的CFRP叶片在20年的服役期内,与火电相比,能够实现CO<sub>2</sub>减排不低于150 kt。与GFRP相比,使用CFRP能够减轻叶片质量,大幅增加叶片长度,提高输出功率,每度电

的CO<sub>2</sub>排放量减少20%~30%。

d. 从全生命周期考虑,使用CFRP具有非常突出的减排效果。

### 参 考 文 献

- [1] 魏文栋,陈竹君,耿涌,等. 循环经济助推碳中和的路径和对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1030-1038.
- [2] 李仲平,冯志海,徐樵华,等. 我国高性能纤维及其复合材料发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 28-36.
- [3] 翟一杰,张天祚,申晓旭,等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455.
- [4] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-general principles and framework: ISO 14040: 2006[S]. Geneva: CEN, 2006: 1-20.
- [5] 钱鑫,王雪飞,马洪波,等. 国内外PAN基高模量碳纤维的技术现状与研究进展[J]. 合成纤维工业, 2021, 44(5): 58-64.
- [6] 钱伯章. 帝人公司开始对其碳纤维进行生命周期分析[J]. 合成纤维工业, 2022, 45(1): 84.
- [7] SUZUKI T, TAKAHASHI J. Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger car [C]// 9th Japan international SAMPE symposium. Tokyo: SAMPE Japan, 2005.
- [8] DAS S. Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16(3): 268-282.
- [9] HOHMANN A. Life cycle assessment of manufacturing processes for CFRP structures to identify optimization potentials-Systematic methodology for estimating the environmental impact of manufacturing process chains [D]. Munich: Technical University of Munich, 2018.
- [10] STOIBER N, HAMMERL M, KROMOSER B. Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124300.
- [11] ENGELS A, ROEHRIG M, WITTE T. Possible optimization of the energy balance in the automotive sector by the use of carbon composite structures [J]. Procedia Engineering, 2012, 49: 303-309.
- [12] PATEL M. Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO<sub>2</sub> emissions for products of the organic chemical industry [J]. Energy, 2003, 28(7): 721-740.
- [13] MENG F, PICKERING S J, MCKECHNIE J. An environmental comparison of carbon fibre composite waste end-of-life options [C]//SAMPE Europe Conference 2018. Southampton: SAMPE Europe, 2018.
- [14] MILLER D A, SAMBORSKY D D, ENNIS B L. Mechanical testing summary: Optimized carbon fiber composites in wind turbine blade design [R/OL]. (2019-09-01) [2022-01-20]. <https://doi.org/10.2172/1562792>.
- [15] KIRIHARA T, KAWASHIMA T, TAKAHASHI J. Demand and disposal forecast for carbon fibre by bottom-up approach[C]//

- 18th international conference on composite materials. Jeju: IC-CM 2011.
- [16] GOELV, BHAT I, PRAKASH R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 1067–1073.
- [17] Japan Carbon Fiber Manufacturer Association. Lifecycle assessment of aircraft, automobile and windmill [EB/OL]. (2012-06-15) [2022-01-29]. <https://www.carbonfiber.gr.jp/english/tech/pdf/lca.pdf>.
- [18] LI X, CHALVATZIS K J, PAPPAS D. Life cycle greenhouse gas emissions from power generation in China's provinces in 2020 [J]. *Applied Energy*, 2018, 223: 93–102.
- [19] WANG Y X, SUN T Y. Life cycle assessment of CO<sub>2</sub> emissions from wind power plant: Methodology and case studies [J]. *Renewable Energy*, 2012, 43: 30–36.
- [20] DOLAN S L, HEATH G A. Life cycle greenhouse gas emissions of utility-scale wind power: Systematic review and harmonization [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(S1): 136–154.

## Carbon emission analysis of carbon fiber reinforced plastic wind turbine blades in life cycle

LIU Jin<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>1</sup>, ZHANG Shubin<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Hengshen Co., Ltd., Danyang 212314; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** Taking carbon fiber reinforced plastic (CFRP) wind turbine blade as an example, the carbon emission in the whole life cycle of CFRP blade was analyzed by using the life cycle assessment (LCA) method and compared with the emission reduction effect of glass fiber reinforced plastic (GFRP) blade during operation. The results showed that according to the LCA framework, the life cycle process of CFRP wind turbine blades includes four stages, namely material production, component preparation, operation and scrapping; the energy consumption intensity is 286–500 MJ/kg and the equivalent emission of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is 20–30 kg/kg in the process of carbon fiber preparation; compared with GFRP, CFRP can reduce the blade mass, greatly increase the blade length, increase the output power, and reduce the CO<sub>2</sub> emission per kW·h by 20%–30%; and considering the life cycle of wind turbine blade, CFRP blade has a very prominent effect of emission reduction.

**Key words:** carbon fiber; composite material; wind turbine blade; life cycle assessment; carbon emission

### ◀ 国内外动态 ▶

#### 百吨级高强高模聚酰亚胺纤维项目通过鉴定

2022年3月21日,百吨级高强高模聚酰亚胺(PI)纤维制备技术及应用项目在北京通过由中国石油和化学工业联合会组织的科技成果鉴定。鉴定专家组认为,该项目研发了高强高模聚酰亚胺纤维成套产业化制备技术及关键装备,并形成系列产品,项目成果整体技术处于国际

领先水平。

该项目由北京化工大学武德珍教授科研团队和江苏先诺新材料科技有限公司联合承担。鉴定意见显示,该项目已在多个高端装备制造领域获得重大应用或进行考核验证。作为完全自主可控和军民两用的原创产品,该项目产品可满足我国航空航天、国防军工等领域对高性能有机纤维的迫切需求,应用前景广阔。

(通讯员 钱伯章)

## 广 告 索 引

上海思尔达科学仪器有限公司	封一	上海思尔达科学仪器有限公司	后插 1
石家庄波特无机膜分离设备有限公司	封二	扬州普立特科技发展有限公司	后插 2
郑州沃华机械有限公司	封三	中国石油化工有限公司天津分公司化工部	后插 3
扬州普立特科技发展有限公司	封四	厦门帮众科技有限公司	后插 4
厦门帮众科技有限公司	前插 1	崑特泵业(上海)有限公司	后插 5
崑特泵业(上海)有限公司	前插 2	“讲文明树新风”公益广告	后插 6