

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2025.01.0012

引用格式: 于雪梅, 张昌保, 田丰, 等. 废弃风电叶片 FRP 材料模压设备选型与模具设计[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2025, 34(1): 97-102.

废弃风电叶片 FRP 材料模压设备选型与模具设计

于雪梅^{1a}, 张昌保^{1b}, 田丰^{1c}, 谢宁², 仲秋成^{1b}, 任飞融^{1b}

(1. 江苏海洋大学 a. 学术期刊社; b. 机械工程学院; c. 创新创业学院, 江苏 连云港 222005;
2. 济南大学 山东省建筑材料制备与测试技术重点实验室, 山东 济南 250022)

摘要: 废弃风电叶片材料具有难以降解和处理的环境问题, 而将粉碎后的废弃风电叶片 FRP 材料进行模压处理, 形成材料循环利用。在前期研究基础上将废弃风电叶片进行粉碎处理, 得到二级粉碎料。为了进一步利用二级粉碎料, 通过分析各种液压机优缺点, 选择适用于 FRP 粉碎材料模压的液压机, 并设计产品模压模具, 利用 ANSYS 软件进行分析, 计算求解得到上模最大变形量为 0.102 mm, 模具整体变形量为 0.894 mm, 最大等效应力为 216.38 MPa, 模具变形量在海洋板误差范围内, 符合国际海洋板误差要求, 废弃风电叶片 FRP 材料实现了循环再利用。

关键词: 废弃风电叶片; 模具; 模压设备; 有限元分析

中图分类号: TG70 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-8248(2025)01-0097-06

Selection and mold design of FRP molding equipment for waste wind turbine blades

YU Xuemei^{1a}, ZHANG Changbao^{1b}, TIAN Feng^{1c}, XIE Ning², ZHONG Qiucheng^{1b}, REN Feirong^{1b}

(1. a. Academic Periodical Press of Journal; b. School of Mechanical Engineering; c. School of Innovation and Entrepreneurship, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;
2. Key Laboratory of Building Materials Preparation and Testing Technology of Shandong Province, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: Due to the environmental problems of the waste wind power blade material which is difficult to degrade and treat, the purpose is to mold the waste wind power blade FRP material after crushing to form the material recycling. On the basis of the previous research of the research group, the waste wind turbine blades were crushed to obtain secondary crushing materials. In order to make further use of secondary crushing materials, the advantages and disadvantages of various hydraulic presses were analyzed, a hydraulic press suitable for molding FRP crushing materials was selected, and the product molding mold was designed. Analyzed with ANSYS software, the maximum deformation of the mold was 0.102 mm, and the overall deformation of the mold is 0.894 mm, and the maximum equivalent stress was 216.38 MPa. The deformation of the mold is within the error range of the ocean plate, which meets the error requirements of the international ocean plate, and the waste FRP materials of wind turbine blades are recycled and reused.

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-07-27

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52372026); 江苏省大学生创新创业训练项目(SD202211641635007); 连云港市科技项目(CGJBG2103)

作者简介: 于雪梅(1975—), 女, 教授, 博士, 研究方向为机械装备及控制系统设计, (E-mail) 327992496@qq.com.

通信作者: 张昌保(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为 FRP 粉碎料模压设备与模具, (E-mail) 1912152658@qq.com.

Key words: waste wind turbine blades; mold; molding equipment; finite element analysis

0 引言

风力是一种取之不尽、用之不竭的新型能源^[1]。我国幅员辽阔,有面积的高原、山地以及漫长的海岸线,有着天然风场的便利条件,有利于风能的利用与发展,因此风能成为我国的重要能源之一^[2]。利用风能发电既可以解决能源短缺问题又可满足低碳环保要求。国际能源协会(International Energy Agency)估计,2050年全球15%至18%的电力将由风能产生^[3]。风电叶片作为风电机组的关键部件,其需求量也是持续增长。

纤维增强复合塑料(fiber reinforced plastics, FRP),又名玻璃钢复合材料,由于具有力学性能好、高强轻质以及耐腐蚀强等诸多优点^[4],成为制造风电叶片的主要材料。研究表明,风电叶片的设计使用寿命一般为20~25年^[5]。中国风电产业的规模化发展从2004年开始,内蒙古龙源首次采用1.5 MW机组,开启了大容量风电机组时代^[6]。这就表明随着时间的推移,我国投入发电的风电叶片将面临批量退役,必将会产生数以千万吨计的废弃风电叶片。由于玻璃钢复合材料具有机械性能好以及硬度高等特点,不易被切割,也不易被降解,风电叶片尺寸偏大问题也导致处理的难度大大增加,传统的掩埋、焚烧方法对环境污染大,处理量有限且成本高,距离所期待的处理结果相差甚远。因此,如何实现废弃风电叶片的批量化处理及回收再利用,是风电行业可持续发展所面临的一个重大问题,也是一直阻碍风电行业健康快速发展的绊脚石。

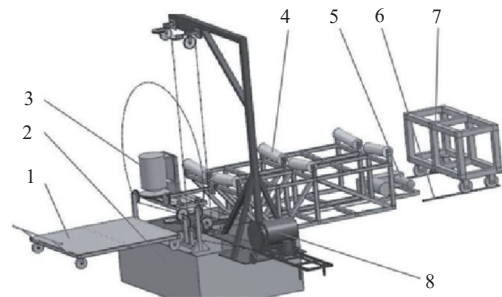
海洋板是指符合BS1088海洋胶合板国际生产的产品,具有耐气候性、防潮、防水、高硬度等特点,因此被广泛应用于船舶工业制造中,如船体内部制造以及码头、港口等近海周边建筑等。海洋板所需材料特性与废旧风电叶片特性相比相差无几,所以可将废旧风电叶片废料制成海洋板。

本研究以废弃风电叶片为主要原料,利用课题组前期所研究的切割设备将废弃风电叶片切割,粉碎。使用Solidworks软件建立模具的三维模型,并用ANSYS软件进行仿真分析,使其达到所需精度要求,再通过模压设备将粉碎的废弃风电叶片制成

海洋板,以期为风电叶片的回收利用提供新思路和新方法。

1 废弃风电叶片处理工艺

本课题组前期所研究的金刚石绳锯切割设备^[7]如图1所示。该设备主要由横向切割部件、纵向切割部件、卷扬机、工作台、控制系统等部分组成。金刚石绳锯切割设备可将大型风电叶片分割成小段形式。废弃风电叶片切割后如图2所示。



1—切割料托盘;2—冷却系统;3—纵向切割部件;4—重载托辊;5—卷扬机;6—导轨;7—移动小车;8—横向切割部件。

图1 金刚石绳锯切割设备^[7]

Fig.1 Diamond rope saw cutting equipment



图2 切割后废弃风电叶片^[7]

Fig.2 Waste wind turbine blades after cutting

为实现对高强度FRP材料的有效破碎,以双轴剪切式一级破碎设备将其破碎。双轴剪切式一级破碎设备主要有传送装置、动力装置、破碎室等,双轴剪切式一级破碎设备如图3所示。双轴剪切式一级破碎工艺流程为:将切割后的废旧风电叶片块状料放在传送带上,随传送带移动,直至掉落到料斗中,掉落的风电叶片块状料会被刀模进行粗破碎处理。粉碎后的块状风电叶片碎料如图4所示。

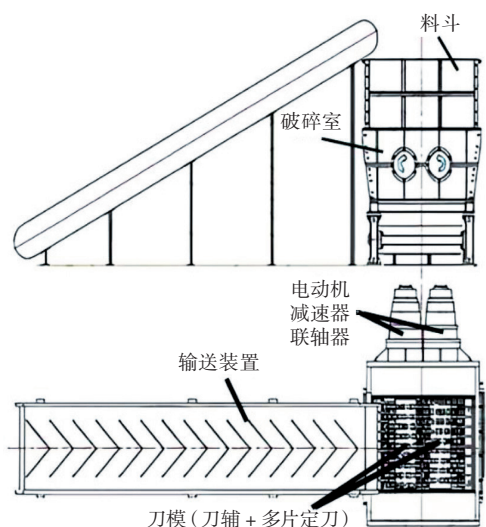


图 3 双轴剪切式一级粉碎设备

Fig.3 Biaxial shear type first-stage crushing equipment



图 4 粉碎后的块状风电叶片碎料

Fig.4 Block wind turbine blade crushing material after crushing

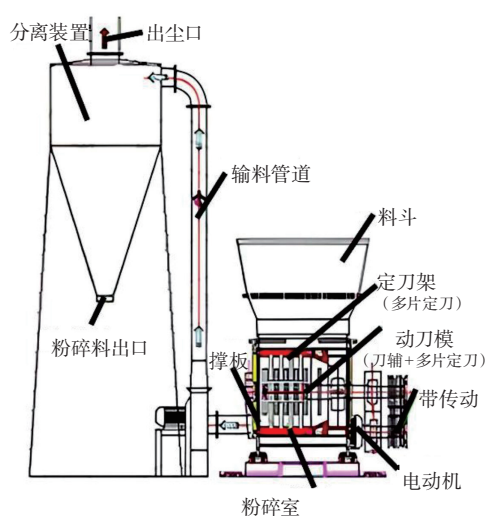


图 5 废弃玻璃钢材料二级粉碎设备

Fig.5 Waste glass fiber reinforced plastic material secondary crushing equipment



图 6 二级粉碎料

Fig.6 Secondary crushing material

针对一级设备破碎后废弃 FRP 破碎物料的特性, 采用废弃玻璃钢材料二级粉碎设备。其主要有动力输出系统(电动机)、粉碎室、料仓等, 如图 5 所示。二级粉碎设备工艺流程为: 将一级破碎后的风电叶片碎料放在传送带上随传送带移动, 直至掉落到料斗中, 在粉碎室中进行二次粉碎, 然后通过输料管道传送到粉碎料出口。二级粉碎料如图 6 所示。

2 模压设备

液压机是一种以液体为工作介质, 根据帕斯卡原理制成的用于传递能量以实现各种工艺的机器。按结构形式可分为四柱式、单柱式(C型)、框架式、万能液压机等, 其结构特点、优缺点如表 1 所示。

表 1 液压机种类分析
Table 1 Analysis of hydraulic press types

液压机类型	结构特点	优点	缺点
四柱式液压机	由 4 根立柱支撑和固定工作台, 结构稳定, 适用于大型工件加工和高加工精度	结构稳定, 适用于大型工件加工, 加工精度高	结构复杂, 制造和维修难度大, 占用空间较大
单柱式液压机	由一根立柱支撑和固定工作台, 结构简单紧凑, 适用于小型工件加工, 操作方便	结构简单, 紧凑, 适用于小型工件加工, 操作方便	加工力和承载能力有限, 结构稳定性可能较差
框架式液压机	由立柱和上下横梁组成, 形成坚固的机架结构, 加工力大, 加工精度高, 操作简便	结构坚固稳定, 加工力大, 加工剪度高, 操作简便	结构复杂, 制造和维修难度大, 占用空间较大, 维护成本较高
万能液压机	功能液压机, 适用于多种不同类型的加工任务, 灵活性和适应性较高	多功能性, 加工剪剪度高, 操作简便	成本较高, 需要定期维护和保养

针对 FRP 材料特征,考虑产品精度、成本、场地等因素,模压设备选用型号为 YPYJ-800 的框架式液压机,如图 7 所示。经过多年生产实践证明,其稳定性能好,生产效益高,节能,可供蒸汽或导热油加热使用,灵活多变,更换模具便捷,安装方便。该机设计结构合理,采用三向同步定位,合模精确平衡,充液快速加压,可在 35 s 内完全加压到位,操作方便简单,只需将粉碎后的风电叶片材料铺平于模具内,按下工作按钮,压机便可自动完成下压、加压、限压、保压、计时、卸压、脱模、上升到位全过程,模压一个产品保压固化时间 400 s 左右。

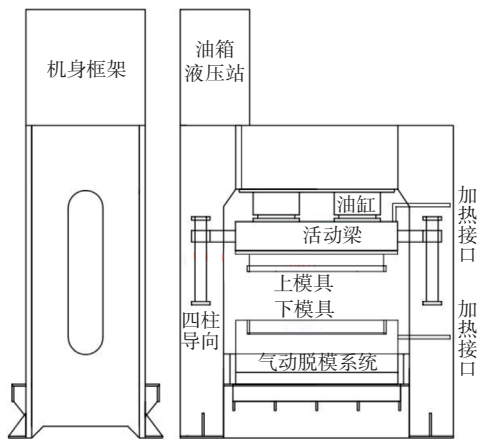


图 7 TPYJ-800 框架式液压机
Fig.7 TPYJ-800 frame hydraulic press

TPYJ-800 框架式液压机大致可分为机身框架、液压缸系统、液压系统、操作控制系统和工作台。机身框架采用坚固的钢制机身框架,提供稳定的支撑和结构强度。框架通常由上、下两个横梁和多个立柱组成,形成一个稳定的框架结构。液压缸系统由液压缸、液压泵、液压阀和管路等组成,其利用液体在封闭的容器中传递压力,通过控制液压泵和液压阀的开关来控制液体的流动和压力的变化。液压系统由液压泵、液压油箱、压力控制阀、流量控制阀等组成,其将液压油从油箱中抽取,并通过阀门控制流量和压力,为液压缸提供所需的动力和控制。操作控制系统为 TPYJ-800 框架式液压机配备操作控制系统,包括开关按钮、控制面板、液压控制阀等,通过控制面板和按钮来启动、停止液压机的运行,调节加工参数和控制加工过程。液压机的工作台是加工工件的平台,通常由坚固的金属材料制成,用于接受加工力和支撑工件。

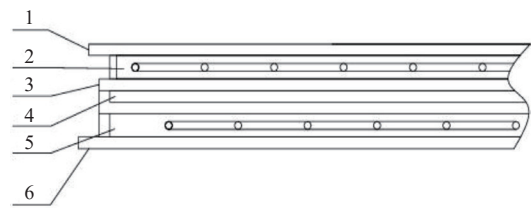
3 产品介绍与模具建模仿真

3.1 产品介绍

海洋板是一种用于海洋工程和船舶建造的板材。由于海洋环境的特殊性,海洋板需要具备耐腐蚀、耐磨损、耐高压、耐低温等特性,以确保良好的性能和可靠性。风电叶片材料具备海洋板所需的特性。因此,将废弃风电叶片材料做成海洋板是一项创新技术。海洋板尺寸有多种,这里研究尺寸为 $1\ 200\ \text{mm} \times 2\ 400\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$,应用在船舶驾驶舱,其厚度尺寸误差在 $\pm 0.2\ \text{mm}$,为保证产品尺寸要求,其模压模具设计时应保持形变量在厚度误差范围内。模具设计时需建立三维模型,利用有限元软件分析受力情况,保证产品公差要求。

3.2 三维建模

根据海洋板形状与尺寸,确定所设计模具尺寸大小。利用三维软件 Solidworks 进行模具建模,如图 8 所示。模具结构包括上模连接板、上模加热区域、压缩板、产品型腔、下模加热区域、下模连接板。上模连接板与活动梁相连接,上模具会随活动梁的移动而移动。下模连接板则是固定在工作台面。模具材料选用 45 钢材,因为 45 钢具有较高的硬度、强度和耐磨性等良好的机械性能,使其适合用于制造模具,特别是需要承受高压力和磨损的情况下。其次,45 钢也具有较好的加工性能,易切削、铣削和加工成形,这使得在制造模具过程中更容易实现设计要求。最后,相对于一些特殊合金钢或其他高端模具材料,45 钢在成本上更为经济实惠。加热方式选用铜管内加入热油,热油循环使得加热区域被加热。加热区内部有少量铝粉与树脂,铝粉具有良好的导热性能,可以帮助加热区域更快地传递热量,从而提高加热效率。树脂的填充使得加热区域内的空隙减少,从而减少热量的散失,同时提高加热效率。



1—上模连接板; 2—上模加热区域; 3—压缩板; 4—产品型腔;
5—下模加热区域; 6—下模连接板。

图 8 模具三维建模图
Fig.8 3D modeling diagram of mold

3.3 仿真分析

利用有限元软件对模具进行受力分析。具体步骤为: ① 构建模具三维模型; ② 将模具三维模型导入有限元软件系统中; ③ 确定具体位置的材料属性; ④ 划分网格; ⑤ 添加约束与载荷; ⑥ 求解; ⑦ 评估结果。选用 ANSYS Workbench2023 进行有限元软件分析。将 Solidworks 软件创建的三维模型转化为 .x_t 格式, 这种格式可以一次性将装配体以及相应的接触与配合导入 Workbench 软件中^[8]。

将模具的三维模型导入 Workbench 中, 定义材料属性为 Q45 钢和铝材。Q45 钢具有较高的硬度和耐磨性, 且其经济成本低。铝具有良好的导热性, 能够快速传导热量。

在有限元分析中, 网格划分是前处理步骤中非常关键的一步。网格的密度和质量会直接影响到分析结果的准确性和计算量大小。一般来说, 网络密度会直接影响到分析结果的准确性和计算量。因此在确定网格密度时需要综合考虑这两方面因素。此外, 网格质量的好坏也会影响到计算结果的准确性。对于模具关键部位, 需要保证高质量的网格; 而对于模具的次要部位, 可以适当降低网格质量以减少计算机计算量。因此, 模具总体网格划分采用网格大小为 7 mm, 如图 9 所示。等整体网格划分完成, 再对关键部分进行网格细化 5 mm。网格划分完后网格数量为 1 590 244 个, 节点数量为 911 071 个, 平均网格质量为 0.803。

边界条件与载荷的施加也是有限元分析中的关键步骤。边界条件添加应遵循以下原则: ① 要有足够的约束条件才能保证刚度矩阵的非奇异性, 从而得到位移的唯一解; ② 不能有多余的约束, 多余约

束会使分析对象产生实际上不存在的约束力, 从而使计算结果与实际情况差别很大^[9]。网格划分完成后对模具施加固定约束与载荷, 如图 10 所示。

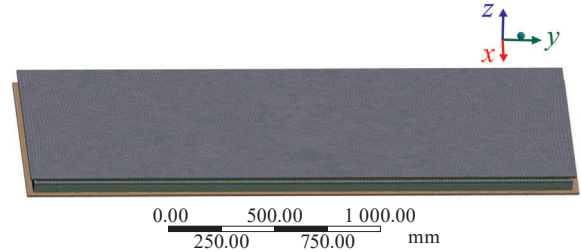


图 9 划分网格
Fig.9 Dividing grid

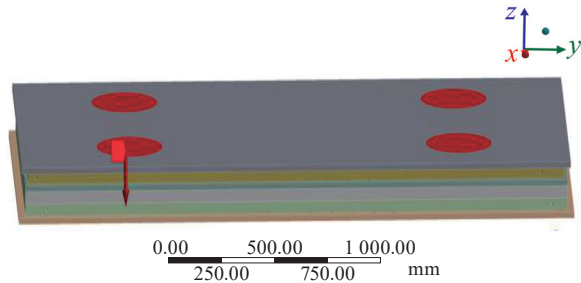


图 10 添加约束与载荷
Fig.10 Adding constraints and loads

进行求解计算, 上模变形量、模具整体变形量与等效应力如图 11~ 图 13 所示。图形变形扩大 160 倍显示。上模最大变形量为 0.102 mm, 模具整体变形量为 0.894 mm, 最大等效应力 216.38 MPa。上模变形量为 0.102 mm, 符合海洋板厚度标准误差 ± 0.2 mm。Q45 钢屈服强度最小为 450 MPa, 而最大等效应力小于 Q45 钢屈服强度, 故模具变形量在海洋板误差范围内, 模具结构合适。

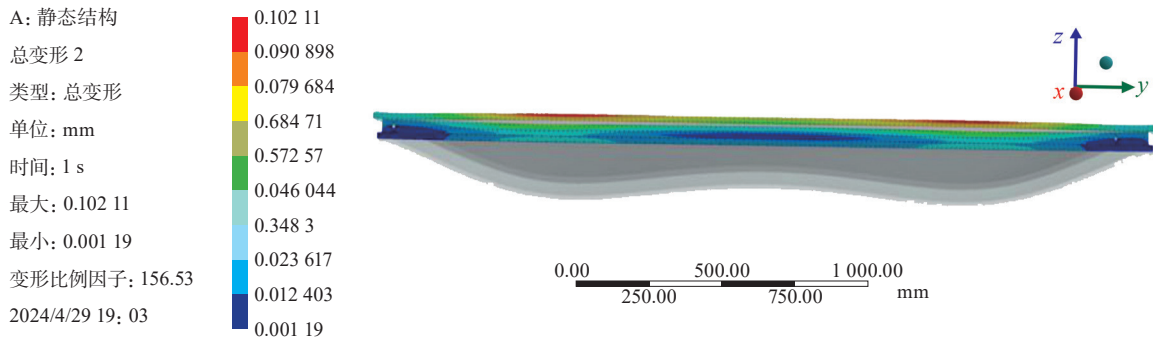


图 11 上模变形量
Fig.11 Upper mold deformation

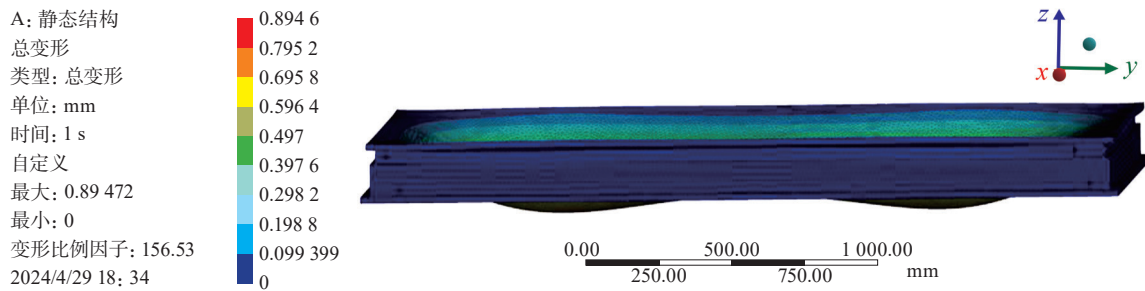


图 12 模具整体变形量

Fig.12 Overall deformation of the mold

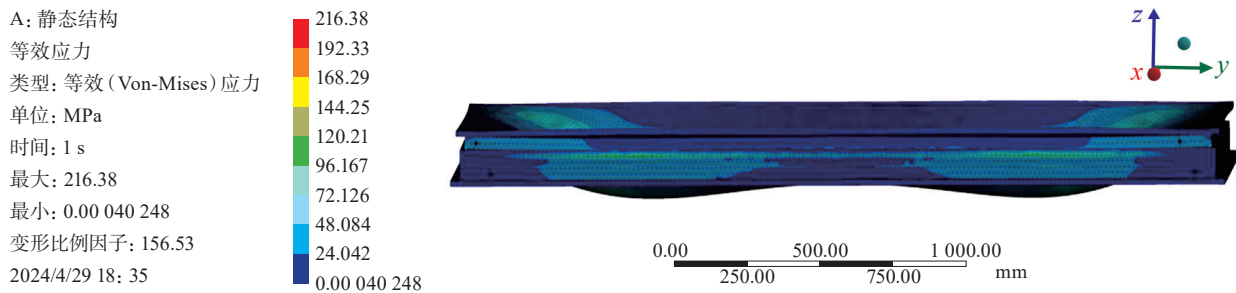


图 13 等效应力

Fig.13 Equivalent stress

4 结论

本文以废弃风电叶片为研究对象, 对其进行破碎处理, 先使用金刚石绳锯切割设备, 将风电叶片进行切割, 再利用双轴剪切式一级粉碎设备对切割后的风电叶片进行粗破碎, 最后使用废弃玻璃钢材料二级粉碎设备将粗破碎叶片再次粉碎, 最终得到风电叶片粉碎料。由于液压机种类不同, 通过分析液压机的优缺点, 选取合适的液压机类型。再根据海洋板尺寸规格设计一套相应规格模具, 并对模具进行三维建模仿真分析。仿真结果显示, 上模最大变形量为 0.102 mm, 模具整体变形量为 0.864 mm, 最大等效应力为 216.38 MPa, 复合国际海洋板误差要求, 因此该模具满足实际使用需求。

参考文献:

- [1] 王野平, 高俊, 李金东. 风力发电的现状[J]. 机械设计与制造, 2006(5): 154-156.
- [2] 刘胜强, 贺升, 周益辉, 等. 风电叶片废弃物回收技术综述[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(11): 109-111.
- [3] LIU Pu, BARLOW C Y. Wind turbine blade waste in 2050[J]. Waste Management, 2017, 62: 229-240.
- [4] 李伟. FRP 材料在土木工程中的运用分析[J]. 中华建设, 2023(4): 114-116.
- [5] 唐荆, 陈啸, 杨科. 风电叶片全寿命周期性能研究[J]. 风能, 2017(1): 58-61.
- [6] 武德涛, 柴树飞, 张国鹏. 废弃风电叶片材料的机械法回收及资源化利用技术研究[J]. 能源科技, 2024, 22(1): 66-70.
- [7] 于雪梅, 朱晓华, 刘卫生, 等. 废弃风电叶片切割装置设计及破碎料的应用[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6): 60-64.
- [8] 张海兵, 王莉, 孙红光. 某型飞机法兰盘表面缺陷的无损检测方法[J]. 无损检测, 2020, 42(2): 74-76.
- [9] 刘茜, 王太勇, 万淑敏. 框架式油压机机身的有限元分析和优化设计[J]. 机械, 2004, 31(4): 10-12.

(责任编辑: 褚金红)