

无损回收碳纤维智能制造技术助推 碳纤维高值化闭环循环经济发展（上）

张友根

（上海第一塑料机械厂，上海 201201）

摘要：针对碳纤维复合材料传统回收存在纤维损伤大、能耗高、污染严重，制约产业闭环发展的问题，本文提出 AI 碳纤维“无损回收”智能制造新概念。更新 AI 碳纤维无损回收认知理念，界定其定义、优势、流程与质量指标；围绕废料前处理、纤维无损解离、树脂基体优化、溶剂—催化剂体系、三废绿色处置开展系统性研究，分析该技术当前面临的现实挑战并给出对应解决策略。结合生产线开发实例与再生碳纤维高值化应用案例表明，依托人工智能实现纤维力学性能高保有率的精准解离，能够推动碳纤维从废弃物向高性能再生原料转化。该 AI 无损回收方案可为碳纤维高值化闭环循环经济发展提供新的技术路径。

关键词：AI；碳纤维；解离；循环经济；研究

引用论文：张友根. 无损回收碳纤维智能制造技术助推碳纤维高值化闭环循环经济发展[J]. 橡塑技术与装备, 2026,52(9):01-09.

中图分类号：TQ330.46

文章编号：1009-797X(2026)09-0001-09

文献标识码：B

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.09.001

0 前言

碳纤维复合材料（CFRP）在航空航天、汽车、能源等领域得到了广泛应用。据相关数据，2024 年全球回收碳纤维核心市场规模约 1.5 亿美元，预计 2030 年将增至 2.3 亿~2.5 亿美元，同比增幅 40%。在国内，2024 年中国碳纤维回收产业处理量约 4.4 万 t，占当年可回收量的 63 % 左右，剩余 37 % 仍待进入正规回收体系；2024 年中国回收碳纤维中约 1/3 实现了高值化再利用，其余 2/3 主要用于低端填充、水泥窑协同燃料或填埋。国内碳纤维回收产业仍处于发展阶段，但随着政策支持和市场需求的增加，回收规模也在逐步扩大。碳纤维通常与树脂等基质紧密结合，要实现高效、完全的分离并非易事。传统 CFRP 的回收问题一直是制约其可持续发展的关键瓶颈。传统的回收方法分离不彻底或对碳纤维造成损伤，降低其性能，且存在高能耗、高污染等问题，是一个极具挑战性的技术问题。AI 技术引入碳纤维回收为实现碳纤维闭环循环经济提供了新的解决方案。

本文提出了基于 AI 碳纤维“无损回收”的新概念，开启了碳纤维闭环循环经济新质制造模式。本文提出了基于 AI 碳纤维无损回收认知理念的更新，提出了

AI 碳纤维“无损回收”的技术要求，研究了基于 AI 碳纤维无损回收前期处理技术，研究了 AI 碳纤维无损解离创新技术，研究了 AI 碳纤维无损解离树脂基体优化，研究了基于 AI 碳纤维无损解离溶剂与催化剂科学发展，研究了 AI 碳纤维无损解离废气废液绿色化处理及回收利用，研究了 AI 碳纤维复合材料无损回收面临挑战和应对策略，研究了基于 AI 碳纤维无损回收面临挑战及应对策略，碳纤维无损回收生产线的开发案例。列举了 AI 无损回收高质碳纤维高值利用科学发展的案例。本文提出的基于 AI 碳纤维无损回收技术为实现碳纤维闭环循环经济模式提供了新的解决方案。

1 AI 碳纤维无损回收认知理念的更新

碳纤维无损回收闭环循环经济模式是实现碳纤维材料可持续利用的关键路径，具有显著的环境效益与经济效益。通过构建从回收、再生到再制造的完整闭环体系，不仅能够缓解碳纤维资源短缺问题，也为“双碳”目标下的绿色制造提供了可行方案。根据碳纤维

作者简介：张友根（1947—），男，教授级高级工程师，终身享受国务院政府特殊津贴，主要从事塑料材料和工艺的相关研究，已发表论文多篇。

回收科学发展, 本文提出了 AI 碳纤维“无损回收”的新概念, 反映了碳纤维回收技术的新发展方向。“无损回收”技术旨在解决传统回收方法中存在的纤维性能损失大、回收效率低、环境影响大等问题。

1.1 AI 碳纤维无损回收定义认知更新

碳纤维无损回收是把“黑色黄金”重新变成“绿色黄金”的兼顾高性能、低环境足迹、职业健康友好三重底线的全过程范式, 支撑碳纤维复合材料产业从“高能耗—难降解”转向“低碳—闭环”的可持续模式。

1.1.1 碳纤维资源闭环回收利用永续化

在回收过程中, 通过特定方法(如电化学回收、溶剂解离或热解等)将碳纤维增强复合材料中的树脂基体降解或去除, 同时确保碳纤维的力学性能(如拉伸强度、杨氏模量等)、长度、表面状态等几乎不受影响, 回收得到的碳纤维性能能够直接用于再生产, 具有较高的经济价值和再利用潜力。

1.1.2 碳纤维资源闭环回收过程健康化的定义

在碳纤维回收过程中, 采用环保高效的方法(如高能效热解法在缺氧条件下热处理, 回收纯碳纤维, 并减少 CO₂ 排放), 避免传统回收中因切割、碾碎等操作导致碳纤维长丝逸散到空气中, 从而防止对人体皮肤造成伤害(类似石棉粉尘的危害)。同时, 优化回收流程(如采用化学回收法或改进处理工艺), 避免释放有毒气体或不产生有毒粉尘和废水, 确保回收过程对环境和人体健康的负面影响最小化, 最终实现破纤

维材料的可持续闭环回收。

AI 碳纤维无损回收是指基于 AI 人工智能技术, 如机器学习、数据分析和过程优化等, 通过先进的工艺和方法, 将废弃的碳纤维复合材料中的碳纤维进行精准解离、提纯和再生处理, 使其在回收过程中不破坏碳纤维的微观结构和力学性能, 规避人类健康风险和环境风险, 实现高回收率, 从而推动碳纤维绿色闭环循环经济的发展。

1.2 AI 在碳纤维无损回收中的关键作用认知更新^[1]

AI+ 碳纤维无损回收共同构建智能化的无损回收模型。实现对回收过程的精准控制和优化, 以达到碳纤维回收产率最大化、回收质量最优化、回收效率最大化、规避人类健康风险和环境风险最佳化的无损回收目标。AI 在碳纤维无损回收中的关键作用主要表现在以下方面:

1.2.1 AI 无损闭环回收废碳纤维

关键特征如图 1 (对应文字框):

- (1) 资源化: 树脂单体化、纤维高值化, 100% 物料进入下一循环。
- (2) 健康化: 全过程密闭、负压、零粉尘逸散; 溶剂无毒、废水零排放。
- (3) 无损化: 常温/低温解离+AI 精准控参, 纤维强度保持 >97%。
- (4) 闭环化: AI-LCA 数据实时反馈, 工艺参数持续优化, 形成数字孪生闭环。

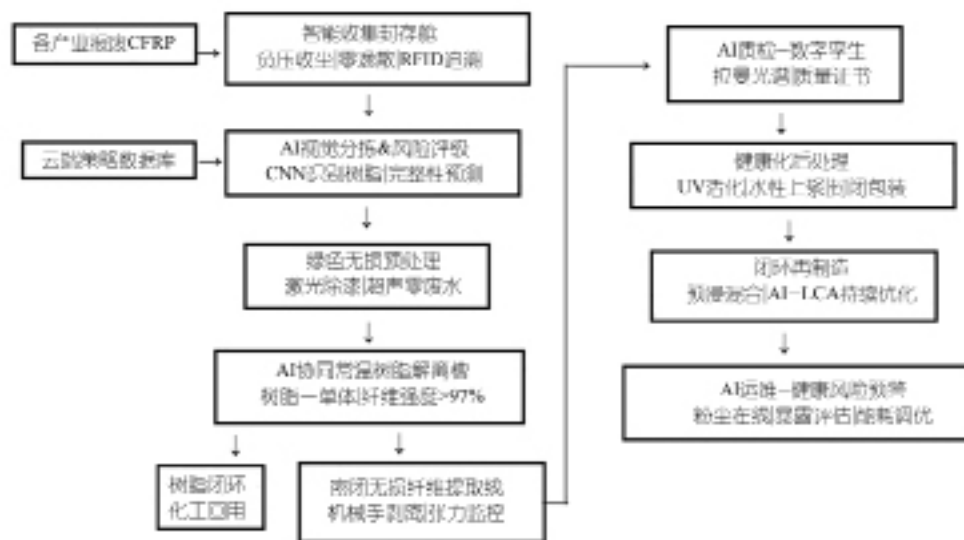


图1 AI 无损闭环回收废碳纤维方框图

1.2.2 AI 在碳纤维无损闭环循环经济核心优势
碳纤维无损闭环循环经济核心优势见表 1。

表 1 AI 在碳纤维无损闭环循环经济核心优势

特征	描述
资源闭环	实现碳纤维“从摇篮到摇篮”的循环利用
高值再生	保留纤维性能，用于中高端制造
低碳排放	减少原生碳纤维生产带来的高能耗与碳排放
智能驱动	AI+ 物联网提升回收效率与质量控制
政策协同	政府引导 + 标准体系支撑可持续发展

1.2.3 AI 回收过程的智能优化^[1]

AI 技术能够通过机器学习算法对碳纤维回收过程中的各种参数进行分析和优化。例如，在热解回收过程中，AI 可以实时监测温度、压力、气体流量等参数，并根据碳纤维的性能要求自动调整这些参数，以确保回收过程中碳纤维的完整性，最大限度地减少损伤，提高回收质量。通过对大量历史数据的学习和分析，AI 模型可以预测最佳的回收条件是否符合无损要求，从而提高回收效率和质量。

1.2.4 AI 缺陷检测与质量评估^[2]

借助计算机视觉和深度学习技术，AI 可以对回收后的碳纤维进行快速、准确的缺陷检测。通过分析碳纤维的表面形貌、内部结构等特征，AI 模型能够识别出断丝、磨损、杂质等缺陷，并对碳纤维的质量进行评估和分级。这有助于将不同质量等级的碳纤维应用于合适的领域，提高资源的利用效率。例如，高质量的回收碳纤维可以重新用于航空航天等高性能领域，而较低质量的碳纤维可以用于建筑加固等对性能要求相对较低的领域。

1.2.5 AI 回收网络的构建与管理

利用 AI 技术构建高效的碳纤维无损回收网络，实现从废弃物收集、运输到回收处理的全过程管理。AI 还可以对回收过程中的数据进行实时监控和分析，及时发现和解决问题，确保回收网络的稳定运行。例如，通过智能传感器和物联网技术，回收设备可以实时将数据传输到 AI 系统，AI 系统根据这些数据进行分析 and 决策，实现智能化的回收管理。

1.3 AI 碳纤维复合材料无损回收技术要求

回收过程应尽量减少对环境的污染，采用绿色、环保的回收工艺和材料。无损回收技术标准尚未建立，但结合现有研究、专利和行业实践，学习《废碳纤维复合材料回收利用碳排放核算方法》(T/ZGZS 0113—2024)、《废碳纤维复合材料回收利用碳排放核算方法》(T/ZGZS 0113—2024)：规范了碳纤维复合材料回收

利用过程中的碳排放核算方法，提出以下技术标准和规范的要点：

1.3.1 碳纤维无损解离力学性能质量要求

碳纤维无损解离与原生碳纤维的性能差距，如力学性能，如拉伸强度、模量等，需满足闭环再加工要求。碳纤维回收率 98%；力学性能和纤维长度保有率 97%；碳纤维的结构损伤率应低于 2%。

1.3.2 碳纤维树脂基无损解离外观及内在质量要求

回收的树脂纯度和性能需达到再加工要求。表面清洁无积炭残留、无损伤，结构完整。对于溶剂分解法，要求树脂能够充分分解成低分子量的聚合物或有机小分子，以便与碳纤维有效分离。热塑性树脂无损回收率及纯度 98%；树脂利用率 98%。回收的热固性树脂分解产物纯度需达到 96% 以上。

1.3.3 废气废液无损处理及回收质量要求

对于有机废气（如 VOCs），去除率需达到 99.999% 以上，挥发性有机物（VOCs）的排放浓度限值为 100 mg/m³。尾气含氧量控制在 5%~10%。废气废液利用率 98%。

1.4 AI 碳纤维无损回收技术与传统回收技术比较

AI 碳纤维无损回收技术与传统回收技术相比，具有显著的优势^[3]。AI 碳纤维无损回收与传统回收两者的主要项目比较（表 2）。

2 基于 AI 碳纤维前期无损回收技术的科学发展

碳纤维前期处理主要指分拣、分割、清洗、粉碎等解离之前的处理。本节主要研究分拣、分割、粉碎三类技术优化。

2.1 基于 AI 碳纤维无损回收分拣技术的科学发展

AI 系统通过高分辨率摄像头和光谱传感器，实时识别碳纤维材料的类型、长度、直径和表面状态。深度学习算法能够快速准确地对材料进行分类，确保分拣的准确性。AI 技术能够实现对碳纤维材料的精细化识别和分类，可有效避免因误分拣导致的材料浪费和质量下降。AI 算法的处理速度快，能够在短时间内对大量的碳纤维材料进行快速识别和分拣，大大提高了回收效率，满足大规模工业化回收的需求。图 2 为基于 AI 碳纤维复合材料无损回收分拣场景示意图。

表 2 AI 碳纤维无损回收与传统热解回收比较

对比项目	传统热解回收技术	AI 无损回收技术
回收原理	机械粉碎法通过物理研磨将废弃复合材料转化为粉末；热解法通过高温处理使碳纤维复合材料中的热固性树脂基体发生分解；溶剂溶解法使用化学试剂与碳纤维复合材料反应，将碳纤维从树脂基体中剥离。	运用 AI 技术结合特定的化学、物理方法，如利用 AI 视觉识别系统分析进料特性，辅助优化回收流程；采用化学回收法通过可降解热固性树脂基体，在特定催化剂作用下实现树脂的温和解聚等。
回收率与利用率	传统回收技术效率相对较低，如溶剂分解法中的常压溶解法分解效率低，热解法需要专业的废气处理设备和严格的工艺控制，流化床热解法回收纤维的力学性能受工艺限制。回收率与利用率：<80%。	配备 AI 系统的设备可实时分析进料特性并生成数据表，能更精准地控制回收过程，提高效率，如 Carbon Cleanup 公司第二代设备生产能力较第一代提升三倍，且能处理更多种类复合废料。回收率与利用率：95%。
原材料成本	机械法基本无额外原材料成本；热解法无需特殊原材料，但需消耗大量能源来维持高温环境；溶剂溶解法需要使用大量化学溶剂，如硝酸、醇类等，溶剂采购成本高，使用后需进行处理，增加后续成本。	在化学回收过程中，可能需使用特定催化剂、绿色溶剂等，这些材料成本较高。不过，随着技术的发展和规模化应用，原材料采购量增加，成本有望因规模效应而降低。
工艺性	操作复杂，需大量试剂。	智能优化，操作简便。
环保性和健康性	机械粉碎法会产生严重粉尘；热解法产生大量废气，需要专业处理设备；溶剂溶解法使用的腐蚀性溶剂或会造成二次污染。	一些 AI 辅助的化学回收法采用绿色溶剂和低温工艺，较传统热解法降低 30% 能耗，且无化学污染；利用超临界二氧化碳为溶剂的超临界流体萃取法，无需后续清洗工序，对环境更友好
产品附加值	机械粉碎法产品仅能作为填充物或燃料，附加值极低；热解法和溶剂溶解法回收的碳纤维性能有一定损失，限制了其在高端领域的应用。	回收得到的碳纤维性能高，可用于高端领域，如航空航天级再生碳纤维已实现量产，其 3D 打印模具在强度、疲劳寿命等指标上与原材料无显著差异。
材料应用寿命及领域	回收利用次数有限，首次回收低于原值应用，主要用于低附加值产品。	高附加值领域，可多次原值应用。
自修复能力	差	优异

2.1.1 基于 AI 碳纤维无损回收分拣技术原理解析

2.1.1.1 绿色粉尘控制

分拣系统配备了高效的粉尘抽取系统，能够在分拣过程中及时收集粉尘，防止其扩散到空气中。此外，系统还配备了空气质量监测传感器，实时监测工作环境中的粉尘浓度，确保工作环境的安全。

2.1.1.2 机器视觉识别

利用高分辨率摄像头等视觉传感器，对碳纤维及其复合材料进行图像采集。通过深度学习算法，如卷积神经网络（CNN），对采集到的图像进行分析和处理，能够精准识别碳纤维的类型、长度、直径、颜色、表面状态等特征，以及复合材料中碳纤维与其他组分的分布情况，从而实现对不同碳纤维材料的快速、准确分类。

2.1.1.3 光谱分析

借助近红外光谱（NIR）、拉曼光谱等技术，对碳纤维及其复合材料的化学成分和结构进行检测。每种材料在特定光谱范围内都有独特的光谱特征，AI 算法通过对光谱数据的分析和比对，可以区分不同类型的碳纤维以及其复合材料中的树脂基体等成分，为后续的分拣和回收提供依据。

2.1.1.4 传感器融合

将机器视觉、光谱分析等多种传感器技术相结合，获取更全面、准确的材料信息。例如，通过视觉传感器确定碳纤维的外观特征，同时利用光谱传感器获取

其化学成分信息，再通过 AI 算法对这些多源数据进行融合处理，提高识别和分拣的准确性和可靠性。

图 2 展示了系统，该系统包括粉尘抽取系统和数字屏幕，实时显示数据和 AI 算法。背景是一个干净、现代化的工业环境，配有安全设备和分拣材料的存储箱，明亮的灯光突出了过程的精确性和安全性。



图 2 基于 AI 碳纤维复合材料无损回收分拣场景示意图

2.1.2 基于 AI 碳纤维无损回收智能分拣技术创新及应用案例

（1）DeepMind 公司利用强化学习算法，开发出了一种新型的 AI 分拣系统，该系统能够在复杂的废料环境中快速精准识别碳纤维，分拣效率比传统方法提高了 30% 以上。

（2）德国某科研机构研发出一种新型的光谱传感器，能够快速准确地检测出碳纤维废料中的化学成分，为 AI 分拣提供了更精确的数据支持。

(3) 日本发那科公司推出的一款智能机器人,集成了先进的 AI 技术和高精度的机械臂,能够在复杂的环境中完成碳纤维废料的分拣任务,操作精度达到了毫米级。

2.2 基于 AI 碳纤维无损回收切割技术的科学发展

通过减少粉尘的产生和扩散,显著降低了工人暴露于有害粉尘的风险,保护了工人的健康。减少了粉尘排放,降低了对环境的污染,符合绿色制造的理念。AI 提高了切割的精度和效率,同时减少了材料浪费。

2.2.1 基于 AI 碳纤维无损回收切割技术原理解析

2.2.1.1 绿色粉尘健康化控制

AI 算法通过高精度传感器实时监测切割过程,自动调整切割速度和力度,以减少粉尘的产生。同时,切割工具配备了高效的粉尘抽取系统,能够在切割过程中及时收集粉尘,防止其扩散到空气中。

2.2.1.2 AI 机器学习与深度学习

机器学习和深度学习算法可以对碳纤维切割过程中的复杂数据进行自动学习和建模,从而实现对切割工艺的智能化优化。

2.2.1.3 AI 数据驱动的工艺优化

AI 系统通过机器学习算法分析切割过程中的数据,自动调整参数以实现最佳切割效果。采用高频率、高功率的非接触式超快激光(如皮秒激光或飞秒激光),能够减少热影响区,避免对纤维造成损伤,提高切割精度,切割速度可达 100 mm/min 以上(对于 2 mm 厚的板材),热影响区小于 5 μm 。

2.2.1.4 AI 无损切割检测与预处理

在切割之前,利用 AI 技术结合无损检测手段,如超声波检测和红外热成像,对碳纤维材料进行精确检测。这不仅可以识别材料中的缺陷,还可以优化切割路径,减少不必要的切割,从而降低粉尘产生。图 3 为基于 AI 碳纤维规避微尘健康风险绿色切割优化未来化场景。

2.2.1.5 AI 规避健康风险的环境监测与反馈

系统配备空气质量监测传感器,实时监测工作环境中的粉尘浓度。一旦检测到粉尘浓度过高,AI 系统会自动调整切割参数或暂停切割,直到粉尘浓度降至安全水平。图 3 为基于 AI 碳纤维规避微尘健康风险绿色切割优化未来化场景,展示了一个配备精密切割工具和粉尘抽取系统的机械臂。切割过程由显示在数字

屏幕上的 AI 算法精确控制。背景是一个干净、现代化的工业环境,配有安全设备和回收材料的存储箱,明亮的灯光突出了过程的精确性和安全性。



图 3 基于 AI 碳纤维规避微尘健康风险绿色切割优化未来化场景

2.2.2 基于 AI 碳纤维无损回收智能切割技术创新及应用案例

紫外皮秒激光切割技术是一种先进的材料加工技术,在碳纤维等材料的切割中具有独特优势。紫外皮秒激光切割技术利用的是紫外波段的皮秒级激光脉冲。皮秒激光具有极短的脉冲宽度,1 皮秒等于 1 万亿分之一秒(1 ps=10⁻¹² s)。在极短的时间内,聚焦光斑直径可以达到 $\leq 20 \mu\text{m}$,激光能量被高度集中,使得激光具有极高的峰值功率。当这种高能量密度的紫外皮秒激光聚焦在碳纤维材料表面时,能够在瞬间将材料表面的原子或分子激发到极高的能量状态,使其直接汽化或电离,从而实现对材料的精确切割,由于激光脉冲宽度极短,热量来不及向周围传导,属于“冷加工”模式,能有效避免材料因受热而产生的热损伤、变形和碳化等问题。

某无人机桨叶制造商采用紫外皮秒激光技术切割碳纤维材料。该技术利用超快脉冲(1 ps=10⁻¹² s)+紫外冷光,实现“原子级精密加工”。其具有冷加工模式,热量来不及传导,树脂不碳化,切口光滑;超短脉冲可瞬间汽化材料,纤维丝整齐切断,无毛刺;聚焦光斑直径 $\leq 20 \mu\text{m}$,复杂异形件一次成型,良品率提升 90%+。采用该技术后,该制造商的切割效率提升 3 倍,产品报废率从 15% 降至 0.5%。

2.3 基于 AI 碳纤维无损回收粉碎技术的科学发展

基于 AI 的碳纤维无损回收绿色粉碎技术优化是应对微尘健康风险和环境问题的重要手段。

AI 智能粉碎系统能够精确控制粉碎过程,最大限

度地减少对碳纤维的损伤,从而提高回收材料的质量。这使得回收的碳纤维可以重新用于高端应用。智能粉碎技术更加环保,减少了对环境的污染。此外,通过优化粉碎过程,还可以降低能源消耗,进一步减少碳排放。

2.3.1 基于 AI 碳纤维无损回收粉碎技术原理的解析

2.3.1.1 绿色粉尘控制

高效粉尘收集装置:配备先进的粉尘收集系统,如负压集尘设备,能够在粉碎过程中及时收集粉尘,防止其扩散到空气中。

2.3.1.2 智能监测与反馈

利用 AI 算法实时监测粉尘浓度,根据监测数据自动调整粉碎参数或暂停操作,确保粉尘浓度始终处于安全范围内。

2.3.1.3 无损检测与预处理

在粉碎之前,利用 AI 技术结合多种无损检测手段,如超声波检测、计算机断层扫描(CT)、红外热成像等,进行精确检测。这些技术可以识别回收碳纤维中的缺陷、损伤和内部结构,为后续的粉碎和回收提供数据支持。例如,通过超声波检测可以发现碳纤维复合材料中的分层、裂纹等缺陷,从而在粉碎过程中避免对这些区域造成进一步损伤。

2.3.1.4 智能粉碎系统

AI 驱动的智能粉碎设备能够根据无损检测的结果,自动调整粉碎参数,如粉碎力度、速度和角度。这些设备通常配备高精度的传感器和执行器,能够实时监测粉碎过程中的物理变化,并通过机器学习算法进行动态优化。例如,当检测到碳纤维的特定区域需要更温和的粉碎方式时,系统可以自动降低粉碎力度,以减少纤维的损伤。

2.3.1.5 数据驱动的优化

AI 算法通过对大量历史数据和实时监测数据的学习,不断优化粉碎过程。这些数据包括碳纤维的类型、厚度、缺陷分布以及粉碎过程中的各种参数。通过深度学习和强化学习算法,系统能够预测最佳的粉碎策略,以实现无损回收。

2.3.2 低粉尘产生技术

2.3.2.1 激光粉碎技术

采用激光粉碎设备,通过高精度激光束对碳纤维进行切割和粉碎,减少粉尘的产生。

2.3.2.2 水射流辅助粉碎

结合水射流技术,在粉碎过程中引入水流,降低粉尘的产生和扩散

2.3.3 基于 AI 碳纤维无损回收粉碎技术创新及应用案例

图 4 为 AI 飞机碳纤维外壳无损智能粉碎技术的未来化场景,展示了一个先进的 AI 控制的碳纤维飞机外壳粉碎设施。图中展示了专为碳纤维设计的大型粉碎机,配备 AI 系统以优化粉碎过程,提高效率和安全性;实时监控屏幕上显示粉碎进度、纤维分离和安全指标等数据;工人穿着防护装备监督整个过程并与 AI 界面互动;封闭且通风良好的系统用于捕捉和过滤空气中的颗粒物,确保工作环境的安全;传送带将粉碎后的碳纤维材料运输至进一步处理区域。整个设施现代化且井然有序,突出尖端技术与环境安全措施。



图 4 AI 控制的碳纤维飞机外壳分离及粉碎设施

日本在碳纤维无损回收粉碎技术方面注重精细化和智能化。他们研发了具有高精度传感器的设备,这些传感器能够实时监测碳纤维在回收过程中的物理和化学变化。同时,结合 AI 技术对监测数据进行快速分析和处理,实现对回收过程的精确控制。例如,在粉碎过程中,通过 AI 算法优化刀具的转速、进给量等参数,确保碳纤维在不被破坏的情况下被有效粉碎,保持其原有的高强度和高模量特性。

3 基于 AI 碳纤维无损解离技术创新和发展

碳纤维无损解离技术指采用先进的解聚、分离和净化原理,如利用超声波、微波等能量场,促使复合材料内部的界面发生变化,实现碳纤维与树脂基高效解离。

近年来,创新出多种新型的碳纤维无损回收方法。这些方法不仅提高了回收碳纤维的质量,还降低了回收成本,为大规模应用奠定了基础。AI 技术可以用于

提高和优化解离过程,实现无损解离。图4 AI控制的碳纤维飞机外壳粉碎设施。本节阐述和分析几种基于AI碳纤维无损解离技术的创新和发展。

3.1 碳纤维物理无损解离技术的创新

碳纤维物理无损解离技术的创新不仅提高了碳纤维的生产效率和质量,还降低了能耗和成本,推动了碳纤维在航空航天、新能源、交通运输等领域的广泛应用。

3.1.1 纳米结构诱导微波加热技术

爱尔兰利莫瑞克大学的研究团队开发了一种利用微波加热技术制造碳纤维的方法。通过在纳米级别上控制材料结构,提高了聚丙烯腈的转化效率,生产的碳纤维具有良好的拉伸强度和模量。该技术通过纳米结构诱导微波加热,能耗降低高达70%,且力学性能与传统方法生产的碳纤维相当。

微波辅助解聚技术可将废弃复合材料的回收率提升至85%,再生纤维强度保留率达90%。此外,该技术还可使用家用微波炉进行生产,极大地降低了设备成本。

3.1.2 等离子体加热技术

美国4M碳纤维公司与橡树岭国家实验室共同开发的4X技术,通过等离子体化学预氧化,比传统预氧化速度快3倍,单位能量消耗降低75%,同时碳纤维质量较高。

3.1.3 等离子和微波技术组合无损解离技术

法国CARBOWAVE联盟(包括UL团队、德国纺织与纤维研究所、法国微波技术咨询公司等)开发了一种基于等离子和微波技术的碳纤维无损解离方法。AI技术用于优化加热过程,确保碳纤维生产的高效性和一致性。该技术已应用于碳纤维的工业化生产,推动了可持续工业发展。使用等离子和微波加热技术替代传统热源,降低能耗达70%。

3.1.4 直接放电的电脉冲无损解离技术

早稻田大学开发了一种直接放电的电脉冲方法,利用焦耳热、热应力和等离子体膨胀力,将CFRP中的碳纤维与树脂基体分离。该技术无需高温或化学处理,回收的碳纤维强度更高,且无残留树脂。该技术已成功应用于废旧飞机部件、汽车废料和风力涡轮机叶片的回收,显著提高了资源利用率。

3.1.5 多步热解法无损解离技术^[2]

Hyeon等提出的三步热解法主要用于从碳纤维增强热固性复合材料(如环氧树脂基复合材料)中回收

碳纤维。这种方法通过分步加热和气氛控制,实现了高效、环保且低成本的碳纤维回收,通过控制热解温度和时间,可使碳纤维的机械强度显著提高,回收率可达95%,拉伸强度比原始纤维提高80%。通过调整热解温度和气氛,可以根据不同的复合材料和回收要求进行优化,具有较强的灵活性。与传统的化学回收方法相比,多步热解法不使用有害化学试剂,减少了对环境的污染。

3.1.6 膨胀法无损解离技术

在碳纤维增强复合材料(CFRP)的回收中,膨胀法无损解离技术可以通过加热或化学处理使树脂膨胀,从而实现碳纤维与树脂的无损分离。

在特定的体系中,利用具有高热膨胀系数的材料作为媒介。当对含有碳纤维的复合材料施加外部刺激(通常是加热)时,热膨胀材料迅速吸收热量并发生膨胀。这种膨胀产生的机械应力能够作用于碳纤维与聚合物基体之间的界面,逐渐破坏两者之间的结合力,从而实现碳纤维从聚合物基体中的解离。与其他解离技术相比,膨胀法的独特之处在于其利用材料自身的膨胀特性来实现分离,避免了复杂的化学反应或高温带来的高能耗与纤维损伤问题。

3.1.7 动态化学键回收技术

美国能源部橡树岭国家实验室开发出闭环技术,可回收碳纤维增强聚合物(CFRP)。该技术使用动态化学基团和关键物质频哪醇,使CFRP可无损性能回收利用,同时提高了材料的韧性,其强度几乎是传统材料的两倍。

3.2 碳纤维化学解聚法无损技术的创新

碳纤维化学解聚技术的创新为解决碳纤维复合材料的回收难题提供了多种有效途径。这些技术不仅提高了碳纤维的回收效率和质量,还实现了回收产物的高值化利用,推动了碳纤维复合材料的可持续发展。南加州大学的研究团队开发了一种创新的化学解聚法回收技术,利用工程化的青霉菌分解聚合物基体,并将其转化为具有潜在医药应用的化合物,回收的碳纤维可保留超过97%的原始强度。

3.2.1 可逆酰胺化反应

研究人员通过构筑可闭环回收的碳纤维增强聚合物基复合材料,利用马来酸叔酰胺键的可逆酰胺化学,在室温下1 h内即可实现复合材料的解聚。解聚后可回收完整的碳纤维和高纯度的单体,这些单体可重新用于制备新的复合材料,且性能与原批次基本一致。

3.2.2 芳香频哪醇交联树脂

吉林大学孙俊奇教授课题组开发了基于芳香频哪醇交联的热固性树脂及其碳纤维增强复合材料。通过加热,该复合材料可解聚为高性能弹性体和可再利用的碳纤维。这一技术不仅实现了碳纤维的高效回收,还获得了具有优异力学性能的弹性体。

3.2.3 定向解聚技术

中国科学院山西煤化所侯相林团队开发了定向解聚法,通过特定的溶剂和催化剂体系,在较温和的条件下将高分子在特定键位解聚,形成长链热塑高分子或树脂合成单体。该技术不仅提高了回收效率,还改善了环氧树脂废弃物难以利用的现状。

3.2.4 动态化学基团无损解离技术^[2]

美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)开发了一种闭环技术,用于回收碳纤维(CFRP)。使用动态化学基团(如频哪醇)使CFRP在无损性能的情况下实现回收。该技术通过化学键的动态交换,使树脂基体在温和条件下解离,保留了碳纤维的高强度力学性能。回收后的碳纤维可用于制造风力涡轮机叶片、电动汽车部件和体育用品。

3.3 碳纤维理化组合多步法无损解离技术

碳纤维理化组合二步法无损解离技术是一种结合物理和化学方法的创新回收技术,技术的核心在于通过分步处理,高效、无损地分离碳纤维复合材料中的碳纤维和树脂基体,为碳纤维复合材料的回收提供了一种高效、环保且经济的解决方案。碳纤维理化组合多步法无损解离技术的核心在于通过分步处理,逐步去除复合材料中的树脂基体,最终实现碳纤维的无损回收。Hyeon等提出了一种利用过热蒸汽和空气进行多步热解的方法,能够实现高达95%的回收率,并且回收碳纤维的拉伸强度比原始碳纤维提高了80%。

碳纤维理化组合二步法无损解离技术流程:

第一步:物理热解(低氧环境)过程:将碳纤维复合材料置于低氧环境中,利用微波加热或其他热解技术,使复合材料中的树脂基体发生热裂解。

第二步:化学氧化(有氧环境)过程:将第一步得到的中间产物置于有氧环境中,通过电加热或其他方式进一步加热,使残留的树脂发生氧化反应,最终完全去除。

3.4 AI规避健康风险无损回收

AI凭借其强大的功能,为解决回收碳纤维过程中产生的大量粉尘污染问题提供了全方位的解决方案。通过建立数据模型,AI可以快速识别出粉尘产生的规律和趋势。基于精准的监测和深入的分析,AI实现了对除尘设备的智能控制。AI技术的应用,让回收的清洁化工作从传统的粗放式管理转变为精细化、智能化的控制,为彻底解决碳纤维回收过程中的粉尘污染问题迈出了关键的一步。

3.5 基于AI碳纤维无损解离创新技术案例

德国CFK Valley Recycling公司的回收系统利用AI算法对碳纤维复合材料的回收过程进行全面优化。通过传感器实时采集回收过程中的温度、压力、物料流量等数据,并将这些数据传输至AI控制系统。AI系统根据预设的模型和算法,对这些数据进行快速分析与处理,精准地调整回收设备的运行参数,实现了对解离过程的智能控制。通过AI的智能调控,能够将碳纤维的回收率提高至85%以上,强度、模量等关键性能指标上,与原始碳纤维相比仅有微小差异。宝马等汽车制造商采用该公司回收的碳纤维,用于制造汽车内饰、车身结构件等,不仅降低了生产成本,还提高了汽车的轻量化水平和燃油经济性。

Lossless recycling of carbon fiber intelligent manufacturing technology drives the development of a high-value closed-loop circular economy for carbon fiber

Zhang Yougen

(Shanghai First Plastic Machinery Factory, Shanghai 201201, China)

Abstract: Aiming at the problems of severe fiber damage, high energy consumption and heavy pollution existing in the traditional recycling of carbon-fiber-reinforced polymer composites (CFRP), which restrict the closed-loop development of the industry, this paper puts forward a new concept of intelligent manufacturing

Key words: AI; carbon fiber; dissociation; circular economy; research

(未完待续)

The giant in special tires turned losses into profits in the second quarter

(R-03)

