

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（下）

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(10):01-09.

中图分类号：TQ330.46

文章编号：1009-797X(2026)10-0001-09

文献标识码：B

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.10.001

（续接上期）

4 基于 AI 碳纤维无损回收性能修复技术的科学发展

碳纤维解离后表面都有不同数量、不同类型、不同程度的损失、损害，对这些性能缺陷进行修复，是无损回收的组成部分。修复处理主要包括表面处理和界面相处理，处理目标都是为了提高界面性能和力学性能，但它们的侧重点和方法有所不同。这两种方法可以结合使用，以达到最佳的性能提升效果。

4.1 AI 碳纤维无损解离界面相修复处理技术的研究

碳纤维界面相是碳纤维与基体之间的微观结构区域，通常厚度在纳米到微米级别。它不仅是物理上的过渡层，更是化学和力学性能的关键区域。实现高效无损解离碳纤维，界面相处理是一个重要环节。构建一个适配的界面相，使碳纤维和基体之间的模量、热膨胀系数等物理特性能够平稳过渡，提高解离过程中碳纤维的韧性和断裂韧性，构建无损解离界面相。图 5 为碳纤维与聚合物基体之间的界面相示意图，图中中间灰色层为界面相。

4.1.1 碳纤维界面相技术特征解析^[4]

碳纤维与树脂之间的界面层是复合材料的关键部

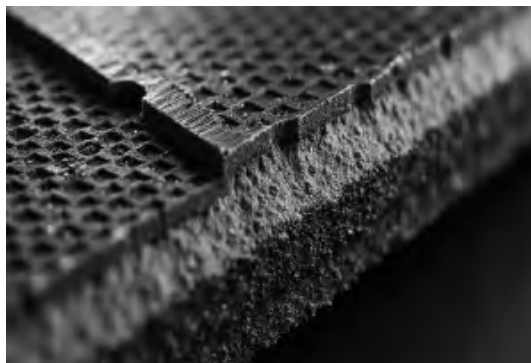


图 5 碳纤维与聚合物基体之间的界面相示意图

分。这个界面层的形成主要依赖于碳纤维表面的处理和树脂的浸润。

4.1.1.1 界面相的结构特征

构建具有“刚性—柔性”界面相，可以显著提高碳纤维与树脂之间的界面黏合强度，能够有效传递应力并改变裂纹的传播路径，从而提高复合材料的整体力学性能。

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。

4.1.1.2 界面相的厚度和均匀性

适当的界面层厚度可以确保应力的有效传递,而均匀的界面层则有助于避免应力集中,提高复合材料的稳定性和可靠性。

4.1.2 AI 技术在碳纤维无损解离界面相修复处理中的应用

4.1.2.1 利用 AI 进行界面相损伤检测与诊断

通过机器学习和深度学习算法,对无损检测(NDI)和结构健康监测(SHM)数据进行分析,可以准确地检测、定位和分类碳纤维复合材料中的各种损伤类型,如裂纹、分层、界面脱粘等,为后续的修复处理提供精确的指导。

4.1.2.2 AI 辅助的界面相修复材料设计

利用 AI 技术对大量的材料性能数据进行分析 and 模拟,预测不同材料组合和处理工艺对碳纤维与基体界面性能的影响,从而设计出更有效的界面修复材料。预测不同材料组合和处理工艺对碳纤维与基体界面性能的影响,从而设计出更有效的界面相修复材料。

4.1.2.3 AI 在界面相修复效果评估中的应用

利用 AI 算法对修复后的碳纤维复合材料进行性能评估,通过分析力学性能测试数据、微观结构表征结果等,快速准确地判断修复效果。

4.1.3 碳纤维界面相增强理论创新

4.1.3.1 多尺度界面相增强理论

结合纳米材料和聚合物的协同作用,构建多尺度的界面相增强结构。例如,通过在碳纤维表面接枝纳米材料(如碳纳米管、纳米二氧化硅等)和聚合物(如超支化聚咪唑、环氧树脂等),形成具有不同尺度的界面相,从而提高复合材料的界面相强度和韧性。

4.1.3.2 智能界面相增强理论

利用智能材料或自修复材料构建界面相,使复合材料具有自感知和自修复能力。例如,通过在碳纤维表面涂覆具有自修复功能的聚合物涂层,当复合材料受到损伤时,涂层能够自动感知并启动修复机制。

4.1.4 无损解离界面相技术创新设计^[5]

界面相的技术创新设计不仅能够提高复合材料的性能和可回收性,还为未来的可持续发展提供了新的思路。

4.1.4.1 纳米复合涂层界面相

通过在碳纤维表面引入石墨烯氧化物或氮化硼纳米片,构建纳米复合涂层,显著提高了纤维与树脂基

体之间的界面结合性能。

4.1.4.2 光响应性聚合物界面相

利用光响应性(如光致变色材料),通过光照使界面层降解或软化,从而实现分离。

4.1.4.3 智能材料响应性界面相

利用智能材料(如形状记忆聚合物或光响应性材料)设计响应性界面,通过外部刺激(如温度、光照)实现界面结合与分离的切换。AI 精确控制外部刺激条件,避免误操作。

在碳纤维与树脂之间引入形状记忆聚合物层,通过温度变化实现界面的结合与分离。

4.1.4.4 等离子体动态交联可逆涂覆界面相

利用等离子体处理提高碳纤维表面的活性和粗糙度,同时在其表面涂覆一层可逆的化学涂层,增强界面结合力并便于分离。等离子体处理可显著提高碳纤维表面活性,增强界面结合力。可逆涂层设计灵活,分离过程可控。

4.1.4.5 碳纤维可逆交联智能界面相

可逆交联无损解离的智能界面相是一种基于动态化学键(如共价键、氢键、配位键等)的界面结构,能够在特定条件下(如温度、溶剂、机械力等)实现交联网络的可逆断裂和重新形成。这种界面相不仅能够增强复合材料或聚合物材料的力学性能,还能够材料回收或修复过程中实现无损解离,从而实现材料的高效回收和再利用。图 6 为碳纤维动态交联界面相的概念图,展示了碳纤维网络中发光的交联节点,这些节点通过 AI 算法进行优化和控制,象征着 AI 技术在动态交联界面相中的重要作用。

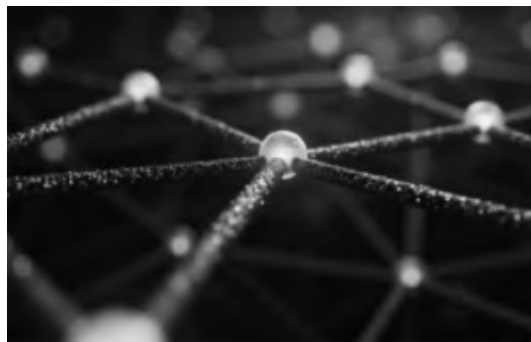


图 6 碳纤维动态交联界面相的概念图

4.1.5 碳纤维界面相创新技术案例

美国橡树岭国家实验室(ORNL)研究人员通过在聚合物基体中引入动态化学基团(如硼酸酯基团),实现了碳纤维与树脂之间的动态交联。这种交联方式

不仅增强了界面结合力,还允许通过特定化学处理(如加入频哪醇)实现复合材料的完全回收。通过设计含亚胺键和氢键的双动态交联网络,研究人员成功开发了一种可回收的环氧树脂基复合材料。这种材料在保持高强度和韧性的同时,能够在3 h内完全降解,从而实现闭环回收。

4.2 AI 碳纤维无损回收表面性能修复处理技术的研究

图7为碳纤维表面详细纹理和特性的显微图像,图中展示碳纤维表面整体较为光滑,但存在一些微小的粗糙度,这些细小的纤维排列整齐,表面还有一些小的沟槽和凹陷,使其呈现出略微的纹理感。纤维的直径均匀,整体结构有序。高分辨率的图像清晰地捕捉到了碳纤维表面的复杂细节。



图7 碳纤维表面详细纹理和特性的显微图像

AI 碳纤维表面处理是提高其再利用价值和性能的关键步骤。

4.2.1 AI 在碳纤维表面性能修复中的应用

AI 在碳纤维表面处理中的应用不仅提高了处理工艺的效率和精度,还为开发高性能、多功能的碳纤维复合材料提供了新的可能性。

4.2.1.1 智能工艺设计

通过机器学习算法, AI 可以根据材料特性设计最优的表面处理工艺。通过 AI 优化的等离子体处理工艺,碳纤维与基体的界面结合强度可提高30%。

4.2.1.2 实时监测与反馈

AI 驱动的监测系统可以实时监控表面处理过程,及时调整工艺参数,确保处理效果。

4.2.1.3 缺陷预测与修复

AI 技术可以通过数据分析预测表面处理过程中可能出现的缺陷,并提供修复建议。使用 AI 驱动的图片识别系统检测碳纤维复合材料表面的裂纹和脱粘缺陷。

4.2.2 碳纤维表面处理与修复方法探索

碳纤维表面性能修复技术多种多样,每种方法都有其独特的原理、优缺点和适用场景。选择合适的表面处理技术可以显著提高碳纤维的再利用价值,增强其与树脂的界面结合性能,从而提升复合材料的整体性能。以下是几种常见的碳纤维回收后表面处理技术及其应用。

4.2.2.1 电化学氧化法

电化学氧化法是唯一能够在碳纤维制备时在线连续运行的表面处理技术,通过在碳纤维表面引入含氧官能团,如羧基、羟基等,改善其表面活性和与树脂的相容性。电氧化处理不但使碳纤维表面变得粗糙、增加其比表面积,还改善了其拉伸强度和模量。

4.2.2.2 等离子体处理法

利用等离子体中的高能粒子轰击碳纤维表面,使其表面发生物理和化学变化,产生新的活性位点和官能团,从而改善表面性能。这种方法处理时间短、效果显著,且对环境友好。

4.2.3 AI 碳纤维表面处理创新技术案例

三菱化学通过热解技术回收后的碳纤维经过表面处理,可用于多种应用,如短切纤维、纤维球、非织造布等。

东丽公司通过 AI 和机器学习技术,预测碳纤维复合材料在不同回收工艺下的性能表现。AI 技术用于优化回收碳纤维的表面处理工艺,以提高其与新基体材料的相容性。

5 基于无损解离 AI 智能溶剂和催化剂技术创新及应用的科学发展

选择绿色、可回收的环保溶剂是无损解离的重要原则。溶剂和催化剂需要与碳纤维复合材料的基体树脂具有良好的相容性,能够有效地渗透到复合材料的内部,从而促进解离过程,同时最大限度地保留碳纤维的性能和提高了解离效率。

5.1 有机溶剂和无机溶剂组合无损解离

乙酸与过氧化氢混合溶液: Li 等研究发现,利用乙酸对碳纤维复合材料进行膨胀预处理,随后在 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)或丙酮与 H₂O₂ 的混合溶液中处理30 min,环氧树脂的降解率可达95%,回收的碳纤维力学性能保持率在95%以上。

KOH 与聚乙二醇溶液: Jiang 等利用酸预处理(硫酸或硝酸),在 KOH 和聚乙二醇溶液中实现碳纤维的回收,力学性能降低少于5%。

DMSO 与醋酸铵：Chun Pei 等研究了在二甲基亚砜（DMSO）中，通过化学溶胀和电化学氧化相结合的方法，实现了常温常压下从碳纤维增强塑料（CFRP）中分离和回收碳纤维。结果表明，环氧树脂的解聚率随醋酸铵浓度和电流密度的增加而显著提高。

5.2 超临界水无损解离

超临界水在温度高于 374 °C、压力高于 22.1 MPa 的工况下，具有高溶解能力和化学反应活性，通过优化反应条件和添加催化剂来提高树脂的降解效率，从而实现碳纤维与树脂基体的高效回收。回收后的碳纤维表面洁净，树脂残留少。

超临界水无毒、无污染，是一种绿色的回收技术。通过添加催化剂，超临界水可以在较短时间内实现树脂的高效降解。

超临界水无损解离技术能够在一定程度上保持碳纤维的性能，但回收过程仍可能对纤维造成损伤。研究表明，回收碳纤维的拉伸强度相比原丝降低了 2%~10%。这表明超临界水无损解离技术在实现高效回收的同时，仍需进一步优化以减少对纤维的损伤。

Liu 等研究了在亚临界水条件下，利用苯酚和 KOH 的协同作用，实现了碳纤维增强环氧树脂复合材料的高效降解。这种方法不仅环保，还能显著提高降解效率。

5.3 离子液体无损解离

离子液体（Ionic Liquids, ILs）溶解复合材料中的树脂基体，能够与碳纤维表面发生相互作用，改善纤维与基体之间的界面结合力，降低界面的化学键合强度，从而实现温和条件下的解离。某些离子液体可以通过动态交联作用，使树脂基体在特定条件下可逆降解，从而实现碳纤维的无损回收。超支化离子液体因其独特的分子结构和优异的溶解能力，被广泛应用于碳纤维复合材料的无损解离，在常压、100~140 °C 条件下可实现复合材料的降解，再生后的碳纤维和树脂仍能保持其原有的力学性能和电学性能。

5.4 催化剂与无损解离

通过 AI 优化反应条件和催化剂的选择，可以减少高温或强酸碱的环境对碳纤维的损伤，保持其力学性能。催化剂不仅可以加速树脂基体的降解，还能在温和条件下实现碳纤维与树脂的分离，同时最大限度地减少对碳纤维的损伤。

5.4.1 金属离子催化剂的开发

LIU 等、DENG 等和 WANG 等利用配位不饱和

或弱配位的金属离子（如 AlCl_3 、 ZnCl_2 ）的强烈络合倾向，弱化碳杂原子键，并通过调控金属离子配位状态，催化选择性断裂 C—N 键或 C—O 键，实现了热固性 CFRPs 的高效降解和全组分回收。

5.4.2 氧化物半导体催化技术的开发

氧化物半导体（如二氧化钛 TiO_2 、氧化锌 ZnO 、氧化钴 Co_3O_4 等）在催化过程中主要通过光催化作用、氧化还原催化、与其他催化剂（如贵金属或过渡金属）结合协同催化等方式进行。

日本信州大学的研究团队开发了一种基于氧化物半导体的催化技术，用于工业规模的碳纤维复合材料回收。该技术通过优化催化剂体系和反应条件，实现了高效、低成本的碳纤维回收。该技术在工业应用中表现出良好的可行性和经济性，为碳纤维复合材料的可持续回收提供了新的解决方案。

5.4.3 复合催化剂的开发

复合催化剂通过多种活性组分的协同作用，提高了催化效率和选择性。许多复合催化剂能够在较低温度和压力下实现高效解离，降低了能耗和设备要求。东京大学 Kyoko Nozaki 课题组开发了一种负载型 Ni—Pd 双金属催化剂，用于环氧树脂及其复合材料的加氢裂解。

5.5 无损解离溶剂和催化剂的应用案例

西班牙巴利亚多利德大学和英国诺丁汉大学研究表明，流体体系及碱性催化剂可促进树脂的降解，提高反应速率。通过改变流体速率和碱性催化剂比例，实现了在 15 min 内降解 95% 以上树脂的回收方法，且回收纤维强度可保持原纤维 85%~99%。

美国 ATI 公司通过低温化学处理去除树脂以及一些污染物，再经真空高温分解剩余的树脂，获得了 99% 纯度的纤维。

6 AI 碳纤维解离废气废液无损回收利用的科学发展

随着 CFRP 使用量的不断增加，其废气废液的后处理问题日益凸显。传统处理方式如高温焚烧会释放有害化学物质，污染环境。在此背景下，碳纤维解离的废气废液无害化技术应运而生，该技术旨在解离过程中规避环境和人类健康风险，促进资源高附加值的循环利用。

6.1 废气废液无害化收集技术

全密闭收集：在切割、粉碎、研磨、解离等工艺

过程中,应设置全密闭的废气收集设施。确保废气收集率达到 98% 以上,避免废气直接排放到环境中

6.2 碳纤维解离废气废液无损化处理技术

碳纤维解离过程中产生的废气和废液含有多种有害物质,如挥发性有机化合物(VOCs)、颗粒物、酸性气体、重金属等,对环境和人体健康存在潜在危害。因此,对这些废气和废液进行无害化处理及回收利用是实现碳纤维解离技术可持续发展的关键环节。图 8 为碳纤维解离废气处理的现代工业设施示例,图中展示了用于碳纤维解离废气处理的先进设备,包括降温系统、吸附单元和催化氧化反应器,体现了该工艺的高效性和环保性。



图 8 碳纤维解离废气处理的现代工业设施示例

6.3 AI 技术在废气处理中的应用

- (1) 智能监测与控制。
- (2) 利用 AI 技术实时监测废气废液成分、温度、流量等参数,优化处理工艺。
- (3) 通过机器学习算法预测废气废液排放趋势,提前调整处理设备的运行参数。

6.4 碳纤维解离废气废液绿色技术处理主要有以下几类

6.4.1 吸附法

利用活性炭纤维(ACF)等高比表面积、多孔结构的吸附剂,通过化学键力或分子引力吸附废气中的有害物质。例如,可采用预处理、吸附、蒸气脱附等组合工艺,对组分相对单一、沸点在 50~200 °C、非水溶性、中等浓度的有机废气进行净化和资源化利用。但该方法存在吸附剂需定期更换或再生,运行费用较高,且饱和活性炭需专业处理等问题。

6.4.2 生物过滤法^[7]

利用微生物的代谢作用将废气中的有机物分解为二氧化碳和水。生物过滤塔内填充有生物膜载体,废

气通过生物膜时,微生物将有机物分解。环保、节能,无二次污染,适用于处理低浓度、易生物降解的废气。处理效率受微生物活性和环境条件影响较大,对难降解的有机物效果有限。

6.4.3 等离子体技术

利用高能电子束或等离子体产生的高能粒子,将废气中的有害物质分解为无害的小分子物质。等离子体技术可以在低温下实现高效处理。处理效率高,适用范围广,能够处理多种有害气体。

6.4.4 酸性气体处理

碱液吸收法。对于酸性气体(如 HCl、硫酸雾),可以采用碱液吸收塔进行处理。废气通过碱液时,酸性气体与碱液发生中和反应,生成无害的盐类。处理效率高,成本较低。需要定期更换碱液,并处理产生的废液。

6.4.5 组合处理工艺

降温+吸附+催化氧化组合处理工艺。先对高温废气降温,再通过活性炭吸附去除有机物,吸附饱和后经热空气脱附,将高浓度废气送入催化氧化装置,将一氧化碳等有害气体转化为无害的二氧化碳和水后达标排放。这种组合工艺能更有效地减少废气污染,满足严格的环保要求。

7 AI 碳纤维无损回收面临挑战和应对策略^[9]

AI 技术为碳纤维复合材料的无损回收提供了新的机遇,但同时也面临着诸多挑战。

7.1 面临挑战

7.1.1 数据代表性与泛化能力

AI 模型的性能高度依赖于数据的质量和数量。然而,碳纤维复合材料的回收过程复杂,实验数据获取难度大,导致 AI 模型的训练数据有限,影响其泛化能力。

7.1.2 树脂基体性能与回收平衡

为了实现无损回收,树脂基体需要引入动态化学键或可降解组分,但这可能会降低其使用性能。

7.1.3 回收过程的能耗与效率

虽然 AI 可以优化回收条件,但目前的回收方法(如化学降解、超声辅助回收)仍存在能耗高、效率低的问题。

7.1.4 碳纤维回收性能保有率

在回收过程中,碳纤维可能会受到损伤,导致其力学性能下降。例如,传统的热解和化学解聚方法可能会损伤纤维表面,降低其强度。

7.1.5 环境污染问题

碳纤维废料可能含有杂质和污染物,如树脂残留物或其他材料。这些杂质会影响再生碳纤维的质量和性能,需要有效的方法来去除或减少污染。

7.1.6 规模和效率

碳纤维回收技术仍处于发展的早期阶段,工业规模的回收工艺尚未普及。扩大回收过程以处理大量废物并实现具有成本效益的回收方法仍然是重大挑战。

7.1.7 经济可行性

由于工艺的复杂性和对专用设备的需求,碳纤维回收的成本可能高于生产新碳纤维的成本。开发具有成本效益的回收技术,使其与原生碳纤维的生产成本相媲美,是该行业面临的关键挑战。

7.2 应对策略

7.2.1 优化回收工艺

不断优化回收工艺,例如改进机械回收法中的破碎、筛分技术,减少碳纤维在回收过程中的损伤;优化化学回收法中的化学试剂配方,降低试剂消耗和环境污染;提高热解回收法中的热解效率,减少能耗。

7.2.2 数据驱动与物理模型结合

结合传统物理模型和 AI 技术,通过物理模型生成大量可靠的模拟数据,为 AI 模型提供更丰富的训练样本。例如,利用有限元模拟和机器学习相结合的方法,优化复合材料的回收过程。

7.2.3 新型树脂基体的研发

高性能且可回收的树脂基体,如生物基树脂、动态交联树脂等。通过 AI 优化其化学结构,使其在保持使用性能的同时,实现高效无损回收。

7.2.4 绿色回收技术的开发利用

AI 优化温和条件下的回收技术,如常温回收、超声辅助回收等。例如, Ai-Carbon 公司开发的常温回收技术,通过特定溶剂和催化剂实现了碳纤维的无损回收。

7.2.5 碳纤维保护技术的开发及应用

在回收过程中引入碳纤维保护技术,如表面涂层或预处理,减少纤维损伤。例如,通过 AI 优化的表面处理方法,可以在纤维表面形成保护层,提高其在回收过程中的耐久性。

8 碳纤维无损回收生产线的开发案例

图 9 为碳纤维回收技术生产线。图中展示了一个未来感十足的生产线,从原料入口开始,复合材料被送入系统。AI 驱动的机械臂首先对材料进行分拣和分类。分类后的材料通过自动化系统进行清洗和干燥。接下来,使用先进的技术(可能涉及激光或化学工艺)分离碳纤维和树脂基体,整个过程由 AI 监控。分离后的纤维经过表面处理以增强其性能。最后,经过处理的纤维由机械臂进行打包和输出。整个工厂环境超现代,数字屏幕上显示实时数据,照明充足,且配备了安全设备,整个过程高度自动化,展现了尖端技术。



图 9 碳纤维回收技术生产线

弗劳恩霍夫高速动力学研究所(Fraunhofer EMI)研发的碳纤维回收生产线,是一项革命性的创新,能够高效回收复合材料中的连续碳纤维,同时保持其材料性能。生产线的关键环节和特点。

8.1 原料输入与预处理

回收的复合材料主要来自废弃的高压储氢罐、航空航天部件、汽车轻量化部件等,这些材料通常由连续碳纤维增强的热固性树脂基体构成。

预处理:对回收的复合材料进行初步分类和清洁,去除表面杂质和非纤维部分,确保后续处理的效率和质量。

8.2 高功率激光热解技术

核心工艺:采用高功率激光对复合材料进行局部高温降解。激光能够精确地分解纤维周围的热固性树脂,而不损伤碳纤维。

工艺窗口:通过精确控制温度(300~600 °C)和时间,确保树脂基体完全降解,同时避免碳纤维受损。

同步解绕:在热解过程中,同步进行纤维粗纱的解绕,确保纤维的连续性和完整性。

8.3 纤维回收与检测

纤维回收:经过激光热解后的碳纤维被自动收集,保持其连续性和力学性能。

质量检测：回收的碳纤维通过自动化检测系统进行质量评估，确保其性能与新纤维相当。

8.4 再生纤维的后处理

清洗与干燥：回收的碳纤维经过清洗和干燥处理，去除残留的树脂和杂质。

性能优化：通过特殊的表面处理工艺，进一步优化纤维的表面性能，使其更适合后续的再利用。

8.5 再生纤维的再利用

应用领域：回收的连续碳纤维可以重新用于制造高压储氢罐、航空航天部件、汽车轻量化部件等，实现材料的循环利用。

性能验证：通过严格的机械性能测试，验证回收纤维的性能与新纤维相当，确保其在高端应用中的可靠性。

8.6 经济与生态效益

能源节约：该技术所需的能量仅为生产新纤维的五分之一，显著降低了能源成本。

环保优势：避免了传统回收方法中纤维长度缩短和性能下降的问题，减少了废弃物的产生。

市场潜力：由于其高性能和低成本，该技术在复合材料回收领域具有巨大的市场潜力。

9 AI 无损回收高质碳纤维高值化利用科学发展的案例及解析^[8]

无损回收高质碳纤维为高值化利用打下了基础。高值化利用指再生纤维直接用于航空、航天、汽车、医疗、风电等高性能复材，或再生丝束 $\geq 90\%$ 强度保持率。

AI 无损回收技术通过优化回收工艺和精准控制，显著提高了碳纤维的回收效率和质量，后处理可提升力学性能，不仅降低了生产成本，还为回收的碳纤维在航空航天、医疗设备、汽车、医疗等领域高值化利用提供了可能。

9.1 无人机领域

图 10 为 AI 无损回收碳纤维制造无人机机体的制造场景。图中可以看到由回收碳纤维制成的轻巧、耐用的无人机机体，突出了其空气动力学设计。背景是一个现代化的清洁工厂环境，配有先进的 AI 系统、机械臂和高科技设备，突出了可持续制造的精准性和创新性。

9.2 导弹领域

图 11 是 AI 无损回收碳纤维制造导弹壳体的工业场景。



图 10 AI 无损回收碳纤维制造无人机机体的制造场景



图 11 AI 无损回收碳纤维制造导弹壳体的工业场景

图中可以看到由回收碳纤维制成的轻巧且坚固的导弹壳体，突出了其强度和精密工程设计。背景是一个现代化的工业环境，配有先进的 AI 系统、机械臂和高科技设备，突出了先进国防制造的精准性、创新性和安全性。

9.3 飞机领域

图 12 是 AI 无损回收碳纤维制造飞机的概念图。



图 12 AI 无损回收碳纤维制造飞机的概念图

图中展示了一个现代化的飞机装配线，工程师和技术人员正在将回收碳纤维部件整合到飞机结构中。回收碳纤维被制成高质量、轻量化的板材和梁，被小心地安装到机身和机翼上。背景是一个干净、高科技的工作车间，配备了先进的机械和工具，明亮的灯光突出了回收碳纤维在飞机制造中的精准应用和创新。

9.4 航天领域

图 13 为 AI 无损回收碳纤维制造航天飞机部件的制造场景图。



图 13 AI 无损回收碳纤维制造航天飞机部件的制造场景图

图中可以看到由回收碳纤维制成的先进航天飞机部件，如机翼部分或机身面板，突出了其强度、轻量化和精密工程设计。背景是一个现代化的工业环境，配有先进的 AI 系统、机械臂和高科技设备，突出了可持续航空航天制造的精准性和创新性。

9.5 高级轿车领域

图 14 为 AI 无损回收碳纤维制造汽车外壳。



图 14 AI 无损回收碳纤维制造汽车外壳

图中描绘了一个先进的回收设施，机器人手臂和 AI 引导的机械正在将旧的碳纤维汽车部件分解成纤维。这些纤维随后被加工并转化为现代电动汽车的新碳纤维部件。背景是一个高科技车间，配备传送带、自动化系统和监控整个过程的工程师。明亮的工业灯光突出了 AI 在汽车行业回收和再利用碳纤维的高效性和创新性。

9.6 医疗设备领域

图 15 为 AI 无损回收碳纤维并用于制造 MRI 检查仪外壳的现代制造场景图。

图中可以看到由回收碳纤维制成的轻巧、耐用的 MRI 检查仪外壳，背景是一个现代化的清洁工厂环境，



图 15 AI 无损回收碳纤维并用于制造 MRI 检查仪外壳的现代制造场景图

配有先进的 AI 系统、机械臂和高科技设备，突出了可持续制造的精准性和创新性。

9.7 风力发电领域

图 16 为 AI 无损回收碳纤维制造风力发电机叶片的现代制造场景图。



图 16 AI 无损回收碳纤维制造风力发电机叶片的现代制造场景图

图中可以看到由回收碳纤维制成的大型、光滑的风力发电机叶片，突出了其强度和空气动力学设计。背景是一个现代化的工业环境，配有先进的 AI 系统、机械臂和高科技设备，突出了可持续风能制造的精准性和创新性。

10 结语

展望未来，AI 碳纤维无损解离技术有望在以下几个方面取得更大进展：一是技术的融合创新将进一步深化，AI 与碳纤维技术将与更多领域的技术相互交叉融合，如与纳米技术、3D 打印技术等结合，开发出更多高性能、多功能的复合材料。

中国碳纤维回收利用技术落后于日本。中国碳纤维全年回收 4.4 万 t，其中 1.4 万 t 占比约 32% 进入高值化应用。日本全年回收 1.8 万 t，其中 1.26 万 t

占比约 70% 用于高值化。Toray/Mitsubishi 采用化学溶解 + 等离子表面改性, 纤维强度损失 <5%, 已形成航空与汽车闭环供应链。法规 ELV 法强制车企使用 $\geq 25\%$ 再生料, 直接拉高高值化比例。中国热解仍占 62%, 纤维强度损失 8%~15%, 限制高端应用。中国产能扩张快但高值化后端(取向、预浸、认证)配套不足, 导致 68% 流向低端市场或出口粗加工。

上述分析说明, 碳纤维无损纤维强度是提高高值化利用率的技术关键。所以 AI 碳纤维组合无损解离技术不仅是材料科学领域的一项重要突破, 更是影响未来众多行业发展的关键力量。

参考文献:

[1] 王磊, 陈宇, 机器学习在碳纤维复合材料回收中的应用研究[J].

高分子材料科学与工程, 2021,39(5):600–608.

[2] 刘洋, 赵强. 利用机器学习优化碳纤维复合材料回收过程中的质量控制[J]. 环境科学, 2021,40(6):1 500–1 508.

[3] 赵刚, 孙浩, 基于深度学习的碳纤维材料智能分拣系统设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2022,10:56–62.

[4] 张华, 李明. 多技术集成的碳纤维复合材料回收优化方案[J]. 高分子材料科学与工程, 2021,39(5):600–608.

[5] 黄鑫, 刘汉超, 吴锦荣等, 超支化聚合物增韧增强的自修复环氧 Vitrimers[J]. 高分子学报, 2019,5:535–542.

[6] 王磊, 陈宇, 碳纤维与环氧树脂的高效解离技术研究[J]. 复合材料学报, 2021,39(5):600–608.

[7] 张友根. 生物酶基因改造促进环境友好型降解塑料循环利用的科学发展[J]. 橡塑技术与装备, 2025,1:1–11.

[8] 胡桥乐, 端玉芳, 刘志, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料回收再利用现状[J]. 复合材料学报, 2022,39:64–76.

Lossless recycling of carbon fiber intelligent manufacturing technology drives the development of a high-value closed-loop circular economy for carbon fiber (Part 2)

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 for AI-driven “non-destructive recycling” of carbon fiber. It updates the cognition of AI-enabled non-destructive carbon-fiber recycling, and defines its definition, advantages, processes and quality indicators. Systematic research is carried out on waste pretreatment, non-destructive fiber dissociation, resin matrix optimization, solvent-catalyst systems and green disposal of three types of wastes. Practical challenges of the technology are analyzed and corresponding solutions are proposed. Examples of production-line development and high-value application of regenerated carbon fiber show that AI-based precise dissociation with high retention of fiber mechanical properties can convert carbon-fiber waste into high-performance regenerated raw materials. This AI-powered non-destructive recycling scheme provides a new technical path for the development of high-value closed-loop circular economy of carbon fiber.

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

(R-03)

全文完

