

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.011

二甲基亚砜溶胀诱导碳纤维层压板分层回收机理

赵云¹, 邢明飞¹, 徐婉婷¹, 张东晖², 徐萍¹, 郑瑞亚¹

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000; 2. 河南省焦作生态环境监测中心, 河南焦作 454000)

摘要:在碳纤维(CF)增强树脂基复合材料(CFRP)中,树脂基体的脆硬特性及其与纤维的强界面结合,致使机械回收时CF发生不可控的脆性断裂,严重破坏了回收CF的连续性及取向排列,显著降低其再生利用价值。针对这一难题,采用绿色低毒的极性溶剂二甲基亚砜(DMSO),利用树脂溶胀原理,在温和常压条件下将CF/环氧树脂层压板分层解离为单层CF织物。实验结果表明,在120~180℃下,CFRP层压板可在DMSO中实现自动分层,且温度升高可显著缩短分层时间(120℃/4 h、140℃/2 h、160℃/1 h、180℃/0.5 h),对应树脂溶胀率为100.5%~104.48%,树脂降解率为5.94%~9.66%。该方法实现了CFRP中纤维长度与织物结构的完整保留,所得柔软的分层产物易于机械裁切和定向铺设,辅以少量环氧树脂可热压成高性能CFRP板材。新制备板材的弯曲强度、拉伸强度和层间剪切强度为原始CFRP的68.59%~79.76%、83.53%~91.34%和85.48%~93.28%。溶胀机理分析表明,DMSO的S=O等极性基团通过与树脂网络中质子供体形成氢键渗透至树脂体系,引发树脂基体的快速物理膨胀。由此产生的内应力可有效破坏纤维/树脂界面,实现CFRP层压板中相邻CF层的自发分层。同时DMSO化学性质稳定,溶胀处理前后化学组分无明显变化,可通过减压蒸馏循环利用。本研究为废弃CFRP的绿色回收与高值利用提供了新的思路。

关键词:碳纤维增强聚合物;二甲基亚砜溶胀;分层;热压;溶解回收

中图分类号:X705 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)01-0081-11

Delamination recovery mechanism of dimethyl sulfoxide-induced swelling of carbon fiber laminated plates

ZHAO Yun¹, XING Mingfei¹, XU Wanting¹, ZHANG Donghui², XU Ping¹, ZHENG Ruiya¹

(1. Institution of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. Jiaozuo Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Due to the brittle and hard nature of the resin matrix and its strong interfacial bonding with the fibers, uncontrollable brittle fractures occur in the mechanical recycling of carbon fiber (CF)-reinforced resin matrix composites (CFRP), severely damaging the continuity and orientation arrangement of the recycled CF, and significantly reducing their reutilization value. To solve this problem, the green and low-toxicity polar solvent, dimethyl sulfoxide (DMSO), was used to dissociate CF/epoxy resin laminate into a single layer of CF fabric under mild atmospheric pressure conditions by using the principle of resin swelling. The experimental results indicate that at temperatures ranging from 120 °C to 180 °C, CFRP laminates can be automatically layered in DMSO, and the increase in temperature significantly shortens the layering time (4 hours at 120 °C, 2 hours at 140 °C, 1 hour at 160 °C, and 0.5 hours at 180 °C). The corresponding resin swelling rates range from 100.5% to 104.48%, the resin degradation rates range from 5.94% to 9.66%. This method realizes the complete retention of fiber length and fabric structure in CFRP, and the resulting soft layered products are easy to be mechanically cut and laid in directions and can be hot-pressed into high-performance CFRP plates supplemented with a small amount of epoxy resin. The flexural strength, tensile strength and interlayer shear strength of the newly prepared plates are 68.59%–79.76%, 83.53%–91.34% and 85.48%–93.28% of original CFRP, respectively. Swelling mechanism analysis indicates that polar S=O groups of DMSO penetrate the resin network by forming hydrogen bonds with proton donors, inducing rapid physical expansion of the resin matrix. The resulting internal stresses can effectively disrupt the interface bonding between fibers and

基金项目:国家自然科学基金项目(52370135),河南省科技攻关项目(242102320079)

通信作者:邢明飞,副教授,硕士生导师,研究方向为固体废弃物资源化利用

收稿日期:2025-10-31

引用格式:赵云,邢明飞,徐婉婷,等.二甲基亚砜溶胀诱导碳纤维层压板分层回收机理[J].工程塑料应用,2026,54(1):81–91.

ZHAO Yun, XING Mingfei, XU Wanting, et al. Delamination recovery mechanism of dimethyl sulfoxide-induced swelling of carbon fiber laminated plates[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 81–91.

resin, enabling spontaneous delamination of adjacent CF layers in CFRP laminates. At the same time, DMSO has stable chemical properties, no change in chemical structure before and after swelling treatment, and can be recycled by vacuum distillation. This study provides a new idea for green recycling and high-value utilization of waste CFRP.

Keywords: carbon fiber-reinforced polymer; dimethyl sulfoxide swelling; delamination; hot pressing; solvent recovery

碳纤维(CF)增强树脂基复合材料(CFRP)因其优异的力学性能、低密度、卓越的耐腐蚀性和热稳定性而备受青睐,已广泛应用于航空航天、交通运输等对轻量化和节能要求较高的领域^[1-2]。然而,在CFRP生产和使用过程中会产生大量废弃CFRP。由于废弃CFRP不可生物降解,若随意填埋或焚烧,将对生态环境带来严重影响^[3-4]。废弃CFRP中的CF保留着优异的力学性能,是一种宝贵的二次资源。对其回收利用,是应对原生CF高能耗、高成本的有效途径,也具有显著的经济和环境效益^[5]。

CFRP的主要回收策略包括机械法、热解法及化学法^[6-7]。其中,机械回收通过破碎、研磨等工艺将CFRP粉碎为短纤维或粉末^[8]。然而,树脂基体脆硬特性且与纤维界面结合紧密,机械外力易导致CF发生断裂。此过程不仅难以实现纤维与树脂的有效分离,还会破坏纤维的连续性与取向结构,致使回收纤维的增强性能与利用价值显著降低。相比之下,热回收通过热解去除CFRP中树脂基体得到连续的CF,热解温度范围为450~700 °C,加热时间为30~180 min^[9-11]。然而该方法能耗较高,且高温环境会导致CF表面氧化和刻蚀,造成其力学性能损失。化学回收法则主要利用水、有机溶剂、酸、碱或氧化剂等,在亚/超临界条件下降解树脂基体,从而实现纤维的分离与回收^[12]。该方法能较好地保持纤维长度与强度,但其实际应用常受限于试剂用量大、毒性高以及对反应设备要求严苛等因素^[13-14]。此外机械法会产生大量微小树脂粉末,容易引发微塑料污染,而在传统的热解或化学降解过程中,CFRP中的树脂组分无法得到有效回收,还会转化为含有毒性的酚类物质,需进行妥善处理^[15-16]。因此,实现低碳、环境友好与高附加值回收是CFRP回收技术不断发展的核心目标^[15,17]。

CFRP层压板的制备主要通过将多层CF预浸片按设计纤维方向叠层,并在加热加压条件下固化或热压成型,从而制备出力学性能优异的层压板。如果废弃层压板能够剥离成类似原始预浸带的连续薄片,并保持其中纤维长度和取向,其回收价值将显著提升。例如,具备一定弹性的木材可通过旋

切方式获得纤维完整的连续薄片,然后将其切割成规则形状的矩形薄片,之后通过机械振动或空气动力方法实现矩形薄片定向铺设、交叉层叠,并热压制成高性能定向刨花板^[18]。由于CF层压板中玻璃态树脂基体的脆硬特性及其与纤维的强界面结合,机械分层切割产生的外部应力极易引发树脂随机开裂与纤维横向断裂,而非理想的层间剥离致使获得厚度均匀的薄片在实际中几乎无法实现。然而,多层纤维增强树脂基复合材料可通过溶胀法实现有效分层,获得结构完整的类似预浸料形态的单层片材^[19-22]。溶胀过程中,树脂在溶剂作用下快速软化并体积膨胀^[23]。当树脂过度膨胀时,内部应力增大,导致基体局部碎裂,削弱CF与树脂的界面结合,从而实现层压板的逐层分离。获得的柔性单层片材可裁切为条状,并通过热压复合制备力学性能优异的新型板材,实现CF与树脂的协同回收和高值化利用。

溶胀分层方法最初用于从废弃印刷电路板(WPCB)中回收铜箔^[24-25]。将WPCB浸泡在135~200 °C二甲基乙酰胺(DMAC)、二甲基甲酰胺(DMF)或乙酸等溶剂中1~3 h,WPCB可以自动分层为柔软的单层玻璃纤维片和铜箔^[20-21,26-27]。有研究利用乙酸在160~220 °C条件下反应1 h,将CFRP溶胀分层为单层CF片;或者使用DMAC在120~160 °C常压条件下处理1 h,溶胀率为51.57%~59.71%^[18,28-29]。此外,乙酸反应活性较强,在溶胀过程中容易与树脂发生反应导致乙酸的大量消耗,同时还会引发树脂的部分降解;其降解产物与乙酸混合后会使溶剂体系复杂化,提高乙酸的分离与回收成本;而DMF、*N*-甲基吡咯烷酮(NMP)和DMAC等传统有机溶剂因其毒性还存在明显的环境和健康风险^[30]。DMF和DMAC被欧盟列为1B类生殖毒物,其中DMF还是疑似致癌物;DMAC被美国国家消防协会列为二级健康及火灾危险品,加热过程中易释放刺激性和有毒气体,严重限制了其工业大规模应用^[31-33]。因此,开发绿色低毒溶剂以替代这些有害化学品显得尤为重要。

二甲基亚砜(DMSO)回收法以“树脂溶胀解构”

为核心原理,与传统热解的“高温破坏”及化学法的“键断裂降解”截然不同,通过DMSO的温和渗透作用撑大树脂的交联网络,实现树脂的物理性软化与剥离。该工艺在常压、中低温等温和条件下即可进行,大幅降低了能耗、设备要求及安全风险。同时,与NMP、DMF、DMAC等常用极性溶剂相比,DMSO具有低毒性、低挥发性和高稳定性等优势,可显著减少综合能耗^[24]。DMSO的高沸点(189 °C)使其能够在较高温度下保持稳定,从而高效溶胀大多数树脂;相比之下,DMF和DMAC在相同温度下易发生显著蒸发,导致溶剂损耗增加。更为重要的是,DMSO的低毒性显著降低了废气治理、系统密闭及危险废物处理等环节的能源消耗与安全负担。DMSO的强极性及与树脂相匹配的溶解度参数,可在温和条件下实现环氧树脂的高效溶胀^[34]。同时DMSO具备良好的可循环利用性和生物降解性,赋予本工艺比传统回收方式更好的环保性^[35-36]。因此,本研究使用DMSO进行CFRP层压板的溶胀分层回收。相对于传统研究的创新点是:(1)更简便的工艺流程和更低的设备要求;(2)更加温和的反应条件,降低了安全风险;(3)溶剂可回收利用,具有经济环保优势。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CF增强环氧树脂预浸料:WP-3011,由0°/90°正交编织T300-3K CF(60%质量分数)和6508环氧树脂(40%质量分数)组成,山东威海光威碳纤维公司;

环氧树脂:6508(双酚A,固化剂为双氰胺),山东威海光威碳纤维公司;

DMSO:分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司;

KBr:光谱纯,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器及设备

油浴锅:ZDS1-YRE-5000B,北京海富达科技有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:IRAffinity-1S,日本岛津仪器有限公司;

定时制样机:XZ-50,鹤壁先锋仪表有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SUPRA40,德国卡尔蔡司股份公司;

高温烘箱:GW-150B,湖南力辰仪器科技有限

公司;

万能试验机:WDW-20,长春万能材料试验机厂;

电子天平:GL2004B,上海佑科仪器仪表有限公司;

旋转蒸发仪:ZDS1-YRE-5000B,北京海富达科技有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 CFRP层压板热压成型方法

将CF增强环氧树脂预浸料裁切为80 mm×10 mm×0.18 mm的矩形试样。将八层预浸料裁切片以平行铺层方式堆叠,经热压固化制备CF增强树脂基复合材料层压板,所得试样尺寸为80 mm×10 mm×2 mm,每块CFRP层压板约为2 g。热压固化工艺参数为:温度120 °C、压力0.10 MPa,热压时间180 min。

1.3.2 固化环氧树脂(CEP)的制备

为研究环氧树脂在DMSO中的溶胀过程与特性,以热固性环氧树脂6508为研究对象,制备标准树脂块样品。首先,将未固化的环氧树脂加热至80 °C,以提高其流动性并确保浇注均匀。随后,将流动状态的树脂注入规格为10 mm×10 mm×10 mm的硅胶模具中,在120 °C条件下固化3 h,得到固化环氧树脂块(CEP)。所得样品经脱模后用于后续DMSO溶胀实验。

1.3.3 DMSO溶胀分层回收CFRP层压板过程

DMSO溶胀分层回收CFRP层压板过程如图1所示。首先将CFRP与30 mL DMSO置于250 mL锥形瓶中,为确保溶胀过程均匀且充分,需使CFRP完全浸没于DMSO溶剂中。然后将锥形瓶置入预热好的油浴锅内。DMSO的常压沸点为189 °C,为避免溶胀剂大量挥发,本实验溶胀处理最高温度限定为180 °C。溶胀反应温度分别为100、120、140、160、180 °C,在各温度下保持反应时间30、60、120、240 min。溶胀处理后从锥形瓶取出CFRP溶胀分层产物,并在200 °C的恒温烘箱中烘干120 min,去除CFRP溶胀产物中残留的溶剂。之后在溶胀分层CF薄片表面均匀涂覆适量未固化的环氧树脂基体(约1 g),随后利用相同热压工艺(120 °C,0.10 MPa,180 min,)将八层分层产物重新压制成80 mm×10 mm×2 mm的CFRP层压板。层间剪切力测试使用CF薄片剪成15 mm×5 mm,热压成15 mm×5 mm×

2.5 mm的测试样品。在热压过程中多余树脂会从分层产物中挤出。使用减压蒸馏方法(175 °C、0.09 MPa、持续 20 min)对使用过的 DMSO 溶液进行再生回收。

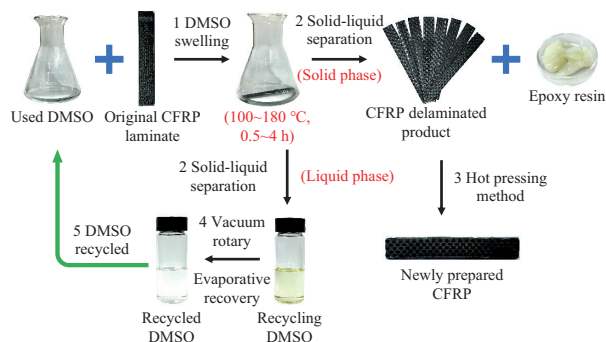


图1 DMSO溶胀回收CFRP工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of DMSO swelling recover CFRP

1.4 测试与表征

(1) CFRP层压板中树脂溶胀率和降解率的计算。

CFRP中树脂的溶胀率(S)和降解率(D)分别按式(1)和式(2)计算。

$$S = \frac{M_1 - M_2}{M_0 \times M_r - M_3} \times 100\% \quad (1)$$

$$D = \frac{M_3}{M_0 \times M_r} \times 100\% \quad (2)$$

$$M_3 = M_0 - M_2 \quad (3)$$

式中: M_0 为原始CFRP层压板质量,单位g; M_1 为CFRP层压板溶胀后含吸附溶胀介质的质量,单位g; M_2 为烘干去除溶胀介质后的溶胀产物质量,单位g; M_r 为复合材料中树脂组分的质量分数,该值为40%。

(2) FTIR分析。CEP样品经不同温度的DMSO处理后,使用制样机研磨成粉末,并经烘箱干燥。干燥后的样品与KBr粉末按质量比1:50混合研磨,随后使用压片机在90 kN压力下压制1 min,制备成可直接进行红外测试的样品。对于DMSO液体样品,可将其滴加在压制好的KBr膜片上测试。红外光谱分析仪的分辨率设为 4 cm^{-1} ,扫描次数为64次,波数测量范围为 $405 \sim 4350 \text{ cm}^{-1}$ 。

(3) SEM表征。原始CFRP及不同实验条件处理后的样品经烘干并进行表面喷金处理,之后利用SEM观察不同试样表面微观形貌。

(4)原始CFRP层压板及由溶胀产物热压制备的CFRP层压板的弯曲强度、拉伸强度和层间剪切强度均采用万能试验机进行测试。根据GB/T 9341—

2008、GB/T1040.1—2018和ASTM AD2344—2000标准进行弯曲强度、拉伸强度和层间剪切强度测试^[37],每项测试均采用八个平行样品,结果取其平均值,计算公式见式(4)~(6)。

$$\sigma_m = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (4)$$

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (5)$$

$$F_{sbs} = 0.75 \times \frac{P_m}{b \times h} \quad (6)$$

式中: σ_m 为弯曲强度,单位MPa; σ_n 为拉伸强度,单位MPa; F_{sbs} 为层间剪切强度,单位MPa; P 为测定的最大载荷,单位N; L 为跨距,单位mm; b 和 h 为样品的宽度与厚度,单位mm; F 为拉伸测试中对应的负荷,单位N; A 为试样原始横截面积,单位 mm^2 ; P_m 为最大载荷,单位N。弯曲和拉伸测试加载速度为 2 mm/min ,层间剪切强度测试加载速度为 1 mm/min 。

2 结果与讨论

2.1 CFRP在DMSO中的溶胀降解特性

CFRP层压板中环氧树脂在DMSO中不同温度和时间条件下的溶胀率和降解率如图2所示。实验结果显示CFRP中树脂溶胀率和降解率均随温度升高和时间延长而不断增大。在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下,延长溶胀时间(0.5~4 h)可使溶胀率从24.12%提升至61.74%;而当温度升至 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,同等时间间隔内的溶胀率则由32.91%显著增至103.11%。尤其在 $180 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下,溶胀过程极为迅速,仅0.5 h内溶胀率即达103.11%,并于4 h后急剧提升至147.69%,展现出显著的温度强化效应。因为在低温阶段,树脂交联网络中的分子链段运动能力有限,致密的网络结构阻碍了DMSO分子的大规模渗透,导致溶胀率较低^[38]。随着温度升高,体系热能被充分激活,一方面显著增强了树脂分子链的运动能力,使网络结构更为松弛,扩大了自由体积;另一方面也极大地加快了DMSO分子的扩散速率。二者协同作用,使DMSO得以快速渗透并通过强极性官能团(如 $\text{S}=\text{O}$)与树脂分子链发生广泛的溶剂化作用,最终引发树脂网络的宏观膨胀和软化。

图2同时展示了树脂降解率随温度与时间的演变规律。当温度低于 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,树脂降解程度较低,树脂质量损失率始终维持在2%以下。然而,当温度升至 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 及以上时,降解率开始显著上升。例如,在 $140 \text{ }^\circ\text{C}$ 处理4 h后,质量损失率达14.35%;而

在 160~180 °C 的高温下,仅需 0.5 h 降解率便达到 4.92%~9.66%,4 h 后则增至 14.35%~14.53%。树脂质量损失现象主要归因于 DMSO 剧烈的物理溶胀作用:溶剂分子渗入树脂网络产生巨大的内应力,当此应力超过树脂的本体强度时,即导致树脂发生物理性的碎裂与剥离。同时,在高温条件下,DMSO 也会与树脂之间发生一定化学降解反应(如水解、氧化),共同导致树脂质量损失。

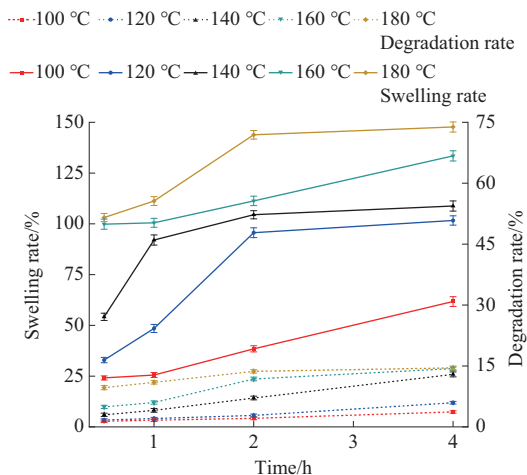


图2 不同温度、时间条件下CFRP的溶胀率和降解率

Fig. 2 Swelling rate and degradation rate of CFRP under different temperature and time conditions

2.2 CEP在DMSO中的溶胀过程及溶胀机制

图3显示出了当溶胀时间固定为1 h时,不同溶胀温度对CEP形貌的影响。原始树脂块为淡黄色规则立方体,初始边长为10 mm。在100 °C条件下,树脂的溶胀过程由表及里逐步推进,导致内外层膨胀程度不均,从而形成明显的梯度应力。该应力最终引发树脂表面开裂,并伴有薄片状碎片脱落。当

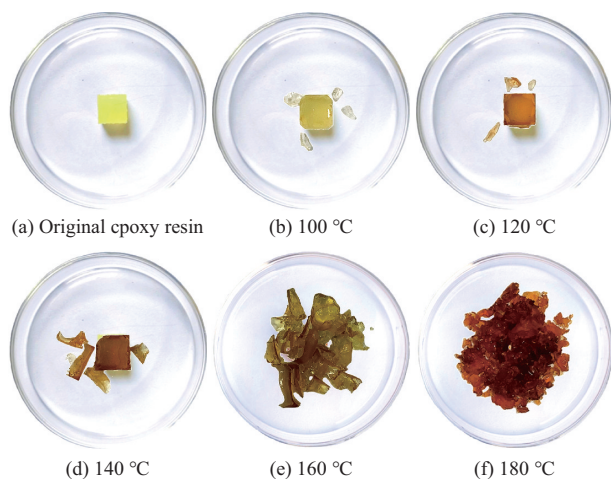


图3 不同温度处理条件下CEP溶胀产物照片

Fig. 3 Photographs of CEP swelling products at different temperatures

温度升至140 °C时,树脂在DMSO中充分吸收溶剂,发生明显体积膨胀,边长增至12 mm。尽管脱落碎片尺寸有所增大,树脂整体结构仍基本保持完整。但在160 °C及以上温度条件下,剧烈的体积膨胀与内应力协同作用,导致块状树脂完全破裂为大量不规则碎块,进一步证明DMSO在高温条件下具有优异的溶胀能力。此外,随着温度的升高,树脂颜色变深,可能是由于树脂氧化造成的。

DMSO与环氧树脂间的氢键作用是诱发树脂溶胀的核心初始机制。作为强极性非质子溶剂,DMSO分子可通过其硫氧基(S=O)上的氧原子作为氢键受体,与环氧树脂分子链上的极性基团(特别是一OH)发生强烈的氢键相互作用。CEP和DMSO之间可能存在的氢键作用如图4所示。这一过程有效削弱了树脂内部的分子间相互作用,导致原本紧密的分子链被DMSO分子插入而间距增大,引发树脂体积膨胀。同时,氢键的形成增强了分子链的柔性,使其更易发生构象调整与链段运动。对于交联型环氧树脂,尽管三维网络限制了分子的宏观流动,但DMSO在交联点附近形成的氢键能局部减弱链间的束缚,促进更多溶剂分子渗入网络内部,从而持续推动溶胀进程^[39]。

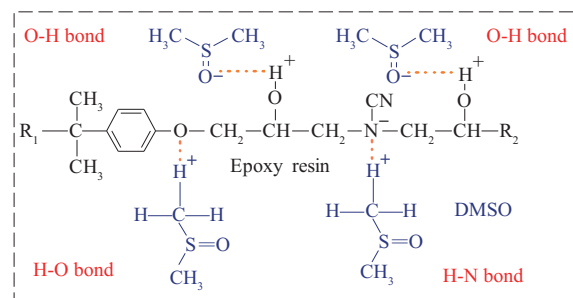


图4 DMSO诱导环氧树脂溶胀的氢键作用机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of hydrogen bonding mechanism for DMSO-induced swelling of epoxy resin

图5为不同温度下CEP溶胀产物的FTIR谱图。在100~180 °C内,溶胀处理后的环氧树脂的FTIR谱图与原始树脂相比未出现显著差异。环氧树脂的主要特征吸收峰,包括C=C键(1 608 cm⁻¹)、C—H键(830 cm⁻¹)、C—C键(1 508 cm⁻¹)、C—O—C键(1 240 cm⁻¹)和C—N键(1 298 cm⁻¹),在相应波数的峰形与强度均保持相对稳定^[40]。尽管树脂在此温度区间可能发生轻微降解,但FTIR结果说明其主体化学结构未发生明显改变。因此,树脂在该溶胀温度范围内的破碎行为,应主要归因于DMSO渗透引起的物理溶胀与体积膨胀效应,而非化学结构的显著破坏。

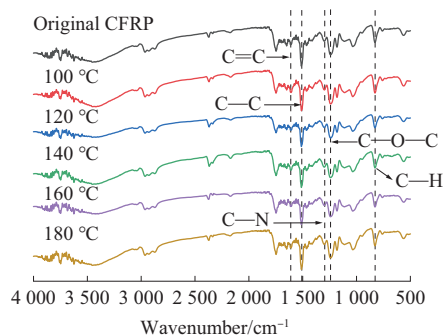


图5 不同温度下 CEP 溶胀产物的 FTIR 谱图

Fig. 5 FTIR spectra of CEP swelling products at different temperatures

2.3 CFRP 在 DMSO 中分层解离特性

图6为不同溶胀温度(溶胀时间为1 h)下溶胀产物的厚度对比图。该图直观对比了原始 CFRP 与不同温度下溶胀产物的宏观形貌与厚度演变。原始 CFRP 表面致密光滑,CF 被树脂完全包覆,其初始厚度为 1.50 mm。随着溶胀温度升高,树脂基体吸收 DMSO 后发生体积膨胀,引起层压板整体增厚;在 120 °C 和 140 °C 条件下,厚度分别增至 1.61 mm 与 2.09 mm。当温度达到 160 °C 及以上时,强烈的溶胀作用导致层间界面失效,CFRP 发生彻底分层,转变为柔软的单层 CF 织物,厚度进一步增加至 2.87 mm。

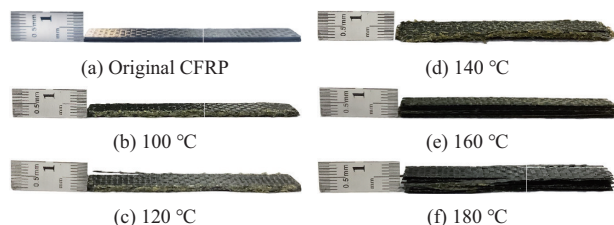


图6 不同溶胀温度下 CFRP 的厚度对比

Fig. 6 Comparison of thickness of CFRP at different swelling temperatures

本研究系统分析了 1.5 mm 厚 CFRP 层压板在不同温度下的最短完全分层时间。结果表明,树脂溶胀速率随温度升高而显著加快,分层时间相应缩短。在 120 °C 下处理 4 h 后,层压板实现完全分层,此时树脂溶胀率为 101.66%,降解率为 5.94%(图2);温度升至 140 °C 并处理 2 h 后,溶胀率增至 104.48%,降解率为 7.11%;在 160 °C 下仅需 1 h 即可完成分层,溶胀率为 100.50%,降解率为 6.00%;而当温度进一步提高至 180 °C 时,分层时间缩短至 0.5 h,溶胀率达到 103.11%,降解率为 9.66%。由于各温度条件下所得分层产物在宏观形貌上高度一致,图7以 160 °C 处理 1 h 的样品作为代表,展示了溶胀法在完整保留 CF 织物结构方面的有效性。

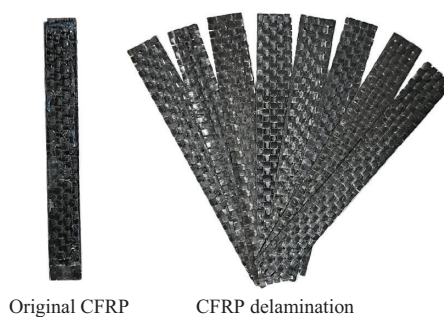


图7 原始 CFRP 及其分层产物

Fig. 7 Origin CFRP and its delamination products

DMSO 是一种强极性溶剂,能够渗透到环氧树脂基体中。溶剂分子的进入使环氧树脂分子链段间的距离增大,分子链的活动能力增强,原本相对规整、紧密的分子结构变得较为疏松,从而导致基体的刚性下降,硬度降低。图8展示了不同溶胀温度条件下处理 1 h 溶胀产物的载荷-变形对比。将 CFRP 一端固定,另一端悬挂一个 200 g 砝码。原始 CFRP 具有较高的刚度和抵抗变形的能力,几乎不发生弯曲。随着温度升高到 120 °C,CFRP 的弯曲角度略有增加,此时弯曲角度为 5°。当温度升高至 140~160 °C 时,CFRP 中的树脂迅速溶胀,环氧树脂分子链的活动能力增强,分子间的作用力减弱,使得基体的刚性下降,弯曲度增加到 30°~35°。当处理温度提升至 180 °C 时,CFRP 材料发生完全分层现象,同时试样弯曲角度达到实验过程中的最大形变值(60°)。这说明,溶胀过程不仅可以使层压板分层,也能够显著改善 CFRP 的机械加工性能。这些软化的溶胀产物也可以直接利用机械裁切成形状规则的薄片或长条。

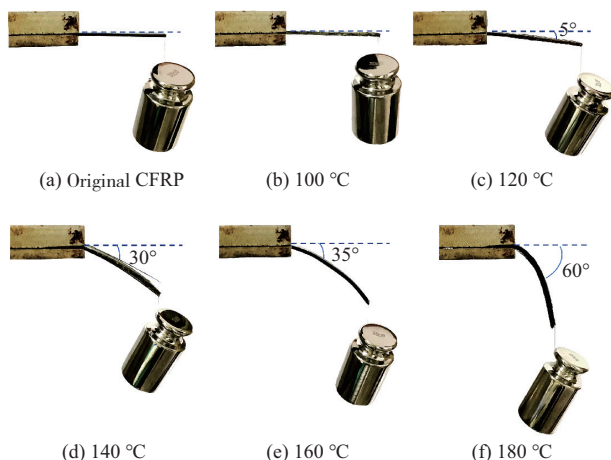


图8 不同温度下 CFRP 溶胀产物的载荷-变形对比图

Fig. 8 Comparison diagram of load-deformation of CFRP swelling products at different temperatures

图9为CFRP在不同温度下于DMSO中溶胀处理1 h后的SEM照片。原始CFRP的表面平整,CF丝紧紧地结合在树脂内。在100 °C的DMSO中浸泡处理1 h,CFRP表面形貌变化不明显。在120 °C至140 °C的温度下,CF片材表面的大量树脂开裂并剥落,在CF丝束编织交叉区域出现明显裂纹。但此时的树脂溶胀效果还不足以使各层CF自动分离,这可能归因于CF的强度较高,限制了树脂的体积膨胀。在温度超过160 °C时,相邻的CF丝束之间的交叉编织位置的分离更加明显。这是因为随着DMSO渗入树脂并引发其软化与溶胀,纤维-树脂界面逐渐弱化,促使裂纹沿纤维编织路径扩展,最终导致材料在宏观尺度发生分层。

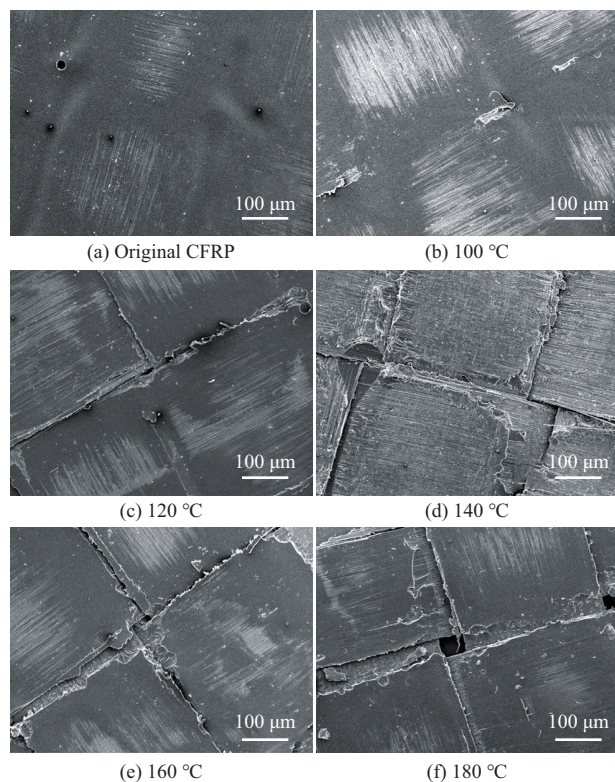


图9 不同温度下溶胀产物的SEM照片

Fig. 9 SEM photos of swelling products at different temperatures

2.4 CFRP在DMSO中溶胀分层过程和机制

DMSO溶胀法回收CFRP是一个基于溶剂渗透和树脂膨胀导致界面分离的过程。在加热条件下,(100~180 °C),强极性的DMSO分子凭借其小分子尺寸和与环氧树脂的亲水性,从层压板边缘、裂纹等缺陷处渗透,逐渐扩散至层与层之间的富树脂区及CF/树脂界面。DMSO分子中的S=O官能团作为强氢键受体,与环氧树脂分子链上的羟基(—OH)、醚键(C—O—C)等极性基团形成氢键。这一

相互作用撑大了环氧树脂的交联网络,导致树脂基体发生宏观上的体积膨胀和微观上的链段运动能力增强,从而使坚硬的树脂转变为软化状态。树脂的溶胀、膨胀在受限的层间界面区域受到周围材料的约束,从而产生巨大的拉应力和剪切应力。当此内应力超过纤维与树脂之间的界面结合力时,界面便发生脱黏。如图10所示,界面脱黏从层压板边缘开始,随着更多DMSO分子的持续渗入,裂纹不断扩展、贯通,最终驱动整个层压板逐层解离,得到结构完整、质地柔软的单层CF织物。与热解法的化学降解和机械法的物理破碎不同,溶胀法是通过溶剂分子“撑开”树脂交联网络,利用由此产生的内应力来实现界面分离。这是一种通过树脂膨胀导致的CF解离过程,因此能最大程度地避免对CF本身的结构性损伤。

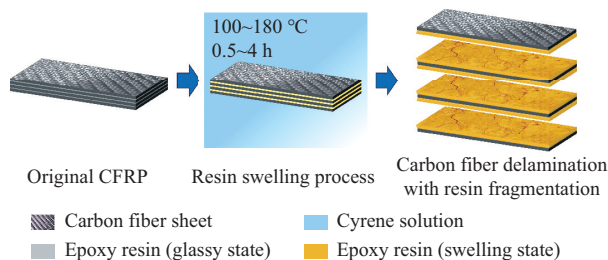


图10 CFRP在DMSO中的溶胀分层过程

Fig. 10 Swelling stratification process of CFRP in DMSO

2.5 溶胀产物重新制备CFRP力学性能分析

将溶胀分层CFRP样品干燥处理后,表面均匀涂覆适量未固化环氧树脂,采用热压工艺实现CFRP溶胀分层产物的再生制备。表1展示了不同溶胀分层条件下再生CFRP的力学性能。本研究选取120~180 °C作为代表性温度区间,其优化后的分层参数分别为:120 °C/4 h、140 °C/2 h、160 °C/1 h及180 °C/0.5 h。选择该温度区间的主要原因是,在100 °C的低温条件下,实现完全分层所需时间过长(>4 h),导致过程能效与效率过低,难以满足实际回收应用的需求。实验结果表明,原始CFRP的弯曲强度、拉伸强度和层间剪切强度分别为752.30、339.27、47.46 MPa。利用120 °C溶胀产物重构的CFRP层压板,其弯曲强度、拉伸强度和层间剪切强度分别为515.97、309.89、44.27 MPa,相当于原始性能的68.59%、91.34%和93.28%。随着溶胀温度升高,弯曲强度逐步提高,而拉伸强度和层间剪切强度略有下降:140 °C时,弯曲强度升至587.89 MPa,拉伸强度和层间剪切强度轻微下降至294.28 MPa和43.75

表1 重新制备CFRP的拉伸、弯曲和层间剪切强度
Tab. 1 Tensile, flexural and interlaminar shear strength of
reprepared CFRP

Material	Flexural strength/MPa	Tensile strength/MPa	Interlaminar shear strength/MPa
Original CFRP	752.30±12.00	339.27±13.32	47.46±1.14
120 °C swelling CFRP	515.97±8.52	309.89±12.55	44.27±0.98
140 °C swelling CFRP	587.89±16.39	294.28±11.42	43.75±1.02
160 °C swelling CFRP	593.43±10.13	290.31±10.36	41.96±1.26
180 °C swelling CFRP	600.01±14.16	283.44±11.28	40.57±0.94

MPa; 180 °C时,回收材料的弯曲、拉伸强度和层间剪切强度分别为600.01 MPa (原始值的79.76%)、283.44 MPa (原始值的83.54%)和40.57 MPa (原始值的85.48%)。

CFRP在DMSO介质中的溶胀过程会对基体树脂产生一定影响,尤其在高温条件下,树脂发生明显碎裂和轻微降解,削弱其与CF之间的界面结合强度,导致材料整体弯曲性能和层间剪切强度下降。随着处理温度的升高,树脂的膨胀体积逐渐增大,这不仅加剧了CFRP内部裂纹的扩展,还进一步降低了树脂与纤维界面的结合质量,表现为材料表面树脂覆盖层脱落增加。在随后的热压再生过程中,液态环氧树脂可以填充树脂中部分裂纹区域,从而实现断裂界面的重构。新树脂基体与CF表面重新形成稳定的界面结合层,显著改善了复合材料的整体结构完整性与载荷传递能力。这种界面重构效应,使得再生CFRP的弯曲性能和层间剪切强度明显恢复^[28]。

相比弯曲强度,拉伸强度随处理温度升高仅出现轻微下降。拉伸强度评估材料在轴向载荷下抵抗断裂的能力,对于CFRP来说,主要取决于CF自身的强度以及纤维方向上的载荷传递效率。相比之下,弯曲强度测试更为复杂,材料在测试过程中同时承受拉伸、压缩和剪切应力,CFRP的弯曲性能主要依赖于环氧树脂与CF之间界面的结合强度。溶胀回收的原理是通过溶剂渗透交联的环氧树脂网络,使树脂膨胀、软化,从而破坏纤维-树脂界面的结合,实现CF的分离和回收。从图9中溶胀产物的SEM图可见,溶胀处理对CF丝束形貌影响较小,CF丝束的编织结构基本得到保留。然而,树脂的溶胀作用不可避免地在CFRP分层产物中产生大量裂隙,尤其在CF丝束纵横交错区域,丝束会发生明显

位移和分层(见图9e、图9f),破坏了原有经过优化的纤维-树脂界面化学键合。在利用溶胀分层产物重新热压制备CFRP复合材料时,新添加的树脂难以完全填充原有裂隙,也难以与原固化树脂充分结合,导致新制备的CFRP中常出现微小缺陷、空隙及局部结合力不足的区域。因此,再生CFRP的弯曲强度恢复率通常低于拉伸强度^[41]。

提升溶剂溶胀回收CFRP低温分层材料的性能的核心在于解决界面结合弱和树脂损伤的短板问题。关键措施是对回收纤维进行表面处理与功能化,例如通过等离子体活化或施加新型上浆剂,以增强其与树脂的化学黏结和物理浸润性^[42]。同时,可通过优化热压罐或真空成型工艺,提升新添加液态树脂在CFRP分层材料中的扩散填充能力,使树脂充分弥补溶胀过程中产生的裂隙。此外,在树脂基体中添加纳米填料或选用韧性更好的树脂体系,可有效补偿基体性能损失并提高整体强度。复合体系与工艺的优化同样关键,例如将回收纤维与少量原生纤维混杂作为承力骨架,或通过优化模压工艺参数确保树脂充分浸润并减少孔隙。最终,通过界面、基体与工艺的全链条协同优化,可最大化回收材料的性能,接近或满足新制CFRP的使用要求。

2.6 DMSO的回收利用

在CFRP溶胀实验过程中,可明显观察到DMSO溶剂颜色的变化。起始阶段,DMSO呈无色透明,随着溶胀的进行,溶剂颜色逐渐转为浅黄色。溶剂颜色的变化可被归因于以下两方面因素:(1)DMSO溶解了树脂基体中的低分子量组分;(2)环氧树脂在热-溶剂协同作用下发生了部分链段断裂,产生了可溶性的降解副产物。这些物质的存在改变了溶剂的折光指数和光吸收特性。为验证溶剂的循环利用可行性,使用过的DMSO过滤回收后再使用旋转蒸发的方式纯化。图11为原始DMSO与回收DMSO的FTIR谱图。如图11所示,原始和回收的DMSO在特征官能团区域(C—H伸缩振动~3000 cm⁻¹, S=O伸缩振动~1025 cm⁻¹)的吸收峰强度和峰形高度一致。原始和回收的DMSO光谱说明DMSO分子在溶胀-回收过程中结构保持完整,并且特征官能团未发生明显的化学转化,溶剂具备优异的热稳定性和化学惰性。该结果表明DMSO在循环过程中性能稳定,可被多次循环使用,这极大地提升了工艺的环境友好性与经济性。

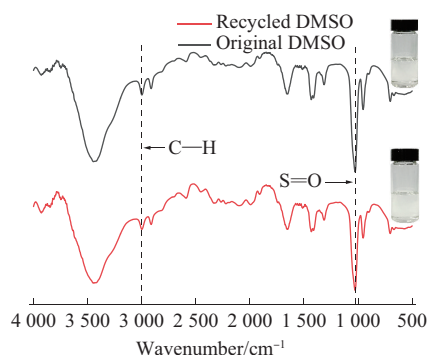


图11 原始DMSO与回收DMSO的FTIR谱图

Fig. 11 FTIR spectra of original DMSO and recycled DMSO

2.7 回收CF薄片的重利用方式

通过DMSO回收得到的CF分层薄片可被机械裁切为形状规则、厚度均匀的薄片。这种规整的形态便于对其进行机械化的定向逐层铺设,并在层间施加黏接剂,最终通过热压工艺成型为所需尺寸和形状的复合材料。本研究借鉴了“定向结构刨花板”的制备思路,采用多层交叉铺设的方式(图12)来制造新型CFRP材料。“定向”是指回收薄片在每层内均按同一方向排列,且相邻层的排列方向相互垂直。与随机排列相比,这种有序结构能够更有效地传递载荷,并提高材料力学性能的一致性。

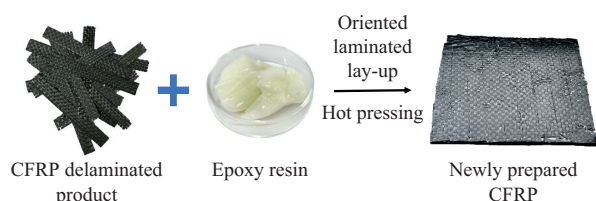


图12 定向排列CF薄片制备新CFRP

Fig. 12 Preparation of new CFRP by CF sheets arranged in a directional manner

在大尺寸定向板材制造过程中可能存在树脂富集/贫乏区、空气间隙与界面未完全黏接等缺陷;这些缺陷在使用过程中可能出现层间剥离、界面滑移、层裂、疲劳裂纹扩展与冲击/穿透失效等问题。针对上述可能存在的缺陷可以采用界面改性(偶联剂、界面涂层)、局部热修复、化学修复以恢复界面,在热压制备中优化树脂量与渗透工艺以及采用辅助加固(薄膜层/层间黏结剂)来改善层间剪切传递^[43]。鉴于复合材料的性能受到纤维取向、界面结合、内部应力及工艺参数等多种因素的复杂影响,本研究尚未对大尺寸板材进行全面的力学性能测试。因此,后续研究工作将聚焦于利用溶胀回收的CFRP产物制备大尺寸板材,深入探究影响其力学

性能的关键因素,并进一步优化成型工艺。

3 结论

本研究提出了一种基于DMSO溶胀原理的废弃CFRP低温分层回收方法。结果表明,CFRP层压板在120~180℃的区间内仅需0.5~4h即可完成自动分层,对应树脂溶胀率为100.5%~104.48%,降解率为5.94%~9.66%。溶胀过程中CF长度与织物结构得以完整保留,所得单层CF织物可通过少量环氧树脂复合热压制备再生CFRP,其弯曲强度、拉伸强度和层间剪切强度为原始CFRP的68.59%~79.76%、83.54%~91.34%和85.48%~93.28%。DMSO分子中的S=O基团通过与环氧树脂分子链上的羟基、醚键等极性基团形成氢键,引起树脂网络膨胀并破坏纤维-树脂界面结合,实现物理“撑开”式分层。工艺条件温和、溶剂可循环利用,兼具环保性与高效性,为废弃CFRP的绿色回收和高值再利用提供了新的技术路径。

参考文献

- [1] HOWARTH J, MAREDDY S S R, MATIVENGA P T. Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 81: 46-50.
- [2] CHEN P Y, FENG R, XU Y, et al. Recycling and reutilization of waste carbon fiber reinforced plastics: Current status and prospects [J]. *Polymers*, 2023, 15(17). DOI:10.3390/polym15173508.
- [3] AKBAR A, LIEW K M. Assessing recycling potential of carbon fiber reinforced plastic waste in production of eco-efficient cement-based materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123001.
- [4] GENNA S, PAPA I, LOPRESTO V, et al. Mechanical characterisation of CFRP laminates with recycled carbon fiber obtained by resin infusion under flexible tooling (RIFT) technology[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 199. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108328.
- [5] WANG Y, LI A Y, ZHANG S H, et al. A review on new methods of recycling waste carbon fiber and its application in construction and industry[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 367. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130301.
- [6] MENG F R, OLIVETTI E A, ZHAO Y Y, et al. Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management options[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(8):9 854-9 865.
- [7] ZHAO Q, JIANG J J, LI C B, et al. Efficient recycling of carbon fibers from amine-cured CFRP composites under facile condition [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 179. DOI:10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2020.109268.
- [8] 张灵静,陈桦,蒋建军,等.碳纤维增强热固性复合材料回收再利用

- 用技术研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7):134–140, 150.
- ZHANG Lingjing, CHEN Hua, JIANG Jianjun, et al. Research progress on recycling and reuse technology of carbon fiber reinforced thermosetting composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7):134–140, 150.
- [9] OLIVEUX G, DANDY L O, LEEKE G A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties[J]. Progress in Materials Science, 2015, 72: 61–99.
- [10] ABDOU T R, BOTELHO A B Jr, ESPINOSA D C R, et al. Recycling of polymeric composites from industrial waste by pyrolysis: Deep evaluation for carbon fibers reuse[J]. Waste Management, 2021, 120:1–9.
- [11] REN Y Y, XU L, SUN Y F, et al. Study on oxidation behavior during process of recycling carbon fibers from CFRP by pyrolysis [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 347. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119103.
- [12] ZHANG J, CHEVALI V S, WANG H, et al. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 193. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108053.
- [13] KIM K W, LEE H M, AN J H, et al. Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 203:872–879.
- [14] LIU T, ZHANG M, GUO X L, et al. Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin[J]. Polymer Degradation and Stability, 2017, 139:20–27.
- [15] GASTELU N, LOPEZ-URIONABARRENECHEA A, SOLAR J, et al. Thermo-catalytic treatment of vapors in the recycling process of carbon fiber-poly (benzoxazine) composite waste by pyrolysis[J]. Catalysts, 2018, 8(11). DOI: 2018: 8.10.3390/catal.8110523.
- [16] SUKANTO H, RAHARJO W W, ARIAWAN D, et al. Carbon fibers recovery from CFRP recycling process and their usage: A review[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1034(1). DOI:10.1088/1757-899X/1034/1/012087.
- [17] HANAOKA T, ARAO Y, KAYAKI Y, et al. New approach to recycling of epoxy resins using nitric acid:Regeneration of decomposed products through hydrogenation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(37):12 520–12 529.
- [18] LI Z X, XING M F, ZHAO L, et al. Recovery of carbon fiber-reinforced polymer waste using dimethylacetamide base on the resin swelling principle[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10. DOI: 10.3389/fchem.2022.1050827.
- [19] LI J, XU P L, ZHU Y K, et al. A promising strategy for chemical recycling of carbon fiber/thermoset composites: Self-accelerating decomposition in a mild oxidative system[J]. Green Chemistry, 2012, 14(12):3 260–3 263.
- [20] VERMA H R, SINGH K K, MANKHAND T R. Comparative study of printed circuit board recycling by cracking of internal layers using organic solvents-dimethylformamide and dimethylacetamide[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 1 721 – 1 727.
- [21] VERMA H R, SINGH K K, MANKHAND T R. Liberation of metal clads of waste printed circuit boards by removal of halogenated epoxy resin substrate using dimethylacetamide[J]. Waste Management, 2017, 60:652–659.
- [22] XU P L, LI J, DING J P. Chemical recycling of carbon fibre/epoxy composites in a mixed solution of peroxide hydrogen and *N, N*-dimethylformamide[J]. Composites Science and Technology, 2013, 82:54–59.
- [23] PEI C, CHEN P Y, KONG S C, et al. Recyclable separation and recovery of carbon fibers from CFRP composites: Optimization and mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 278. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119591.
- [24] WATH S B, KATARIYA M N, SINGH S K, et al. Separation of WPCBs by dissolution of brominated epoxy resins using DMSO and NMP:A comparative study[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 280:391–398.
- [25] YOUSEF S, TATARANTS M, TICHONOVAS M, et al. Recycling of bare waste printed circuit boards as received using an organic solvent technique at a low temperature[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187:780–788.
- [26] XING M F, LI Y, ZHAO L, et al. Swelling-enhanced catalytic degradation of brominated epoxy resin in waste printed circuit boards by subcritical acetic acid under mild conditions[J]. Waste Management, 2020, 102:464–473.
- [27] ZHU P, CHEN Y, WANG L Y, et al. The separation of waste printed circuit board by dissolving bromine epoxy resin using organic solvent[J]. Waste Management, 2013, 33(2):484–488.
- [28] XING M F, LI Z X, ZHENG G H, et al. Recycling of carbon fiber-reinforced epoxy resin composite via a novel acetic acid swelling technology[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109230.
- [29] 李展, 邢明飞, 李紫鑫, 等. *N, N*-二甲基乙酰胺溶胀解离回收碳纤维增强环氧树脂复合材料[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 7–12.
- LI Zhan, XING Mingfei, LI Zixin, et al. Swelling and dissociation process of recycled carbon fiber epoxy resin composites by *N, N*-dimethylacetamide[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51 (4):7–12.
- [30] RAMOS-VILLASEÑOR J M, SOTELO-GIL J, RODIL S E, et al. Dihydrolevoglucosenone (Cyrene™), a new possibility of an environmentally compatible solvent in synthetic organic electrochemistry[J]. Faraday Discussions, 2023, 247:182–194.
- [31] STINI N A, GKIZIS P L, KOKOTOS C G. Cyrene: A bio-based novel and sustainable solvent for organic synthesis[J]. Green Chemistry, 2022, 24(17):6 435–6 449.
- [32] VIDAL R, ALBEROLA-BORRÀS J A, HABISREUTINGER S

- N, et al. Assessing health and environmental impacts of solvents for producing perovskite solar cells[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(3):277–285.
- [33] YAMAMOTO Y K, MIYAKE A. Influence of a mixed solvent containing ionic liquids on the thermal hazard of the cellulose dissolution process[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 127(1):743–748.
- [34] MARINO T, GALIANO F, SIMONE S, et al. DMSO EVOL™ as novel non-toxic solvent for polyethersulfone membrane preparation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(15):14 774–14 785.
- [35] HESSEL V, TRAN N N, ASRAMI M R, et al. Sustainability of green solvents-review and perspective[J]. *Green Chemistry*, 2022, 24(2):410–437.
- [36] PONOMAREV I I, BLAGODATSKIKH I V, MURANOV A V, et al. Dimethyl sulfoxide as a green solvent for successful precipitative polyheterocyclization based on nucleophilic aromatic substitution, resulting in high molecular weight PIM-1[J]. *Mendeleev Communications*, 2016, 26(4):362–364.
- [37] 段裕熙, 张凯, 徐伟芳, 等. 碳纤维复合材料力学性能研究进展[J]. *包装工程*, 2023, 44(21):36–45.
- DUAN Yuxi, ZHANG Kai, XU Weifang, et al. Mechanical property of carbon fiber composites[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(21):36–45.
- [38] MIJOVIĆ J, ZHANG H. Molecular dynamics simulation study of motions and interactions of water in a polymer network[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(8):2 557–2 563.
- [39] MARBLE C B, XU X Q, PETROV G I, et al. Hyper-Raman spectroscopy of the methyl group contributions to hydrogen bonding in DMSO-methanol mixtures[C]//Advanced Chemical Microscopy for Life Science and Translational Medicine 2021. March 6–12, 2021. Online Only, USA. SPIE, 2021:34.
- [40] WANG Y Q, CUI X J, GE H, et al. Chemical recycling of carbon fiber reinforced epoxy resin composites via selective cleavage of the carbon-nitrogen bond[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3(12):3 332–3 337.
- [41] 王在跃, 姜宁, 王明道. 碳纤维表面改性对其增强热塑性复合材料性能影响的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(1):147–161.
- WANG Zaiyue, JIANG Ning, WANG Mingdao. Research progress on surface modification of carbon fiber and its effect on the properties of thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(1):147–161.
- [42] 李振磊, 吴新锋, 李小慧, 等. 碳纤维增强热塑性树脂基复合材料表面改性研究进展[J/OL]. *化工新型材料*, 2025:1–7[2025–11–17]. <https://link.cnki.net/doi/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.06.029>.
- LI Zhenlei, WU Xinfeng, LI Xiaohui, et al. Surface modification research advances in carbon fiber-reinforced thermoplastic composites[J/OL]. *New Chemical Materials*, 2025:1–7[2025–11–17]. <https://link.cnki.net/doi/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.06.029>.
- [43] 范金鹏, 贺辛亥, 赵阳, 等. 硝酸/偶联剂协同改性对针刺碳纤维树脂基复合材料力学与摩擦性能影响[J/OL]. *化工新型材料*, 2025:1–7[2025–11–17]. <https://link.cnki.net/doi/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.05.028>.
- FAN Jinpeng, HE Xinhai, ZHAO Yang, et al. Effect of nitric acid/coupling agent synergistic modification on mechanical and friction properties of needle-punched carbon fiber resin matrix composites[J/OL]. *New Chemical Materials*, 2025:1–7[2025–11–17]. <https://link.cnki.net/doi/10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2026.05.028>.