http://pmse.scu.edu.cn

常压溶剂法回收碳纤维布再制备复合材料的力学性能

胡 婷[1], 康少付[2], 虎志强[1], 马吉祥[1], 母全祎[1]
(1. 宁夏大学 物理学院,宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学 机械工程学院,宁夏 银川 750021)

摘要:采用常压溶剂法降解树脂基体回收碳纤维布,通过真空辅助树脂灌注成型技术(VARI)再制备复合材料,对比了新鲜碳纤维布、回收碳纤维布(rCFF)及再处理回收碳纤维布制备的复合材料的力学性能及微观形貌。结果显示,常压溶剂法降解回收 rCFF 再制备的复合材料力学性能下降,原因之一为 rCFF 上的残留树脂使新鲜树脂与纤维的界面黏结性能变差,易引发孔隙等浇筑缺陷,另一原因为 rCFF 的纤维丝排布规整度下降,导致其本身的力学性能降低。将 rCFF 用含催化剂的溶剂再处理得到几乎无树脂残留的再处理回收碳纤维布,用其制备的复合材料的拉伸强度为新鲜碳纤维布制备复合材料的 96.1%。但对 rCFF 进行多次回收再处理,会加速其纤维丝排布规整度下降,故再处理 rCFF 时,需平衡树脂残留减少与纤维丝排布规整度下降对其复合材料力学性能的影响。因此,提高再制备复合材料力学性能的主要途径为提高树脂基体降解程度及保留 rCFF 纤维丝排布规整度。

关键词:碳纤维增强复合材料;回收碳纤维布;化学回收法;真空辅助树脂灌注成型技术;力学性能
中图分类号:TB332 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7555(2025)09-0064-09

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer composite, CFRP)作为一种轻质材料,在航天航空、汽车、风电、运动装备等领域都有广泛应用,CFRP 的大规模使用产生了大量服役到期产品及加工边角料,对其进行绿色环保回收再利用兼具环境效益和经济效益[1]。目前回收 CFRP 主要有机械回收法、热处理法及化学回收法,回收碳纤维(rCF)主要有短切碳纤维、杂乱蓬松短纤维及保留纤维编织结构的碳纤维布 3 种形式[2]。

短切碳纤维的再利用主要是作为填料或增强材料,纤维力学性能下降较多。将 CFRP 切割再热压也是常用的回收再利用方法,Ruan 等[3]将 CFRP 切为 40 mm×40 mm 的碎片,经层合热压再制备的热塑性树脂复合材料,其拉伸强度为新鲜碳纤维复合材料(vCFRP)的 30%~50%。Xing 等[4]使用醋酸溶胀环氧树脂基体使 CFRP 分层,剪切为 80 mm×2 mm×2 mm 的长条,添加新树脂热压再制备 CFRP 板,其弯曲强度为原 CFRP 板的 47%~89%。制备碳毡、无纺布及取向排列等是再利用杂乱蓬松 rCF 的有效方法。Hu 等[5]用溶剂法降解树脂基体,将回收的 rCF 均匀分散后,采用类似造纸方法制备了再生碳纤维毡,可用作电磁干扰屏蔽材料。Rabe 等[6]对梳理、拉丝和纺纱工艺进行改进,用纬编机编织 rCF 制成混合纱线,最后通过热压用 rCF 生产三维回收碳纤维复合材料(rCFRP)。另外,将 rCF 取向排列,可解决随机纤维结构中纤维体积分数较低,进而力学性能不高的问题。Oliveux 等[7]用专利工艺 I2M 对随机纤维进行取向排列制备纤维带,用其再制造复合材料,板中纤维体积分数为 44.6%~57.9%。Hecker 等[8]开发了高性能不连续纤维工艺(HiPerDiF),回收报废船帆,rCF 拉伸强度保持 94%,但 rCFRP 拉伸强度降低了约 35%。

可以看出,回收的短切碳纤维及杂乱蓬松短纤维均能成功制备 rCFRP,但存在需要特殊的再成型

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0157
收稿日期: 2024-08-12
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12202218); 宁夏自然科学基金资助项目(2024AAC05003)
通讯联系人: 母全祎, 主要从事聚合物基复合材料力学研究, E-mail: qmu@nxu.edu.cn

设备及工序,rCFRP 力学性能降低较多的缺点。保留 rCF 纤维编织结构和尺寸可保持纤维的堆叠顺序、长度、排列和方向,从而提高 rCFRP 的纤维体积分数和力学性能,且不需要后处理工序,能节省相应设备成本和能源消耗[9]。常压溶剂法回收工艺,能保留回收纤维布的编织结构和尺寸,可方便地采用与 vCFRP 相同的方法再制备 rCFRP。Yu 等[10]用含催化剂的乙二醇溶剂降解热固性环氧树脂基体,实现了树脂和碳纤维近 100% 的回收再利用,rCFF 的拉伸强度保持 95%。安乐等[11]采用溶剂法降解树脂基体,回收得到了编织形态和尺寸保持完整的 rCFF,其强度保持在 94% 以上,并用 rCFF 直接再制备了复合材料。

目前常压溶剂法回收完整碳纤维布的研究更多关注的是降解工艺优化及 rCFF 力学性能的保持,对其再制备的 rCFRP 力学性能的影响因素研究较少。本文主要探究了影响常压溶剂法回收碳纤维布再制备复合材料力学性能的因素,以期给出提高再制备复合材料力学性能的措施。

1　实验部分

1.1　主要原料

双酚 A 二缩水甘油醚(DGEBA)、乙酰丙酮锌($Zn(Ac)_2$):西格玛奥得里奇(上海)贸易有限公司;戊二酸酐(GA)、1,5,7-三氮杂二环(4.4.0)癸-5-烯(TBD):上海麦克林生化科技有限公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、乙二醇(EG):国药集团化学试剂有限公司;碳纤维布:山东鼎盛科技有限公司;真空袋、脱模布、导流网、密封胶带:上海沥高科技股份有限公司;脱模剂:上海海都化学科技有限公司。

1.2　CFRP 的制备

按照环氧基:酰基:催化剂摩尔比为 1∶1∶0.05 配置环氧树脂。待环氧单体 DGEBA 在 130 ℃完全熔融后,加入催化剂 $Zn(Ac)_2$,并在 130 ℃搅拌至混合均匀。然后将交联剂 GA 在 130 ℃熔融后加入到 DGEBA/$Zn(Ac)_2$ 的混合物中,将 DGEBA/$Zn(Ac)_2$/GA 混合物在 130 ℃搅拌至均匀半透明状,随后放入 80 ℃真空干燥箱中,抽真空 5 min 以彻底去除气泡。

采用真空辅助树脂灌注成型技术(VARI)制备 CFRP,如 Fig.1 所示。裁剪 8 块尺寸为 200 mm×180 mm 的碳纤维布,整齐叠放在铝合金基板上,用密封胶将碳纤维布四周完全固定,依次铺设脱膜布、导流网(面积约为成型材料的 1/2~2/3),用透明软管连接好树脂导入口和树脂抽出口。将上述配置的、真空处理过的树脂混合物在 130 ℃加热 2 min 即进行浇筑,在 130 ℃,85 kPa 下进行,以免树脂温度降低黏度增大,树脂浇注停止后继续抽真空 3~5 min。浇筑完成后将其置于 140 ℃的烘箱中固化 12 h,固化完成后去除表面真空袋、脱模布及导流网即得 200 mm×180 mm 的 CFRP。制备的复合材料平均厚度约为 3 mm,碳纤维布的体积分数约为 66%。

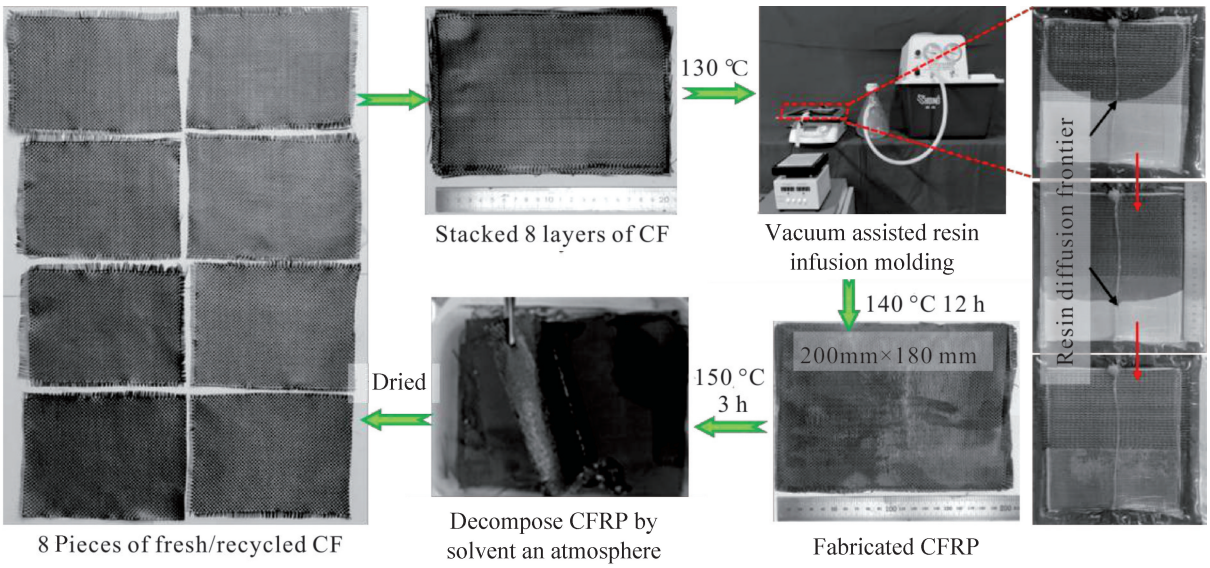


Fig. 1　Flowchart of the decomposition of epoxy matrix in mixed solvent at normal pressure for recycling intact CFF and the fabrication of CFRP though VARI method

1.3 CFRP 的常压溶剂法降解及回收再利用

采用常压溶剂法降解环氧树脂基体,混合溶剂由质量分数 50% 良溶剂 DMF 及质量分数 50% 小分子醇 EG 组成[12]。将复合材料放入钢化玻璃盘中,加入混合溶剂并密封盘口,在 150 ℃烘箱中加热 3 h 使环氧树脂基体充分降解。降解完成后将碳纤维布用镊子取出自然风干。如 Fig.1 所示,rCFF 形状基本未改变,可作增强材料再利用制备复合材料 rCFRP。为了对比回收碳纤维的影响,后续循环过程基体材料均使用新鲜的环氧树脂。将回收碳纤维布重复上述 VARI 制备和常压溶剂降解,得到多次回收碳纤维布及其制备的复合材料。此处,1rCFF 和 2rCFF 分别表示第 1 次及第 2 次的回收碳纤维布,1rCFRP 及 2rCFRP 分别表示第 1 次及第 2 次回收碳纤维布制备的复合材料。对每次制备的复合材料及回收的碳纤维布,均裁取边缘部分作测试表征,剩余部分进行下一次回收再利用。

1.4 回收碳纤维布的再处理

回收碳纤维布的再处理溶剂采用质量分数 50% DMF∶50%EG,为了提高回收碳纤维布上黏附树脂的降解效率,按照 0.35 mol/L 加入催化剂 TBD(Zn$(Ac)_2$ 催化剂不溶于上述溶剂)[12]。将 rCFF 置入上述混合溶剂再处理 20 min。再处理的回收碳纤维布按照上述制备回收及再处理过程重复再利用 2 次。此处,1rtCFF 和 2rtCFF 分别表示第 1 次及第 2 次的回收再处理碳纤维布,1rtCFRP 及 2rtCFRP 分别表示第 1 次及第 2 次回收再处理碳纤维布制备的复合材料。对每次回收再处理碳纤维布及其制备的复合材料,均裁取边缘部分作测试表征,剩余部分进行下一次循环再利用。

1.5 测试与表征

复合材料的拉伸性能依据国标 GB/T 3354-2014,用万能电子试验机(美特斯工业系统(中国)有限公司)进行单轴拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min,复合材料受拉面约为 2 mm×5 mm;采用单轴拉伸试验测试碳纤维布的力学性能[10,11],试样件尺寸为 30 mm×80 mm,在其两头包裹加强片以方便夹持。每组试样测试不少于 3 次,取平均值。用扫描电子显微镜(蔡司)对制备的 CFRP 及回收得到的 CFF 进行 SEM 表征。选用热重分析仪(德国 Netzsch STA449F5)对碳纤维布进行热重分析,在室温以 20 ℃/min 的升温速率加热至 800 ℃。用光学显微镜(MV5000,江南永新光学有限公司)观察 CFRP 的断口。

2 结果与讨论

2.1 回收碳纤维布制备复合材料

2.1.1 回收碳纤维布制备复合材料的力学性能:对比了回收碳纤维布与新鲜碳纤维布制备的复合材料的力学性能,Fig.2(a)为选取的 vCFRP,1rCFRP 及 2rCFRP 的拉伸应力-应变曲线,其拉伸强度、弹性模量和断裂伸长率总结在 Fig.2(b)中,可以看出,1rCFRP 和 2rCFRP 的拉伸强度分别为 vCFRP 的 93.8% 及 63.8%,断裂伸长率分别为 vCFRP 的 79.8% 及 70.5%,弹性模量分别为 vCFRP 的 134.0% 及 84.6%。这与已有研究结果一致,不管采用何种回收方法,回收碳纤维布制备的复合材料,其力学性能较 vCFRP 均有不同程度的降低[1,13]。Fig.2(a)插图中复合材料的拉断照片与文献一致[14],即从碳纤维的缝线处断裂,另外,正面显微镜放大图显示没有碳纤维丝被拔出,说明碳纤维/树脂界面良好。总体上,本文 VARI 工艺制备的复合材料性能良好,回收碳纤维布制备复合材料的力学性能在合理范围。下面将探究影响回收碳纤维布制备复合材料力学性能的因素。需要注意的是,通过溶剂法降解复合材料,回收碳纤维布的同时可以回收树脂及溶剂,但回收低聚物的黏度大于新鲜原料[12]。鉴于 VARI 工艺对树脂体系的黏度要求,本文均采用新鲜树脂浇筑以固定 VARI 工艺参数,故在后续研究中不讨论基体树脂的影响。

2.1.2 回收碳纤维布的力学性能:碳纤维是复合材料中的主要承载相,碳纤维本身的力学性能对其制备的复合材料力学性能影响较大[7]。因此,通过单轴拉伸测试研究了回收碳纤维布的力学性能。vCFF,1rCFF 及 2rCFF 的拉伸应力-应变曲线如 Fig.3(a)所示,3 种纤维的拉伸强度、弹性模量和断裂伸长率总结在 Fig.3(b)中。可以看出,1rCFF 与 2rCFF 拉伸强度分别是 vCFF 的 94.8% 和 89.9%;1rCFF 与 2rCFF 的弹性模量接近,分别为 vCFF 的 54.4% 和 53.3%,下降幅度较大;1rCFF 与 2rCF 的断裂伸长率

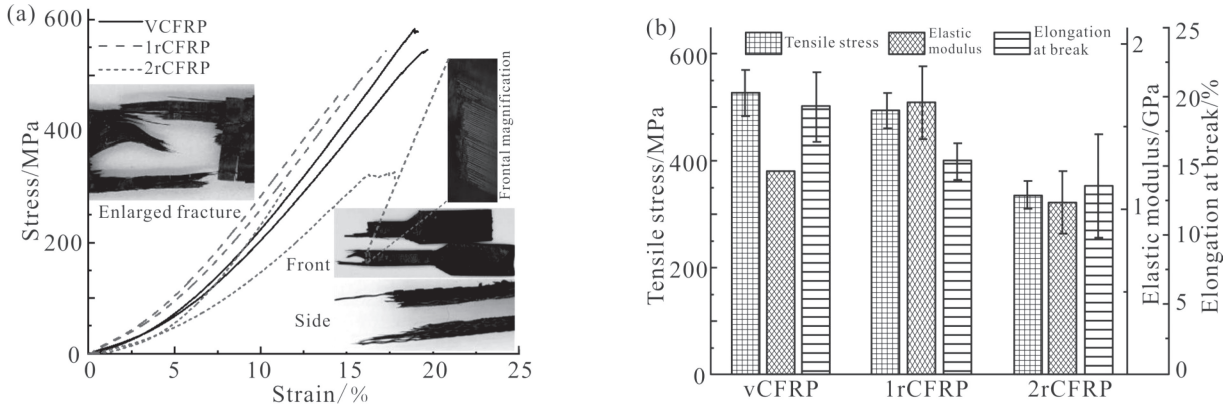


Fig. 2　Comparison of the mechanical properties of vCFRP, 1rCFRP, and 2rCFRP: (a) stress-strain curves (the inserts are the optical photographs and microscope image of the fractured specimen); (b) tensile stress, elastic modulus (within the first 1% stretch), and elongation at break

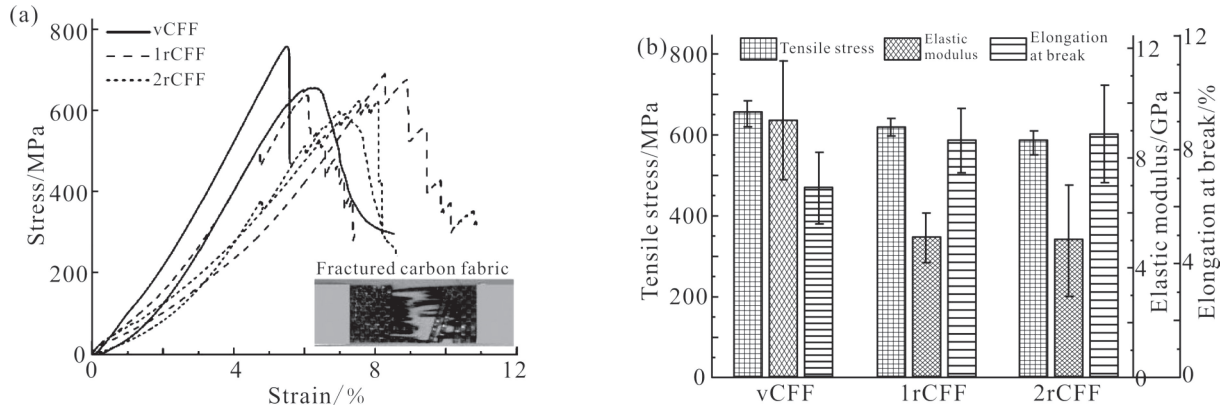


Fig. 3　Comparison of the mechanical properties of vCFF, 1rCFF, and 2rCFF: (a) stress-strain curves (the insert is the optical photograph of the fractured carbon fiber fabric); (b) tensile stress, elastic modulus and elongation at break

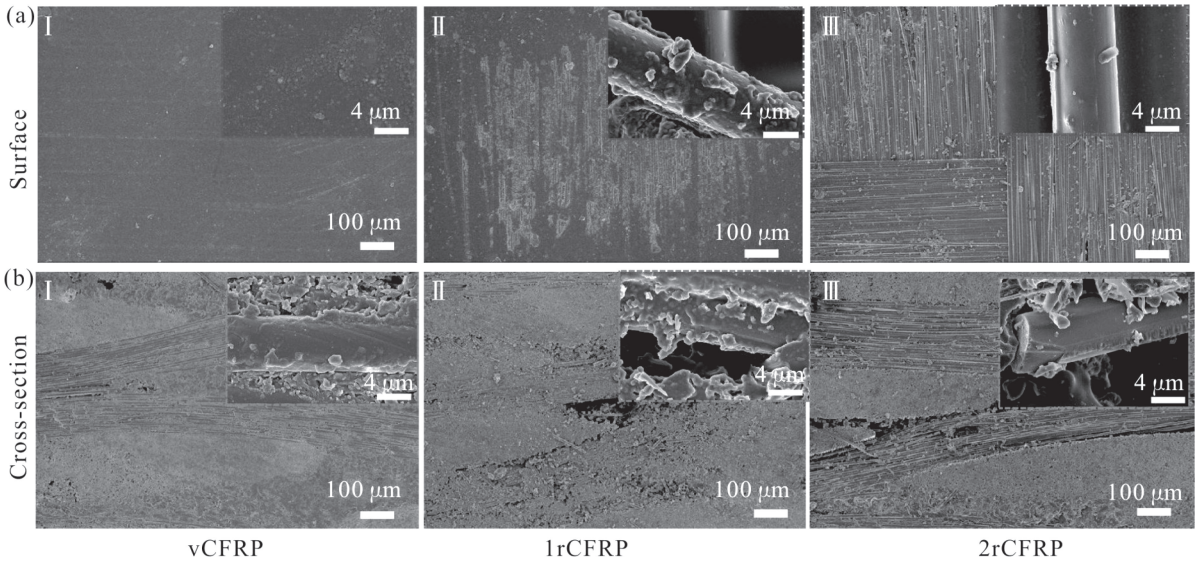


Fig. 4　SEM images of the surface and cross-section of CFRP made from fresh and recycled carbon fabric

接近,约为 vCFF 的 1.3 倍。初次回收后碳纤维布力学性能有一定程度的下降,后续再次回收利用时其力学性能降低不明显。因此,rCFF 的力学性能较 vCFF 降低,是导致 rCFRP 力学性能较 vCFRP 降低的原因之一。

2.1.3 树脂基体与纤维界面性能分析:碳纤维与树脂基体之间的界面在很大程度上决定了复合材料的结构强度和功能[15]。Fig.4(a)为 vCFRP,1rCFRP 及 2rCFRP 表面的 SEM 图像,可以看出,vCFRP 的表面光滑、平整,没有缺陷;1rCFRP 的表面存在树脂剥落区域,为复合材料脱模时树脂剥落所致,剥落区域局部放大图显示,碳纤维丝上黏附大量树脂。2rCFRP 的表面树脂剥落区域进一步扩大,且能观察到露出的碳纤维,剥落区域局部放大图显示,外露的碳纤维表面较为光滑,只有少许块状树脂黏附在碳纤维表面,说明树脂/纤维界面强度较低[16]。实验中喷涂脱模剂等工艺相同,说明 vCFRP 中 vCFF 和树脂基体的界面粘接最好,1rCFF 与树脂粘接性能次之,2rCFF 与树脂的粘接性能相对最差。

vCFRP,1rCFRP 及 2rCFRP 横截面的 SEM 图像如 Fig.4(b)所示,vCFRP 的纤维层之间树脂填充密实,几乎不存在孔隙;1rCFRP 的树脂和纤维界面处出现了浇筑不完全的区域,该区域的局部放大图显示树脂和碳纤维之间存在孔隙;2rCFRP 的树脂和纤维界面脱黏区域较大,从脱黏区域放大图上可以看出纤维表面几乎没有黏附树脂,且存在纤维断头,纤维和树脂之间的孔隙较大。随着回收次数增加,回收纤维与树脂之间的粘接性能逐渐降低,界面脱黏、孔隙等缺陷逐渐增加。复合材料中的孔隙缺陷会对复合材料的性能产生不利影响[17,18]。下面将对新鲜及 2 次回收碳纤维布进行微观形貌表征,以明确回收纤维与树脂之间粘接性能降低的原因。

Fig.5 对比了 vCFF 及 1rCFF,2rCFF 的 SEM 图像。总体上,回收碳纤维布的形状没有变化,纤维束排布整齐密实。逐级放大图显示随着回收次数增加,回收碳纤维布上残留树脂量逐渐增大,且残留树脂块体积增大。此外,相较规整的 vCFF,回收碳纤维布上出现了少许不规则的纤维丝。由于残留树脂会影响新鲜树脂对纤维丝的浸润,导致 rCFRP 中出

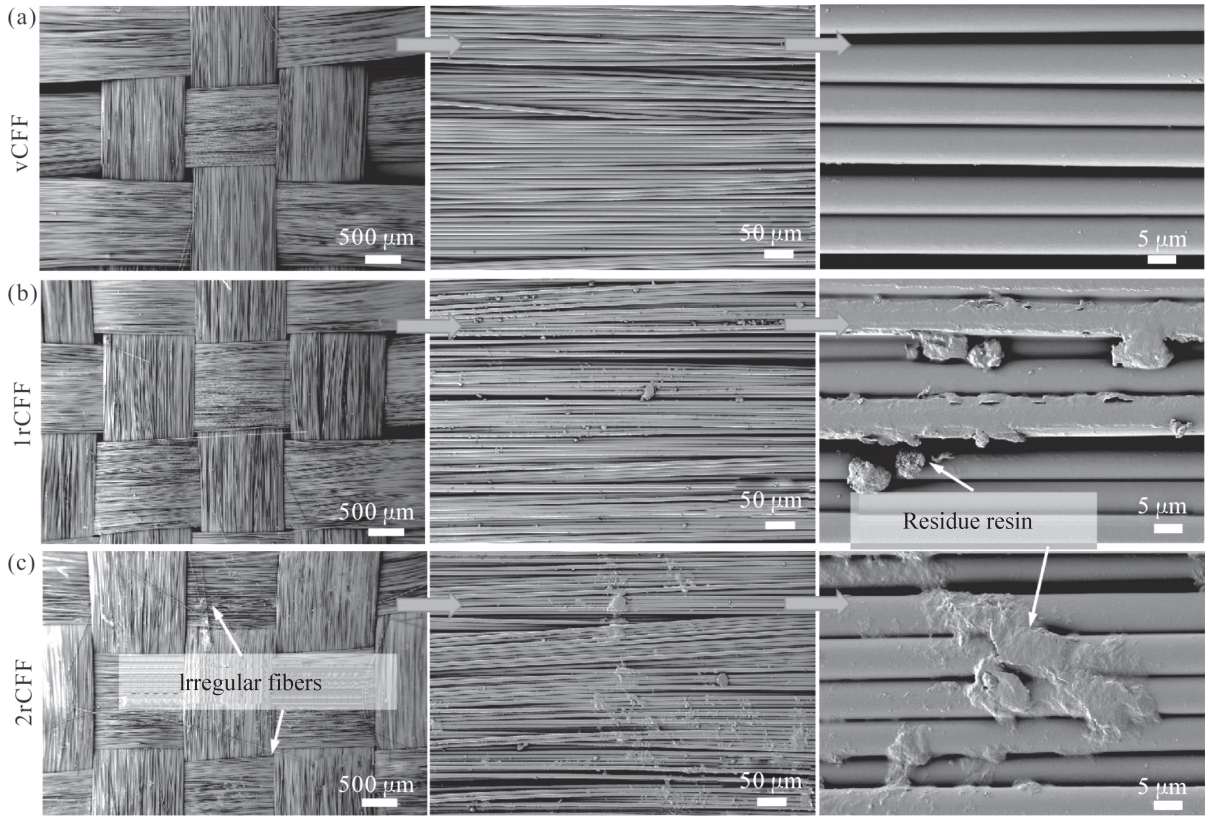


Fig. 5 SEM images of the surface of (a) vCFF, (b) 1rCFF and (c) 2rCFF

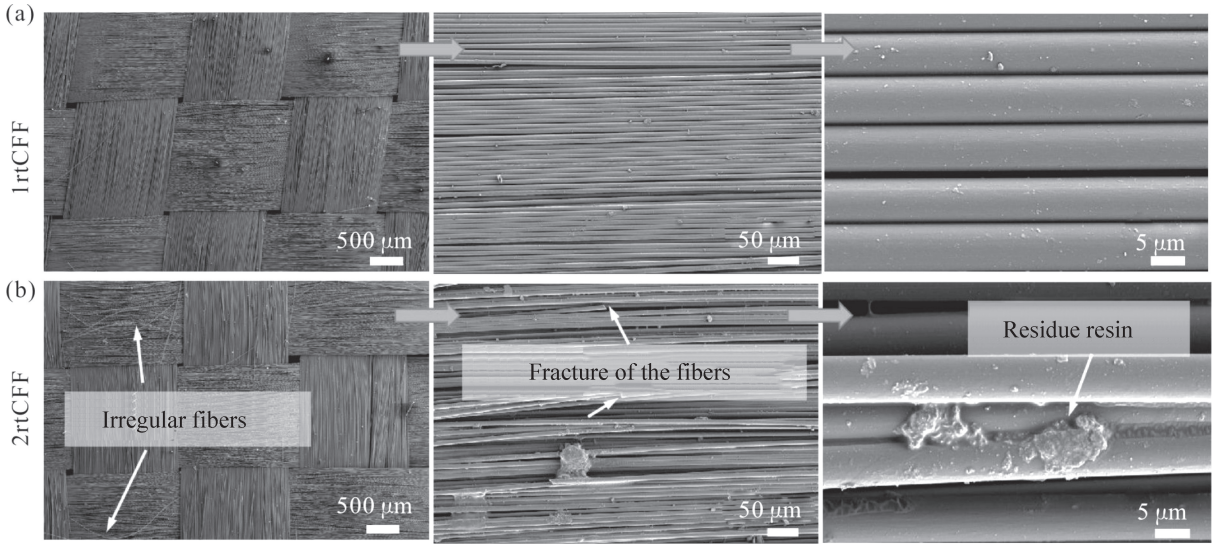


Fig. 6　SEM images of the surface of (a) 1rtCFF and (b) 2rtCFF

现未浇筑完全的孔隙,形成富含树脂的区域和空隙,容易产生应力集中[19],且残留树脂与新鲜树脂结合不良,进而影响树脂和纤维的界面粘接,最终导致 rCFRP 的力学性能降低[13]。因此,将进一步降解回收碳纤维布上的残留树脂,以获得纤维/树脂界面良好的 rCFRP。

2.2　回收碳纤维布的再处理

2.2.1　*再处理回收碳纤维布上的树脂残留*:上述研究发现,回收碳纤维布上的树脂残留会影响纤维/树脂界面、引发浇筑缺陷,为了促进残留树脂进一步降解,在溶剂(50% DMF 及 50% EG)中加入酯交换催化 TBD,依次将 1rCFF 和 2rCFF 浸入上述含催化剂的溶剂中再处理 20 min。此处,再处理 rCFF 的 20 min 对降解复合材料的 3 h 而言是相对较短的,且由于 rCFF 上残留树脂较少,可以多次重复使用该含催化剂的溶剂,故回收碳纤维布再处理的时间成本和材料成本均不高。再处理回收碳纤维布 1rtCFF 和 2rtCFF 的 SEM 图像如 Fig.6 所示。总体上,再处理回收纤维布的形状没有变化,纤维束排布整齐,接近新鲜碳纤维布(Fig.5(a))。从 Fig.6(a)可以看出,经过再处理的 1rtCFF 纤维丝表面干净整齐,几乎没有残留树脂。Fig.6(b)显示,经过含催化剂溶剂再处理,2rtCFF 纤维丝表面树脂减少,没有成片的残留树脂,但是对于表面上聚集较多、体积较大的残留树脂,再处理并没有将其完全降解清除。另外,多次再处理引起个别纤维丝排布不规整,Fig.6(b)上能观察到纤维丝的断口。而碳纤维织物结构形状松散会导致复合材料力学性能降低[11]。

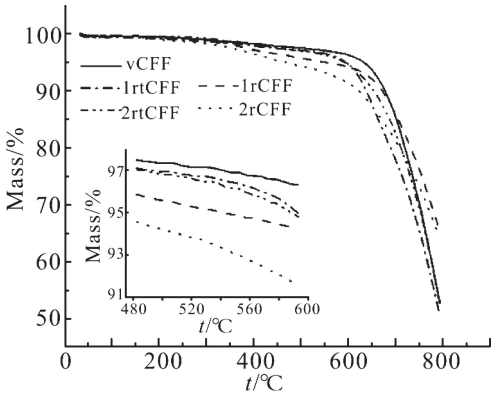


Fig. 7　TGA curves of vCFF, 1rCFF, 2rCFF, 1rtCFF and 2rtCFF

通过热重法进一步分析再处理对回收碳纤维布上残留树脂的清除情况,Fig.7 对比了 vCFF,1rCFF,2rCFF,1rtCFF 及 2rtCFF 的 TGA 曲线。300 ℃前各碳纤维布质量变化一致,主要是由水分、溶剂等挥发造成[20]。随着温度进一步升高,回收纤维布上的残留树脂逐渐开始降解,如插入的放大图所示,接近 600 ℃时,1rtCFF,2rtCFF 与 vCFF 的曲线比较接近,质量减少小于 5%,1rCFF 及 2rCFF 的质量分别减少了 5.9% 和 8.7%,比文献中残留树脂约 10% 略少[2]。结合 Fig.5 和 Fig.6 中各碳纤维布的 SEM 图像,溶剂法降解 CFRP 后,回收碳纤维布表面仍有残留树脂,且残留树脂随回收再利用 CFF 的次数而增加,通过用含催化剂的溶剂再处理可以减少树脂残留。

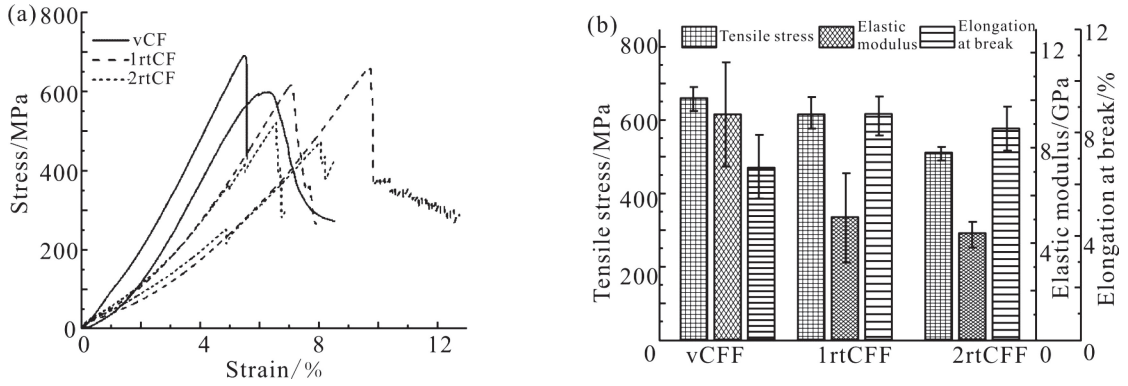


Fig. 8 Comparison of the mechanical properties of vCFF, 1rtCFF, and 2rtCFF: (a) stress-strain curves; (b) tensile stress, elastic modulus and elongation at break

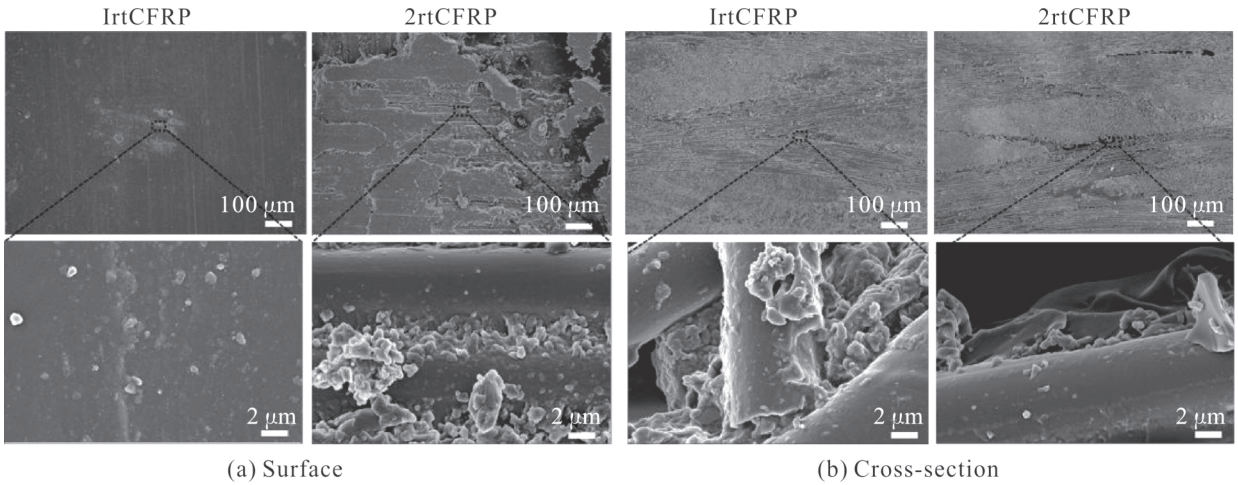


Fig. 9 SEM images of the composites prepared with reprocessed recycled carbon fabric

2.2.2 再处理回收碳纤维布的力学性能:再处理回收碳纤维布 1rtCFF,2rtCFF 与 vCFF 的力学性能对比总结在 Fig.8 中(此处将 vCFF 的力学性能曲线绘制在一起以方便对比)。可以看出,与未经再处理的回收碳纤维布类似,初次回收之后弹性模量降低较多,断裂伸长率增加,但后续回收对弹性模量和断裂伸长率影响不大。1rtCFF 及 2rtCFF 的拉伸强度分别为 vCFF 的 93.9% 和 78.0%,分别为 1rCFF 及 2rCFF 的 99.1% 和 86.7%。说明第 1 次再处理对回收碳纤维布的力学性能影响不大,但多次回收再处理对 rtCFF 力学性能影响逐渐显著。结合 Fig.6 的 SEM 图像可以推测,2rtCFF 的力学性能较 2rCFF 下降的主要原因为,二次再处理再利用后纤维布规整度降低。

2.3 再处理回收碳纤维布制备的复合材料

用再处理回收碳纤维布制备了复合材料,Fig.9 为 1rtCFRP 及 2rtCFRP 的表面及横截面 SEM 图像。1rtCFRP 的表面密实,与新鲜碳纤维布制备的复合材料(Fig.4(a-Ⅰ))类似,脱模没有造成表面树脂的脱落。1rtCFRP 横截面上基本不存在孔洞缺陷,浇筑密实,这归因于再处理后,1rtCFF 上几乎没有残留树脂,树脂-纤维界面粘接性能好,故用其制备的复合材料 1rtCFRP 品质良好。可以看出,2rtCFRP 表面局部区域出现了树脂脱落,但较 2rCFRP 的表面(Fig.4(a-Ⅲ))有所改进。2rtCFRP 横截面 SEM 图像显示树脂层与纤维层间存在间隙,这可能是 2rtCFF 表面残留树脂影响 VARI 浇筑中树脂的通过,致使 2rtCFRP 中出现浇筑缺陷。

最后,研究了再处理回收碳纤维布对制备的复合材料力学性能的影响。1rtCFRP,2rtCFRP 与 vCFRP 的力学性能对比如 Fig.10 所示。1rtCFRP 和 2rtCFRP 的拉伸强度分为 1rCFRP 和 2rCFRP 的 102.4% 和 109.6%,总体上,经过再处理,1rtCFRP 的力学性能接近 vCFRP,2rtCFRP 的力学性能较 2rCFRP 有所提高但仍比 vCFRP 低。可能是由于 1rtCFF 上树脂移除

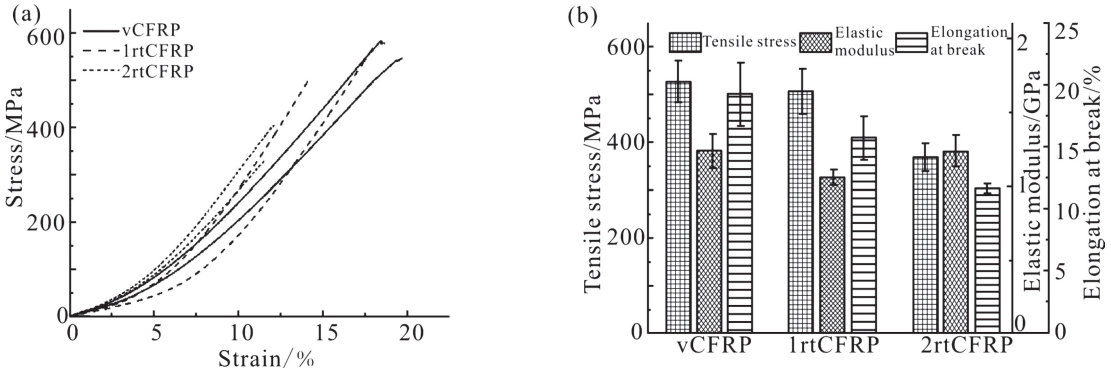


Fig. 10　Comparison of the mechanical properties of vCFRP, 1rtCFRP, and 2rtCFRP: (a) stress -strain curves; (b) tensile stress, elastic modulus and elongation at break

相对彻底,树脂-纤维界面粘接性能高,一定程度上提高了 1rtCFRP 的力学性能,而 2rtCFF 上存在少量的残留树脂,加之个别纤维丝排布不规整,故 2rtCFRP 的力学性能改进有限。值得注意的是,本文中性能相对较差的复合材料 2rCFRP 及 2rtCFRP,其拉伸强度依然高于金属合金。

3　结论

(1)常压溶剂法可多次降解碳纤维增强复合材料,得到规整、编织结构完好、尺寸不变的回收碳纤维布,可方便地采用与新鲜碳纤维布相同的方法制备复合材料。

(2)常压溶剂法回收碳纤维布制备复合材料力学性能下降的主要原因为回收碳纤维布上树脂残留使树脂与纤维界面粘接变差、孔隙率增加;纤维丝排布规整度下降,导致回收碳纤维布本身力学性能降低。

(3)将回收碳纤维布用含催化剂的溶剂再处理,减少其上树脂残留,是提高再制备复合材料力学性能的有效方法。但多次回收再处理碳纤维布时,需平衡树脂残留减少与纤维丝排布规整度下降对再制备复合材料力学性能的影响。

(4)提高再制备复合材料力学性能的主要途径为,提高树脂基体的降解程度及保留纤维丝排布规整度。

参考文献:

[1] Liu T, Shao L, Zhao B M, *et al*. Progress in chemical recycling of carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2022, 43: e2200538.

[2] Ballout W, Sallem I N, Sclavons M, *et al*. High performance recycled CFRP composites based on reused carbon fabrics through sustainable mild solvolysis route[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 5928.

[3] Ruan F T, Yang Q Y, Zhang B B, *et al*. Tensile and impact properties of chopped carbon fibre reinforced thermoplastics with multiple recycle and regenerate[J]. Industria Textila, 2023, 74: 223-229.

[4] 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: 109230.

[5] Hu Q L, Duan Y F, Zheng X H, *et al*. Lightweight, flexible, and highly conductive recycled carbon fiber felt for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 935: 168152.

[6] Rabe D, Häntzsche E, Cherif C. Recycling of carbon fibres and subsequent upcycling for the production of 3D-CFRP parts[J]. Materials, 2022, 15: 5052.

[7] Oliveux G, Bailleul J L, Gillet A, *et al*. Recovery and reuse of discontinuous carbon fibres by solvolysis: realignment and properties of remanufactured materials[J]. Composites Science and Technology, 2017, 139: 99-108.

[8] Hecker M D, Longana M L, Eloi J C, *et al*. Recycling end-of-life sails by carbon fibre reclamation and composite remanufacture using the HiPerDiF fibre alignment technology[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 173: 107651.

[9] Qazi H, Lin R, Jayaraman K. Fibre structure preservation in composite recycling using thermolysis process[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 105482.

[10] Yu K, Shi Q, Dunn M L, *et al*. Carbon fiber reinforced thermoset composite with near 100% recyclability[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26: 6098-6106.

[11] 安乐, 赵文哲, 金宸宇. 工业用环氧树脂及其复合材料的闭环回收再制造[J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2575-2586.
An L, Zhao W Z, Jin C Y. Closed-loop recycling and re-manufacturing of engineering epoxy and its composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2575-2586.

[12] Mu Q Y, An L, Hu Z Q, *et al*. Fast and sustainable recycling of epoxy and composites using mixed solvents[J]. Polymer

Degradation and Stability, 2022, 199: 109895.

[13] 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: 3508.

[14] Ou Y F, Zhu D J, Zhang H, *et al*. Mechanical properties and failure characteristics of CFRP under intermediate strain rates and varying temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 95: 123-136.

[15] Sun Z L, Luo Y X, Chen C Y, *et al*. Mechanical enhancement of carbon fiber reinforced polymers: from interfacial regulating strategies to advanced processing technologies[J]. Progress in Materials Science, 2024, 142: 101221.

[16] 党婧, 王凯, 肇研. 碳纤维增强热塑性树脂基复合材料界面性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(4): 142-145.
Dang J, Wang K, Zhao Y. Study on interfacial properties of carbon fiber reinforced thermoplastic resin composites[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(4): 142-145.

[17] 刘梓楠, 于雅琳, 王荣, 等. 热压罐成型压力对双马树脂基复合材料孔隙及力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(2): 70-77.
Liu Z N, Yu Y L, Wang R, *et al*. Effect of forming pressure of autoclave on voids and mechanical properties of bismaleimide resin composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(2): 70-77.

[18] 康少付, 范航天, 瞿立, 等. “无机粒子-无纺布”协同改性碳纤维复合材料及其增韧机理[J]. 宁夏工程技术, 2024, 23(1): 16-22.
Kang S F, Fan H T, Qu L, *et al*. Carbon fiber composite materials co-modified by inorganic particle and non-woven fabric and the toughening mechanism[J]. Ningxia Engineering Technology, 2024, 23(1): 16-22.

[19] Deng Z Y, Yue J L, Huang Z X. Solvothermal degradation and reuse of carbon fiber reinforced boron phenolic resin composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 221: 109011.

[20] 陈勇, 余煜玺, 赖德林, 等. 聚丙烯腈基纳米炭纤维无纺布的制备与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(9): 128-131.
Chen Y, Yu Y X, Lai D L, *et al*. Preparation and characterization of PAN-based carbon nanofibers non-woven[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(9): 128-131.

Mechanical Properties of Composites Reprepared with Carbon Fiber Fabric Recycled Using Solvent at Normal Pressure

Ting Hu[1], Shaofu Kang[2], Zhiqiang Hu[1], Jixiang Ma[1], Quanyi Mu[1]

(*1. School of Physics, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Mechanical Engineering Ningxia University, Yinchuan 750021, China*)

ABSTRACT: In this paper, the resin matrix was decomposed by solvent at normal pressure to recycle carbon fiber fabric, and the composite was reprepared by vacuum assisted resin infusion molding technology (VARI). The micromorphology and mechanical properties of the composites prepared with virgin carbon fiber fabric, recycled carbon fiber fabric (rCFF) and reprocessed recycled carbon fiber fabric were compared. The results show that one reason for the deterioration of mechanical properties of composite prepared with rCFF is that the residual resin on rCFF deteriorates the interface adhesion between fresh resin and fibers, and is prone to causing porosity and other infusion defects, the other reason is that the mechanical properties of rCFF are deteriorated due to the decrease in the regularity of fiber arrangement. The tensile strength of rCFF prepared composite is 96.1% of that of virgin carbon fiber fabric prepared composite. However, repeated recycling and reprocessing of rCFF would accelerate the decline in the regularity of its fiber arrangement, therefore, it is necessary to balance the opposite effects of residue resin and fiber arrangement regularity on the mechanical properties of the composites during rCFF reprocessing. Overall, the main ways to improve the mechanical properties of the reprepared rCFF reinforced materials are to enhance the degradation degree of resin matrix and retain the regularity of rCFF fiber filament arrangement.

Keywords: carbon fiber reinforced composite; recycled carbon fiber fabric; chemical recycling; vacuum assisted resin infusion molding technology; mechanical properties