高等学校化学学报
CHEMICAL JOURNAL OF CHINESE UNIVERSITIES
研究论文

# 自乳化环氧树脂上浆剂的制备及对碳纤维的表面改性

徐金尧[1], 戴景富[2], 陆书来[1,2], 王长宇[2], 周诗然[1], 马晓坤[1]
(1. 吉林化工大学石油化工学院, 吉林 132021; 2. 中国石油吉林石化公司研究院, 吉林 132023)

**摘要** 以邻苯二甲酸酐接枝聚乙二醇(PA-g-PEG)与环氧树脂(EP)为单体, 采用共聚合方法制备了一种自乳化环氧树脂上浆剂(SEERS). SEERS的一端为亲水羟基基团, 另一端为疏水的环氧基团, 将羟基基团和环氧基团引入碳纤维(CFs)表面, 可增强CFs表面活性, 进而增强CFs与EP基体的化学结合作用. 将PA-g-PEG与EP按照摩尔比1∶1在110 ℃条件下反应4 h, 可得到粒径最小为101.71 nm的SEERS乳液, 该乳液具有良好的稳定性. 通过扫描电子显微镜观察到该上浆剂乳液将CFs均匀包裹, 改善了CFs与EP的结合界面. 将上浆后的CFs热压制备成碳纤维复合材料(CFCs), 在其断面中观察到上浆后CFs与EP的界面相容性较好, 表明CFs与EP具有良好的结合性. 与上浆前相比, 上浆后CFCs的0°拉伸强度、0°压缩强度、90°拉伸强度和层间剪切强度分别提升了33.84%, 26.09%, 68.45%和16.00%.

**关键词** 自乳化; 上浆剂; 碳纤维复合材料; 力学性能
**中图分类号** O631 **文献标志码** A doi: 10.7503/cjcu20260162

# Preparation of Self-emulsifying Epoxy Resin Sizing Agent and Surface Modification of Carbon Fibers

XU Jinyao[1], DAI Jingfu[2], LU Shulai[1,2], WANG Changyu[2], ZHOU Shiran[1], MA Xiaokun[1*]
(*1. School of Chemical Engineering, Jilin University of Chemical Technology, Jilin* 132021, *China*;
*2. Research Institute of Jilin Petrochemical Company, China National Petroleum Corporation, Jilin* 132023, *China*)

**Abstract** A self-emulsifying epoxy resin sizing agent(SEERS) was synthesized *via* the grafting reaction of phthalic anhydride-g-polyethylene glycol(PA-g-PEG) with epoxy resin(EP). The amphiphilic molecular architecture, bearing hydrophilic hydroxyl terminals and hydrophobic epoxy segments, enables surface functionalization of carbon fibers(CFs) and promotes interfacial chemical bonding with the EP matrix. Under optimized conditions[*n*(PA-g-PEG)/*n*(EP)=1∶1, 110 ℃, 4 h], the SEERS emulsion attained a minimum particle size of 101.71 nm and favorable colloidal stability. Scanning electron microscopy revealed a uniform sizing layer on CF surfaces, thereby enhancing fiber-matrix interfacial compatibility. Fracture surface analysis of carbon fiber composites(CFCs) further confirmed strong interfacial adhesion between CFs and EP, manifesting in significant improvements in 0° tensile strength(26.09%), 0° compressive strength(33.84%), 90° tensile strength(68.45%), and interlaminar shear strength(16.00%) compared with unsized counterparts.

**Keywords** Self-emulsifying; Sizing agent; Carbon fiber composite material; Mechanical property

碳纤维复合材料(CFCs)是一类以碳纤维(CFs)为增强体、聚合物为基体, 通过特定工艺复合而成的高性能材料[1,2]. 它兼具CFs的高强度[3]和高模量[4]与聚合物的耐腐蚀性[5]和易成型性[6], 凭借着轻量

收稿日期: 2026-04-20. 网络首发日期: 2026-09-11.
联系人简介: 马晓坤, 女, 博士, 副教授, 主要从事高分子复合材料制备及表面改性方面的研究. E-mail: mxk-xshx@163.com
基金项目: 吉林省重大科技专项科研基金(批准号: YDZJ202203CGZH033)资助.
Supported by the Major Science and Technology Special Research Fund of Jilin Province, China(No.YDZJ202203CGZH033).

化[7]和高性能[8]的核心优势，已逐渐成为航空航天、高端装备及新能源等领域的关键材料[9]. 然而，CFs作为复合材料增强材料，在具有高比强度、高比模量及耐腐蚀[10]等优势的同时，由于其表面惰性[11]，与树脂的相容性较差[12]，仍存在界面结合问题亟待解决[13].

CFs的表面特性直接影响其与基体材料的界面结合强度，故CFs的表面改性是制备复合材料的关键环节[14]. 当前，传统的CFs表面处理方式主要包括气相氧化[15]、化学接枝[16]、化学气相沉积[17]及等离子体处理[18]等. 与上述方法相比，上浆处理法[19]在保证界面改性效果的同时，不需要对CFs表面再进行刻蚀，通过物理包覆与界面调节的方式，调整上浆剂的黏度和浓度，即可调节CFs表面的摩擦系数，解决CFs在加工、存储及界面结合等层面的核心问题[20~22].

环氧树脂(EP)上浆剂是CFs领域应用最广泛的上浆剂类型之一，其核心优势源于环氧树脂本身的化学特性与CFs的界面适配性[23,24]. 凭借对复合材料的界面兼容性、加工适配性及性能均衡性等优势[25~29]，环氧树脂上浆剂已成为航空航天、风电及高端装备等领域CFs的最成熟、产业化应用最广泛的主流上浆剂[30~32]. 然而，环氧树脂上浆剂在当前的工业化应用中常加入丙酮及丁酮等有机溶剂[33,34]，面临溶剂回收处理和环境保护等问题[35~38]. 因此，研制一种环境友好且性能优异的环氧树脂上浆剂仍为本研究领域的热点课题.

本文制备了一种自乳化环氧树脂上浆剂(SEERS)，可将反应官能团引入CFs表面，增加CFs与树脂基体的化学结合作用. SEERS在水相中具有良好的自乳化功能，且环境友好、使用方便、贮存稳定性高. 实验结果表明，上浆后CFs表面的界面性能提高，起毛量降低，CFs的集束性良好，制备的复合材料性能优异.

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

碳纤维(未上浆，牌号T300)，未上浆碳纤维(UCF)和市售上浆剂碳纤维(CF0)，吉林石化公司研究院；邻苯二甲酸酐(PA)，分析纯，天津大茂化学试剂厂；过硫酸钾，分析纯，佛山西陇化工有限公司；环氧树脂E51(环氧值0.48~0.54，黏度在40 ℃下低于2500 mPa·s)和环氧树脂E44(环氧值0.41~0.47，黏度在25 ℃下约为20000~40000 mPa·s)，化学纯，济宁百川化工有限公司；聚乙二醇[PEG，数均分子量别为400(PEG400)，600(PEG600)，2000(PEG2000)和4000(PEG4000)]，分析纯，无锡亚泰联合化工有限公司.

NanoBrook 90plus PALS型激光粒度仪，美国布鲁克海文仪器公司；RV-211A0型旋转蒸发仪，上海一恒科学仪器有限公司；HX-2000W型超声波细胞破碎仪，上海沪析实业有限公司；NDJ-5S型旋转黏度计，上海昌吉地质仪器有限公司；Regulus 8100型场发射扫描电子显微镜(SEM)，日本日立公司；Z100型万能试验机，德国Zwick Roell公司；东荣MODEL HM410型复合材料界面性能评价装置，北京佳仪分析设备有限公司，分别遵循ASTM D7264和ASTM D2344标准制备弯曲强度和层间剪切强度(ILSS)的试样.

### 1.2 自乳化环氧树脂上浆剂的制备

将PEG加入旋转蒸发仪中，于110 ℃加热蒸发2 h以除去吸附的水分子；将无水PEG和PA按照1∶1的摩尔比加入带有温度计、搅拌桨和$N_2$气入口的四颈烧瓶中，在110 ℃下反应2~4 h，进行PEG的改性接枝，得到PA改性PEG(PA-g-PEG).

为了达到SEERS所需要的黏结性和柔韧性，需要将环氧树脂进行复配使用. 利用下式计算复配环氧树脂(BEP)的环氧当量($EEW_{total}$，g/mol)，并用其计算反应摩尔数：

$$EEW_{total} = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{EEW_1} + \frac{m_2}{EEW_2}} \quad (1)$$

式中：$m_1$(g)为环氧树脂E44的质量；$m_2$(g)为环氧树脂E51的质量；$EEW_1$(g/mol)为环氧树脂E44的环氧当量；$EEW_2$(g/mol)为环氧树脂E51的环氧当量.

将环氧当量为205的BEP和PA-g-PEG按照摩尔比1∶1加入到干燥的分离式玻璃反应釜中，在60 r/min的转速下将其搅拌均匀．在$N_2$气保护下逐渐升温到70 ℃，加入少量过硫酸钾引发聚合反应；再升温到110 ℃反应4 h，得到淡黄色黏稠聚合物SEERS．聚合反应方程式见本文支持信息图S1.

### 1.3 CFs的制备与表征

在室温下，将不同量的SEERS溶于水中，使用细胞破碎仪超声分散5 min，得到高分散上浆剂乳液（SEERS的质量分数分别为1%，2%，3%，4%和5%）．利用激光粒度仪测试上浆剂乳液粒径大小及其分布和*Zeta*电位．用旋转黏度计测定上浆剂乳液的黏度，在25 ℃下选择0号转子于60 r/min的转速下测试，选择量程为10 mPa·s．将不同浓度的SEERS乳液分别倒入上浆液槽中，并将未上浆的碳纤维原丝经过导纱辊以恒定的速率匀速通过上浆液槽，浸浆后使用刮片刮出多余浆液，利用收丝筒进行收丝，得到上浆后的CFs．根据所用SEERS乳液的浓度（质量分数），将上浆后的CFs分别标记为CF-1%，CF-2%，CF-3%，CF-4%和CF-5%.

将上浆前后的CFs分别固定在导电胶上，增金处理后利用场发射扫描电子显微镜观察CFs上浆前后的表面状态，并运用能谱仪对其表面元素进行定性分析．利用起毛量测试仪，在机械牵引下使3 m长（$L$）的CFs通过2 cm×3 cm的摩擦海绵，用分析天平测量摩擦前后摩擦海绵上附着的毛丝的质量（$m$，mg），则m/$L$即为SEERS上浆前后CFs的起毛量（$M$，mg/m）．利用万能试验机和界面评估设备对上浆前后碳纤维复合材料的力学性能进行测试．将CFs与环氧数值E51按照质量比为1∶9放入预成型平板状模具中，通过热压处理固化成型制备碳纤维复合材料（CFCs，根据所用CFs的不同，分别命名为CFC-1%，CFC-2%，CFC-3%，CFC-4%，CFC-5%，UCFC和CFC0）．用高精度切割锯将CFCs切割至测试标准规格，测试拉伸强度、0°压缩强度、90°拉伸强度和层间剪切强度，通过对比上浆前后所得CFCs的性能指标验证上浆剂的应用效果．

## 2 结果与讨论

### 2.1 上浆剂的粒度和Zeta电位

PA-g-PEG与BEP的摩尔比会影响SEERS的亲水性和乳化效果，通过调整二者的比例可以得到乳化效果优良的SEERS乳液．由图1（A）可见，当BEP与PA-g-PEG的摩尔比为1∶1时，制备的SEERS粒

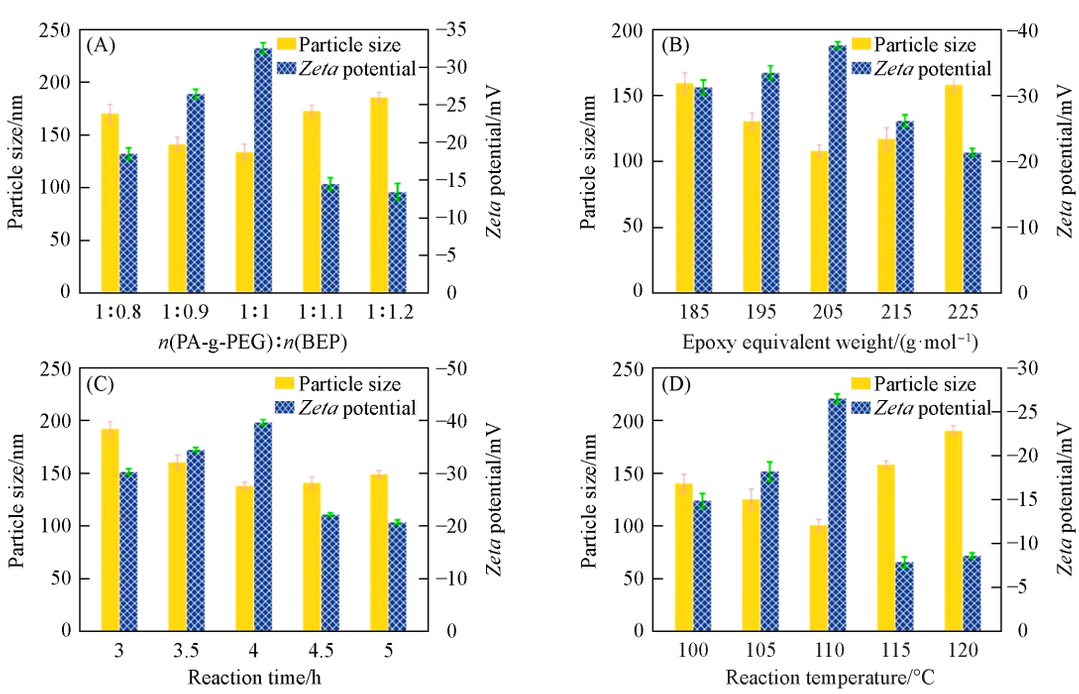



**Fig. 1 Influence of $n$(PA-g-PEG)∶$n$(BEP)(A), epoxy equivalent weight(B), reaction time(C) and reaction temperature(D) on the particle size and *Zeta* potential of SEERS**

径最小，为131 nm，此时的Zeta电位最高，为−30.95 mV，制得的SEERS乳液最稳定．其它反应摩尔比下，副反应的发生会使PA-g-PEG与环氧基结合，不但影响自乳化能力，而且使乳液粒子的粒度增大，导致乳液粒子的表面电荷减少，降低SERRS乳液的稳定性．

适当的环氧值有利于在CFs表面形成一层柔韧的上浆层，提高SEERS与CFs界面的键合性，从而增加CFCs复合材料的界面结合强度．由图1(B)可以看出，当BEP的环氧当量为205 g/mol(E44和E51的复配质量比为1∶1)时，制备的SEERS乳液粒径为101.71 nm，Zeta电位−36.84 mV，乳液稳定性最佳．系统考察了聚合反应时间和反应温度[图1(C)和(D)]对乳液稳定性的影响．结果表明，最佳的反应条件为于110 ℃下反应4 h.

### 2.2 上浆剂的黏度分析

适当的黏度可以使SEERS充分浸润CFs，并保持良好的均匀性．若上浆剂的黏度过大，会使CFs表面涂层不均匀，甚至会使上浆后的CFs过于刚硬；反之，SEERS将无法有效黏附在CFs表面，降低CFs的集束性．PEG的分子量是SEERS黏度的决定性因素．图S2(见本文支持信息)列出了不同分子量PEG制备的SEERS乳液黏度的变化．随PEG分子量从400增加到4000，SEERS的黏度从8.27 mPa·s增加到26.58 mPa·s. 这是因为高分子量的PEG分子链更长，参与反应时更容易发生相互缠绕，从而形成类似网状的结构，故流动速度更慢，黏度更大．最终确定PEG2000为最适合的分子量．

### 2.3 形貌分析

图2示出了用不同质量分数的SEERS乳液上浆后CFs的表面状态．由图2(A)可见，未上浆碳纤维原丝表面虽然较光滑，但存在明显沿纤维轴向的纳米级沟槽及凹凸结构．这归因于在湿法纺丝过程中，纺丝液通过喷丝板挤入凝固浴中，导致CFs表面沿着纤维轴向有很多沟壑和缺陷．少量上浆剂附着在CFs表面可以填补小部分表面的沟槽，但由于SEERS乳液浓度过低时黏性较低，表面留存量不足，上浆效果并不理想[图2(B)]．当SEERS乳液质量分数为2%时，CFs的表面上浆剂留存量有所增加，表面光滑程度提高[图2(C)]．由图2(D)可以看出，当SEERS乳液质量分数达到3%时，CFs表面覆盖了一层均匀、薄厚适中的上浆层，这表明CFs得到了充分的浸润，且在表面缺陷得到显著修复的同时，表面仍保留了一定的粗糙度，优化了CFs与树脂的化学键合与机械嵌合．当SEERS乳液质量分数进一步增加到4%时[图2(E)]，CFs表面形成了较厚的上浆层，且分布不均匀．当SEERS乳液质量分数增加到5%时，CFs的表面甚至出现较大的团聚体[图2(F)]．这是因为SEERS乳液浓度增大后黏度也随之增加，流动性降低，导致局部堆积、纤维束间分布不均，故最佳的SEERS乳液质量分数为2%~3%.

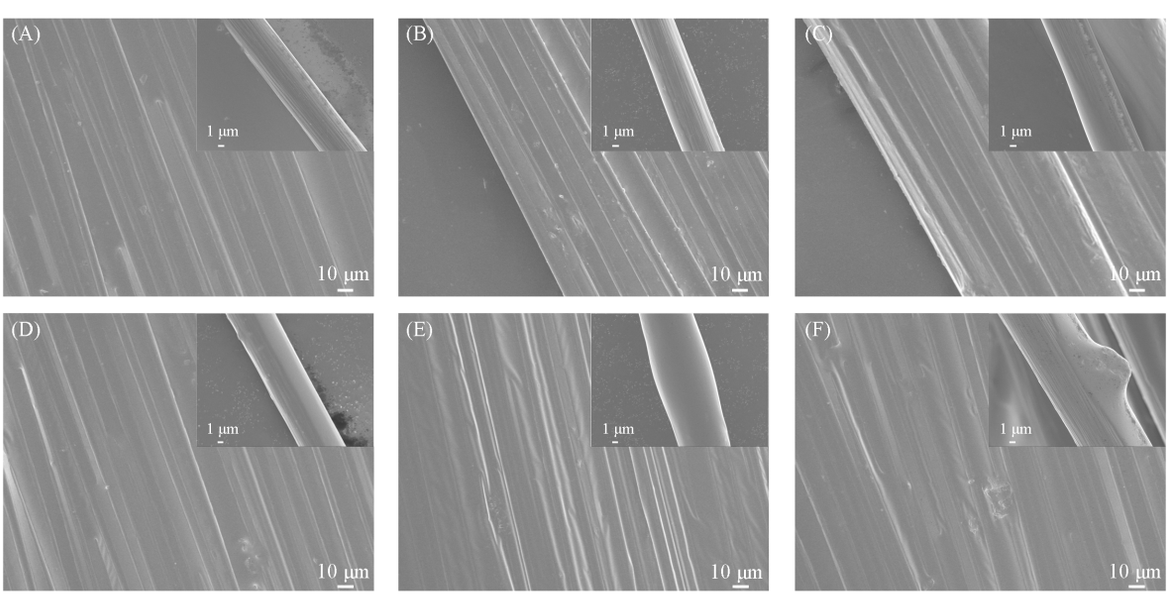



**Fig. 2 Surface morphologies of CFs before and after sizing treatment**

(A) UCF; (B) CF-1%; (C)CF-2%; (D) CF-3%; (E) CF-4%; (F) CF-5%. Insets: magnified views of the corresponding CFs surfaces.

### 2.4 碳纤维表面元素分析

图3为UCF和CF-3%的EDS表面元素分析图. 由图3(A)~(C)可以看出, 未上浆的CFs表面只有C元素和极少量的O元素. 这是因为原丝在生产过程中经过碳化过程的高温处理, 表面活性基团很少. 未上浆的CFs表面的石墨层状共轭双键及饱和碳单键皆为类石墨骨架上的非极性碳结构, 化学活性极低、不易与树脂反应, 这也是导致纤维-树脂界面结合弱的核心原因. 而SEERS能提供与CFs表面结合的羟基和环氧基团, 能够在CFs表面覆盖一层均匀的膜, 提高基体树脂与CFs的界面结合作用. 由图3(D)~(F)可以看出, CFs-3%表面上浆后, CF-3%表面的C元素和O元素分布明显增多, 印证了此上浆剂的黏附性和稳定性, 其含有活性环氧基团和极性键, 可使CFs具有良好的集束性和展宽度.

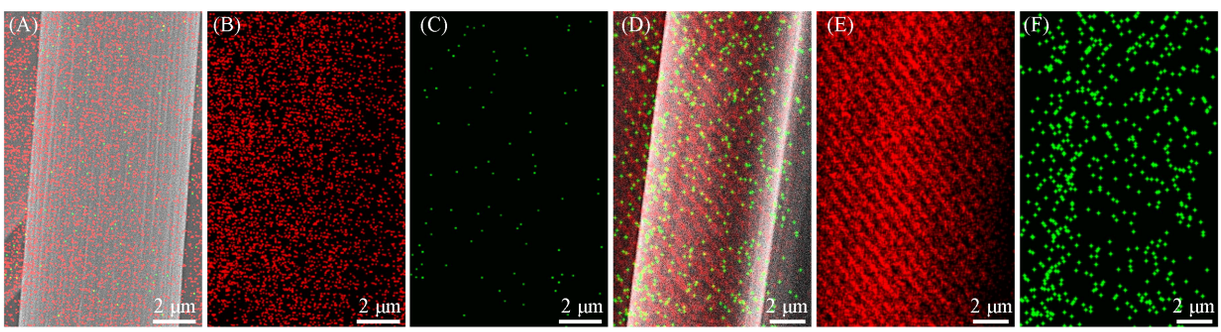



**Fig. 3 Surface element distribution of UCF(A—C) and CF-3%(D—F)**

(A, D) All elements; (B, E) C element; (C, F) O element.

### 2.5 上浆前后碳纤维表面的浸润性

SEERS改性后CFs表面因黏附了更多的有机基团, 提高了CFs的表面能, 从而降低CFs的表面接触角(CA), 有利于改善CFs与树脂基体之间的浸润性和界面黏结强度. 图4示出了不同质量分数SEERS乳液上浆前后CFs的水接触角. 由图4可见, UCF的水接触角最大, 约为85.7°, 这是因为CFs表面活性基团极少, 同时CFs微观层面的乱层石墨结构呈现惰性. 经SEERS上浆处理后, 由于引入了大量醚键、环氧基团及羟基基团等活性基团, 其水接触角显著减小, 且随着SEERS乳液浓度的增大呈现先减小后增大的趋势. 由图4(D)可见, CF-3%的接触角最小, 为55.9°, 此时SEERS体系中亲水基团和疏水基团数目适中, 具有更好的润湿性和渗透性. 当SEERS乳液浓度过大时[图4(D)~(F)], 会因上浆层过厚使得与水的浸润性能下降, 呈现接触角增大的现象, 这与图2结果相一致.

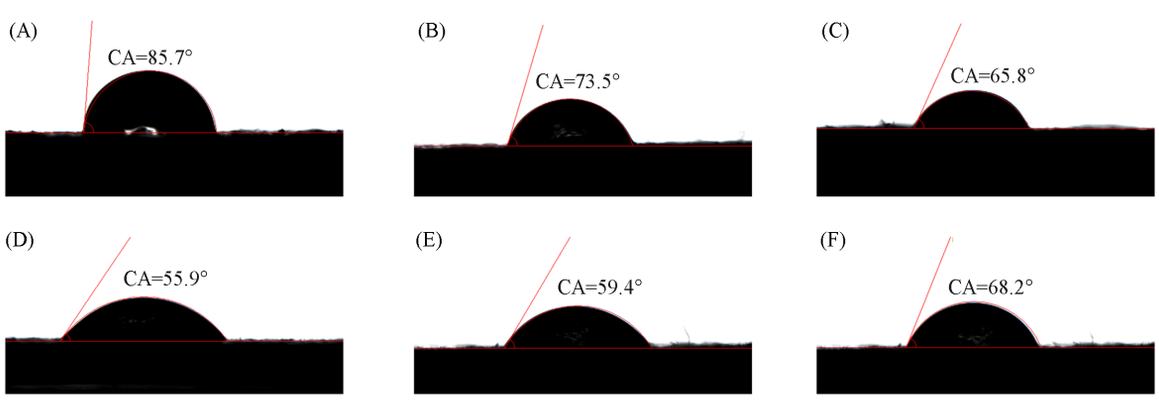



**Fig. 4 Contact angles of UCF(A), CF-1%(B), CF-2%(C), CF-3%(D), CF-4%(E) and CF-5%(F)**

### 2.6 上浆剂的乳液稳定性

上浆剂的稳定性是一个重要的性能评价指标. 若在上浆过程中, 上浆剂出现分层和沉淀等现象, 都会对CFs表面的浸润性有较大的影响. 将不同质量的SEERS溶液用高速乳化仪乳化5 min, 得到

SEERS质量分数分别为1%~5%的稳定的乳液.

将上述SEERS乳液静置2，4及6 m观察其乳液稳定性. 实验证实SEERS乳液具有良好的稳定性，经过4 m的静置后仍保持均一稳定. 当SEERS乳液的质量分数低于3%时，放置6 m后仍无沉降颗粒产生. 通过粒度测试可以看到，长期放置后粒度的变化并不明显(见本文支持信息表S1). 但当SEERS质量分数过高(>4%)时，放置6 m后，SEERS乳液中出现了小颗粒不溶物，且有了少许沉降颗粒(图S3，见本文支持信息). 这源于浓度过高时，布朗运动导致颗粒频繁碰撞，分散相颗粒间发生碰撞的概率提高，SEERS粒子不断碰撞形成大分子颗粒，最终导致了颗粒间的团聚和絮凝.

### 2.7 碳纤维起毛量分析

起毛量是衡量CFs表面完整性和加工性能的关键指标，对CFs及CFCs的性能具有多方面重要影响. SEERS的主要作用是在CFs表面均匀附着一层薄薄的树脂层，可防止CFs起毛松散，提高其集束性.

图5对比了未上浆CFs(UCF)、市售上浆剂改性CFs(CF0)和不同浓度SEERS乳液改性CFs(CF-1%，CF-2%，CF-3%)的起毛量. 上浆后CFs的起毛量呈不同程度的下降，UCF起毛量为16.22%，CF0的起毛量为13.53%，而SEERS乳液改性CFs的起毛量都优于前两者. 随着SEERS乳液质量分数的增大，起毛量呈现先下降后上升的趋势，当SEERS乳液浓度为2%时，CF-2%的起毛量最低，为8.75%，优于CF-1%和CF-3%(其起毛量分别为9.84%和10.61%). 这是由于当SEERS乳液浓度过低时，CFs表面未能完全被上浆剂包覆；而当SEERS乳液浓度过高时，易发生团聚、缠结的现象，导致浸润性能较差.

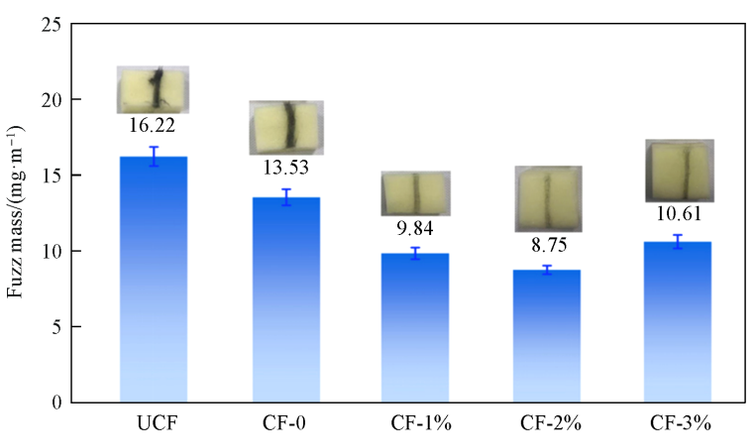



**Fig. 5 Fuzz mass of UCF, CF0, CF-1%, CF-2% and CF-3%**

Insets: the photographs of the fuzz collected on the sponge after the fuzz-mass test.

### 2.8 复合材料的力学性能

图6示出了不同质量分数SEERS乳液改性后所得CFCs的力学性能指标. 由图6可见，与未上浆CFCs相比，上浆后的CFCs各项机械性能均得到显著提升. 总体的力学性能均呈现上升后下降的变化趋势，其中CFC-3%的机械性能改善最为显著，0°压缩强度、0°拉伸强度、90°拉伸强度和层间剪切强度均最高，分别为1696.36，2431.59，90.86及72.56 MPa，与UCFC相比，分别提升了26.09%，33.84%，68.45%和16.00%.

图7示出了经过上浆处理前后的CFCs的断裂面SEM图片. 由图7(A)和(B)可以看出，当UCF/E51断裂时，CFs紧密排列，断裂面表面非常光滑，且几乎没有树脂残留. 这是由于CFs与EP之间的界面结合力较弱，在外力作用下，CFs与树脂之间易于分层，故而CFCs的力学性能较低. 由图7(C)和(D)可以看出，CF-3%与E51树脂之间浸润效果提高，有明显的树脂剥离界面. 因此，当CFCs受力断裂时，强的界面结合性会迫使外力分散于基体内部或穿过CFs扩展，或克服界面黏结力将CFs从EP树脂基体中拔出，这都会有效地防止应力过度集中，提高CFCs的力学性能.

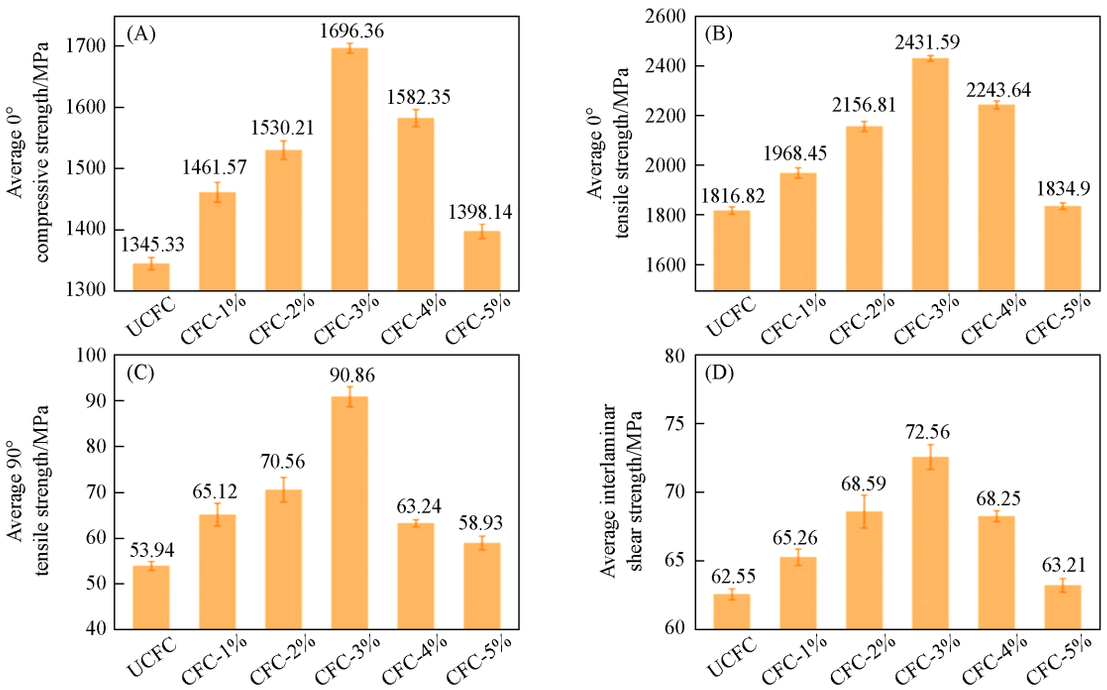



**Fig. 6　0° compressive strength(A), 0° tensile strength(B), 90° tensile strength(C) and interlaminar shear strength(D) of composite materials with different mass fraction of SEERS emulsions**

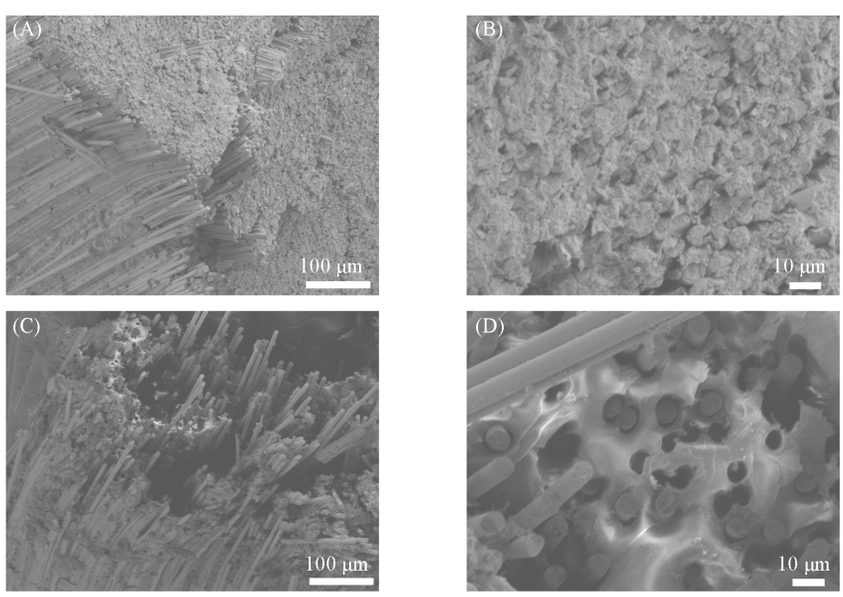



**Fig. 7　SEM images of the fracture surface of UCFC(A, B) and CFC-3%(C, D)**

## 3　结　　论

设计制备了一种分子结构中含有活性环氧基团和极性羟基基团的SEERS. 通过调整PEG的分子量和复配环氧树脂的环氧值，将邻苯二甲酸酐改性的PEG 2000和环氧当量为205 g/mol的BEP按照1∶1摩尔比，在110 ℃下反应4 h，可得到粒度为101. 71 nm，Zeta电位达到−36. 84 mV的稳定的SEERS乳液. SEERS乳液具有良好的稳定性，在质量分数为3%时，放置6 m未见有破乳和沉降现象. 用质量分数为3%的上浆剂乳液改性CFs表面，可以得到浸润完全的CFs，其表面上浆层均匀、薄厚适中. 通过EDS分析证实了上浆后的CFs表面具有更多的C和O元素，这些有机基团有利于改善基体树脂与CFs

的界面结合作用，进而提高碳纤维复合材料的综合性能. 同时，SEERS可有效减少CFs的起毛量(与未上浆CFs相比降低了53.95%). 上浆后CFCs的力学性能明显提高，其0°拉伸强度、0°压缩强度、90°拉伸强度和层间剪切强度分别较未上浆CFCs提升了33.84%，26.09%，68.45%和16.00%.

支持信息见http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503/cjcu20260162.

## 参 考 文 献

[1] Xiong S., Zhao Y., Wang Y. K., Song J. P., Zhao X. R., Li S., *Appl. Surf. Sci.*, **2021**, *546*, 149135
[2] Yan F., Liu L., Li K. X., Jin L., Zhang M. J., Liu Y., Xiao L. H., Ao Y. H., *Compos. Sci. Technol.*, **2021**, *201*, 108489
[3] Jiao W. W., Cai Y. M., Liu W. B., Yang F., Jiang L., Jiao W. C., Wang R. G., *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, *439*, 88—95
[4] Li T. S., Li M., Gu Y. Z., Wang S. K., Li Q. W., Zhang Z. G., *Compos. Sci. Technol.*, **2018**, *166*, 176—182
[5] Wang C. F., Li J., Sun S. F., Li X. Y., Zhao F., Jiang B., Huang Y. D., *Compos. Sci. Technol.*, **2016**, *135*, 46—53
[6] Sharma M., Gao S., Mäder E., Sharma H., Wei L., Bijwe J., *Compos. Sci. Technol.*, **2014**, *102*, 35—50
[7] Zhang R. L., Huang Y. D., Liu L., Tang Y. R., Su D., Xu L. W., *Appl. Surf. Sci.*, **2011**, *257*(8), 3519—3523
[8] Jin L., Zhang M. J., Shang L., Liu L., Li M., Ao Y. H., *Compos. Sci. Technol.*, **2020**, *200*, 108382
[9] Feng P. F., Song G. J., Li X. R., Xu H., Xu L. Y., Lv D. D., Zhu X., Huang Y. D., Ma L. C., *J. Colloid Interface Sci.*, **2021**, *583*, 13—23
[10] Pei H., Zhang J, Sun Z., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2025**, *41*(1), 21—32
[11] Lu W., Wang C., Yuan H., *Adv. Mater. Res.*, **2012**, *430*, 2008—2012
[12] Hiremath N., Mays J., Bhat G., *Polym. Rev.*, **2016**, *57*(2), 339—368
[13] Liu F. Y., Shi Z., Dong Y. B., *Compos Part A-Appl.*, **2018**, *112*, 337—345
[14] Yang S. Q., Xu S. J., Tang Q. H., Miao H., Yang X., Lin S. L., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(10), 20240248(杨思卿，许神剑，唐卿涵，缪涵，杨溪，林绍梁. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(10), 20240248)
[15] Zhang Q. B., Liu L., Jiang D. W., Yan X. R., Huang Y. D., *J. Compos. Mater.*, **2014**, *49*(23), 2877—2886
[16] Ge H., Ma X., Liu H., *Appl. Polym. Sci.*, **2015**, *132*(16), 41882
[17] Liu S, Liu F., Guan L., *J. Mater. Eng. Perform.*, **2025**, *35*(8), 1—13
[18] Zhang W. S., Yang C. L., Yao L. L., Li Z. H., Li S. X., Lu Y. G., *Appl. Polym. Sci.*, **2019**, *136* (38), 47982
[19] Sun G. Z., Pang J. H. L., Zhou J. Y., Zhang Y. N., Zhan Z. Y., Zheng L. X., *Appl. Phys. Lett.*, **2012**, *101*, 131905
[20] Chen J. L., Wang K., Zhao Y., *Compos. Sci. Technol.*, **2018**, *154*, 175—186
[21] Sun J., Ren Y, Dai M, Li H., Yu H., Wang S, He Z., Wang S., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2026**, *42*(1), 294—304
[22] Zhang Y. H., Park S. J., *Compos. Part A*, **2018**, *112*, 356—364
[23] Gu J. W., Lv Z. Y., Wu Y. L., Guo Y. Q., Tian L. D., Qiu H., Li W. Z., Zhang Q. Y., *Compos. Part A-Appl. S.*, **2017**, *94*, 209—216
[24] Ma L. C., Wu G. S., Zhu Y. Y., Li X. R., Han P., Wang G., Song G. J., *Polym. Compos.*, **2018**, *39*, 2381—2389
[25] Zhang J., Ding R., Yu Z., *Chem. Res.Chinese Universities*, **2024**, *40*(6), 1060—1067
[26] Shiba K., Tagaya M., Samitsu S., Motozuka S., *Chempluschem*, **2014**, *79* (2), 197—210
[27] Qian X., Wang X. F., OuYang Q., Chen Y. S., Yan Q., *Reinf. Plast. Compos.*, **2012**, *31*(15), 999—1008
[28] Aldosari M. S., Khan M., Rahatekar S., *J. Matter. Res. Technol.*, **2020**, *9*(4), 7786—7806
[29] Beggs K., Servinis L., Gengenbach T., Huson M., Fox B., Henderson L., *Compos. Sci. Technol.*, **2015**, *118*, 31—38
[30] Zhang R. L., Huang Y. D., Su D., Liu L., Tang Y. R., *Materials & Design*, **2012**, *34*, 649—654
[31] Xu D., He L., Zeng F., Liu B., Ma J., Han D., Yang Q., Du J., *Chem. Res. Chinese Universities*, **2024**, *40*(6), 1050—1059
[32] Ren T., Zhu G., Hou X., *Appl. Polym. Sci.*, **2021**, *138* (9), 50363
[33] Yuan X. M., Zhu B., Cai X., Zhao S. Y., Qiao K., Zhang M., *Polymer Composites*, **2017**, *39*, 2036—2045
[34] Wu Q., Zhao R. Y., Zhu J. F., Wang F., *Appl. Surf. Sci.*, **2019**, *504*, 144384
[35] Xu R. J., Luo Y. C., Zhang F., Zhang X. Q., Lei C. H., *Polym. Comp.*, 2017, 40(2), 514—522
[36] Wang K. J., Li Y. Y., Sang S. L., Zhang S. J., Chen L. L., Tang J. L., *Appl. Polym. Sci.*, **2021**, *139*(7), 51655
[37] Chen Y. F., Ding L., Chai M. Z., Liu L., Huang Y. D., *Polym. Comp.*, **2021**, *42*(4), 1741—1751
[38] Zhu L., Zhang M. Y., Sheng J., Niu H. Q., Wu D. Z., *Appl. Polym. Sci.*, **2021**, *139*(2), 51475

(Ed.: W, K, M)