http://pmse.scu.edu.cn

# 碳纤维增强聚苯硫醚复合材料在不同服役环境下湿热老化行为

卿晓婷[1]，杨 洋[2]，王 旭[2]，杨家操[3,4]，董 园[1]，林鸿宇[1]
卫志美[3,4]，杨 杰[3,4]，王孝军[3,4]

（1. 四川大学 高分子科学与工程学院，四川 成都 610065；2. 上海飞机制造有限公司，上海201324；
3. 四川大学 分析测试中心，四川 成都 610064；4. 先进高分子材料全国重点实验室（四川大学），四川 成都 610065）

**摘要：**碳纤维增强聚苯硫醚（PPS/CF）复合材料因其优异的力学性能、加工性能等优点而受到广泛应用，但是服役环境中的温度及湿度会对复合材料的性能产生影响，严重影响其使用中的安全性及稳定性。因此，文中针对PPS/CF复合材料在海水、冷却液及碱溶液环境中的湿热老化进行了研究。发现复合材料在3种环境中吸湿速率随温度的升高而增加，平衡吸湿率也随之增加，吸湿率的增加导致复合材料的力学性能衰减严重，冲击强度衰减可达30%。差示扫描量热分析、热重分析和红外分析结果表明，复合材料在湿热老化过程中热性能及化学结构没有发生变化。微观分析发现，湿热老化后，复合材料力学性能衰减是由于碳纤维与树脂基体之间发生了界面退化，无法有效传递应力。

**关键词：**聚苯硫醚；复合材料；碳纤维；湿热老化；力学性能
**中图分类号：**TB332 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）07-0131-08

在过去的几十年中，纤维增强聚合物复合材料(FRPC)由于其轻质、高比强度等优越的性能[1~3]在诸多工业领域得到了广泛应用，包括但不限于油气生产、电子器件以及包括陆地、海洋和空气在内的各种运输方式[4]。随着复合材料应用范围的逐渐扩大和应用场景的丰富，复合材料在服役过程中不可避免的面临更加复杂的环境工况，材料受到湿热、太阳辐照等因素的长期影响，会发生多尺度结构变化，导致性能劣化[5~8]。因此，研究材料在不同环境中的耐环境性及性能演化规律对保证结构安全性具有十分重要的意义，是复合材料领域的热点问题[8,9]。

复合材料在长期服役中常面临高温高湿耦合环境，故湿热老化是对复合材料长期耐久性影响较大的因素。当FRPC暴露在高温和潮湿环境中，水分在FRPC内部发生渗透、扩散，会引起复杂的吸湿效应[10]。FRPC在吸湿过程中，纤维通常不吸收水分，树脂基体会因吸湿而发生膨胀、水解和产生微裂纹等劣化反应。在吸湿和高温的作用下，纤维和基体之间由于存在湿膨胀差及热膨胀差异，复合材料内部会形成溶胀应力、热应力，造成纤维/基体界面产生脱粘、开裂等缺陷[11]。国际上也有许多学者从不同角度研究了复合材料湿热老化过程。Sang等[12]针对短碳纤增强尼龙6复合材料的湿热老化进行了研究，发现随着老化温度的升高，复合材料的拉伸强度和弹性模量逐渐降低，冲击强度则迅速增加，并且揭示碳纤增强尼龙6的湿热老化机理主要包括：基体的塑化、纤维基体界面失效及材料表面损伤。Li等[13]研究了碳纤维增强环氧树脂复合材料在循环湿热环境中的界面行为和性能，发现纯树脂的吸湿行为表现出非Fick扩散溶胀特性，但是在引入碳纤维后，复合材料的吸湿行为符合Fick扩散。随着湿热老化的进行，复合材料的层间剪切强度和玻璃化转变温度迅速降低，之后降低速率减慢。经过除湿处理后，复合材料层间剪切强度的可逆损伤比例为63.98%。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0123
收稿日期：2025-03-26
基金项目：高分子材料工程国家重点实验室自主课题（sklpme2024-2-17）
通讯联系人：杨家操，主要从事纤维增强热塑性复合材料及高性能纳米复合材料开发研究，E-mail: yangjc@scu.edu.cn
王孝军，主要从事高性能热塑性复合材料开发、高性能聚合物产业化合成开发等研究，E-mail: wangxj@scu.edu.cn

**Tab. 1 Injection molding process parameters**

| Stage 1 temperature/℃ | Stage 2 temperature/℃ | Stage 3 temperature/℃ | Injection pressure/% | Nozzle pressure/% | Injection time/s | Holding time/s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 315 | 320 | 300 | 55 | 80 | 15 | 10 |

Xian等[8,14,15]研究了湿热老化对尼龙6改性碳纤维增强环氧树脂复合材料力学性能及降解机理的影响，发现水分子对树脂的聚合物链具有蚀刻作用，会导致树脂水解和填料/树脂界面脱粘。

现有的关于复合材料的湿热老化研究主要针对环氧树脂、尼龙等材料[16]，对聚苯硫醚等高性能树脂基复合材料的研究还较少。聚苯硫醚由于其结构特性，具有优异的耐化学腐蚀性、热性能和力学性能等，广泛应用在耐高温、耐腐蚀等苛刻环境中，如油路冷却系统、船舶、航空航天等领域[17~19]。本文针对聚苯硫醚的极端使用环境，研究了短碳纤维增强聚苯硫醚复合材料在海水、冷却液、碱溶液3种环境中的湿热老化行为。跟踪其吸湿行为，监测其力学性能变化，并结合红外分析、热分析及SEM形貌观察，从宏观和微观上揭示了PPS/CF复合材料的湿热老化机理，为航空航天冷却系统、海洋装备等严苛环境中PPS/CF复合材料的长期服役提供了理论支持。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

主要原材料是20%短切碳纤维增强聚苯硫醚复合材料，由南京特塑复合材料有限公司提供；其余药品均购自成都科隆化学品有限公司。

### 1.2 试样制备

首先将短切碳纤维增强聚苯硫醚复合材料粒料在80 ℃鼓风干燥烘箱中干燥24 h以去除原料中的水分，然后通过EM80-V型震雄注塑机将粒料注塑成力学性能测试标准样条，注塑工艺参数如Tab.1所示。随后将标准样条在120 ℃退火8 h以消除内应力。

拉伸样条根据国标GB/T 1040.2-2006制备，试样尺寸为150 mm × 10 mm × 4 mm（长×宽×厚）。

弯曲样条根据国标GB/T 9341-2008制备，试样尺寸为80 mm × 10 mm × 4 mm（长×宽×厚）。

冲击样条和吸湿样条同弯曲样条尺寸一致。

### 1.3 湿热老化方法

将PPS/CF复合材料试样分别置于海水（SW）、冷却液（CL）和碱溶液（AL）3种溶液介质中，在恒温水浴下进行湿热老化实验，实验温度为25 ℃，50 ℃和80 ℃。

人工海水成分配比参考标准ASTMD 1141-98，海水溶液配比如Tab.2所示，pH调至8.2。

**Tab. 2 Seawater composition ratio**

| Item | Content/(g·L$^{-1}$) | Item | Content/(g·L$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| NaCl | 24.53 | $NaHCO_3$ | 0.201 |
| $MgCl_2$ | 5.2 | KBr | 0.101 |
| $Na_2SO_4$ | 4.09 | $H_3BO_3$ | 0.027 |
| $CaCl_2$ | 1.16 | $SrCl_2$ | 0.025 |
| KCl | 0.695 | NaF | 0.003 |

冷却液为40 #航空冷却液，执行标准为GJB6100A，产自抚顺欧力石化有限公司，主要成分为乙二醇、水等。

碱溶液参照ACI 440.3R-04：加固混凝土结构的纤维增强聚合物的实验方法进行溶液配置，pH为12.6 ~ 13.0。

**Tab. 3 Composition ratio of alkali solution**

| Item | Content/(g·L$^{-1}$) |
|---|---|
| $Ca(OH)_2$ | 118.5 |
| NaOH | 0.9 |
| KOH | 4.2 |

### 1.4 测试与表征

**1.4.1** 吸水率测试：参照标准ASTM D5229对PPS/CF复合材料试样进行吸湿行为研究。在规定时间间隔内，将试样取出，用吸水纸擦干试样表面残留水分，使用测量精度为0.1 mg的电子分析天平进行称量，并记录样品质量，为更好观察水的扩散行为，取样时间采取前密后疏的区间规律进行取样。称量后，立即将试样放回原湿热老化环境中，试样吸水率由式(1)计算所得

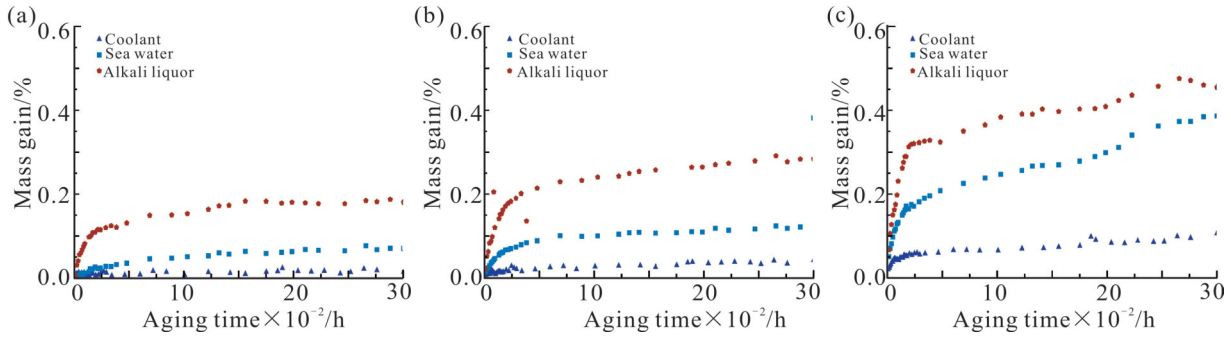



**Fig. 1 Moisture absorption curve of PPS/CF composites in seawater, coolant and alkali solution: (a) 25 °C; (b) 50 °C; (c) 80 °C**

$$M_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中:$M_t$——吸湿率;$m_0$和$m_t$——分别为湿热老化前后样品质量。

**1.4.2** 力学性能测试:通过万能材料试验机(美特斯工业有限公司,MTS Exceed E45)和摆锤式冲击试验机(美特斯工业有限公司,ZBC8400-B),对湿热老化前后PPS/CF复合材料试样进行拉伸、弯曲和冲击性能测试。参照国标GB/T 1040.2-2006进行拉伸性能测试,拉伸速度为10 mm/min,测试6组样品数据取平均值;按照国标GB/T 9341-2008进行弯曲性测试,加载速度为2 mm/min,测试6组样品数据取平均值;根据国标GB/T 1843-2008对悬臂梁的无缺口冲击强度进行冲击性能测试,摆锤能量为4 J,测试8组样品取平均值。

**1.4.3** 热稳定性分析:取湿热老化后试样表面树脂粉末,通过热重分析仪(METTLER TOLEDO,TGA2)和差示扫描量热分析仪(METTLER TOLEDO,DSC31500)研究不同环境对材料热稳定性的影响。

热重分析(TGA)采用氮气氛围,温度范围为25~800 ℃,升温速率为10 ℃/min。

差示扫描量热分析(DSC)在氮气氛围下进行,称取5~8 mg试样表面粉末,测试温度范围为25~330 ℃。先以30 ℃/min快速升温,并在350 ℃保持5 min以消除样品热历史,然后以10 ℃/min冷却后再升温,记录材料的结晶和熔融过程。

**1.4.4** 微观形貌表征:使用扫描电子显微镜(美国FEI, Nova NanoSEM450)对湿热老化前后试样冲击断面进行观察,先进行喷金,使试样表面导电,扫描电子显微镜加速电压为5 kV。

**1.4.5** 化学结构分析:所有样品均为固体,采用傅里叶变换红外光谱仪(美国THERMO FISHER公司,Nicolet is50)的ATR模式对固体表面进行测量,测试波数范围为400 ~ 4000 $cm^{-1}$,扫描次数为32次,分辨率为4 $cm^{-1}$。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PPS/CF复合材料的吸湿行为

在不同湿热老化环境中,PPS/CF复合材料的吸湿曲线如Fig.1所示。在不同温度下,PPS/CF复合材料在3种溶液介质中的吸湿曲线均在初期快速增长,随后吸湿速率逐渐降低至平衡。经过3000 h的湿热老化后,25 ℃时PPS/CF复合材料在海水、冷却液和碱溶液3种溶液环境中的吸湿量分别为0.068%,0.015%和0.181%。50 ℃湿热老化后吸湿量分别为0.210%,0.043%和0.284%;80 ℃的吸湿率分别为0.386%,0.106%和0.455%。冷却液环境中,水分含量比例仅为50%左右,油水混合物的扩散较少,因此该环境中的吸湿率低于其余介质环境。而碱溶液环境中,由于$Ca(OH)_2$颗粒包覆在试样表面,导致其增重率远大于其余介质环境。对比发现,随着温度的升高,材料的吸湿速率增大,平衡吸湿率也随之增大,这表明吸湿速率和平衡吸湿率均与环境温度有关。随着温度的升高,扩散进入复合材料的水分子活性增加,扩散能力增强;温度升高,加剧了树脂基体内部分子运动,导致复合材料吸湿初期速率加快,平衡吸湿率也随之增加。

### 2.2 湿热老化后PPS/CF复合材料的力学性能

**2.2.1** 拉伸性能:海水、冷却剂和碱溶液环境湿热老化的拉伸强度随老化时间的关系如Fig.2所示。在20 ℃湿热老化10000 h后,海水、冷却液、碱溶液环

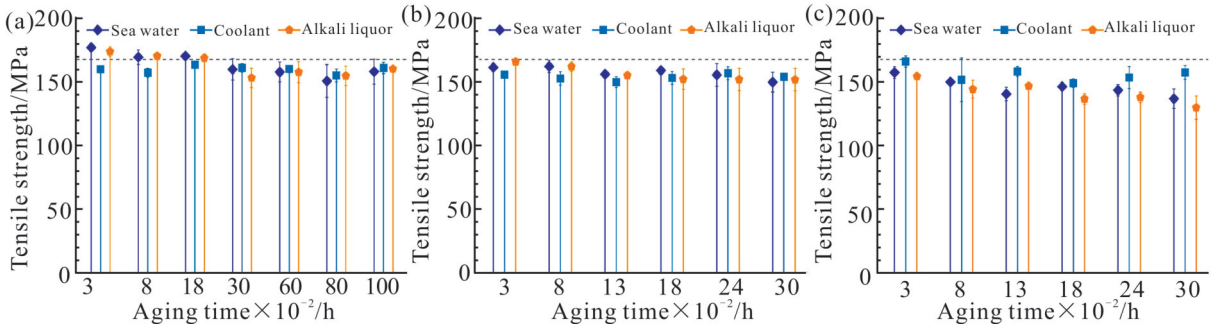



**Fig. 2 Tensile strength of PPS/CF composites in seawater, coolant and alkali solution: (a) 25 °C; (b) 50°C; (c) 80 °C**

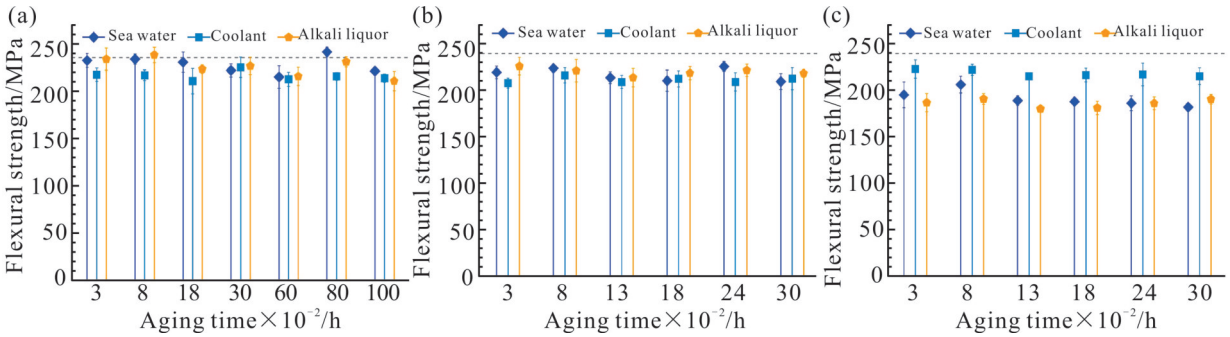



**Fig. 3 Flexural strength of PPS/CF composites in seawater, coolant and alkali solution: (a) 25 °C; (b) 50 °C; (c) 80 °C**

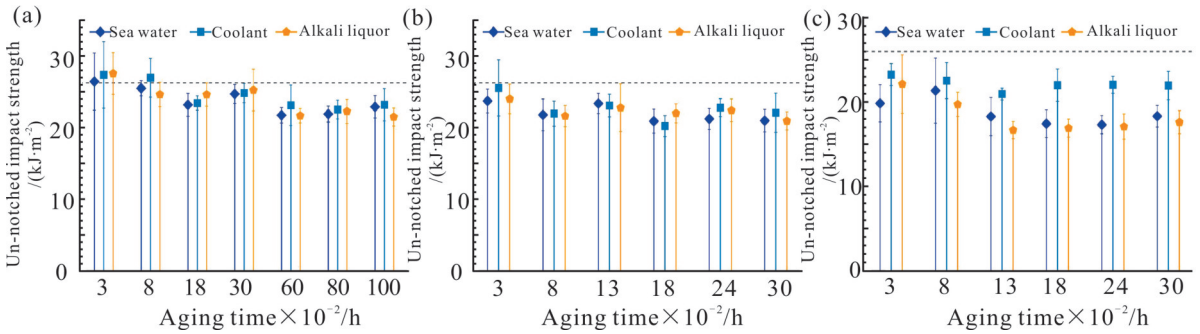



**Fig. 4 Impact properties of PPS/CF composites in seawater, coolant and alkali solution: (a) 25 °C; (b) 50 °C; (c) 80 °C**

境中PPS/CF复合材料拉伸强度从原始的169.01 MPa分别下降到157.46 MPa，160.25 MPa和159.58 MPa。经过接近14个月冷却液环境老化，PPS/CF复合材料的拉伸性能仅衰减5%～7%。随着温度的升高，复合材料力学性能衰减变得更加显著，如Fig.2 (b, c)所示。在50 ℃老化3000 h后，3种溶液环境拉伸强度分别149.20 MPa，153.27 MPa和151.21 MPa。当温度进一步升高至80 ℃时，拉伸强度分别衰减至136.22 MPa，156.81 MPa和129.28 MPa，除冷却液环境外，衰减了19%～24%。随着温度的升高，力学性能劣化加剧，与吸湿趋势相似，随着温度的升高，平衡吸湿率随之升高，高温时，吸湿量最大，性能衰减也最为严重。冷却液环境中，虽然聚苯硫醚对冷却液中的水分具有吸湿敏感性[20]，但冷却液环境中含水量只有50%，故该环境中吸湿率最低，性能衰减也最为缓慢。

**2.2.2** 弯曲性能：海水、冷却液和碱溶液环境中湿热老化后的弯曲强度随时间变化如Fig.3所示。20 ℃湿热老化后，PPS/CF弯曲强度由原来的235.01 MPa分别下降至220.68 MPa，213.15 MPa和210.18 MPa。同拉伸强度一样，低温时性能发生轻微衰减。50 ℃时，复合材料湿热老化后弯曲强度分别衰减至205.48 MPa，208.52 MPa，214.18 MPa。当温度进一步升高至80 ℃时，复合材料湿热老化后性能衰

减至178.57 MPa,211.13 MPa和186.93 MPa,分别衰减了24.02%,10.16%和20.46%。弯曲强度的性能衰减与拉伸强度衰减程度相似,同样只有冷却液环境性能衰减程度较低,其余环境衰减程度基本相当,说明PPS/CF复合材料在复杂环境中仍具有优异的力学性能。

**2.2.3** 冲击强度:相较于拉伸强度和弯曲强度,湿热老化对PPS/CF复合材料冲击强度影响更为严重,如Fig.4所示。25 ℃湿热老化10000 h后,冲击强度从初始的26.17 kJ/m$^2$衰减至22.82 kJ/m$^2$,23.11 kJ/m$^2$,21.41 kJ/m$^2$,衰减程度相似。当温度升高至50 ℃时,冲击强度衰减严重,该温度湿热老化3000 h后冲击强度分别衰减了20.14%,15.96%和20.30%。温度升高至80 ℃,冲击强度进一步衰减,在吸湿初期变急剧衰减,湿热老化3000 h后衰减至18.44 kJ/m$^2$,22.11 kJ/m$^2$和17.73 kJ/m$^2$,除冷却液环境外,其余2种溶液环境中PPS/CF复合材料力学性能衰减高达30%。

值得注意的是,力学性能的衰减与吸湿率变化趋势一致,在前期性能衰减迅速,后期逐渐趋于平缓至稳定。力学性能的损伤可能是由于水分子侵入破坏了纤维和树脂基体的界面,导致界面结合减弱。老化温度对力学性能的衰减有加速作用,温度越高,达到最终平衡状态的时间越短,性能衰减更为严重。不同服役环境中,冷却液环境由于水分含量(50%)相对较低,故该环境中的力学性能衰减较小,说明相对湿度越高,湿热老化后复合材料力学性能劣化越严重。

## 2.3 湿热老化机理

以80 ℃样品为例,对复合材料湿热老化前后的样品进行红外光谱分析,结果如Fig.5所示。湿热老化前后,谱图未出现峰的产生、消失及偏移,说明长时间的湿热老化未对PPS/CF复合材料表面树脂化学结构产生较大影响,未发生分子链降解,这与碳纤维增强聚苯硫醚复合材料优异的腐蚀抗性相关,树脂及碳纤维成分稳定,湿热老化后未发生变化。

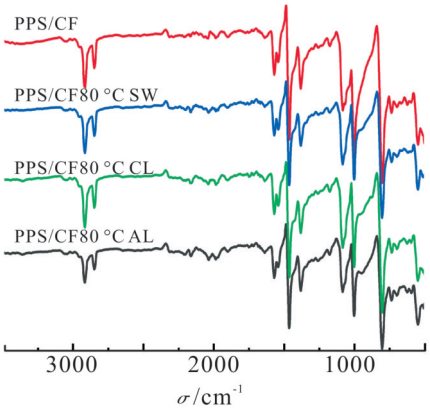



**Fig. 5 Fourier transform infrared spectra of PPS/CF composites before and after hygrothermal aging**

通过热重分析和差示扫描量热法对湿热老化前后的样品进行了热稳定性分析,结果如Fig.6和Tab.4所示。未老化样品在279.9 ℃有1个吸热峰,220.8 ℃有1个结晶放热峰,不同服役环境中湿热老化后,熔融温度基本保持不变,结晶温度略有升高,这可能是由于湿热老化引起碳纤维与PPS基体界面区域的变化(界面脱粘及微裂纹),这些区域可作为额外的成核位点,成核位点的增加能促进结晶,导致结晶温度升高,因为更多的成核位点使得结晶在较高温度即可进行。PPS/CF复合材料在不同服役环境中湿热老化前后的TGA曲线没有明显差别(Fig.6(c, d)),PPS/CF复合材料老化后的残留量略有升高,这可能是由于在湿热老化过程中纤维表面上浆剂水解,导致可溶性组分或低分子量物质溶解消失,导致热重分析过程不再发生降解,热失重比例减少,残留量偏高。

通过SEM对湿热老化前后的冲击断面进行微

**Tab. 4 TGA characteristic parameters of composites after hygrothermal aging in different service environments**

| Environment | $T_{i5\%}$/℃ | Peak temperature/℃ | Residual carbon content at 800 ℃/% |
|---|---|---|---|
| Unaged | 487.4 | 538.6 | 53.9 |
| Seawater | 483.6 | 536.2 | 54.6 |
| Coolant | 486.6 | 538.0 | 55.0 |
| Alkali liquor | 487.6 | 537.4 | 53.6 |

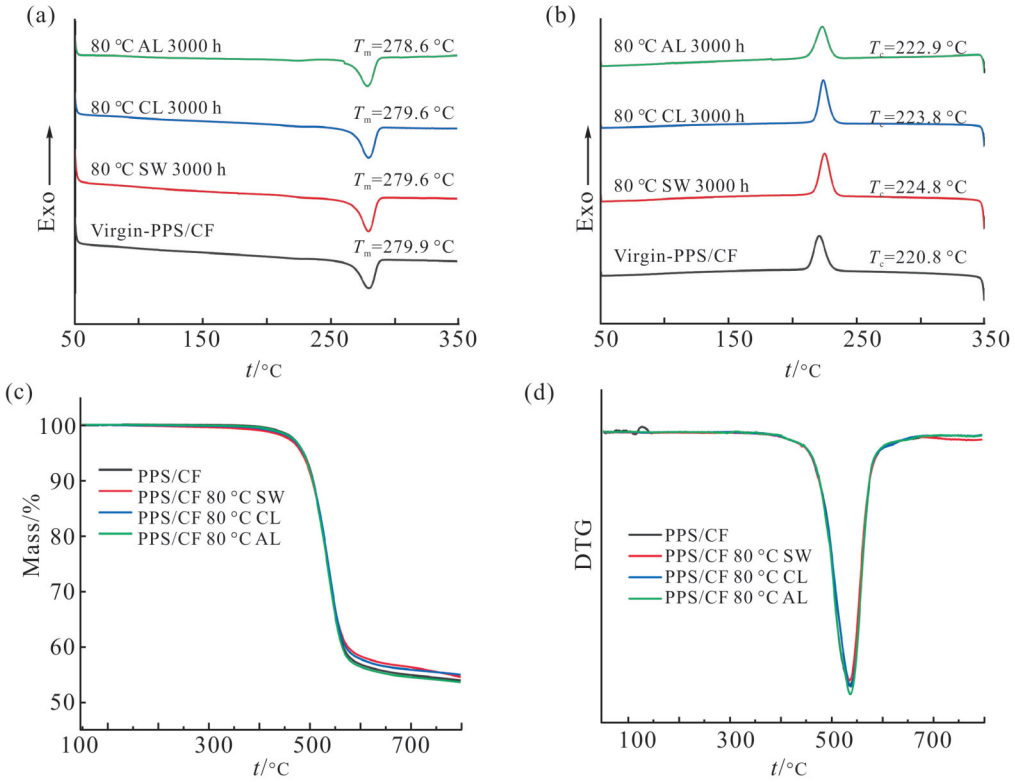



**Fig. 6 Thermal properties of PPS/CF composites before and after hygrothermal aging: (a) DSC heating curves; (b) DSC cooling curves; (c) TGA curves; (d) DTG curves**

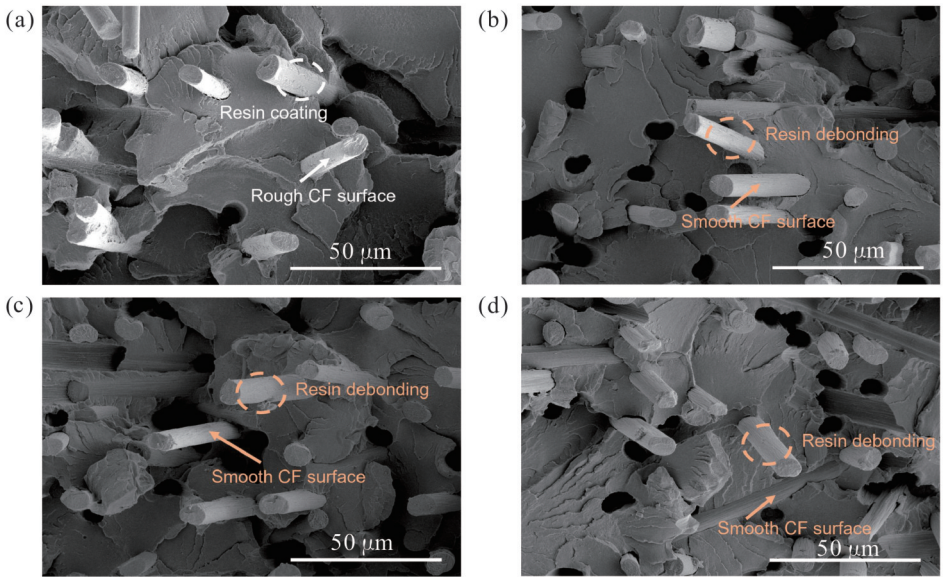



**Fig. 7 SEM of impact fracture surfaces of PPS/CF composites before and after hygrothermal aging: (a) unaged; (b) 80 ℃ seawater hygrothermal aging for 3000 h; (c) 80 ℃ coolant hygrothermal aging for 3000 h; (d) 80 ℃ alkaline solution hygrothermal aging for 3000 h**

观形貌分析。Fig.7(a)为PPS/CF复合材料未老化的断面形貌,裸露的纤维表面粗糙,有大量树脂残留,说明纤维和树脂基体之间存在良好的界面结合。经过长时间的湿热老化后 (Fig.7(b~d)),裸露的纤维表面变得光滑,湿热老化导致纤维与树脂基体界面遭受破坏,发生了严重的树脂脱粘现象。纤维与树脂基体的脱粘是导致宏观力学性能下降的主要原因。湿热环境中,在湿热和温度的耦合作用下,一方面水分子的侵入使界面层遭受破坏;另一方面,由于纤维与树脂基体之间存在吸湿膨胀差异和热膨胀差异,在湿热耦合作用下,由于膨胀差而产生内应力,进一步破坏了纤维-树脂基体界面,从而使力学性能下降。

## 3　结论

本文针对不同服役环境、不同温度的PPS/CF复合材料进行湿热老化研究。结果表明,高温高湿耦合作用对复合材料力学性能损伤最为严重,其中拉伸强度和弯曲强度下降约24%,而冲击强度衰减可达30%。通过热分析和红外光谱分析证实,湿热老化过程中并未改变树脂基体化学结构,但纤维-树脂基体界面是造成力学性能退化的关键区域,其损伤机理可归纳为以下3个方面。

(1)碳纤维与树脂基体之间存在吸湿膨胀和热膨胀差异,界面处产生内应力,应力集中导致界面脱粘,无法有效传递应力;

(2)纤维表面上浆剂水解,造成界面过渡层结构损伤,降低了PPS/CF复合材料界面结合;

(3)水分子的侵入加速了界面微裂纹的萌生与拓展。

值得注意的是,PPS/CF复合材料在长期湿热老化后仍展现出优异的力学性能,尤其是在冷却液环境中仍具有约90%的力学性能保持率。这种优异的抗湿热老化特性,在航空航天冷却系统、海洋装备等极端服役环境具有重要应用价值,能够有效保证装备在复杂工况下的长期服役,为高性能热塑性复合材料的应用设计提供了重要理论依据。

**参考文献:**


[1] Rouleau L, De S O, Deü J F. Vibration prediction of rotating composite fan blades comprising viscoelastic damping treatments [J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 536: 117135.

[2] Fazlali B, Lomov S V, Swolfs Y. Concerns in tension-tension fatigue testing of unidirectional composites: specimen design and test setup[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 272: 111213.

[3] Shi M, Han Q, Liu X, *et al*. Coupling bionic design and application of flow curved surface for carbon fiber composite fan blade[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 1797-1807.

[4] Jang J, Im H G, Lim D, *et al*. Preparation of high-performance transparent glass-fiber reinforced composites based on refractive index-tunable epoxy-functionalized siloxane hybrid matrix[J]. Composites Science and Technology, 2021, 201: 108527.

[5] Wang Q, Chen T, Wang X, *et al*. Recent progress on moisture absorption aging of plant fiber reinforced polymer composites[J]. Polymers, 2023, 15: 4121.

[6] Robert M, Roy R, Benmokrane B. Environmental effects on glass fiber reinforced polypropylene thermoplastic composite laminate for structural applications[J]. Polymer Composites, 2010, 31: 604-611.

[7] 王永疆, 罗琦, 蒋浩, 等. 碳纳米管对复合材料耐湿热老化过程的健康监测[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(2): 105-110.
Wang Y J, Luo Q, Jiang H, *et al*. Health monitoring of carbon nanotubes on humidity and heat resistance of composite materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023,3 9(2): 105-110.

[8] 李玥, 叶林, 赵晓文. 碳纤维增强环氧树脂复合材料盐雾腐蚀行为及其老化分子机制[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(5): 91-97.
Li Y, Ye L, Zhao X W. Salt-spray corrosion behavior and aging molecular mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(5): 91-97.

[9] Liu L, Zhao Z, Chen W, *et al*. An experimental investigation on high velocity impact behavior of hygrothermal aged CFRP composites[J]. Composite Structures, 2018, 204: 645-657.

[10] Korkees F, Alston S, Arnold C. Directional diffusion of moisture into unidirectional carbon fiber/epoxy composites: experiments and modeling[J]. Polymer Composites, 2018, 39: E2305-E2315.

[11] Vuković F, Walsh T R. Moisture ingress at the molecular scale in hygrothermal aging of fiber–epoxy interfaces[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12: 55278-55289.

[12] Sang L, Wang C, Wang Y, *et al*. Effects of hydrothermal aging on moisture absorption and property prediction of short carbon fiber reinforced polyamide 6 composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 153: 306-314.

[13] Li J, Liu Z, Zhao Y. Effects of cyclic hygrothermal environments on interfacial behavior and properties of CF/EP composites[J]. Composites Communications, 2025, 53: 102229.

[14] Xian G, Bai Y, Qi X, *et al*. Hygrothermal aging on the mechanical property and degradation mechanism of carbon fiber reinforced epoxy composites modified by nylon 6[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 6297-6306.

[15] 高立花, 叶林. 尼龙6湿热老化寿命预测[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(5): 111-114.
Gao L H, Ye L. Service life prediction of nylon 6 under hydrothermal ageing[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(5): 111-114.

[16] Ma Y, Jin S, Yokozeki T, *et al*. Effect of hot water on the mechanical performance of unidirectional carbon fiber-reinforced nylon 6 composites[J]. Composites Science and Technology, 2020, 200: 108426.

[17] Wang W J, Dong Y, Wei Z M, *et al*. Hydrothermal aging of short glass fiber reinforced polyphenylene sulfide composites and property prediction[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 217: 110503.

[18] 徐奔, 张守玉, 水锋, 等. 连续碳纤维增强聚苯硫醚复合材料的3D打印及力学性能优化[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(7): 84-92.
Xu B, Zhang S Y, Shui F, *et al*.3D printing and mechanical properties optimization of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022,38 (7): 84-92.

[19] 俞大为, 余婷, 朱金铭, 等. 多巴胺对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料界面性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(8): 30-38.
Yu D W, Yu T, Zhu J M, *et al*. Effect of dopamine on interface performance of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(8): 30-38.

[20] Bourgogne Q C P, Bouchart V, Chevrier P, *et al*. Influence of temperature and cooling liquid immersion on the mechanical behavior of a PPS composite: experimental study and constitutive equations[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2: 368.

# Hygrothermal Aging Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polyphenylene Sulfide Composites Under Different Liquid Media

Xiaoting Qing[1], Yang Yang[2], Xu Wang[2], Jiacao Yang[3,4], Yuan Dong[1], Hongyu Lin[1], Zhimei Wei[3,4]
Jie Yang[3,4], Xiaojun Wang[3,4]

(*1. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Shanghai Aircraft Manufacturing Company, Shanghai 201324, China; 3. Analytical and Testing Center, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 4. National Key Laboratory of Advanced Polymer Materials (Sichuan University), Chengdu 610065, China*)

**ABSTRACT:** Carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (PPS/CF) composites were widely used due to their excellent mechanical properties and processing performance. However, the temperature and humidity in the service environment can affect the performance of the composites, seriously impacting their safety and stability during use. In this study, the hygrothermal aging behavior of polyphenylene sulfide/short carbon fiber (PPS/CF) composites in seawater, coolant, and alkaline solutions was investigated. The results indicate that the moisture absorption rate of the composites increases with rising temperature in all three environments, leading to higher equilibrium moisture uptake. Enhanced moisture absorption is correlated with more severe mechanical property degradation of the composites, with impact strength decreasing by up to 30%. DSC, TGA, and FT-IR analyses reveal no changes in thermal properties or functional groups of the composites during hygrothermal aging. Microscopic characterization suggests that the mechanical deterioration is attributed to interface degradation between carbon fibers and the resin matrix, which hinders effective stress transfer.

**Keywords:** polyphenylene sulfide; composites; carbon fibers; hygrothermal aging; mechanical properties