

# 原位改性石墨烯增强的抗腐蚀、可自愈及抗冲击 天冬聚脲弹性体纳米复合材料的研究

孟庆实<sup>1</sup>, 孟渤皓<sup>1,2</sup>, 刘建邦<sup>2</sup>, 付雨鑫<sup>1</sup>, 于音<sup>2,3</sup>, 韩森森<sup>1</sup>

(1.沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136; 沈阳聚盛新材料技术有限公司, 沈阳 110136;

3.东北大学医学与生物信息工程学院, 沈阳 110167)

**摘要:** 针对天冬聚脲(PAE)在复杂环境下防护性能不足的问题,本研究利用原位接枝技术制备了改性石墨烯(F-GNP)增强的PAE纳米复合材料。表征证实F-GNP与基体界面相容性显著改善。试验表明,0.3%的F-GNP构建了致密阻隔网络,显著提升了涂层的耐腐蚀性和抗冲击强度。尽管自愈合效率微降至82.93%,但该体系实现了强韧性与耐候性的协同提升,为高性能航空防护涂层开发提供了重要支撑。

**关键词:** 抗腐蚀; 可自愈; 抗冲击; 天冬聚脲; 纳米增强; 改性石墨烯

中图分类号:TB332;TQ637

文献标志码:A

文章编号:1007-9548(2026)02-0001-06

## In-Situ Modified Graphene-reinanced Corrosion-resistant, Self-healing and Impact-resistant Aspartic Polyurea Elastomer Nanocomposites

MENG Qing-shi<sup>1</sup>, MENG Bo-hao<sup>1,2</sup>, LIU Jian-bang<sup>2</sup>, FU Yu-xin<sup>1</sup>, YU Yin<sup>2,3</sup>, HAN Sen-sen<sup>1</sup>

(1.College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2.Shenyang Jusheng New Material Technology Co., Ltd., Shenyang 110136, China;

3.College of Medicine and Bioinformatics Engineering, Northeastern University, Shenyang 110167, China)

**Abstract:** To address the insufficient protective performance of polyaspartic ester (PAE) in complex environments, this study prepared functionalized graphene (F-GNP) reinforced PAE nanocomposites via in-situ grafting technology. Characterization confirmed significant improvement in the interfacial compatibility between F-GNP and the matrix. Experiments showed that 0.3% F-GNP constructed a dense barrier network, significantly enhancing the corrosion resistance and impact strength of the coatings. Although the self-healing efficiency slightly decreased to 82.93%, the system achieved a synergistic improvement in toughness and weather resistance, providing significant support for the development of high-performance aviation protective coatings.

**Key words:** anti-corrosion; seal-healable; impact resistant; polyaspartate polyurea; nano enhancement; modified graphene

## 0 引言

航空材料创新是国家综合实力与国防安全的核心

收稿日期: 2025-05-09

**作者简介:** 孟庆实(1981—),男,博士,教授,主要从事二维纳米材料制备、高分子材料改性、纤维增强树脂复合材料等方面研究工作。E-mail: mengqingshi@hotmail.com。

战略要素,其发展聚焦轻量化、高强韧及智能防护等关键性能突破。当前,多功能复合材料体系(透波/吸波/梯度功能)已在飞行器关键部件实现工程化应用,其中抗冲击防护材料因在结构防护与能量耗散方面的独特优势成为研究前沿。传统抗冲击材料(铝/钛合金、陶瓷)虽具有高强度/耐热性优势,但面临高密度、低韧性及自修复能力缺失等瓶颈,难以满足新一代空天装备

对材料综合性能的严苛需求。

聚脲弹性体(PU)凭借高强韧特性及独特微相分离结构<sup>[1]</sup>,其力学性能源于分子层面的拓扑设计:硬段(异氰酸酯基团,  $T_{gH} > R_T$ )与软段(端氨基基团,  $T_{gS} < R_T$ )通过脲键构筑的分子框架赋予其耐热、耐腐蚀特性,热力学不相容性驱动软硬段形成纳米级相分离<sup>[2]</sup>。极性梯度与氢键协同作用进一步强化相分离效应,构建“玻璃态-高弹态”双连续结构,实现刚-韧协同增强。

聚脲弹性体体系历经三代演进:芳族体系(MDI基)具备高柔韧/耐腐蚀特性<sup>[2]</sup>,但苯环光氧化倾向及反应动力学失配导致界面失效;脂族体系通过异氰酸酯-扩链剂协同设计<sup>[3]</sup>优化耐候性,因成本约束商业化受限;天冬氨酸酯聚脲实现芳/脂族优势集成(力学/耐候性协同提升,反应可控性增强),展现出显著工程适应性<sup>[4]</sup>。然而,单一聚脲体系仍存在抗冲击/自修复协同优化瓶颈,需通过纳米复合改性突破性能边界。

聚脲有机-无机杂化改性策略通过引入纳米增强相(如金属/碳基填料)协同提升力学与功能特性<sup>[5]</sup>。典型复合技术(溶液共混、溶胶-凝胶、原位聚合等)<sup>[6]</sup>研究表明:2%纳米铜使聚脲硬度提升 20.25%(耐腐蚀性同步增强),而石墨烯(GNP)在拉伸强度及断裂伸长率协同提升方面优于氧化石墨烯(GO)体系<sup>[7-8]</sup>。

基于有机-无机协同策略,本研究通过原位聚合构筑聚脲胺功能化石墨烯(F-GNP)增强的天冬聚脲复合材料。石墨烯的二维纳米片层结构赋予其高比表面与应力传递优势<sup>[9]</sup>,但其  $\pi$ - $\pi$  堆积诱导的界面团聚效应需通过共价功能化改性克服。通过聚脲胺接枝工程调控界面相容性,制备一种兼顾抗冲击-自修复-耐候的航空防护材料,为航空抗冲击防护材料的界面工程提供新范式。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料及设备

本试验所用材料包括:可膨胀石墨粉(Asbury 碳材料公司)用于制备石墨烯纳米片;改性剂及聚脲合成原料选用 Huntsman 公司 Jeffamine<sup>®</sup> D2000 和 T5000 端氨基聚脲、Covestro 公司异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)和 Desmophen<sup>®</sup> NH1420 聚天门冬氨酸酯;溶剂无水乙醇和 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)分别购自永大化学试剂有限公司和富宇精细化工有限公司。

试验设备涵盖制备与测试两类:制备设备包括 SY-MF-700 智能马弗炉、F-040 型超声振荡器、F-P2000 型高能行星球磨机、GM-05A 型隔膜真空泵、XMTD-702 型集热式磁力恒温搅拌器和 XMA-2000 型电热鼓风干燥箱;性能测试设备包括 CHI660E B19038 型电化学工作站、Nicolet iS 10 型傅里叶红外

光谱仪、TGA-50 型热重分析仪、LRGA-3200 型共焦显微拉曼光谱仪和 XJJY-50 型简支梁冲击试验机。

### 1.2 石墨烯纳米片的制备及表面改性

石墨烯纳米片(GNP)通过热膨胀-超声剥离法制备:可膨胀石墨经 800 °C 热膨胀 1 min 后,在无水乙醇中超声剥离 48 h,经真空抽滤及 80 °C 干燥 24 h 获得。随后采用球磨法实现表面功能化修饰:将 GNP(0.05 g)以质量比 1:20 与 D2000 在 DMF 溶剂中混合,加入氧化锆球于氮气氛围下进行球磨(400 r/min,公转/自转比 1:2,8 h)。最终产物经抽滤及 65 °C 干燥 24 h 制得 D2000 功能化石墨烯纳米片(F-GNP)。

### 1.3 天冬聚脲改性石墨烯纳米复合材料的制备

天冬聚脲改性石墨烯纳米复合材料通过预聚-扩链法制备<sup>[10]</sup>:将 F-GNP 经 DMF 研磨-超声协同分散后,与脱水处理的 D2000/T5000 混合体系(50 kPa/80 °C/1 h)在氮气保护下进行异氰酸酯化反应(IPDI,冰浴预反应 30 min→80 °C 油浴 30 min)。预聚物与 F-GNP 分散液复合后,经 3 h 低速搅拌引入 NH1420 扩链剂,放入模具成型后通过真空除气泡(1 min)及 65 °C/72 h 热固化制得。对照组材料通过 F-GNP→GNP 替代制备,其余工艺参数保持一致。

### 1.4 测试与表征

#### 1.4.1 改性石墨烯结构测试

本研究中,傅里叶变换红外光谱(FTIR)精确揭示了官能团演变,成功追踪到改性过程中新化学键的形成;热重分析(TGA)通过梯度热分解行为定量评估了接枝密度与键合强度,为接枝率计算提供热力学依据;拉曼光谱则通过 D/G 峰强比变化深入解析了  $sp^2$  杂化结构的扰动程度,从晶格振动维度佐证了共价接枝对石墨烯电子结构的重构效应。这种多维度表征体系实现了从化学组成、热稳定特性到电子结构演变的协同验证。

#### 1.4.2 天冬聚脲改性石墨烯抗冲击性能测试

本研究使用简支梁冲击试验机评估 F-GNP/PAE 涂层对航空基材的增强效果。针对铝合金基材,设置 25 J 冲击能量和 60 mm 刃口间距;环氧树脂和碳纤维复合材料则采用 15 J 冲击能量和 42 mm 刃口间距。自愈合性能在 65 °C 真空环境下对预损伤样品进行 24 h 修复,采用显微观测和二次冲击强度恢复率验证修复效果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 改性石墨烯结构分析

#### 2.1.1 红外光谱分析

在改性石墨烯与 D2000 接枝反应的验证中,傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析显示(图 1),接枝产物在

1 600  $\text{cm}^{-1}$  处出现显著吸收峰,该峰归属于 C=N 伸缩振动,表明氨基或亚胺结构的形成。类似的吸收峰可归因于氮掺杂结构的生成<sup>[10]</sup>。D2000 分子中的伯胺/仲胺基团与石墨烯表面羧基或环氧基的反应可能形成 C—N 键,并通过共轭效应导致吸收峰红移至 1 600  $\text{cm}^{-1}$  附近<sup>[11]</sup>。此外,D2000 中的 C—O—C 和氨基(—NH<sub>2</sub>)也可能与石墨烯表面发生化学作用。未改性样品在 1 580~1 620  $\text{cm}^{-1}$  区域无显著吸收峰,进一步证明 D2000 中的—NH<sub>2</sub> 与石墨烯表面发生了相互作用。

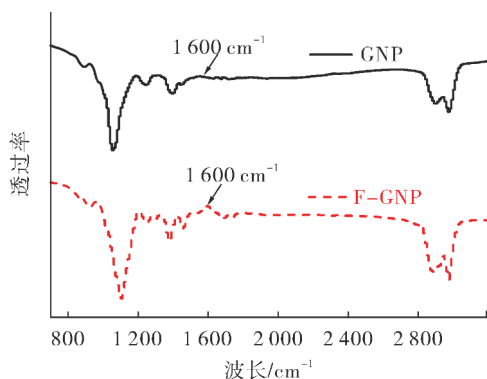


图1 GNP 和 F-GNP 的红外光谱

### 2.1.2 热重分析

为了验证石墨烯纳米片的表面改性,本试验进行了 TG 热重分析(见图 2)。对比 F-GNP 与 GNP 的热分解行为,发现两者在热分解过程中呈现相似的失重趋势,但改性样品在 300~500  $^{\circ}\text{C}$  区间内的失重率更高( $\Delta W=23.5\%$  vs.  $14.8\%$ )。这一现象可归因于接枝分子热分解导致的额外失重。GNP 的失重主要来源于残留含氧官能团的脱除及碳骨架的氧化分解,而 D2000 的醚键和氨基在高温下发生断裂,释放小分子气体(如 NH<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>),导致更高的失重率。类似研究表明,接枝率与失重率呈正相关<sup>[12]</sup>。改性样品在高温区(600  $^{\circ}\text{C}$ )的残余质量略低于未改性样品,这可能是由于接枝反应破坏了石墨烯的共轭结构,降低了热稳定性,结果与氨基改性石墨烯的热分解行为一致。

### 2.1.3 拉曼光谱分析

拉曼光谱分析(图 3)表明,F-GNP 的 D/G 峰强度同步降低,归因于 D2000 物理吸附形成的界面屏障效应:首先表面连续覆盖层阻碍激光—sp<sup>2</sup> 结构耦合,降低散射效率,其次吸附层增强热耗散,抑制声子激发,最后面内/面外应力诱导晶格畸变,引发 G 峰位移及电子能带重构<sup>[13]</sup>。该非破坏性界面工程证实改性以物理吸附主导,未显著破坏石墨烯本征 sp<sup>2</sup> 结构,为表面接枝提供了光谱学证据。

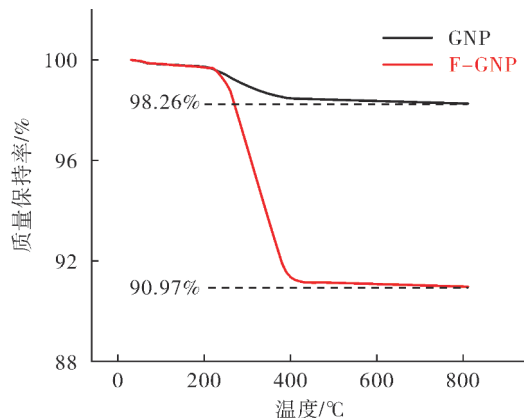


图2 GNP 和 F-GNP 的热重曲线

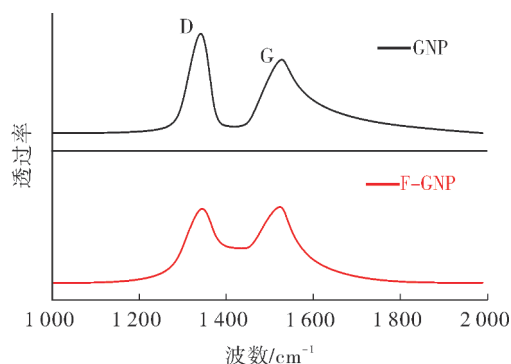


图3 GNP 和 F-GNP 的拉曼光谱

## 2.2 天冬聚脲改性石墨烯纳米复合材料抗冲击性能分析

天冬聚脲及其复合材料的抗冲击强度自愈合性能分析见图 4,其中,a 为铝合金基材,b 为 CFRP 基材,c 为环氧树脂基材天冬聚脲改性石墨烯纳米复合材料。

抗冲击测试结果表明,0.3%F-GNP/PAE 复合材料显著提升了不同航空基材的抗冲击性能。具体而言,复合材料的冲击强度分别达 (619.97±4.2) kJ/m<sup>2</sup> (铝合金)、(327.54±6.77) kJ/m<sup>2</sup> (CFRP) 和 (63.45±0.93) kJ/m<sup>2</sup> (环氧树脂),较空白基材的提升效率分别为 76.49%、224.76% 和 317.16%。这一结果表明,F-GNP/PAE 复合材料在所有测试材料中均表现出优异的抗冲击性能,特别是环氧树脂材料增强效果最为显著。

与 GNP/PAE 体系相比,F-GNP/PAE 复合材料的抗冲击性能提升了 11.8% (铝合金)、10.31% (CFRP),这主要归因于 F-GNP 与聚脲之间的化学键合(脲键>氢键/范德华力)。化学键合增强了复合材料的界面结合力,使得石墨烯的均匀分散性得以更好地实现,从而促进了冲击能量的有效耗散。这一机制与文献中的研究一致,表明化学键合有助于提高复合材料的抗冲击强度<sup>[14-15]</sup>。

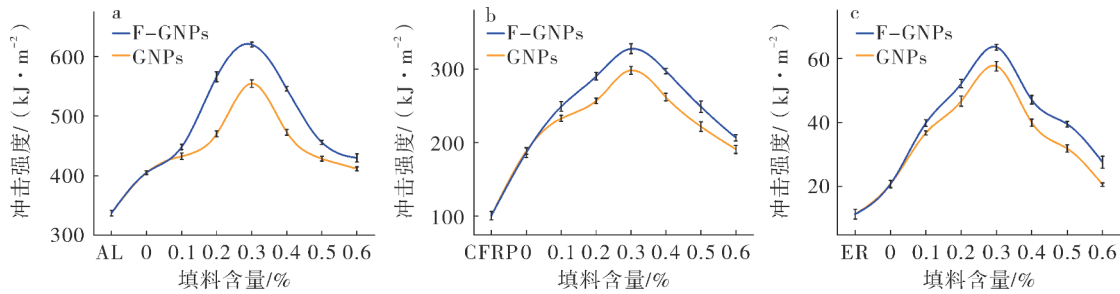


图4 天冬聚脲及其复合材料的抗冲击强度自愈合性能分析

不同材料之间提高效率的差异可归因于界面强度的调控机制。高界面强度的复合材料(如 CFRP)通过分层耗能的方式有效吸收冲击能量,表现出较高的抗冲击强度。而低界面强度的体系(如环氧树脂)则主要依赖基体的塑性变形来吸收冲击能量,因而提高效率较高。这一差异也反映了不同基材对复合材料性能提升的响应程度,进一步验证了界面强度对抗冲击性能的决定性影响。

试验结果表明,当 F-GNP 含量超过 0.3% 时,复合材料的抗冲击强度出现下降。这一现象可归因于以下耗能机制的协同作用,首先分子链重排导致的熵值降低,增强了材料的刚性,即应变诱导结晶硬化现象<sup>[6]</sup>,进而减少了能量的有效吸收;其次在冲击过程中,氢键的反复断裂和重组过程会消耗一定的能量,但这种能量消耗不够稳定,反而可能导致材料性能的下降<sup>[7]</sup>;最

后得益于微相分离结构引发的波速差异耗能,F-GNP 含量过高时,复合材料中的微观结构可能发生相分离,导致波速差异,从而引起额外的能量损失<sup>[18]</sup>。

在冲击强度试验中,填料含量为 0.3% 的 F-GNP/PAE 表现出最优的抗冲击防护效果。因此,本试验选取 0.3%F-GNP/PAE 进行自愈合性能评估,并与未改性体系进行比较。图 5 展示了自愈合试验前后缺口的变化。从图中可以看出,材料损伤区域在愈合 6 h 后呈现明显的裂纹收缩现象,其宏观缺口尺寸显著减小,当愈合时间延长至 12 h 时,试样表面缺口基本实现界面重构与形貌恢复,达到表观完全愈合状态。为系统评价自愈合过程对材料抗冲击性能的恢复效果,本研究进一步对愈合后试样实施二次冲击试验,通过对比原始试样与愈合试样的冲击强度保留率,定量表征复合材料的冲击损伤愈合效率。

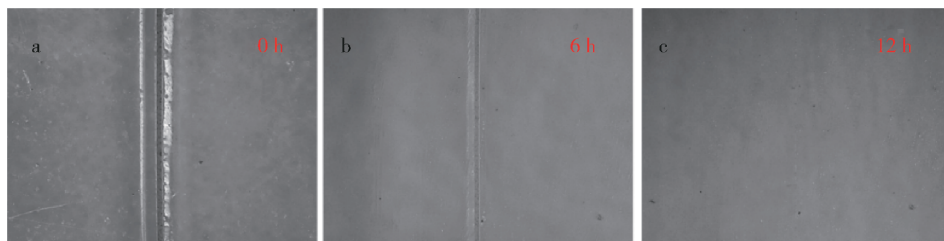


图5 冲击缺口愈合放大图

图 6 分别呈现了 0.3%F-GNP/PAE 在愈合前后对 3 种航空材料基材 (a 铝合金、b 碳纤维复合材料、c 环氧树脂)的抗冲击强度对比及愈合效率。结果显示,尽管 F-GNP/PAE 在抗冲击强度上展现出更高的防护性能,其愈合效率却较低,仅为 82.93%,分别比未改性体系(84.41%)低 1.48%、比纯聚天门冬氨酸酯聚脲(90.25%)低 7.32%,表现为 3 种体系中最差的自愈合效果。

聚脲分子具有优异的自愈合性能得益于其动态氢键网络<sup>[9]</sup>,见图 7,其原理涉及氢键的可逆断裂与重组、分子链的迁移与重排,以及天冬氨酸对氢键网络的增强

作用。聚脲主链中的脲键是氢键的主要来源。脲基中的 N—H(供体)和 C=O(受体)之间可形成强氢键。并且天冬氨酸分子中的氨基(—NH<sub>2</sub>)和羧酸基(—COOH)可额外提供氢键供体(N—H、O—H)和受体(C=O、O—),进一步扩展氢键网络。氢键的键能适中,既保证材料在常态下的稳定性(如力学强度),又能在局部应力或热扰动下可逆断裂,为分子链的移动和重组提供可能。

而在 F-GNP/PAE 体系中,愈合效率下降的原因更加复杂。F-GNP 通过共价键与聚天门冬氨酸酯(PAE)聚脲的分子链结合,这种共价键的存在使得材

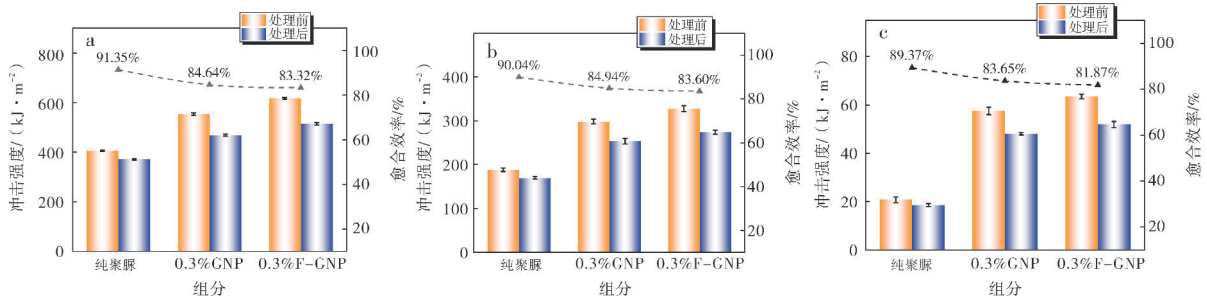


图6 愈合前后抗冲击强度对比

料的结构更加稳定,但在材料受到损伤时,这些共价键的破坏是不可逆的。由于共价键的不可逆断裂,分子链的重组能力受到显著限制,导致在损伤恢复过程中,原本可以通过氢键动态重组的分子链无法再有效地重新排列与缠结,从而大大降低了自愈合效率。与未改性体系相比,F-GNP/PAE 复合材料的自愈合能力受到更为明显的抑制。图5展示了电子显微镜下 F-GNP/PAE 的表面放大图,缺口附近区域颜色更深,表明在愈合过程中,石墨烯纳米片的存在干扰了分子链硬段间氢键的重组。这导致石墨烯纳米片在缺口处聚集,一定程度上降低了修复后 F-GNP/PAE 的抗冲击防护性能。

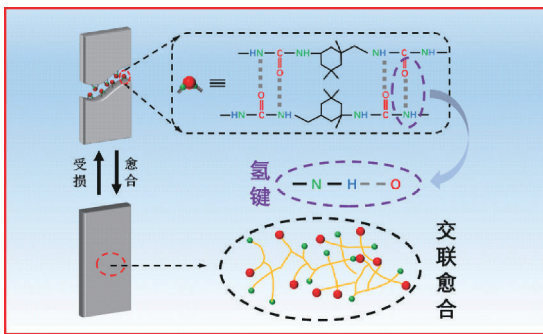


图7 天冬聚脲自修复机理模型

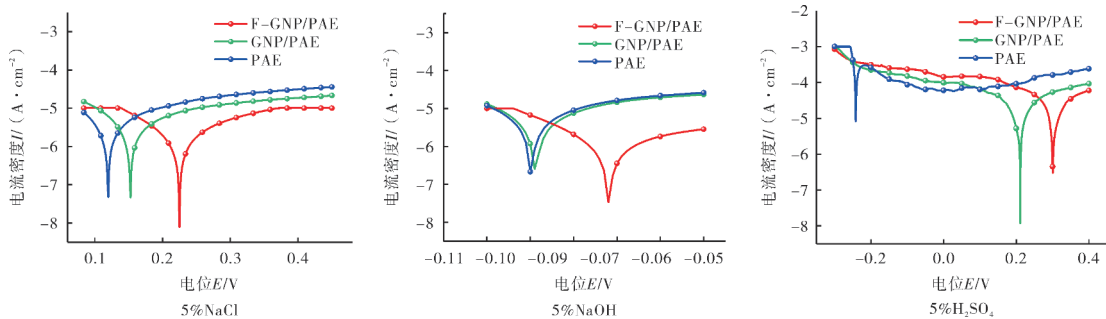


图8 天冬聚脲及其复合材料涂层塔菲尔曲线

然而,填料含量为 0.3%的未改性石墨烯(GNP)和改性石墨烯(F-GNP)的表现出现差异。0.3% F-GNP/PAE 的  $I_{corr}$  值仍低于其他体系,显示出较慢的腐蚀速

综上所述,纳米石墨烯在提高复合材料抗冲击性能的同时,对自愈合性能产生了抑制作用。这表明,界面结合的强度和交联密度虽然提升了材料的机械强度,但却与自愈合能力之间存在权衡。尽管本试验在某种程度上牺牲了自愈合性能,但在抗冲击性能方面却取得了显著的提升。试验结果表明,通过引入纳米石墨烯的复合材料虽然在自愈合效率上有所下降,但其在抗冲击强度方面表现出显著增强。这一发现表明,尽管自愈合能力有所折损,但材料在承受冲击载荷时的能量吸收和损伤恢复能力得到了有效改善。

### 2.3 天冬聚脲改性石墨烯纳米复合材料耐候性能分析

电化学测试揭示 F-GNP/PAE 涂层在浓度为 5% 的 NaCl、NaOH、 $H_2SO_4$  体系中具有最优耐蚀特性,详情见图8。塔菲尔极化分析表明,0.3%F-GNP/PAE 的腐蚀电位  $E_{corr}$  最高、电流密度  $I_{corr}$  最低,见表1,其腐蚀速率较纯 PAE 及 GNP/PAE 体系降低 1~2 个数量级。F-GNP 的纳米阻隔效应主要通过以下机制实现:首先,其高分散性有助于形成致密的增强网络,从而有效抑制腐蚀介质的渗透;其次,界面上的化学键合作用进一步优化了涂层的致密性,阻止了电化学腐蚀通道的形成<sup>[20]</sup>。

度和较好的耐腐蚀性,尤其在酸性溶液中表现尤为突出。而 0.3% GNP/PAE 的耐腐蚀性改善程度逊于同等含量的 F-GNP/PAE,这归因于未改性石墨烯在基体中

分散性较差,易形成团聚体,破坏了内部增强网络的完整性,导致阻隔性能下降,未能有效阻止腐蚀溶液渗透。综合  $E_{corr}$  和  $I_{corr}$  数据,0.3% F-GNP/PAE 在 3 种环境中均展现出最佳耐腐蚀性,凸显了适量改性石墨烯填料在提升涂层防护性能中的关键作用。

表 1 腐蚀参数拟合数据

腐蚀类型	样本类型	$E_{corr}/V$	$I_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
5%NaCl	PAE	0.120	$6.996 \times 10^{-6}$
	GNP/PAE	0.153	$5.831 \times 10^{-6}$
	F-GNP/PAE	0.225	$4.964 \times 10^{-6}$
5%NaOH	PAE	-0.009	$6.356 \times 10^{-5}$
	GNP/PAE	-0.089	$6.204 \times 10^{-5}$
	F-GNP/PAE	-0.072	$5.949 \times 10^{-5}$
5% $H_2SO_4$	PAE	-0.242	$7.896 \times 10^{-5}$
	GNP/PAE	0.211	$4.736 \times 10^{-5}$
	F-GNP/PAE	0.301	$3.873 \times 10^{-5}$

### 3 结语

本研究揭示了改性石墨烯纳米片(F-GNP)对天冬聚脲(PAE)涂层性能的多方面影响。光谱学表征(FTIR/TG/拉曼)证实了 Jeffamine® D2000 通过共价接枝实现石墨烯功能化,其热分解失重增量( $\Delta W=23.5%$ )。抗冲击测试表明,0.3% F-GNP/PAE 涂层在航空基材中表现出最优抗冲击性能(较未改性体系提升 11.8%~0.31%),但自愈合效率(82.93%)因交联密度增加导致动态键合受限而低于纯 PAE(90.25%)。电化学分析揭示其腐蚀防护性能最优( $E_{corr}$  提升 0.072~0.301 V,  $I_{corr}$  降低 1~2 数量级),归因于 F-GNP 的纳米阻隔效应与界面相容性协同。研究表明,基于界面工程的石墨烯改性策略在力学-耐蚀协同增强方面具有显著优势,但需平衡自愈合效率与动态键合可逆性。综上,F-GNP 在提升耐腐蚀性和抗冲击强度方面具有显著优势,但其对自愈合性能的负面效应需进一步优化。

#### 参考文献:

[1] LIU M, OSWALD J.Coarse-grained molecular modeling of the microphase structure of polyurea elastomer[J].Polymer, 2019,176:1-10.

[2] FEDOTOVA O Y, GROZDOV A G, YELIN I O.Synthesis of polyurea copolymers [J].Polymer Science USSR,1965,7 (10): 2011-2015.

[3] 衡丽娜. 脂肪族聚脲弹性体及其纳米复合材料的制备[D].大连:大连海事大学,2013:276-291.

[4] 胡子月,陈艳雪,周红鹏,等.聚天门冬氨酸酯聚脲涂料的

发展及应用研究进展[J].高分子材料科学与工程,2023,39 (9):367-378.

[5] URIEANU V, DONESCU D, BANU A G, et al.Organic-inorganic hybrids made from polymerizable precursors[J].Materials Chemistry and Physics,2004,85(1):120-130.

[6] SANCHEZ C, JULIÁN B, BELLEVILLE P, et al. Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites[J].Journal of Materials Chemistry,2005,15(35-36):3559-3592.

[7] SIDDIQUI Z, WAKEEL A, NASIR M A. Effect of copper nanoparticles on the performance of polyurea coatings[C].2nd International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences,2022:127-133.

[8] QIAN X, SONG L, TAI Q, et al. Graphite oxide/polyurea and graphene/polyurea nanocomposites: a comparative investigation on properties reinforcements and mechanism[J].Composites Science and Technology,2013,74:228-234.

[9] Shams S S, Zhang R, Zhu J.Graphene synthesis: a review[J].Mater Sci Pol,2015,33(3):566-578.

[10] 苏鹏,郭慧林,彭三,等.氮掺杂石墨烯的制备及其超级电容性能[J].物理化学学报,2012,28(11):2745-2753.

[11] 黄毅,陈永胜.石墨烯的功能化及其相关应用[J].中国科学(B辑),2009,39(9):887-896.

[12] FANG M, WANG K, LU H, et al. Single-layer graphene nanosheets with controlled grafting of polymer chains [J]. Journal of Materials Chemistry,2010,20(10):1982-1992.

[13] 蒲吉斌,王立平,薛群基.石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J].摩擦学学报,2014,34(1):93-112.

[14] 方志强,吕平,张锐,等.抗爆型聚脲涂层的性能及其抗爆机理[J].高压物理学报,2022,36(2):78-84.

[15] ZHANG R, HUANG W, LYU P, et al.Polyurea for blast and impact protection: A review[J].Polymers,2022,14(13):2670-2681.

[16] 龚臣成,陈艳,戴兰宏.聚脲弹性体力学性能与本构关系研究进展[J].力学学报,2023,55(1):1-23.

[17] 查俊伟,高婧涵,万宝全,等.自修复聚硅氧烷研究进展[J].高电压技术,2022,49(1):279-293.

[18] HE Y, XIE D, ZHANG X.The structure, microphase-separated morphology, and property of polyurethanes and polyureas[J]. Journal of Materials Science,2014,49:7339-7352.

[19] LI T, XIE Z, XU J, et al.Design of a self-healing cross-linked polyurea with dynamic cross-links based on disulfide bonds and hydrogen bonding [J].European Polymer Journal, 2018,107:249-257.

[20] 李全德,孟惠民.纳米  $SiO_2$  粒子复合对聚脲涂层耐蚀性能的影响[J].工程科学学报,2011,33(6):745-750.

