

改性纤维增强聚脲复合材料的制备及性能

王晨^{1,2}, 张初镜², 姚红蕊^{1,3,4*}, 王娜^{1,3,4*}

(1. 沈阳化工大学 辽宁省特种功能材料合成与制备重点实验室, 辽宁 沈阳 110142; 2. 洛阳船舶材料研究所, 海洋腐蚀与防护重点实验室, 福建 厦门 361000; 3. 中国-西班牙材料联合实验室, 辽宁 沈阳 110142; 4. 沈阳市新型功能涂层材料重点实验室, 辽宁 沈阳 110142)

摘要: 以聚天门冬氨酸酯树脂和异氰酸酯固化剂为原料、碳纤维 (CF) 为增强体、硅烷偶联剂 (KH550) 为改性剂, 制备了硅烷偶联剂改性碳纤维 (KH550-CF) 增强聚脲 (PU) 复合材料 (KH550-CF/PU)。考察了 CF 长度和添加量对碳纤维增强聚脲复合材料性能的影响。采用 FTIR、SEM、XRD、DSC 对 KH550-CF 和 KH550-CF/PU 进行了表征, 通过准静态拉伸和压缩实验、霍普金森压杆实验探究了 KH550-CF/PU 的力学性能和抗爆性能。结果表明, KH550 成功地修饰在 CF 表面, 增强了 CF 与 PU 的相容性和浸润性; CF 或 KH550-CF 的添加不会影响 PU 的分子结构, KH550-CF/PU 仍具有 PU 所固有的理化特性; 当 CF 的长度为 0.5 mm、KH550-CF 添加量为 PU 质量的 1% 时, KH550-CF/PU 的力学性能明显优于 PU, 其最大拉伸应力可达 22.88 MPa, 断裂拉伸应变可达 223.95%, 弹性阶段最大压缩应力为 2.17 kN, 最大压缩应力时的能量吸收值为 0.64 MJ/m³, 应变率 5000 s⁻¹ 时的屈服强度可达 103.18 MPa。

关键词: 复合材料; 聚脲; 碳纤维; 微观结构; 力学性能; 功能材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2025) 06-1272-07

Preparation and properties of modified fiber reinforced polyurea composites

WANG Chen^{1,2}, ZHANG Chuyi², YAO Hongrui^{1,3,4*}, WANG Na^{1,3,4*}

[1. Liaoning Provincial Key Laboratory for Synthesis and Preparation of Special Functional Materials, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute (LSMRI), Xiamen 361000, Fujian, China; 3. China-Spain Joint Laboratory on Material Science, Shenyang 110142, Liaoning, China; 4. Shenyang Key Laboratory for New Functional Coating Materials, Shenyang 110142, Liaoning, China]

Abstract: Silane coupling agent (KH550) modified carbon fiber (KH550-CF) reinforced polyurea (PU) composite (KH550-CF/PU) was prepared with polyaspartate resin and isocyanate curing agent as raw materials, carbon fiber (CF) as reinforcer and KH550 as modifier. The effects of CF length and addition amount on the properties of carbon fiber reinforced polyurea composites were evaluated. The KH550-CF and KH550-CF/PU obtained were characterized by FTIR, SEM, XRD and DSC, while the mechanical and anti-explosion properties of KH550-CF/PU were analyzed by quasi-static tensile and compressive tests as well as Hopkinson compression tests. The results showed that KH550 was successfully coated on the surface of CF, enhancing the compatibility and wettability of CF and PU. The addition of CF or KH550-CF did not alter the molecular structure of PU, with KH550-CF/PU still exhibiting the inherent physicochemical properties of PU. When the length of CF was 0.5 mm and the addition amount of KH550-CF was 1% of the mass of PU, KH550-CF/PU displayed better mechanical properties in comparison to PU, with the maximum tensile stress reaching 22.88 MPa, the tensile strain at break 223.95%, and the maximum

收稿日期: 2024-04-24; 定用日期: 2024-05-29; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240341

基金项目: 中国-西班牙材料联合实验室项目 (2022JH2/10700005); 辽宁省科技厅应用基础研究计划项目 (2023JH2/101300229); 2021 年辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关项目 (2021JH1/10400091)

作者简介: 王晨 (1998—), 男, 硕士生, E-mail: 1412868114@qq.com. 联系人: 姚红蕊 (1991—), 女, 讲师, E-mail: hongruiyao@syuct.edu.cn; 王娜 (1977—), 女, 教授, E-mail: iamwangna@syuct.edu.cn.

compressive stress at the elastic stage 2.17 kN. The energy absorption value at the maximum compressive stress was 0.64 MJ/m^3 , while the yield strength at the strain rate of 5000 s^{-1} could reach 103.18 MPa.

Key words: composite materials; polyurea; carbon fiber; microstructure; mechanical properties; functional materials

随着地区争端和恐怖袭击事件的增加,爆炸事故频发,已成为对人类生命和财产安全的重大威胁。用于人体防护的高性能防弹防爆材料研究备受关注。聚脲树脂具有独特的分子结构,其力学强度高、硬度可调,具备较好的吸能特性,用于防弹防爆材料可有效提高基体材料的抗爆抗侵彻性能,已被广泛应用于军用装备和建筑材料领域^[1-2]。近年来,科研人员已开展了大量关于聚脲涂层的抗爆性能研究,并取得了大量成果。但随着国内外市场对抗爆材料综合防护性能要求的进一步提高,高性能防弹防爆材料的研发和应用需求仍迫在眉睫。因此,设计和优化聚脲材料的结构和性能是该领域的研究重点^[3-10]。

目前,纤维/纳米颗粒增强聚脲复合材料是提高聚脲材料抗爆抗侵彻性能的常用方法^[11-22]。NANTASETPHONG 等^[11]采用动力学理论与线性拟合方法对改性后的玻璃纤维/聚脲复合材料进行了研究,结果发现,与纯聚脲材料相比,复合材料的机械强度、储能及损耗模量均有较大提高。王泽群等^[13]采用手糊成型法制备了聚氨酯/玻璃纤维复合材料,考察了玻璃纤维厚度和层数及复合材料密度对复合材料力学性能的影响,结果表明,随着玻璃纤维厚度和层数及复合材料密度的增加,复合材料力学性能均有提高。JOHNSON 等^[19]将芳纶纤维与聚脲复合,并喷涂在混凝土墙面上,结果发现,在爆炸荷载和静态面荷载作用下,聚脲弹性体能有效提高结构刚度和抗弯能力,芳纶纤维能显著增强聚脲弹性体对结构刚度、稳定性等性能的提升效果。碳纤维(CF)是一种常用的增强材料,具有高强度、低热膨胀系数等优点,在复合材料领域得到广泛^[23-27]。然而,CF表面呈惰性,与聚合物的浸润性不佳,在制备过程中易形成孔洞,从而影响复合材料的力学性能^[28-30]。因此,将CF添加到聚脲基体中用以改善聚脲材料的理化性能时,需对其进行改性。

本文拟以聚天门冬氨酸酯树脂为基体、短切CF为增强体、硅烷偶联剂(KH550)为改性剂来制备改性CF增强聚脲复合材料,系统考察CF长度、添加量对复合材料性能的影响,以及硅烷偶联剂对CF增强聚脲复合材料的作用机理及性能影响,以期对CF增强聚脲材料的性能研究提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

聚天门冬氨酸酯树脂(F420)、异氰酸酯固化剂(GB605B-100、TB850-100),深圳飞杨骏新材料股份有限公司;短切CF(0.5、1、3 mm),日本Toray公司;KH550,佛山硅腾新材料科技有限公司;无水乙醇、丙酮,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;消泡剂6800,海明斯德谦化学有限公司。

Nicolet 6700型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR),美国Thermo Fisher Scientific公司;INSTRON 3367型精密电子万能试验机,美国Instron公司;GEMINI ULTRA55型扫描电子显微镜(SEM),德国Carl Zeiss公司;APD 2000 PRO型X射线衍射仪(XRD),德国S+H公司;Setline DSC型差示扫描量热仪(DSC),法国Setaram公司;ALT-1000新房分离式压杆和拉杆系统,阿基米德工业科技有限公司。

1.2 制备方法

1.2.1 改性CF的制备

将CF(0.5 mm)在丙酮中浸泡2 h后,用蒸馏水反复清洗后置入120 °C烘箱中干燥12 h,备用。按照无水乙醇和水质量比为7:1配制醇水溶液;然后,在醇水溶液中加入含量(以醇水溶液计,下同)为4%的KH550,搅拌均匀后得到硅烷偶联剂水解液。将干燥后的CF加入到硅烷偶联剂水解液中,其中,纤维含量(以硅烷偶联剂水解液质量计,下同)为5%,室温下超声振荡反应6 h后滤出纤维,所得固体经蒸馏水清洗干净后放入120 °C烘箱内干燥12 h,制得硅烷偶联剂改性CF,记为KH550-CF。

1.2.2 CF增强聚脲复合材料的制备

将100.00 g F420、102.50 g GB605B-100、33.50 g TB850-100和2.36 g 消泡剂6800混合均匀;然后,向其中加入2.36 g KH550-CF,待上述原料充分混匀,无明显气泡及纤维团聚现象后,浇注到聚四氟乙烯模具中,并置于真空干燥箱中室温固化7 d,获得KH550-CF添加量[以F420、GB605B-100、TB850-100(即PU)的质量计,下同]为1%的KH550-CF增强聚脲复合材料,记为KH550-CF/PU。

采用上述制备方法,固定其他条件不变,使用CF(0.5 mm)代替KH550-CF,制备CF添加量为1%的CF增强聚脲复合材料,记为CF/PU。

采用上述制备方法，固定其他条件不变，不加入 KH550-CF，制备了纯聚脲弹性体，记为 PU。

此外，为考察 CF 长度和添加量对复合材料性能的影响，采用上述制备方法，制备了添加量为 1% 的 CF 长度为 1、3 mm 的 CF 增强聚脲复合材料，分别记为 1 mm CF/PU、3 mm CF/PU；制备不同添加量（2%、3%）的纤维长度 0.5 mm 的 CF 增强聚脲复合材料，分别记为 2% CF/PU、3% CF/PU。

1.3 表征方法和性能测试

1.3.1 表征方法

FTIR 测试：采用 KBr 压片法对样品进行测试，波数范围 1500~4000 cm^{-1} 。SEM 测试：加速电压 3 kV，工作距离 3 mm。XRD 测试：扫描速率 10 ($^\circ$)/min，精度 $\pm 0.02^\circ$ ， $2\theta=5^\circ\sim 80^\circ$ 。DSC 测试：升温速率 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ ，测试温度 -10~150 $^\circ\text{C}$

1.3.2 性能测试

采用电子万能试验机进行力学性能测试，准静态拉伸实验：样条试件有效部分 20 mm \times 5 mm \times 2 mm，拉伸速率 5 mm/min。准静态压缩实验：试件尺寸统一为 Φ 6 mm \times 10 mm 的圆柱形，实验速率 5 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 纤维长度和添加量对 CF 增强聚脲复合材料性能的影响

2.1.1 纤维长度对 CF 增强聚脲复合材料性能的影响

图 1 为不同长度 CF 制备的 CF 增强聚脲复合材料准静态拉伸性能测试结果。

从图 1a 可以看出，CF/PU、1 mm CF/PU、3 mm CF/PU 的最大拉伸应力均高于 PU，说明 CF 的加入可有效增强复合材料的拉伸应力，并且 CF 长度越长，增强效果越明显。这主要是因为，CF 具有较高的弹性模量和拉伸强度，短切后加入到 PU 基体中可以形成交叉结构，起到承载作用；而且随着 CF 长度的增加，其交叉结构增多，复合材料承载区域增加，进而提高了复合材料的拉伸应力。

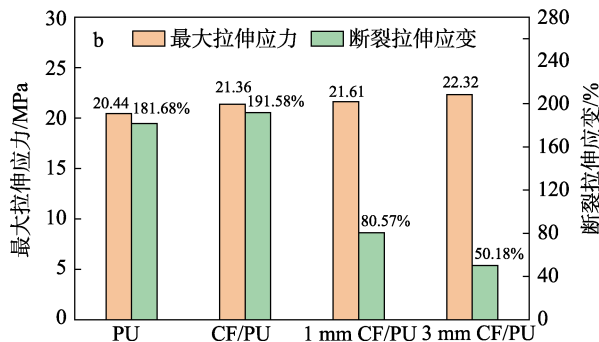
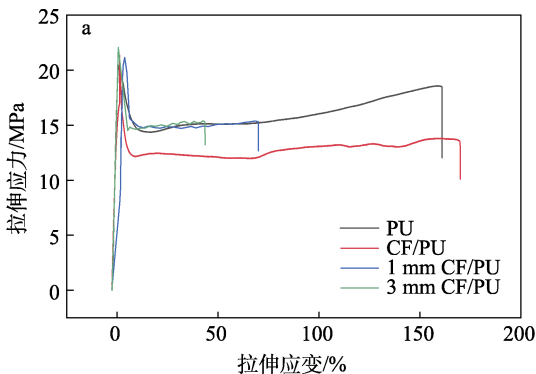


图 1 不同长度 CF 制备的 CF 增强聚脲复合材料应力-应变曲线 (a) 和最大拉伸应力和断裂拉伸应变 (b)

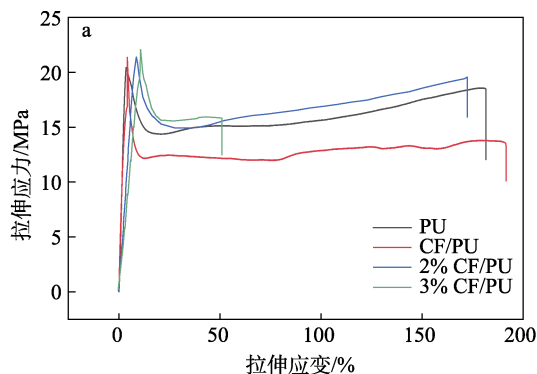
Fig. 1 Stress-strain curves (a) and maximum tensile stress and tensile strain at break (b) of carbon fiber reinforced polyurea composites prepared with different lengths of CF

从图 2b 可以看出，随着 CF 长度的增加，复合材料的断裂拉伸应变呈先增加后降低的趋势。当添加的 CF 长度为 0.5 mm 时，CF/PU 的断裂拉伸应变最大，为 191.58%，随着添加 CF 长度（1、3 mm）的进一步增长，复合材料的断裂拉伸应变迅速下降，3 mm CF/PU 断裂拉伸应变降至 50.18%。这是因为，CF 表面呈惰性，与 PU 基体的相容性较差，当纤维长度较长时，纤维与基体界面微观缺陷较大，在外力作用下容易形成应力集中点，从而在该部位断裂，造成断裂拉伸应变下降。

2.1.2 纤维添加量对 CF 增强聚脲复合材料性能的影响

图 2 为不同 CF（0.5 mm）添加量制备的 CF 增强聚脲复合材料准静态拉伸性能测试结果。

从图 2 可以看出，CF 添加量对复合材料准静态拉伸力学性能的影响规律和其长度的影响规律类似。随着 CF 添加量（1%、2%、3%）的增加，复合材料的拉伸应力逐渐增大，3% CF/PU 拉伸应力最大，为 22.07 MPa。这是因为，本文 CF 的拉伸应力为 4900 MPa，在 PU 基体中起到骨架作用，当 CF 添加量增加时，其本体性能发挥更加明显，因此，对 PU 基体的增强作用更显著。



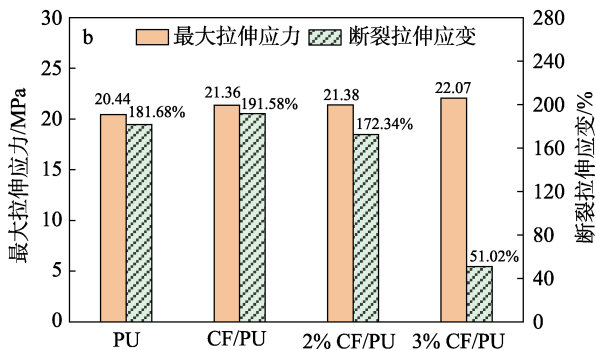


图 2 不同添加量 CF 制备的 CF 增强聚脲复合材料应力-应变曲线 (a) 和最大拉伸应力和断裂拉伸应变 (b)

Fig. 2 Stress-strain curves (a) and maximum tensile stress and tensile strain at break (b) of carbon fiber reinforced polyurea composites prepared with different addition amounts of CF

从图 2 还可以看出, 随着 CF 添加量的增加, 复合材料的断裂拉伸应变先增加后减小, 这主要是因为 CF 与 PU 的浸润性不佳, 纤维与基体之间的微观缺陷随着纤维添加量增大而变多, 较弱的界面结合能力导致复合材料在缺陷部位断裂, 造成断裂拉伸应变下降。因此, CF 的最佳添加量为 1%。

2.2 改性纤维的表征

2.2.1 FTIR 分析

图 3 为 CF 和 KH550-CF 的 FTIR 谱图。

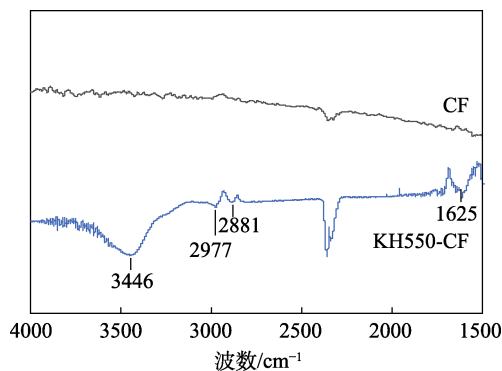


图 3 CF 和 KH550-CF 的 FTIR 谱图
Fig. 3 FTIR spectra of CF and KH550-CF

从图 3 可以看出, 与 CF 相比, KH550-CF 在 2977 和 2881 cm^{-1} 处出现了属于 KH550 中—CH 的吸收峰; 3446 cm^{-1} 处出现了 Si—OH 的伸缩振动吸收峰; 1625 cm^{-1} 处出现由 KH550 水解形成的 H—O—H 的变形振动峰吸收。结果表明, KH550 分子已成功接枝到 CF 表面^[23]。

2.2.2 SEM 分析

图 4 为 CF 和 KH550-CF 的 SEM 图。

从图 4 可以看出, CF 表面光滑细腻、规整无缺陷 (图 4a), 并且纤维表面呈细丝状纹理 (图 4b)。

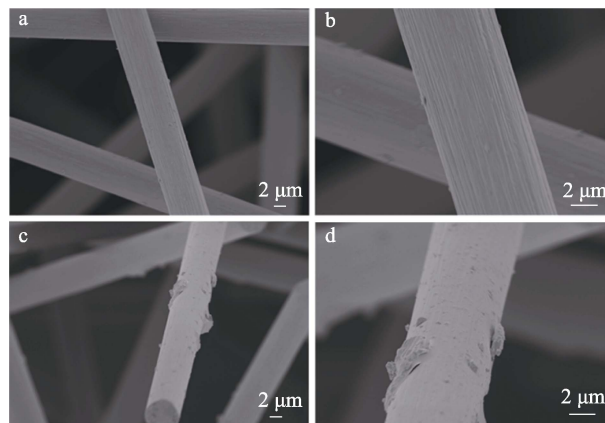


图 4 CF (a, b) 和 KH550-CF (c, d) 在不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of CF (a, b) and KH550-CF (c, d) at different magnifications

KH550-CF 表面粗糙, 局部出现凸起 (图 4c), 纤维表面本身的细丝状纹理有所弱化, 并且表面均匀分布着细小的微凸结构 (图 4d), 这是 KH550 聚集形成的。上述结果再次证明, KH550 已成功修饰了 CF 表面。

2.3 改性 CF 增强聚脲复合材料的表征和性能

2.3.1 XRD 分析

图 5 为 PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 的 XRD 谱图。

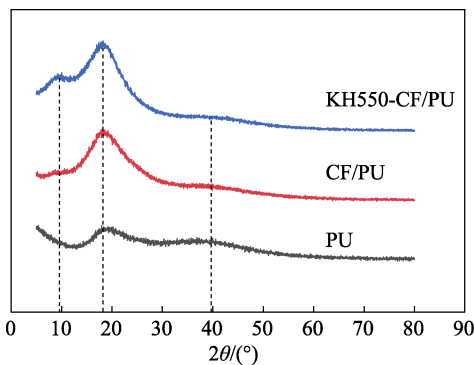


图 5 PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 的 XRD 谱图
Fig. 5 XRD patterns of PU, CF/PU and KH550-CF/PU

从图 5 可以看出, CF/PU 和 KH550-CF/PU 在 $2\theta=10^\circ$ 附近出现了 C(002) 的特征衍射峰, 表明 CF 很好地分布在基体中。PU 样品在 $2\theta=19^\circ$ 附近出现了明显的非晶漫散射峰, 表明 PU 具有明显的无定形态结构, 而在 $2\theta=40^\circ$ 附近出现的微晶区则显示 PU 中硬段脲键的远程有序排列。CF/PU 和 KH550-CF/PU 两种复合材料具有和 PU 相似的衍射峰, 说明 CF 的添加和 KH550 改性不会改变聚脲树脂的分子结构。

2.3.2 DSC 分析

图 6 为 PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 的 DSC 曲线。

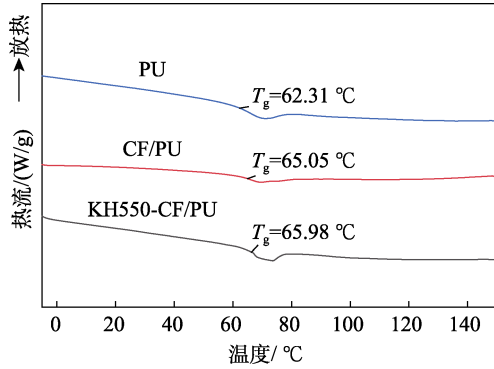


图 6 PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 的 DSC 曲线
Fig. 6 DSC curves of PU, CF/PU and KH550-CF/PU

从图 6 可以看出, PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 均显示吸热峰, 但曲线趋于平滑, 峰形不明显, 说明各样品在 150 °C 下能保持良好的热稳定性。另外, PU 的玻璃化转变温度 (T_g) 为 62.31 °C, CF/PU 和 KH550-CF/PU 的 T_g 分别为 65.05 和 65.98 °C, 分别比 PU 提高了 2.74 和 3.67 °C。这是因为, CF 的加入能提升聚合物链段运动的约束程度, 进而提高聚合物的 T_g ; KH550-CF/PU 表现出最高的 T_g (65.98 °C), 表明 KH550 改性能提升 CF 与基体 PU 的界面相容性, 增加界面结合强度, 从而使聚合物分子链运动受到更大限制, T_g 得到更大的提升。

2.3.3 SEM 分析

图 7 为 PU、CF/PU、KH550-CF/PU 的 SEM 图。

从图 7 可以看出, PU 的断面相对平滑, 并存在微小的气孔 (图 7a); CF/PU、KH550-CF/PU 的断面粗糙程度增加, 断裂台阶更明显 (图 7b、c), 说明加入 CF 改变了 PU 的断裂形态, 这是因为, CF 的拉伸强度较高, 包裹在其周围的树脂不易断裂, 阻碍拉伸过程中裂纹的扩展。比较 CF/PU 和 KH550-CF/PU 可以看出, 未经表面改性的 CF 在树脂基体中易团聚成束, 并且与基体间出现较多缺陷和较大孔洞; 而经过 KH550 表面改性的 CF 则在树脂基体中分布较为均匀, 与基体结合紧密, 所制备的 KH550-CF/PU 缺陷较少。从图 7 还可以看出, CF/PU 表面光滑、纹理清晰, 与树脂基体间存在明显空隙 (图 7d), 说明二者之间浸润性较差。KH550-CF/PU 与树脂基体紧密黏结, 界面处无明显空隙 (图 7e), 表明硅烷偶联剂改性提高了 CF 与 PU 间的界面相容性, 使二者可以更好地浸润, 从而可以提高界面结合强度。

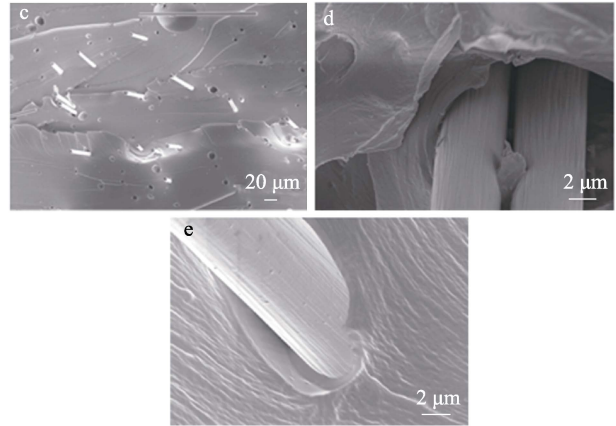
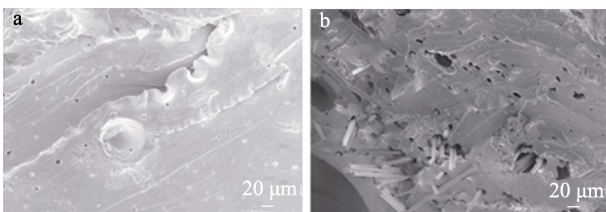
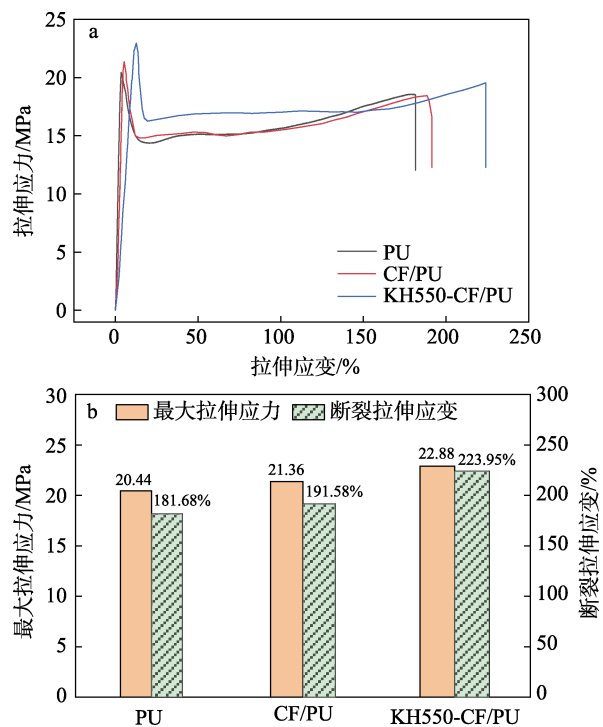


图 7 PU (a)、CF/PU (b、d) 和 KH550-CF/PU (c、e) 在不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 7 SEM images of PU (a), CF/PU (b, d) and KH550-CF/PU (c, e) at different magnifications

2.3.4 准静态拉伸实验分析

图 8 为准静态下 PU、CF/PU、KH550-CF/PU 的准静态拉伸性能测试结果。



a—应力-应变曲线; b—最大拉伸应力和断裂拉伸应变

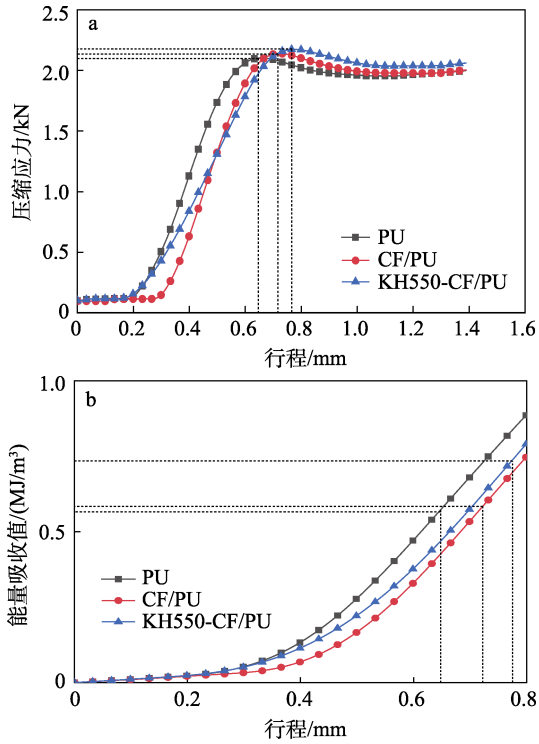
图 8 PU、CF/PU、KH550-CF/PU 的拉伸性能
Fig. 8 Tensile properties of PU, CF/PU, KH550-CF/PU

从图 8 可以看出, 与 PU 相比, CF/PU 的最大拉伸应力和断裂拉伸应变均有明显提升, CF/PU 复合材料的拉伸应力为 21.36 MPa, 断裂拉伸应变为 191.58%, 综合力学性能最佳。而 KH550-CF/PU 样品的最大拉伸应力和断裂拉伸应变分别达到了 22.88 MPa 和 223.95%。这是因为, KH550 改善了 CF 与 PU 基体间的相容性和浸润性, 进一步增强了

有机界面与无机界面的结合强度, 从而使复合材料的拉伸应力和断裂拉伸应变显著提高。

2.3.5 准静态压缩实验分析

图 9 为 PU、CF/PU、KH550-CF/PU 的准静态压缩性能测试结果, 通过压缩行程表示压缩应变过程。



a—应力-应变曲线; b—能量吸收-应变曲线

图 9 PU、CF/PU、KH550-CF/PU 的压缩性能

Fig. 9 Compressive properties of PU, CF/PU, KH550-CF/PU

从图 9a 可以看出, 相较于 PU, CF/PU、KH550-CF/PU 的最大压缩应力明显提升, 尤其是 KH550-CF/PU, 其弹性阶段最大压缩应力可达 2.17 kN。研究表明, 能量吸收值是衡量材料在压缩过程中能量吸收能力的重要指标, 也是评价聚脲材料抗爆性能的重要指标之一。由式 (1) 计算材料的能量吸收值:

$$C = \int_0^{\varepsilon_m} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

式中: C 为单位体积样品的能量吸收值, 即样品在应变量为 ε_m 时, 应力-应变曲线与坐标轴所包围的面积, MJ/m^3 ; ε_m 为任意应变, %; σ 为应力, 即应变 ε 的函数^[31], kN。

从图 9b 可以看出, KH550-CF/PU 不仅具有最大压缩应力, 而且其对应的能量吸收值可达 0.64 MJ/m^3 (表 1)。结果表明, 硅烷偶联剂改性 CF 能有效提高聚脲材料压缩性能和储能能力, 其增强型 PU 具有最优异的力学性能。

表 1 PU、CF/PU、KH550-CF/PU 弹性形变阶段最大压缩应力及对应的能量吸收值

Table 1 Maximum compressive stress and corresponding energy absorption of PU, CF/PU, KH550-CF/PU

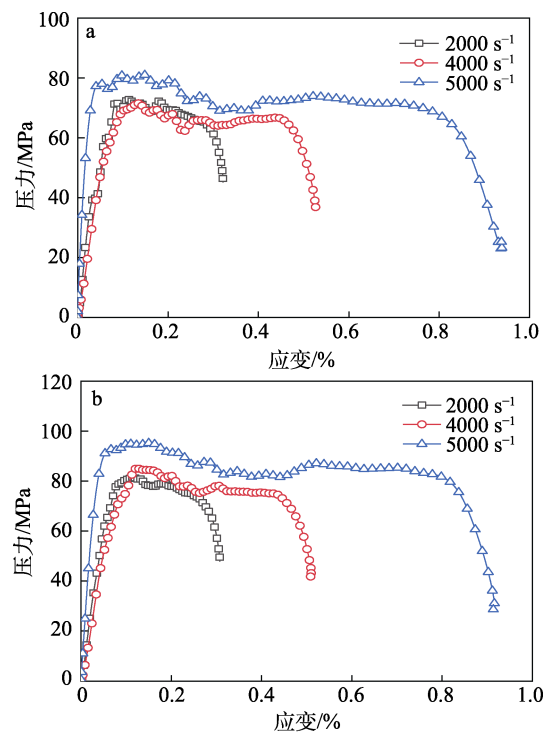
材料	弹性形变阶段最大压缩应力/kN	对应能量吸收值/ (MJ/m^3)
PU	2.10	0.58
CF/PU	2.14	0.59
KH550-CF/PU	2.17	0.64

2.3.6 霍普金森压杆实验分析

霍普金森压杆 (SHPB) 实验曲线可表征材料在不同冲击载荷作用, 特别是在高速率条件下的性能变化。使用直径 20 mm 的钢质 SHPB 作为动态压缩实验平台, 通过气压值调节子弹发射速率, 进而控制加载应变率^[32]。图 10 为动态压缩下 PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 的霍普金森压杆实验应力-应变曲线。

从图 10 可以看出, PU 在不同加载速率下的动态压缩应力-应变曲线均呈由平滑逐渐过渡到锯齿状振动的状态 (图 10a), 即动态压缩曲线表现为线弹性和高弹性两个阶段, 表明 PU 在受到动态冲击的整个过程中发生了由橡胶态到玻璃态的转变。

同时, 加载速率 ($2000、4000、5000 \text{ s}^{-1}$) 越大, 锯齿状振动幅度越明显, 表明 PU 的屈服强度越高, 说明聚脲材料的抗压强度与加载应变率呈明显的正相关性。CF/PU (图 10b)、KH550-CF/PU (图 10c) 和 PU 表现相似。



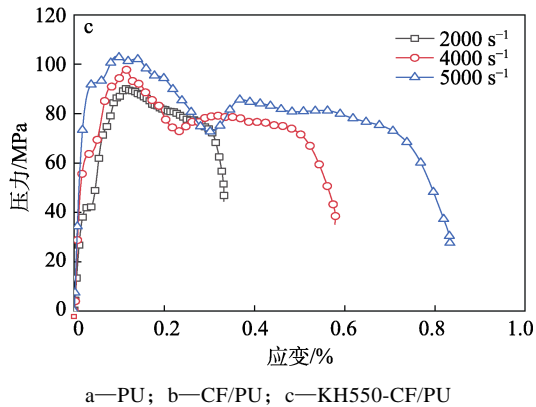


图 10 材料的霍普金森压杆实验应力-应变曲线
Fig. 10 Hopkinson pressure bar test curves of materials

当加载速率为 5000 s^{-1} 时, PU、CF/PU 和 KH550-CF/PU 的屈服强度分别为 81.08、95.23 和 103.18 MPa, KH550-CF/PU 的屈服强度比 PU 提升了 27.3%, 表明复合材料在高速应变率下的抗冲击性能有所提升, 这种复杂响应有助于涂层材料在爆炸冲击下分散和吸收能量, 减少对结构的损害。

综合准静态下拉伸与压缩实验数据表明, KH550-CF/PU 具有优异的力学性能, 尤其是在提高材料的拉伸强度及压缩屈服强度方面可显著提升结构材料的抗冲击能力。

3 结论

以 PU 为基体、CF 为增强体、KH550 为改性剂, 制备了 KH550 改性 CF 增强聚脲复合材料 KH550-CF/PU, 探究了其力学性能, 结论如下:

(1) 当 CF 的长度为 0.5 mm, 添加量为 1% 时, CF/PU 复合材料的拉伸应力为 21.36 MPa, 断裂拉伸应变为 191.58%, 综合力学性能最佳, 表明适量、适当长度 CF 的加入可有效提升复合材料的机械性能。

(2) KH550-CF/PU 复合材料中 CF 分布均匀, 界面结合较好, 无明显缺陷。KH550 表面改性后的 CF 能进一步提高 PU 的拉伸强度、储能能力和动态压缩屈服强度。KH550-CF/PU 的最大拉伸应力和断裂拉伸应变分别达到了 22.88 MPa 和 223.95%; 弹性阶段最大压缩应力可达 2.17 kN, 对应能量吸收值 0.64 MJ/m^3 ; 加载速率 5000 s^{-1} 时, KH550-CF/PU 的屈服强度为 103.18 MPa, 比 PU 提升了 27.3%。

(3) KH550 成功地修饰在 CF 表面, 可有效改善 CF 与聚脲树脂的相容性和浸润性, 并且表面改性后的 CF 不会影响 PU 的分子结构, 复合材料仍具有 PU 固有的理化特性。

本文对 CF 增强聚脲复合材料的性能及其作用机理的探究, 可为 CF 增强聚脲材料的性能研究提供参考。

参考文献:

- [1] RAMAN S N, NGO T, MENDIS P. A review on the use of polymeric coatings for retrofitting of structural elements against blast effects[J]. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2011, 11: 69-80.
- [2] CHEN D, WU H, CHENG Y H. Dynamic behaviors of unreinforced and spray polyurea retrofitted brick masonry infill walls under blast loads: Shock tube test and analyses[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 190: 104975.
- [3] GOSWAMI A, ADHIKARY S. Retrofitting materials for enhanced blast performance of structures: Recent advancement and challenges ahead[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 224-243.
- [4] ZHANG S X (张遂心), WANG X B (王晓波), ZHAO G Q (赵改青), *et al.* The effects of extreme pressure-antiwear additives on tribological properties of polyurea grease[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2010, 27(12): 1228-1232.
- [5] WANG W F (王伟峰), LI G (李根), LI P L (李培礼), *et al.* Preparation and properties of nano-SiO₂ modified waterborne polyurea[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2020, 37(5): 955-961.
- [6] ADRIAN R, FLORINA B. Experimental study on polyurea coating effects on deformation of metallic plates subjected to air blast loads[J]. *Materiale Plastice*, 2016, 53(4): 670-674.
- [7] WANG J G, REN H Q, WU X Y, *et al.* Blast response of polymer-retrofitted masonry unit walls[J]. *Composites Part B*, 2017, 128: 174-181.
- [8] JING F D (景芳达), HAN S (韩松), GE J (葛晶), *et al.* Preparation and properties of modified basalt fiber/polyurethane damping material[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(7): 1369-1375, 1456.
- [9] BAYLOT J T, ASCE F, BULLOCK B, *et al.* Blast response of lightly attached concrete masonry unit walls[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(8): 1186-1193.
- [10] FANG Z Q (方志强), LYU P (吕平), ZHANG R (张锐), *et al.* Blast-resistant properties and mechanism of anti-explosion polyurea coating[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics (高压物理学报)*, 2022, 36(2): 43-52.
- [11] NANTASETHONG W, JIA Z, AMIRKHIZI A, *et al.* Dynamic properties of polyurea-milled glass composites Part I: Experimental characterization[J]. *Mechanics of Materials*, 2016, 98: 142-153.
- [12] LU J K (卢军凯), WANG Z B (王之冰). Mechanical properties of continuous glass fiber reinforced polyurethane composites[J]. *Engineering Plastics Application (工程塑料应用)*, 2017, 45(3): 31-35.
- [13] WANG Z Q (王泽群), LIU L B (刘凉冰), ZHANG S T (张思彤), *et al.* Study on properties of polyurethane composites reinforced with glass fiber[J]. *Special Purpose Rubber Products (特种橡胶制品)*, 2019, 40(1): 17-20.
- [14] ZHANG W C (张文程), MA W S (马文石). Influence of stiffness of isocyanate on the properties of silane modified polyurea[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2017, 34(10): 1194-1200.
- [15] GRUJICIC M, ENTREMONT B, PANDURANGAN B, *et al.* concept level analysis and design of polyurea for enhanced blast mitigation performance[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, 21(10): 2024-2037.
- [16] MATOS H, GUPTA S, SHUKLA A. Structural instability and water hammer signatures from shock-initiated implosions in confining environments[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 116: 169-179.
- [17] AMINI M R, ISAACS J B, NEMAT-NASSER S. Experimental investigation of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(1): 82-89.
- [18] WANG C J (王尘静), QIU X L (丘晓琳), ZHANG C X (张新昌), *et al.* Preparation of modified polyurea coatings and their application in EPP products[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2025, 42(1): 86-94.
- [19] JOHNSON C F, SLAWSON T R, CUMMINS T K, *et al.* Concrete masonry unit walls retrofitted with elastomeric systems for blast loads: Proceedings of the 24th Army Science Conference[R]. 2004.

(下转第 1305 页)