

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.001

超高分子量聚乙烯/热塑性聚氨酯复合织物 热成型与界面优化

岳航¹, 鹿超², 王春红¹, 王俊胜², 张昊¹

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 应急管理部天津消防研究所, 天津 300381)

摘要: 为满足充气式水域救援装备对高性能聚合物涂覆织物复合材料的要求, 以超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)和热塑性聚氨酯(TPU)为原料开展复合材料制备工艺研究。探究了不同热成型温度下 PE-UHMW 纤维的热力学特性和变化规律, 确定了适用于 PE-UHMW/TPU 体系的热贴合复合成型温度。采用环氧树脂(EP)活化浸渍对 PE-UHMW 织物进行活化处理, 分析了 EP 活化浸渍涂覆量对复合材料剥离、抗穿刺、撕裂以及拉伸性能的影响。研究表明, 热成型温度对 PE-UHMW 纤维力学性能的影响显著, PE-UHMW 纤维结晶度随温度上升逐渐下降, 纤维熔融和再结晶过程导致力学性能下降, 温度超过 120 °C 时, PE-UHMW 纤维的强度大幅下降, 纤维出现不可逆结构损伤, PE-UHMW 纤维与 TPU 热压处理温度不应高于 120 °C。单因素方差分析表明, EP 活化浸渍涂覆量对复合材料剥离强力、抗穿刺强力、撕裂强力和拉伸断裂强力均产生显著影响, 复合材料的力学性能随着涂覆量增加而显著提升。其中, EP 活化浸渍涂覆量为 0.2 L/m² 时, 复合材料的剥离强力提升至 22.79 N, 抗穿刺强力、撕裂强力和拉伸断裂强力分别提升 56.3%, 62.3% 和 53.7%。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 热塑性聚氨酯; 环氧树脂; 复合材料; 热学效应; 界面

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0001-08

Thermoforming and interfacial optimization of PE-UHMW/TPU composite fabric

YUE Hang¹, LU Chao², WANG Chunhong¹, WANG Junsheng², ZHANG Hao¹

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China)

Abstract : To meet the stringent requirements for high-performance polymer-coated fabric composites in inflatable water rescue equipment, the research on the composites preparation process was carried out using ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) and thermoplastic polyurethane (TPU) as raw materials. The thermodynamics properties and changing rules of PE-UHMW fibers were investigated under different thermoforming temperatures, and the thermal bonding composite forming temperature for PE-UHMW/TPU system was determined. Epoxy resin (EP) activation impregnation was used to activate PE-UHMW fabrics, and the effect of EP activation impregnation coating amount on the peeling, puncture resistance, tearing and tensile properties of composites was analyzed. The results show that the thermoforming temperature has a significant impact on the mechanical properties of PE-UHMW fibers, PE-UHMW fiber crystallinity gradually decreases with the increase of temperature and that the fiber melting and recrystallization process leads to a decline in the mechanical properties. When the thermoforming temperature exceeds 120 °C, the strength of PE-UHMW fibers decreases significantly, indicating that the hot-pressing temperature for PE-UHMW fibers and TPU should not exceed 120 °C. One-way analysis of variance shows that EP activation impregnation coating amount has the significant effect on the peel strength, puncture resistance, tear strength and tensile breaking strength of the composites, and the mechanical properties of the composites are significantly improved with the increase of coating amount. When the EP

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3006002)

通信作者: 王俊胜, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为消防救援装备、防火阻燃材料和消防员个人防护装备

收稿日期: 2025-04-12

引用格式: 岳航, 鹿超, 王春红, 等. 超高分子量聚乙烯/热塑性聚氨酯复合织物热成型与界面优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(7): 1-8.

YUE Hang, LU Chao, WANG Chunhong, et al. Thermoforming and interfacial optimization of PE-UHMW/TPU composite fabric[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 1-8.

activation impregnation coating amount is 0.2 L/m², the peel strength of the composite increases to 22.79 N, and the puncture resistance, tear strength and tensile breaking strength increase by 56.3%, 62.3% and 53.7%, respectively.

Keywords : ultra-high molecular weight polyethylene ; thermoplastic polyurethane ; epoxy resin ; composite ; thermal effect ; interface

暴雨引发的城市和乡村内涝是全国多地面临的难题^[1]。充气式救援艇被广泛应用于防汛救援工作,是内涝灾害救援中快速响应、灵活应对的关键消防装备^[2]。复杂的城市内涝水下环境对救援艇充气舱室材料提出更高的耐刺穿、耐撕裂等性能要求。目前市场上的充气式救援艇以聚氯乙烯(PVC)涂覆涤纶织物为主,但此类材料耐刺穿和撕裂性能难以满足内涝灾害救援的实际需求^[3],如在2023年8月河北涿州汛情救援行动中,某应急救援队4艘救援艇中3艘被水中锋利物划破,严重影响救援效率,给救援人员带来极大风险。此外,PVC在低温下易变硬和发脆,且存在不耐光、易热氧化及实际使用寿命较短等缺陷^[4-5]。

热塑性聚氨酯(TPU)具有卓越的力学性能、优异的耐低温特性和抗撕裂性。然而,该材料对缺口的敏感性较高,特别是在遭受穿透或划伤后,缺口易迅速扩展^[6]。将TPU与纤维或织物进行复合,是增强其抗破裂性能并有效抑制损伤扩展的常用技术手段,李猛等^[7]通过引入织物增强,显著提升了TPU的力学性能。织物结构有效限制了TPU的变形,提升了TPU膜的整体强度和形变稳定性^[8-9]。超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)具有高强度和耐腐蚀性^[10]。夏蕊等^[11]制备了PE-UHMW织物增强TPU复合材料,具有优异的防刺性能。但PE-UHMW材料表面反应活性低,导致其与TPU之间的界面结合力严重不足^[12-14]。在外力作用下,界面剥离导致TPU破损或失效,限制了复合材料力学性能的发挥。

为提升纤维与热塑性聚合物基体间的界面性能,研究人员在纤维表面引入环氧树脂(EP)以实现纤维活化。Zhang等^[15]通过EP活化聚对苯二甲酸乙二酯(PET)织物制备了PET/橡胶复合材料,EP促进了橡胶乳胶交联点的形成,提高PET/橡胶复合材料的剥离强力。Tayfun等^[16]利用经EP处理的椰壳纤维与TPU热复合,提升了EP与TPU之间的化学相容性,显著提升了复合材料的界面黏结性能。许冬梅等^[17]以EP为胶黏剂制备了水性聚氨酯复合胶膜,采用热压法制备了芳纶1414复合材料,分析了上胶量等因素对其抗刺穿性能的影响。结果表明,复合

材料抗穿刺性能随上胶量的增加而逐渐提高,当上胶量为27%时芳纶复合材料能够兼顾防刺性能和轻量化。

笔者针对PE-UHMW热学特性,分析热成型温度对纤维性能的损伤机制和性能变化规律,探讨EP活化处理对E-UHMW/TPU复合材料性能的影响,并为高性能充气式救援艇用聚合物涂覆织物材料的应用提供数据基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-UHMW长丝:1 666 tex,无捻,东莞金白瑞新材料有限公司;

TPU膜:厚度为0.30 mm,面密度为300 g/m²,北京邦维高科新材料科技股份有限公司;

EP:AM-8928A,环氧值为175~181 g/eq,上海惠柏新材料科技有限公司;

固化剂:AM-8928 B,胺值为630~730 mg KOH/g,上海惠柏新材料科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

半自动打样机:SGA-598,江阴市通源纺机有限公司;

平板硫化机:10 T,东莞市科锐仪器科技有限公司;

电子万能试验机:UTM4204X,深圳三思纵横科技股份有限公司;

X射线衍射(XRD)仪:Smart Lab SE,日本Rigaku公司;

扫描电子显微镜(SEM):MIRA LMS,捷克TESCAN公司。

1.3 试样制备

PE-UHMW分别在100, 110, 120, 130, 140, 150 °C下热压10 min,压力为0.75 MPa,得到不同温度处理后的长丝。复合材料的制备流程如图1所示,PE-UHMW平纹织物由半自动打样机制备而成,织物经纬密度20×16根/inch(2.54 cm),面密度为280 g/m²。EP活化浸渍液由EP与固化剂按10:3质量比混合而成,设置浸渍涂覆量梯度为0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 L/m²。TPU膜置于浸渍涂覆改性织物上

下表面,经平板硫化机热贴复合成型,热贴合温度为120℃,压力为0.75 MPa,热贴合时间为10 min。为便于讨论,将EP浸渍涂覆量为0,0.05,0.10,0.15,0.20 L/m²的PE-UHMW/TPU复合材料样品分别命名为PE-UHMW/EP-0/TPU,PE-UHMW/EP-0.05/TPU,PE-UHMW/EP-0.10/TPU,PE-UHMW/EP-0.15/TPU,PE-UHMW/EP-0.20/TPU。

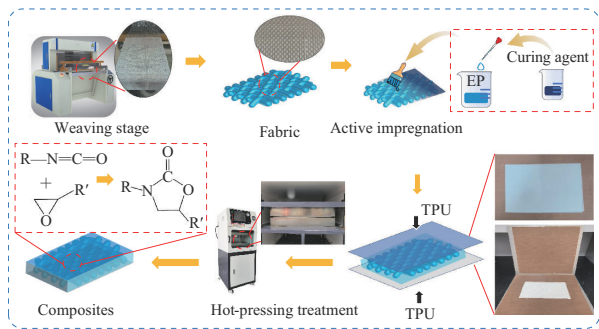


图1 PE-UHMW/TPU复合材料制备流程

Fig. 1 Preparation process of PE-UHMW/TPU composites

1.4 测试与表征

(1) XRD测试:采用铜靶,扫描范围为10°~60°,扫描速率为10°/min。结晶度采用多峰分离法测量,按式(1)进行计算。

$$C = \frac{S_c}{S_t} \quad (1)$$

式中: C 为纤维的结晶度; S_c 为纤维的结晶峰面积; S_t 为纤维的总峰面积。

(2) DSC测试:在50 mL/min的N₂气氛中,由室温升温至200℃,升温、降温速率均为10℃/min。

(3) SEM测试:在真空环境下对麻纤维样品表面进行喷金处理,采用SEM对不同温度处理后的纤维轴向表面观察,加速电压为15 kV,放大倍数为1 000倍。

(4)力学性能测试:采用电子万能试验机,依据GB/T 19975-2005和HG/T 2580-2022对纤维及复合材料进行拉伸测试,拉伸速度分别为250 mm/min和100 mm/min。依据FZ/T 01010-2012标准对复合材料进行剥离测试,剥离速度为100 mm/min。依据GB/T 31064-2014标准进行抗穿刺测试,穿刺速度300 mm/min。依据HG/T 2581.1-2022标准,采用恒速撕裂法进行撕裂测试,撕裂速度为100 mm/min。

(5)统计分析:使用Microsoft Office 2016软件,设显著性水平为0.05,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验加热温度对PE-UHMW单纤维断

裂强度的影响显著性,以及EP浸渍涂覆量对复合材料力学性能的影响显著性。当 P 值(p -value)小于0.05时,表示具有显著性(*)。

2 结果与讨论

2.1 成型温度对PE-UHMW纤维性能的影响

经不同温度处理后的PE-UHMW纤维拉伸性能对比如图2所示。在100℃至120℃范围内,纤维强度随温度升高缓慢下降。当温度由120℃升至140℃时,纤维强度下降更为显著。当温度上升至150℃时,纤维产生严重热损伤,导致拉伸性能无法测量。

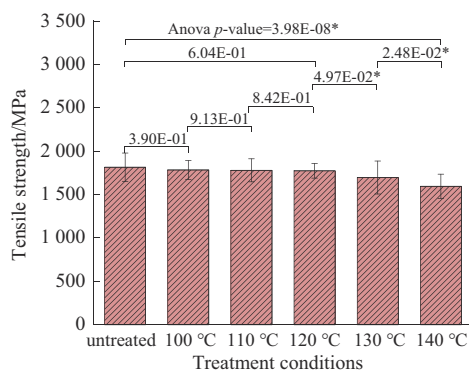


图2 未处理及不同温度热压处理后PE-UHMW纤维的拉伸强度

Fig. 2 Tensile strength of PE-UHMW fibers before and after hot pressing treatment at different temperatures

图3为PE-UHMW纤维DSC测试结果,PE-UHMW纤维在149.1℃和154.8℃分别出现熔峰,表明该温度区间内发生熔融。结晶峰位于120.6℃,表明其在冷却过程中可重新形成结晶结构。纤维断裂强度随温度升高而下降,一方面是由于在较高温度下,PE-UHMW纤维的分子链发生热诱导变化,另一方面是PE-UHMW纤维在热处理过程中微观结构发生改变,如片晶熔融与再结晶。在较低温度下,纤维受热影响较小,力学性能变化不

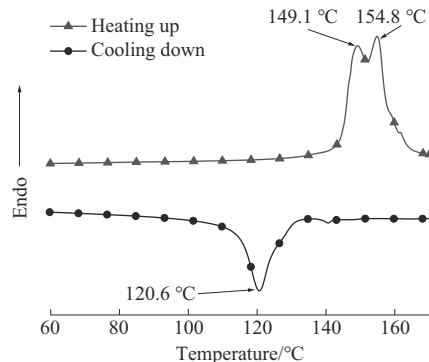


图3 PE-UHMW纤维DSC测试结果

Fig. 3 The DSC test result of PE-UHMW fiber

显著;而在较高温度下,温度对PE-UHMW纤维晶体结构的影响更加明显,导致纤维的拉伸强度下降^[18]。

图4为PE-UHMW纤维经不同温度处理后的XRD图谱。其中,21.8°和24.1°分别对应正交晶型(110)和(200)晶面的衍射峰。随着处理温度升高,正交晶系衍射峰强度逐渐减弱,表明晶体取向度显著下降。表明当温度超出其热稳定范围,分子链发生解体或重排,破坏原有晶体结构。晶体结构无序化导致了纤维力学性能显著劣化^[19]。

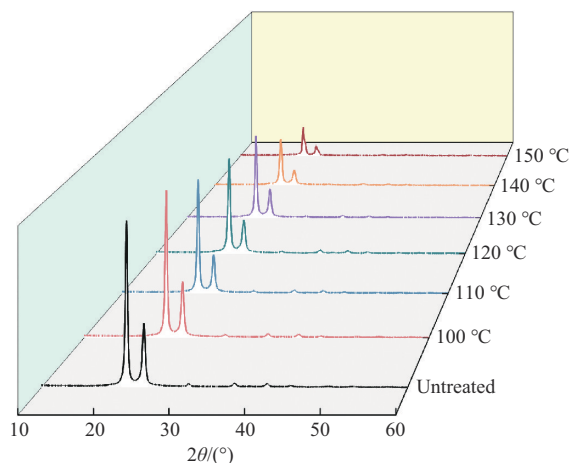


图4 不同温度热压后PE-UHMW纤维的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of PE-UHMW fibers after different heat treatment temperatures

热处理对纤维结构和性能的影响在SEM图中得到了更加直观的展现,如图5所示。在100℃下热压处理10 min后,纤维表面形态规则,未见明显变化。随着热压温度升高至110℃,纤维表面出现微纤维断裂,部分丝束边缘发生局部损伤,此时温度接近PE-UHMW纤维的软化点,热机械作用可能导致分子链滑移及弱点开裂,从而形成断裂的微纤维结构。当温度进一步升高至120℃和130℃时,纤维表面断裂丝束的数量明显增加。纤维损伤程度随着温度升高而加剧,表明该温度范围内,纤维的性能已难以维持。这种损伤可能归因于局部区域的纤维分子链熔融,同时无定形区域逐渐增多,导致纤维整体形态发生变化。在140℃和150℃条件下,纤维表面发生显著形态变化,SEM图像清晰显示了熔融结块现象,纤维形状趋于不规则。表明在高温作用下,纤维经历了熔融与黏结效应,且在冷却过程中重新结晶,导致结构进一步变化。

热复合成型中的高温条件对PE-UHMW纤维的表面形态和结构完整性产生了显著影响。纤维

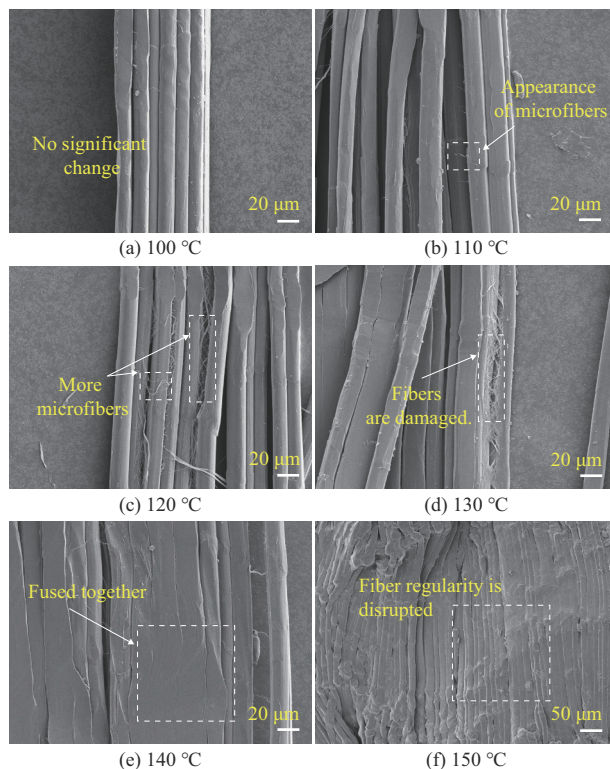


图5 不同热压温度处理后PE-UHMW纤维表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of PE-UHMW fibers after different hot pressing temperatures

拉伸性能测试结果与XRD和DSC测试结果一致,高温对PE-UHMW纤维晶体结构的影响具有不可逆性。一旦晶体结构遭到破坏,即使冷却后也难以恢复至初始状态。因此,在热复合成型中,应严格控制加工温度,以避免纤维过度熔融或热损伤,从而确保复合材料的性能稳定性和可靠性。

单因素方差分析表明,未经处理的纤维与经100、110及120℃处理的纤维在拉伸力学性能方面的差异不显著,当处理温度升高至120~140℃区间时,PE-UHMW纤维的拉伸力学性能将显著降低,纤维出现不可逆结构损伤,因此选择120℃为EP活化浸渍PE-UHMW纤维与TPU的热复合成型温度。

2.2 EP活化浸渍液涂覆量对复合材料性能的影响

在复合材料领域,剥离强力是衡量界面黏合性能的关键指标,剥离强力的高低直接影响材料的整体性能及其在实际应用中的可靠性。如图6所示,EP活化浸渍液作为过渡层显著增强了纤维与TPU的界面黏结性能。剥离强力随浸渍涂覆量的增加显著提高,当浸渍涂覆量为0.2 L/m²时,剥离强力由3.32 N提升至22.79 N。EP活化浸渍液可通过浸润织物、增强其结构稳定性并优化应力传递,在界面

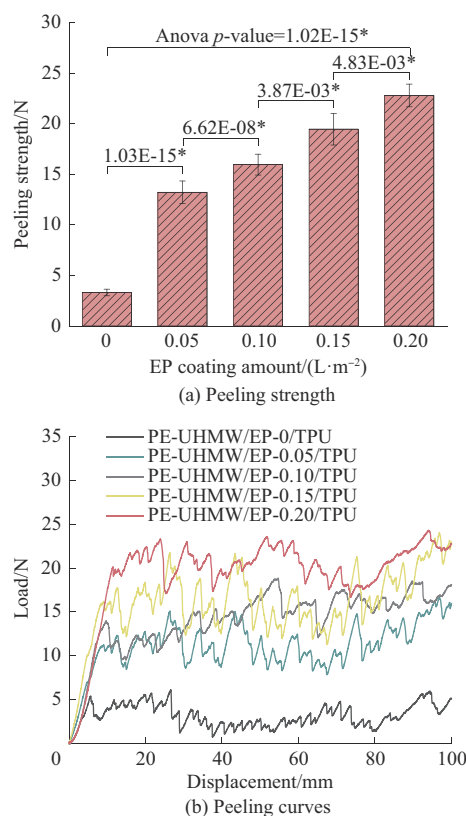


图6 EP涂覆量对PE-UHMW/TPU复合材料剥离强力的影响

Fig. 6 Effect of EP content on peel strength of PE-UHMW/TPU composites

处形成了更强的黏结力和更高效的应力分散能力,对复合材料剥离强力有显著影响。

EP涂覆量与复合材料厚度、面密度、剥离强力以及剥离强力标准变异系数(CV值)的关系见表1。PE-UHMW/TPU复合材料的厚度和面密度随着浸渍量的增加而显著增加。这主要是因为EP活化浸渍液不仅填充了纤维织物中的空隙,还在织物和TPU膜之间形成了较厚的覆盖层,导致材料整体厚度增加。厚度的增加虽有助于提高材料的缓冲性能,但也需根据应用场景平衡轻质性与力学性能之间的关系。

抗穿刺性是衡量材料抵抗尖锐物体穿透能力的关键性能指标,特别是在充气式救援艇等应用中,优异的抗穿刺性能至关重要。图7展示了浸渍

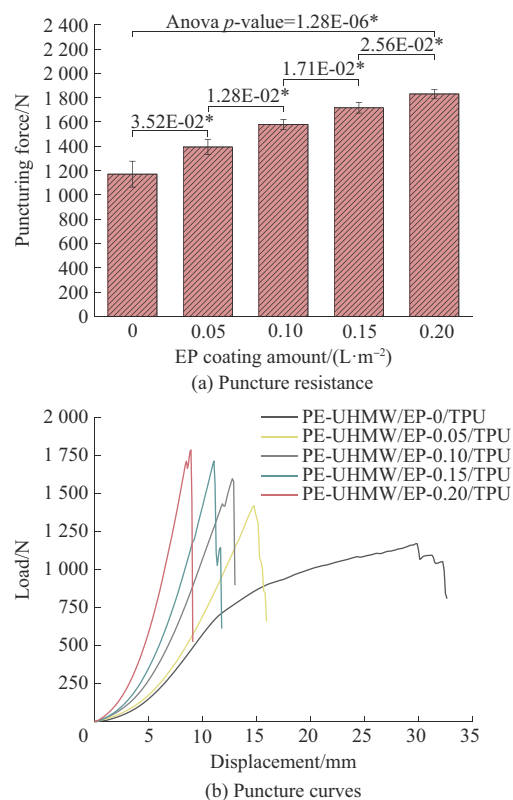


图7 EP涂覆量对PE-UHMW/TPU复合材料抗穿刺性的影响

Fig. 7 Effect of EP coating amount on puncture force of PE-UHMW/TPU composites

涂覆量与抗穿刺性的关系。随浸渍涂覆量增加,抗穿刺力显著提高($p\text{-value}<0.05$)。由图7b的穿刺曲线可见,未改性处理的复合材料抗穿刺力最低,且穿刺过程中产生最大的位移。随着浸渍涂覆量的增加,抗穿刺力显著提升,穿刺位移显著降低。表明EP活化浸渍液增强了复合材料的整体性,提高了材料在穿刺阶段承受和分散应力的能力。

复合材料的穿刺损伤形貌如图8所示。由图8a可见,PE-UHMW/EP-0/TPU复合材料破损一侧纤维呈毛羽状,在穿刺过程中,刀口处的纱线抽拔与断裂现象明显。在刺入过程中,垂直于织物的刺入力导致纱线沿织物截面和纱线轴向产生剪切与拉伸效应。刀尖沿刺入力方向对纱线施加向下的冲击力,刀身对周围纱线施加挤压作用,刀锋对纱线施

表1 EP涂覆量与PE-UHMW/TPU复合材料厚度、面密度、剥离强力以及CV值的关系

Tab. 1 Relationship between EP coating amount and thickness, areal density, peel strength and CV of PE-UHMW/TPU composites

EP coating amount/(L·m ⁻²)	Composite thickness/mm	Areal density/(g·m ⁻²)	Peel strength/N	Coefficient of variation/%
0	1.1	880	3.33	10.98
0.05	1.15	930	13.22	8.46
0.10	1.20	980	15.95	6.46
0.15	1.25	1 030	19.45	8.98
0.20	1.30	1 080	22.79	5.51

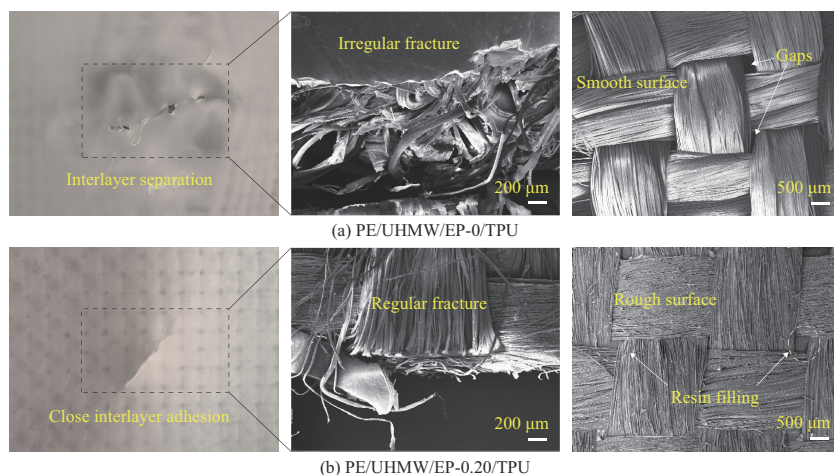


图8 不同EP涂覆量样品穿刺后对比

Fig. 8 Comparison of samples after puncture with different EP coating amount

加切割力,这些因素相互作用共同导致织物破损。其织物表面可观察到光滑特征,且纱线间存在较大孔隙,此结构为纱线受力后易发生滑移创造了条件。

经过浸渍涂覆的复合材料刀口处纤维断裂整齐,如图8b所示。EP活化浸渍液的固化交联有效抑制了纱线间的滑动,改善了抗穿刺能力^[14]。EP活化浸渍液在织物纱线间隙中的流动贯穿,起到连接上下两面TPU的作用,有效提升了织物中纱线的固定性和复合材料的层间结合效果,显著提高复合材料的抗穿刺性。

图9、图10分别展示了浸渍涂覆量与PE-UHMW/TPU复合材料撕裂和拉伸性能的关系。EP涂覆后,PE-UHMW织物与TPU膜的黏合显著增强,复合结构的整体性得到提升,受力更加均匀,撕裂和拉伸断裂强力有较大提升。当EP涂覆量继续

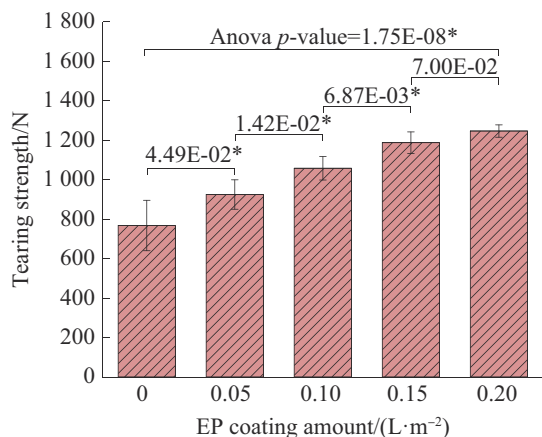


图9 EP涂覆量对PE-UHMW/TPU复合材料撕裂强力的影响

Fig. 9 Effect of EP coating amount on tear strength of PE-UHMW/TPU composites

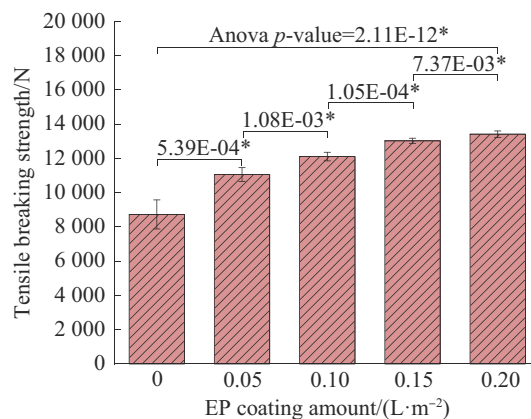


图10 EP涂覆量对PE-UHMW/TPU复合材料拉伸断裂强力的影响

Fig. 10 Effect of EP coating amount on tensile breaking strength of PE-UHMW/TPU composites

增加时,撕裂强力和拉伸断裂强力的增幅趋于减缓,可能是由于织物纱线逐渐接近其拉伸断裂强力的上限。单因素方差分析结果表明,浸渍涂覆量对复合材料撕裂和拉伸断裂强力影响显著(p -value < 0.05)。

在PE-UHMW/TPU复合材料中,TPU基体在撕裂过程中可吸收并分散能量,减缓裂纹扩展,同时,PE-UHMW纤维提供力学支撑,抑制撕裂的进一步发展。PE-UHMW纤维凭借其高强度和高模量提供了显著的力学支撑,有效防止了拉伸过程中的断裂。此外,EP活化浸渍液增强了PE-UHMW纤维与TPU间的界面黏结力,提高了材料在撕裂和拉伸过程中的能量吸收与分散能力。

表2为EP涂覆量对PE-UHMW/TPU复合材料力学性能影响的单因素方差分析,由表2可见,通过单因素方差综合分析,EP活化浸渍液用量对PE-

UHMW/TPU复合材料的剥离、穿刺、拉伸和撕裂性能均有显著性影响。这表明,EP的加入直接影响复合材料的机械性能。但是,随着浸渍量的增加,材

料的剥离强力显著提高,但也导致一定程度的质量增加,这将对轻量化需求的应用场景产生不利影响。

表2 EP涂覆量对PE-UHMW/TPU复合材料力学性能影响的One-Way ANOVA

Tab. 2 One-way ANOVA on the effect of EP coating amount on the mechanical properties of PE-UHMW/TPU composites

Mechanical properties	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F-value	p-value	Significance
Peel strength	1 104.21	24	276.05	194.93	1.03×10^{-15}	*
Puncture resistance	864 669.16	14	206 073.67	51.04	1.28×10^{-6}	*
Tensile strength	18 656 161.44	24	4 413 333.26	88.02	2.11×10^{-12}	*
Tear strength	878 121.76	24	190 203.64	32.42	1.75×10^{-8}	*

Note: when $p\text{-value} < 0.05$, it indicates significant effect(*).

为全面评估EP活化浸渍改性对PE-UHMW/TPU复合材料力学性能的影响,绘制了包含剥离强力、抗穿刺力、撕裂强力和拉伸断裂强力的雷达图,如图11所示。雷达图直观展示了各项性能指标随EP涂覆量变化的整体趋势。随着浸渍涂覆量增加,各项力学性能指标均有所提升,特别是在较低浸渍涂覆量条件下,复合材料的力学性能增幅显著,表明适量的EP活化浸渍改性在改善PE-UHMW与TPU界面黏结性以及增强复合材料整体性方面发挥了重要作用。

超过120℃时,PE-UHMW纤维的强度显著下降,纤维出现不可逆结构损伤。

(2) EP活化浸渍液不仅覆盖在织物表面,还在纤维间隙处形成贯穿黏附位点,显著增强了复合材料的界面结合性能,优化了织物中纱线的固结效果,从而提高了应力传递性能。

(3)通过单因素方差分析,证实EP活化浸渍液涂覆量对复合材料的剥离强力、抗穿刺强力、撕裂强力和拉伸断裂强力均产生显著影响。随浸渍涂覆量增加,复合材料的力学性能逐步提升,但增幅逐渐减小。

参考文献

- [1] WANG Y H, LI C L, HU Y M, et al. Evaluation of urban flooding and potential exposure risk in central and southern Liaoning urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110845.
- [2] LI Y T, WANG Y F, GONG J. An integrated metric for rapid and equitable emergency rescue during urban flash flooding events[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 118. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2025.105209.
- [3] BAO H, WU M, ZHANG X. Study on tearing tests and the determination of fracture toughness of PVC-coated fabric[J]. Journal of Industrial Textiles, 2022, 51(6):977–1 006.
- [4] 郁炜, 聂玲, 陆江锋. 抢险救援行动中冲锋舟和橡皮艇应用对比研究[J]. 水上安全, 2024(7):4–6.
YU Wei, NIE Ling, LU Jiangfeng. A comparative study on the application of charge boats and rubber boats in rescue operations [J]. Maritime Safety, 2024(7):4–6.
- [5] JIN X, GUO N S, YOU Z P, et al. Design and performance of polyurethane elastomers composed with different soft segments[J]. Materials, 2020, 13(21). DOI:10.3390/ma13214991.
- [6] BAI J B, XIONG J J, CHENG X. Tear resistance of orthogonal kevlar-PWF-reinforced TPU film[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(1):113–118.
- [7] 李猛, 刘洪静, 尚坤, 等. 织物骨架增强的TPU复合膜制备与力学性能[J]. 上海纺织科技, 2023, 51(11):59–62, 78.

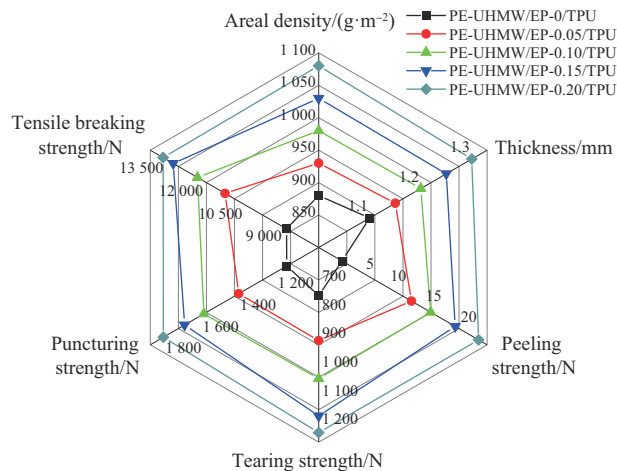


图11 PE-UHMW/TPU复合材料的综合性能雷达图

Fig. 11 Comprehensive performance radar diagram of PE-UHMW/TPU composites

3 结论

研究了不同温度下PE-UHMW纤维的热学效应和热损伤机制,分析了不同EP活化浸渍涂覆对复合材料成型后剥离、抗穿刺、撕裂以及拉伸性能的影响规律,具体研究结果如下。

(1)通过XRD, DSC和SEM等表征技术与统计分析,确定了EP活化浸渍PE-UHMW纤维与TPU最佳热复合成型温度为120℃,随温度升高,特别是

- LI Meng, LIU Hongjing, SHANG Kun, et al. Preparation of fabric reinforced TPU composite film and its mechanical properties[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2023, 51(11):59–62, 78.
- [8] ZUO Q, WANG C H, PEI X Y, et al. Analysis and prediction of tensile properties based on rule of mixtures model for multi-scale ramie plain woven fabric reinforced composite[J]. Composite Structures, 2023, 311. DOI:10.1016/j.compstruct.2023.116785.
- [9] 陈斌,陈敏,陈光静,等.国内外热塑性聚氨酯材料的技术和应用进展[J].聚氨酯工业, 2023, 38(1):1–5.
- CHEN Bin, CHEN Min, CHEN Guangjing, et al. The progress of thermoplastic polyurethane technologies and applications[J]. Polyurethane Industry, 2023, 38(1):1–5.
- [10] 叶卓然,罗靓,潘海燕,等.超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的研发现状与分析[J].复合材料学报, 2022, 39(9):4 286–4 309.
- YE Zhuoran, LUO Liang, PAN Haiyan, et al. Research status and analysis of ultra-high molecular weight polyethylene fiber and its composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 286–4 309.
- [11] 夏蕊,孙茂军,陈红霞,等. UHMWPE 织物增强 TPU 防刺大底复合材料的防刺性能研究[J].化工新型材料, 2024, 52(增刊2): 272–277.
- XIA Rui, SUN Maojun, CHEN Hongxia, et al. Study on puncture-resistant performance of UHMWPE fabric-reinforced TPU puncture-resistant outsole composites[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(Suppl 2):272–277.
- [12] CHHETRI S, BOUGHERARA H. A comprehensive review on surface modification of UHMWPE fiber and interfacial properties [J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2021, 140. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.106146.
- [13] SHELLEY D, LEE S Y, PARK S J. Compatibilization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers and their composites for superior mechanical performance:A concise review [J]. Composites Part B:Engineering, 2024, 275. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111294.
- [14] HE J, WANG Y, QIAN Y, et al. Surface modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene and applications:A review[J]. Polymers, 2024, 16(23). DOI:10.3390/polym16233431.
- [15] ZHANG B, CHEN S X, WANG W C, et al. Polyester (PET) fabrics coated with environmentally friendly adhesive and its interface structure and adhesive properties with rubber[J]. Composites Science and Technology, 2020, 195. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108171.
- [16] TAYFUN Ü, AKAR A Ö, HACIOĞLU F, et al. Compatibilization of coir fiber and elastomeric polyurethane by green modification routes[J]. Green Materials, 2023, 11(3):125–136.
- [17] 许冬梅,李宗家,李年华,等.胶黏剂对芳纶复合材料防刺性能的影响[J].合成纤维工业, 2023, 46(3):23–26.
- XU Dongmei, LI Zongjia, LI Nianhua, et al. Effect of adhesive on anti-puncture performance of aramid composite materials[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2023, 46(3):23–26.
- [18] 薛淑云,叶伟,王征,等.超高分子量聚乙烯纤维的耐高温性能[J].现代纺织技术, 2024, 32(3):53–60.
- XUE Shuyun, YE Wei, WANG Zheng, et al. High-temperature resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fibers[J]. Advanced Textile Technology, 2024, 32(3):53–60.
- [19] 张杏,叶伟,龙啸云,等.超高分子量聚乙烯纤维织物/热塑性聚氨酯复合材料的界面黏结性能[J].纺织学报, 2023, 44(8): 143–150.
- ZHANG Xing, YE Wei, LONG Xiaoyun, et al. Interfacial bonding properties of ultra-high molecular weight polyethylene fabric/thermoplastic polyurethane composites[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(8):143–150.