

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.001

大隔距覆增强结构柔性空间膜材料的制备及力学性能

王昆^{1,2,3}, 蒋金华^{1,2}, 陈南梁^{1,2}

(1. 东华大学产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620; 2. 东华大学纺织学院, 上海 201620; 3. 上海电缆研究所有限公司中央研究院, 上海 200082)

摘要: 针对提高大隔距柔性膜材料力学性能的迫切需求, 通过在大隔距经编间隔织物两表面复合具有增强结构的高分子层, 得到大隔距覆增强结构柔性空间膜材料(UGFM), 采用控制变量法, 分别测试高分子层有增强结构和无增强结构的UGFM撕裂、剥离、间隔向拉断力等力学性能。结果表明, UGFM表面复合的高分子层在引入增强结构后对其力学性能的影响较大。采用面密度为150 g/m²的机织物作增强结构时, UGFM的经向剥离性能降低了约47.7%, 纬向剥离性能降低了约51.0%, 经向撕裂性能提高了约37.9%, 纬向撕裂性能提高了约30.8%, 同间隔距离下间隔向拉伸性能提升了约5.8%。最后探讨了具有增强结构的高分子层对UGFM力学性能影响的机理, UGFM经纬向撕裂和剥离性能的差异化特征主要受间隔织物表面组织结构影响, 若破坏失效方向与线圈平行, 则失效趋势迅速, 若不平行, 则失效趋势放缓。同时UGFM间隔向拉伸断裂性能主要受织物间隔距离影响较大, 有无增强结构对UGFM间隔向拉伸性能影响微弱。

关键词: 经编间隔织物; 膜材料; 增强结构; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0001-07

Preparation and Mechanical Properties of Ultra-gauge Flexible Spacer Membrane Material Covered with Reinforced Structure

Wang Kun^{1,2,3}, Jiang Jinhua^{1,2}, Chen Nanliang^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Textile Technical Education Ministry, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Textile, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Central Research Institute, Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract : According to the urgent need of improving the mechanical properties of the ultra-gauge flexible membrane material, the ultra-gauge flexible spacer membrane material (UGFM) covered with reinforced structure was obtained by the composition of polyvinyl chloride polymer layer with reinforced structure on two surfaces of ultra-gauge warp-knitted spacer fabric. Adopting the control variable method, the mechanical properties of UGFM which carrying polymer layer with reinforced structure or not, such as tearing, stripping and interval tensile force, were researched. The results show that the mechanical properties of UGFM are greatly affected by the introduction of the polymer layers with reinforced structure which are laminated on the surface. When the woven fabric with a surface density of 150 g/m² is used as the reinforced structure, the warp stripping performance of UGFM is reduced by 47.7%, the weft stripping performance is reduced by 51.0%, the warp tearing performance is improved by 37.9%, the weft tearing performance is improved by 30.8%, and interval tensile force is improved by 5.8% during the same interval distance. In the end, the mechanism of the effect of polymer layer with reinforced structure on the mechanical properties of UGFM was also discussed, the different characteristics of the warp and weft tearing and stripping properties of UGFM are mainly affected by the surface structure of spacer fabric. If the failure direction is parallel to the loops, the failure trend is rapid; if not, the failure trend is slow. At the same time, the interval tensile fracture property of UGFM is mainly affected by the interval distance between fabrics, while the reinforcement structure has little effect on the interval tensile property of UGFM.

Keywords : warp-knitted spacer fabric ; membrane material ; reinforced structure ; mechanical property

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0303301), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2232021G-06)

通信作者: 蒋金华, 教授, 主要研究方向为产业用纺织品、特种编织织造技术与复合材料

收稿日期: 2022-11-25

引用格式: 王昆, 蒋金华, 陈南梁. 大隔距覆增强结构柔性空间膜材料的制备及力学性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2): 1-7.

Wang Kun, Jiang Jinhua, Chen Nanliang. Preparation and mechanical properties of ultra-gauge flexible spacer membrane material covered with reinforced structure[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 1-7.

经编间隔织物是使用双针床拉舍尔经编织备的三维结构纺织物,其间隔丝连接各表面层织物形成中空结构^[1-4]。此三维纺织结构赋予了间隔织物良好的保温性、透气透湿性、减震性及结构稳定性等,因此被广泛应用于垫类产品及复合材料增强体^[3-7]。当间隔距离超过 100 mm 时,对应的经编间隔织物被称为超大隔距经编间隔织物^[2-3,8](UGWKF)。UGWKF 在织造封孔后可充气膨胀,间隔层倒伏的间隔丝受张力而直立,间隔丝主要发挥上下表面层的连接作用^[2]。然而 UGWKF 间隔丝长度大、刚性小且排列密度小,织物不能单纯依靠间隔丝的支撑作用来达到抗压性能,所以必须对其表面涂层包覆处理或中空填充之后方可更好地发挥其性能^[2,8-9]。其主要可用于冲浪板、气垫船、消防救护床、充气拉丝气垫、可展开反射面天线等各领域不同产品^[6-11]。

喻颖等^[12]研究了 UGWKF 两表面涂聚氯乙烯(PVC)层所得柔性复合材料的压缩性,发现伴随充气压强增加,其抗压能力和缓冲作用增强。程小梅等^[13]研究了三维间隔织物两表面层涂环氧树脂所得柔性复合材料的力学性能,发现涂覆环氧树脂后的柔性复合材料的抗拉性能和整体抗压性能有所增强,且双面涂层后比单面涂层后的力学性能提高更明显。苗亚敏等^[14]研究了表面涂覆水性聚氨酯涂层三维间隔织物的静态冲击性能,发现在不破坏材料透气性能的情况下,树脂涂层的加入使得材料承载能力得到大幅提高,弹性模量有所提高,缓冲系数降低,缓冲效率提高。

笔者基于探究大隔距覆增强结构柔性空间膜材料(UGFM)的力学性能,将包含有机织物增强结构的 PVC 高分子层和无机织物增强结构的 PVC 高分子层分别复合在 UGWKF 表面,通过比较两种材料的撕裂性能、剥离性能、间隔向拉伸性能,分析引入具有增强结构的 PVC 高分子层对 UGFM 力学性能影响与机理,以及隔距的增加对 UGFM 间隔向拉伸性能的影响与机理,从而为 UGWKF 复合具有增强结构的高分子层后得到的柔性空间膜材料的设计、制备与应用提供基础依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

UGWKF:由细度为 1 000 D 涤纶以经斜编链结构织造,海宁晨峰布业有限公司,基本参数见表 1,

经斜编链组织结构见图 1。

表 1 UGWKF 基本参数

分类	横密/ [个·(5 cm) ⁻¹]	纵密/ [个·(5 cm) ⁻¹]	间隔距 离/mm	面密度*/ (g·m ⁻²)	表面层 结构
织物 a	32	43	100	464.4	经斜编链
织物 b	32	43	150	467.5	经斜编链
织物 c	32	43	200	471.8	经斜编链

注:*面密度为单表面层的面密度,下表同。

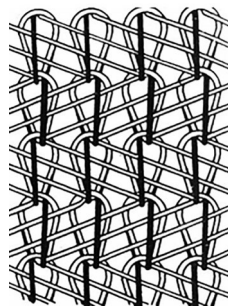


图 1 经斜编链组织

复合树脂:PVC 糊树脂(EPVC) 100 份,增塑剂 45 份,胶水 10 份,稳定剂 2 份,均为质量份,浙江明士达新材料有限公司。

涤纶机织物:面密度 150 g/cm²,海宁晨峰布业有限公司。

PVC 粉料:PVC-SG3,浙江明士达新材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

UGFM 生产设备线及高分子层(无增强结构)压延设备线:浙江明士达新材料有限公司;

万能试验机:WDW-500 型,上海华龙测试仪器股份有限公司;

电子天平:FA2004 型,上海良平仪器仪表有限公司。

1.3 试样制备

(1)无增强结构的 PVC 高分子层的制备。

委托浙江明士达新材料有限公司使用自建压延设备线制备 PVC 高分子层(无增强结构),先将 PVC 粉料密炼熔融,后压延制备出厚度 0.6 mm,单层面密度 784.1 g/m²的 PVC 高分子层(无增强结构)。

(2)具有增强结构的 PVC 高分子层的制备。

委托浙江明士达新材料有限公司使用自有 UGFM 生产设备线,采用轧辊上浆技术通过复合树脂自下而上对增强结构机织物上浆,上浆量为 70~100 g/m²。将中间为增强机织物和两面为 PVC 高分子层(无增强结构)叠层复合后,引入温度为 180~200 ℃的加热辊中压合,经高温固化后制备得到厚

度 0.5~0.7 mm,面密度 943.2 g/m²的 PVC 高分子层(有增强结构)。轧辊上浆技术见图 2a,制备工艺路线见图 2b。

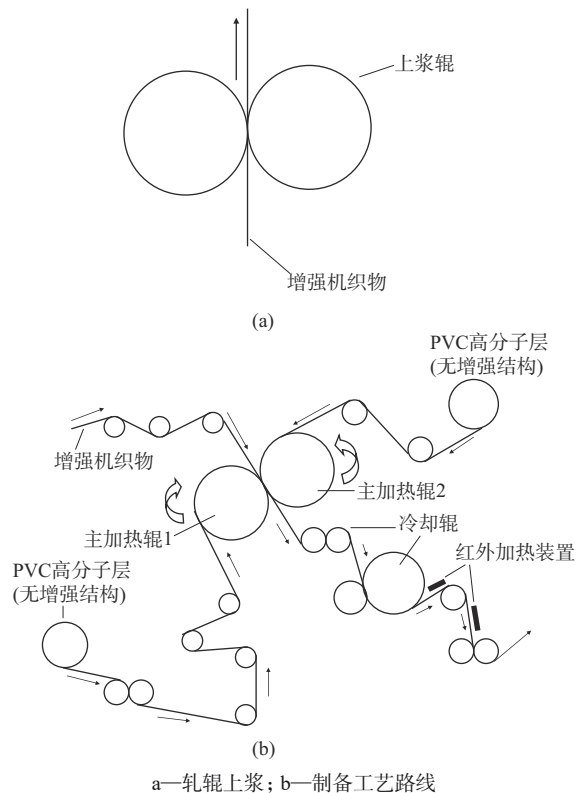


图2 制备具有增强结构的PVC高分子层

(3) UGFM制备。

UGFM制备工艺路线与PVC高分子层(有增强结构)制备工艺路线基本一致,先将UGWKF表层错位张紧间隔丝后,引入浙江明士达新材料有限公司自建UGFM生产设备线内,如图2b所示,将原增强机织物替换为UGWKF放置中间,将两面PVC高分子层(无增强结构)替换为PVC高分子层(有增强结构),将复合树脂作黏合剂(浆料),用改进轧辊上浆技术自下而上地上浆,以90~100 g/m²的上浆量涂覆在间隔织物表面,如图3所示。经过加热辊加热温

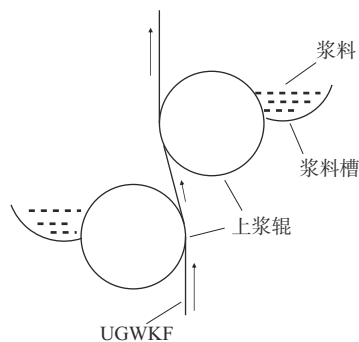
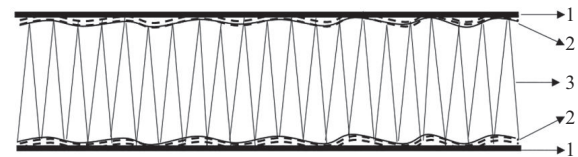


图3 UGWKF的改进轧辊上浆技术

度 200~220 °C处理,以 3.5~4 m/min的牵伸速度将复合好的中间为UGWKF且两表面为PVC高分子层(有增强结构)的组合物引入高温烘箱中固化并冷却后,即可制得UGFM,UGFM内部结构如图4所示,基本参数见表2。



1—PVC 高分子层(有增强结构或无增强结构);

2—经编织物; 3—超大间隔丝

图4 UGFM结构

表2 UGFM基本参数

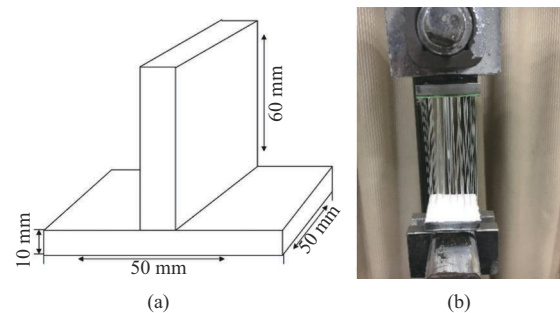
UGFM 编号	UGWKF横密/ [个·(5 cm) ⁻¹]	UGWKF纵密/ [个·(5 cm) ⁻¹]	织物间隔 距离/mm	面密度/ (g·m ⁻²)	增强 结构
A	32	43	100	1 349.6	无
B	32	43	100	1 502.2	有
C	32	43	150	1 504.7	有
D	32	43	200	1 509.1	有

1.4 性能测试与表征

撕裂强力按照GB/T 3917.3-2009测试,试样为等腰梯形,尺寸为(75±1) mm×(150±2) mm,沿经纬向各制备5块试样,初始夹持距离为25 mm,撕裂速度为100 mm/min,预开口为15 mm。

剥离强度按照ASTM D751-2006测试,沿经纬向将试样裁剪成200 mm×25 mm矩形各5块。试样预剥开口25 mm,初始夹持隔距50 mm,剥离速度100 mm/min,剥离距离不少于76 mm,沿PVC高分子层与UGWKF表面层结合的方向剥离。

间隔向拉伸性能测试:裁取40 mm×40 mm面积且间隔丝完整的不同织物间隔距离试样,将其两表面分别用高粘力胶水与T型模具平面完全密封黏合并静置凝固后,使用万能试验机夹持T型模具测试间隔丝方向的拉伸断裂强力,拉伸预张力3 N,拉伸速度100 m/min。T型模具如图5所示。测试面积



a—T型模具; b—间隔向拉伸

图5 T型模具与间隔向拉伸

小于T型模具面积的目的是使膜材表面与模具完全黏合,减少膜材翘曲起包引起测量误差。

2 结果分析

2.1 剥离性能

UGFM A与B的剥离曲线如图6所示。由图6分析发现,B与A的经纬向剥离曲线趋势基本一致,但A的剥离曲线5个峰值均高于B曲线,特别在经向剥离曲线对比中,B曲线波动振幅显著弱于A曲线。在纬向剥离曲线对比中,B曲线较A曲线波动振幅分布更均匀。剥离强度等于剥离曲线中首个波峰后中段处5个最大波峰的均值。经计算,B较A在经向剥离性能上降低了约47.7%,纬向剥离性能上降低了约51.0%,如图7所示。

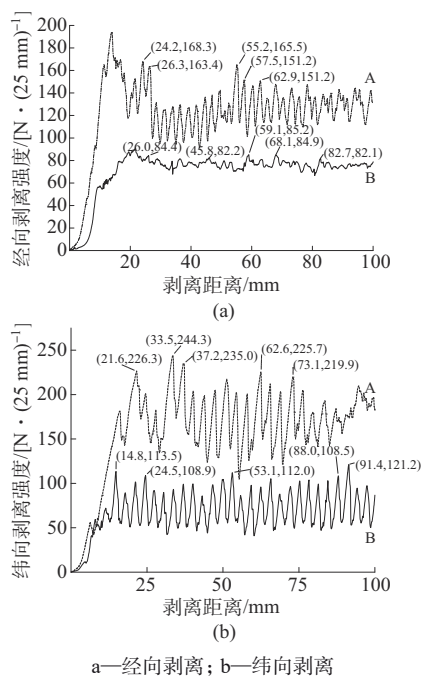


图6 UGFM A与B的剥离曲线

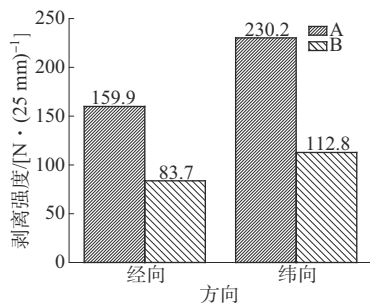


图7 UGFM A与B的剥离强度对比

经纬向剥离的差异化曲线波动主要是由各剥离位置黏合强度的差异造成的,因为复合树脂与上浆工艺基本一致,所以各剥离位置处的剥离强度差异主要来源于织物组织结构的不均匀^[15]。观察B剥

离界面发现,沿经向剥离的PVC高分子层的“触手”呈现纵向连续、横向间隔分布的特征,如图8a所示。“触手”纹路同UGWKF面层编链线圈间的间隙沟槽吻合,且间隙(黏合薄弱区)与线圈贴合面(黏合牢固区)沿剥离方向相互间隔排列,无交叉,无交替制约。而沿纬向剥离的PVC高分子层的“触手”呈现“人”字型均匀分布,沿剥离方向有交叉、可交替制约,如图8b所示。所以经向剥离较纬向剥离更容易发生及扩散,经向剥离曲线的振幅相对更微弱,剥离强度也更低。此外,经纬向剥离后PVC高分子层的“触手”目视凸起长度较短,并未发现“触手”断头、拉伸延展、撕裂等迹象。可能因为PVC高分子层存在增强结构,存在受热不均、贴合面PVC熔融不透彻、可有效渗透进织物间隙的PVC高分子层量不足等问题,与复合无增强结构PVC高分子层相比,有增强结构的PVC高分子层“触手”难以与线圈面和间隙结合牢靠,因此表现为B整体剥离性能弱于A。所以在后续UGFM的研究、设计与制备中,可着重加强间隔织物面层组织结构设计、复合界面结合强度和高性能涂胶胶水性能等方面的研究,通过多角度协同与优化来提高UGFM的剥离性能。

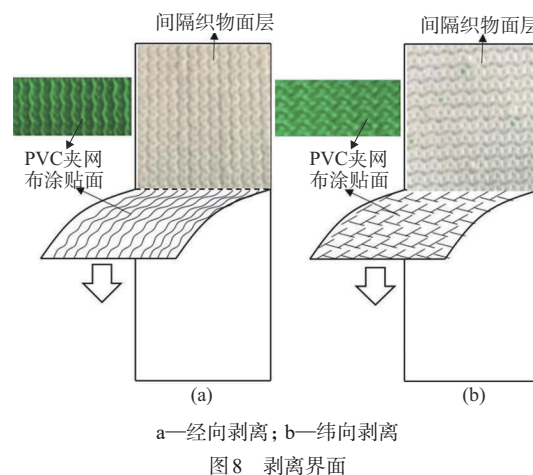


图8 剥离界面

2.2 撕裂性能

UGFM A与B的撕裂曲线如图9所示。由图9分析发现,B与A的经纬向撕裂曲线趋势基本一致,但B的经纬向撕裂曲线的5个峰值均高于A曲线。其中B的经向撕裂曲线波峰分布较离散,曲线波动振幅更随机;纬向撕裂曲线波峰分布相对均匀,波动振幅相对一致。撕裂强度等于撕裂曲线中首个波峰后中段处5个最大波峰的均值。经计算,B较A在经向撕裂性能上提高了约37.9%,B较A在纬向撕裂性能上提高了约30.8%,如图10所示。可见在

PVC 高分子层内引入增强结构的方法对提高 UGFM 撕裂性能的效果十分显著。

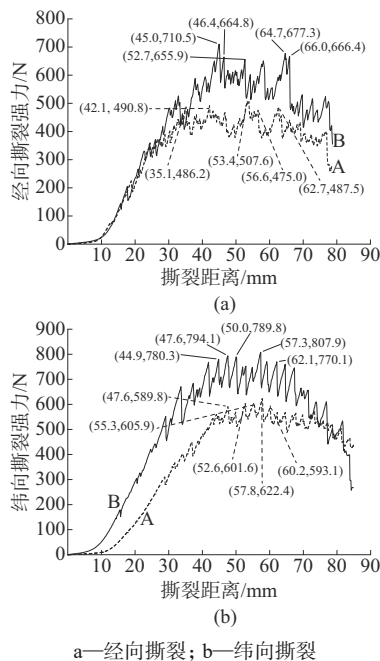


图9 UGFM A 与 B 的撕裂曲线

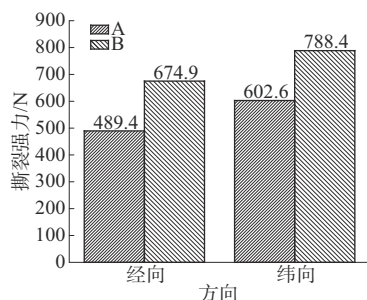


图10 UGFM A 与 B 的撕裂强度对比

经纬向撕裂的差异化曲线波动主要是由各撕裂位置破坏形式的差异造成的,其差异主要来源于间隔织物面层的组织结构破坏位置与机理的不同。在轴梯形撕裂破坏主要分为4个经典区段:拱形褶皱与应力增长段、应力集中三角区形成段、纱线断裂与三角区推进段、撕裂尾段^[16]。观察撕裂三角区发现,空间膜材经向撕裂口扩散位置主要发生在线圈的间隔处,并在应力集中三角区形成阶段,以间隔织物面层内经斜延长线的断裂、撕裂三角区内滑移、部分抽离为主要破坏形式,表现为纱线断裂与撕裂三角区快速推进、经向撕裂断面留存大量经斜纱断头及断面附近涂覆层的部分剥离,如图11a所示。因为经斜延长线与水平方向成一定夹角倾斜,当撕裂三角区经斜延长线受力时,除沿纱线延伸方向受拉外,还产生面内的剪切力,经斜延长线于面

内有产生滑移的趋势。因PVC“触手”在线圈间隙内仅与若干经斜延长线黏结,但面-线结合力远小于面-面结合力,受力的经斜延长线会在其连接的圈柱根部应力集中,部分线圈根部与PVC高分子层发生分离,最终产生了撕裂断口边缘的部分波浪式剥离现象。每两列相邻线圈间有若干经斜延长线,以经斜延长线区为主要位置的撕裂破坏存在一定的随机性和不同步性,所以经向撕裂曲线波峰呈离散分布,波动振幅高低不均。

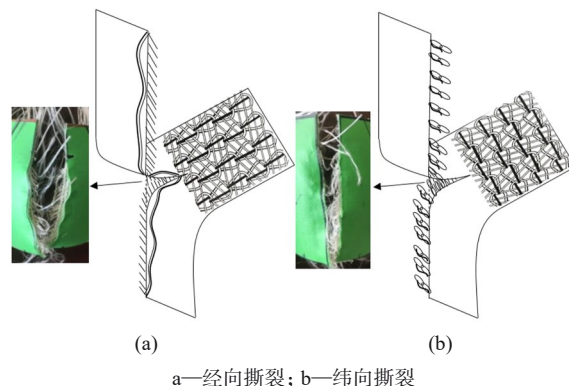


图11 撕裂三角区

纬向撕裂位置主要为规律的线圈和穿插于线圈内的经斜延长线,且各线圈列排列均匀、结构较一致,在应力集中三角区形成阶段,以线圈受力收缩断裂、抽离为主要破坏形式。线圈和穿插于线圈内的经斜延长线共同构成的线圈面与PVC高分子层的结合力更牢靠,所以撕裂断面相对平整,断口有部分抽离的线圈和线头,断口边缘基本无剥离现象,如图11b所示。同时纬向剥离曲线的波峰呈相对均匀分布,波动振幅在中段较为一致。

2.3 间隔向拉伸性能

UGFM A, B, C 和 D 的间隔向拉伸力和提升幅度如图12所示。图12显示, C 的最大间隔向拉伸力较 B 高约 29.0%, D 的最大间隔拉伸力较 C 高约 48.6%。其中具有相同间隔距离的 A 与 B 在复合了不同 PVC 高分子层时,带增强结构 PVC 高分子层的

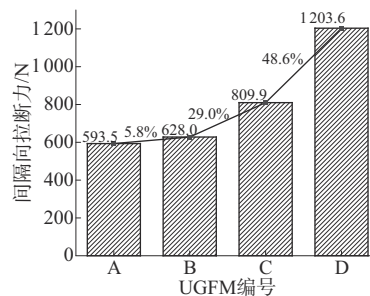


图12 4种UGFM的间隔向拉伸力及提升幅度

B的间隔向拉断力较A微弱提升约5.8%。由此推断,在相同间隔距离下,PVC高分子层引入增强结构后对间隔向拉伸性能的影响甚微,但由于增强结构的引入间接降低了高分子层渗透表面织物层并约束间隔丝底部的程度,且提高了粘贴测试面的刚度,一定程度提升了间隔丝沿拉伸方向的取向度和断裂一致性,所以表现为拉断力有微弱提高。

图13为间隔丝受力图,分析图12和图13可知,假设 F_α 、 F_β 分别为UGFM C和D沿间隔丝实际拉伸方向上的力,则 $F_c = F_\alpha \cos \alpha$, $F_d = F_\beta \cos \beta$ (F_c 、 F_d 为沿垂直高度方向上对间隔丝作用的力), $T_c = (\sqrt{2}/2) F_\alpha \sin \alpha$, $T_d = (\sqrt{2}/2) F_\beta \sin \beta$ (T_c 、 T_d 为间隔丝实际拉伸方向在表面层分力)。由于测试时UGFM平面与T型模具密封黏合,可认为不同间隔距离的材料表面性能表征相同,即 $T_c = T_d$ 。伴随UGFM垂直间隔的距离增大,其间隔丝与垂直高度方向上的夹角 $\beta < \alpha$,故 $\cos \alpha < \cos \beta$, $\sin \alpha > \sin \beta$ ^[16-17]。则 $F_\alpha = \sqrt{2} T_c / \sin \alpha < F_\beta = \sqrt{2} T_d / \sin \beta$,于是得到 $F_c < F_d$ 。由此得出,当其它条件相同时,大间隔距离的UGFM间隔丝与垂直方向的角度更小,在拉伸过程中,间隔丝趋于垂直方向的一致取向度更高,各间隔丝同时断裂的趋势更强,最终表现为UGFM间隔距离越大,其间隔向拉断力越高。

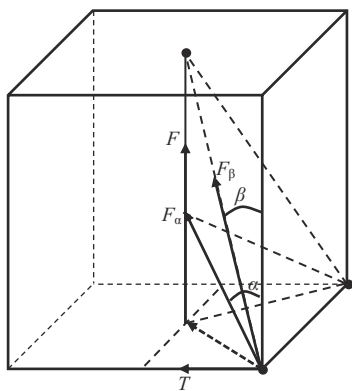


图13 间隔丝受力

3 结论

研究了引入增强结构的高分子层对UGFM力学性能的影响,深入分析了具有增强结构的高分子层对UGFM力学性能影响的机理,通过测试UGFM的撕裂性能、剥离性能、间隔向拉伸性能,得出如下结论:

(1)引入增强结构的高分子层对UGFM的剥离性能有削弱影响,对撕裂性能有增强影响,且影响

程度较大,本研究中,使用150 g/m²的机织物作为增强结构时,UGFM的经向剥离性能降低了约47.7%,纬向剥离性能降低了约51.0%,经向撕裂性能提高了约37.9%,纬向撕裂性能提高了约30.8%。

(2)间隔织物表面组织结构对UGFM在经纬方向剥离和撕裂性能表征差异的影响较大,若破坏失效方向与线圈平行,则失效趋势迅速,性能表现相对不佳,若不平行,则失效趋势放缓,性能表现相对突出。因此在后续UGFM设计和制备过程中可结合性能需求对表面组织结构开展定制化设计,并对组织结构对性能影响作更深入研究。此外现有引入增强结构的高分子层与间隔织物的复合工艺有待进一步优化。

(3)引入增强结构的高分子层对UGFM的间隔向拉伸性能影响相对微弱,同间距下,有增强结构的UGFM较无增强结构的UGFM间隔向拉伸性能提升了约5.8%。

(4)UGFM间隔向拉伸性能主要受间隔距离影响,其它条件相同时,间隔距离越大,间隔向拉断力越大。本研究中,随着间隔距离从100 mm提升至150 mm和200 mm,UGFM的间隔向拉断力分别提升了29.0%,48.6%,随着间隔距离继续增大,间隔向拉断力甚至可能更高。

参考文献

- [1] 陈绍芳,伯燕,雷励. 间隔织物的生产与应用[J]. 上海纺织科技, 2011, 39(10):42-43.
Chen Shaofang, Bo Yan, Lei Li. Production and application of spacer fabric[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2011, 39 (10):42-43.
- [2] 夏凤林. 经编间隔织物的抗压回弹性研究[J]. 纺织学报, 2003(4): 58-60.
Xia Fenglin. Study on compressive resilience of warp knitted spacer fabric[J]. Journal of Textile Research, 2003(4):58-60.
- [3] Sun Y X, Lyu L H, Yan B, et al. Preparation and characterization of 3D flexible high-distance spacer fabric/foam composite[J]. Composite Structures, 2021, 261. DOI: 10.1016/j.compstruct. 2021.113549.
- [4] Yip J, Ng S P. Study of three-dimensional spacer fabrics: Physical and mechanical properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206:359-364.
- [5] Liu Y P, Hu H. Vibration isolation behaviour of 3D polymeric knitted spacer fabrics under harmonic vibration testing conditions [J]. Polymer Testing, 2015, 47:120-129.
- [6] Abounaim M, Hoffmann G, Diestel O, et al. Thermoplastic composite from innovative flat knitted 3D multi-layer spacer fabric using hybrid yarn and the study of 2D mechanical properties[J]. Compos-

- ites Science and Technology, 2010, 70:363–370.
- [7] Ghorbania V, Jeddia A A A, Dabiryan H, et al. Investigation of the flexural behavior of self-consolidating mortars reinforced with net warp-knitted spacer fabrics[J]. Construction and Building Materials, 2020, 232. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117270.
- [8] 徐云龙, 夏凤林. 超大隔距经编间隔织物的生产工艺与应用[J]. 纺织导报, 2018(4):75–77.
- Xu Yunlong, Xia Fenglin. Production process and applications of ultra-high-gauge warp-knitted spacer fabrics[J]. China Textile Leader, 2018(4):75–77.
- [9] 刘洋, 黄晓梅, 曹海建, 等. 三维间隔织物复合材料的制备及拉伸性能研究[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(1):19–22.
- Liu Yang, Huang Xiaomei, Cao Haijian, et al. Study on manufacturing and tensile properties of 3D spacer fabric composites[J]. Technical Textiles, 2017, 35(1):19–22.
- [10] 马明英, 孙懿, 刘贵, 等. 经编间隔织物/室温硫化硅橡胶柔性复合材料压缩性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45(1):7–15.
- Ma Mingying, Sun Yi, Liu Gui, et al. Compression performance of warp-knitted spacer fabric/rtv silicone rubber flexible composites[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2019, 45(1):7–15.
- [11] 张成龙, 陈南梁, 耿奕, 等. 高密经编浮空器蒙皮材料的制备与力学行为研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(9):42–47.
- Zhang Chenglong, Chen Nanliang, Geng Yi, et al. Study on preparation and mechanical behavior of high-density warp knitted aerostat envelope material[J]. Composites Science and Engineering, 2020(9):42–47.
- [12] 喻颖, 张超, 马丕波. 超大隔距经编间隔柔性复合材料制备与压缩性能研究[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(3):28–31.
- Yu Ying, Zhang Chao, Ma Pibo. Preparation and compressive properties' research of high-gauge warp knitted spacer flexible composites[J]. Technical Textiles, 2017, 35(3):28–31.
- [13] 程小梅, 朱婧婧, 贾浩, 等. 三维中空间隔织物柔性复合材料的力学性能研究[J]. 纺织科学与工程学报, 2018, 35(4):6–9.
- Cheng Xiaomei, Zhu Jingjing, Jia Hao, et al. Study on the mechanical properties of 3D hollow spacer fabric flexible composites[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2018, 35(4):6–9.
- [14] 苗亚敏, 吴晓青, 李少玲. 表面涂层对经编间隔织物静态缓冲性能的影响[J]. 纤维复合材料, 2017, 34(1):3–6.
- Miao Yamin, Wu Xiaoqing, Li Shaoling. Effect of surface coating on static cushioning performance of warp-knitted spacer fabric[J]. Fiber Composites, 2017, 34(1):3–6.
- [15] 黄忠耀, 杨建雄, 蔡利海, 等. 双轴向经编涂覆织物剥离性能研究[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(4):22–25.
- Huang Zhongyao, Yang Jianxiong, Cai Lihai, et al. Research on the peeling properties of coated biaxial warp knitted fabric[J]. Technical Textiles, 2012, 30(4):22–25.
- [16] 陈建稳, 张若男, 张阳, 等. 经编织物气囊蒙皮梯形撕裂行为及破坏机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(6):28–36, 53.
- Chen Jianwen, Zhang Ruonan, Zhang Yang, et al. Trapezoid tearing behavior and damage mechanism of warp-knitted envelope fabrics[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(6):28–36, 53.
- [17] 王昆. 三维间隔织物增强空间膜材料的生产和性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- Wang Kun. Studies on production and performance of three-dimensional membrane materials produced with space fabric[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.