

文章编号: 1001-4888(2019)04-0563-11

剪切增稠液改性软织物的单纱拉出测试研究*

马宇, 雷振坤, 冯洋, 白瑞祥

(工业装备结构分析国家重点实验室, 大连理工大学工程力学系, 辽宁大连 116024)

摘要: 剪切增稠液浸渍柔性织物是防弹织物进行表面改性的潜在方法, 利用剪切增稠液剪切率与粘度的极端非线性关系可显著提高纱线拔出力与拔出能量, 从而增加柔性织物的抗冲击性能。本文以 SiO_2 为分散相、乙二醇为分散剂配置剪切增稠液, 来浸渍 Kevlar49 平纹织物进行表面改性。对坯布与浸渍布进行纱线拔出测试, 其载荷-位移曲线呈现相似趋势, 均分为静摩擦与动摩擦两个阶段; 与坯布的极限拔出载荷出现在静摩擦阶段不同, 浸渍布的极限拔出载荷出现在动摩擦阶段, 且明显大于坯布。另外, 浸渍布的纱线拔出能量和面内剪切变形均有明显的提升, 且与剪切增稠液的质量分数和纱线拉拔速率相关。

关键词: 剪切增稠液; 能量吸收; 剪切变形; 柔性织物

中图分类号: O348.1; O346.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-243

0 引言

芳纶纤维平纹机织布具有轻质、高强度、耐腐蚀等优点, 被广泛应用于软质防弹装备中。在子弹冲击防弹织物的过程中, 织物耗散子弹动能的方式主要有三种情况: 织物中纱线的应变能、子弹转化给纱线的动能、纱线滑移及抽出过程中的摩擦力耗能^[1]。柔性织物纱线间的摩擦力大小, 与织物的抗冲击性有明显的相关性^[1-3], 其主要影响纱线抽出过程中的能量损耗、限制纱线间的相互滑移和整个织物的剪切变形^[4]。通常, 弹道高速侵彻实验可以对包括弹头动能变化和织物破坏前后形态变化的防弹织物整体防弹性能进行综合评价, 但是无法对弹头冲击力、纱线间摩擦力等一些关键参数进行捕捉, 更不能从微观层面对织物的冲击变形过程、粘着一滑移过程、载荷传递过程及能量吸收机制进行深入研究。

通过将弹道侵彻实验中的纱线拔出现象模型化为准静态的纱线拔出过程, 既可以研究织物的剪切变形行为, 也能分析纱线的屈曲伸长、粘着一滑移现象和能量传递机制, 有助于理解侵彻实验中纱线摩擦-滑移过程。Tapie 等^[4]对 Kevlar 平纹织物进行了面内与离面拔出测试研究, 认为拉拔力峰值和拔出能量都与织物横向预紧力有关, 并且横向预紧力对面内拉拔测试影响更大。Nilakantan 等^[5]开展了自由边界条件下芳纶纤维布的冲击穿透和纱线拔出实验, 认为纱线滑移和拔出是主要的能量损耗机制。Bai 等^[6]使用数字图像相关方法(DIC)测量了织物在纱线拔出过程中的面内剪切变形, 解释了动摩擦阶段的载荷震荡下降机制。Zhu 等^[7]对织物纱线拔出过程建立了分析模型, 研究了纱线拔出的力学响应与滑移现象。Sueki 等^[8]对织物增强水泥基复合材料的界面结合特性进行了研究, 结果表明拉出载荷与嵌入长度明显相关。Bilisik 等^[9]对 Kevlar29 和 Kevlar129 平纹织物进行了面内拉拔实验研究, 发现纱线的拉拔力取决于织物的编织密度、试样尺寸和拉出端数。

* 收稿日期: 2018-11-05; 修回日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(11772081, 11472070, 11572070)资助

通讯作者: 雷振坤(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事实验力学研究。Email: leizk@dlut.edu.cn

白瑞祥(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要从事复合材料力学研究。Email: bairx@dlut.edu.cn

使用剪切增稠液(STF)对织物表面改性的方法是增强织物抗冲击性能的一个重要研究领域。STF是由分散相和分散剂按照一定质量分数配比而成的非牛顿流体,其剪切速率与粘度之间呈现很强的非线性^[10,11]。当剪切率较低时,液体粘度也呈现较低的水平,但随着剪切速率增加超过某临界速率值时,液体粘度随之迅速增加变得极其粘稠,这种典型特性称为剪切增稠现象,成为柔性织物表面改性的重要手段^[12-19]。防弹衣的设计不仅要考虑其对弹头的能量耗散能力,还要尽量减轻防弹衣的重量,采用 STF 浸渍布制备的防弹衣表现出更好的抗刺性能^[12]。Feng 等^[13]认为 STF 的引入提高了织物纱线间摩擦力,显著增强了能量吸收性能。Cao 等^[14]使用分离式霍普金森压杆研究了 STF 浸渍 Kevlar 织物在高应变速率下的力学性能和能量吸收性能,认为 STF 的体积分数、织物层数和冲击速率对浸渍布的动力学性能有很大的影响。可见,STF 主要加强了纱线间的摩擦力、限制纱线间的滑移和变形,从而提高织物在高应变速率下的抗冲击性能。此外, Lee 等^[15]研究了 STF 的粒径尺寸对浸渍 Kevlar 织物防弹性能的影响,研究表明具有较小粒径的 STF 浸渍布在剪切增稠的起始剪切应变率下表现出最大的摩擦增量。Majumdar 等^[16]研究了 STF 浸渍布的抗冲击增强机理,发现 STF 在冲击过程中转化为类固体材料,充当连接基体将织物中的纱线转换为一体结构,从而引入更多的辅纱参与承载和能量吸收过程。

本文以 SiO_2 为分散相、乙二醇为分散剂的 STF 来浸渍 Kevlar49 平纹机织布,应用纱线拔出测试来评价 STF 对于织物纱线间摩擦力的增强程度,使用数字图像相关方法(DIC)测量织物在纱线拔出过程中的面内剪切变形,来分析纱线拔出过程中摩擦耗能。

1 织物属性

由杜邦公司生产的 Kevlar49 平纹织物作为本研究的实验材料,其材料属性如表 1 所示。本文所使用的 STF 是以 SiO_2 为分散相、乙二醇为分散剂按照特定质量分数(62%、65%、70%)配比、采用行星式球磨法制备而成,其中 STF 中使用的 SiO_2 平均粒径为 $1\mu\text{m}$ 。未经任何处理的织物记为“坯布”试件,经 STF 浸渍过的织物记为“浸渍布”试件,其材料属性列在表 1 中。

表 1 Kevlar49 坯布与浸渍布的材料属性

Tab. 1 Material properties of Kevlar49 Neat fabric and STF-impregnated fabric

织物类型	Dtex	面密度/(g/cm ²)	纱线纤维根数	纤维直径/(μm)
坯布	1580	1.44	1000	12
浸渍布	2560~2934	1.75~1.89	1000	12

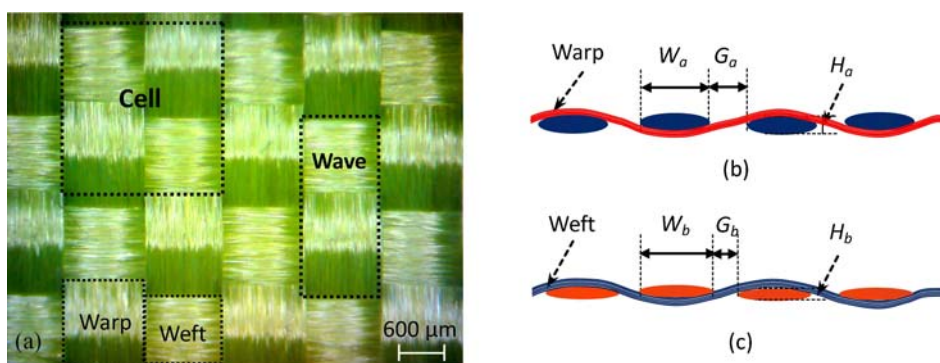


图 1 Kevlar49 平纹织物的几何结构图, (a) 编织结构, (b) 经纱迹线与纬纱横截面, (c) 纬纱迹线与经纱横截面

Fig. 1 (a) Schematic of Kevlar49 plain woven fabric, (b) warp trajectory with cross wefts and (c) weft trajectory with cross warps

本文使用的 Kevlar49 平纹织物的几何结构如图 1(a)所示,可见该织物是由经纱和纬纱正交交织而成,在虚线正方形区域内包含有 2×2 经/纬纱交织点记为平纹编织结构的一个胞元(Cell),整个织物可以看成是无数个胞元不断重复排列而成。在虚线矩形区域内,所包含的 1×2 经/纬纱交织点定义为一个编织波(Wave),是经纱的一个完整编织周期。同样,将纬纱的一个编织周期也定义为编织波,图 1

(b)和图 1(c)分别显示的是织物经纱和纬纱方向的横截面示意图,其中纬纱横截面相对于经纱更加“厚窄”,而经纱横截面则更加“宽薄”,且纱线之间存在间隙,这是由于编织机对经/纬纱施加的不同编织力造成的。用 W_a 和 W_b 分别代表纬纱和经纱的纱线宽度,用 G_a 和 G_b 分别代表纬纱和经纱的纱线间隙, T_a 和 T_b 代表纬纱和经纱的纱线厚度,这些几何参数列在表 2 中。

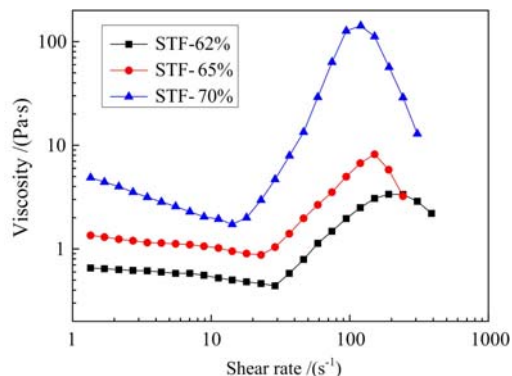


图 2 剪切增稠液的流变性能曲线

Fig.2 Rheological curve of the prepared STF s

这一过程定义为剪切稀化现象。随着剪切率增加超过一个“阈值”后,STF 粘度显著升高,变得极其粘稠,这一过程定义为剪切增稠现象。针对三种质量分数的 STF,其阈值分别为 $36.6s^{-1}$ 、 $28.9s^{-1}$ 和 $18s^{-1}$ 。此外,较大质量分数的 STF 具有更明显的剪切增稠变化,例如质量分数为 70% 的 STF 在剪切增稠过程发生后,其粘度变化程度明显高于质量分数为 62% 与 65% 的 STF。

本项研究中,将 STF 使用无水乙醇以 1 : 5 的质量比进行稀释,并将织物试件浸渍其中,水浴法超声震荡 5 分钟以增加 SiO_2 颗粒的分散程度,之后取出织物并悬挂在干燥箱 (DZF-6050) 中。待乙醇完全挥发后,STF 浸渍布试件准备就绪。使用扫描电子显微镜 (QuantaTM) 对 Kevlar49 纯织物和 STF 浸渍布进行观察,评价织物表面改性状态,如图 3 所示。

表 2 Kevlar49 坯布及浸渍布平纹织物

几何尺寸参数(单位:mm)

Tab.2 Dimensions of Kevlar49 neat fabric and STF-impregnated fabric (Unit: mm)

坯布	纬纱	$W_a = 1.012$	$G_a = 0.241$	$T_a = 0.25$
	经纱	$W_b = 1.148$	$G_b = 0.057$	$T_b = 0.2$
浸渍布	纬纱	$W_a = 1.056$	$G_a = 0.204$	$T_a = 0.2$
	经纱	$W_b = 1.204$	$G_b = 0$	$T_b = 0.2$

采用流变仪 (Physica MCR301) 来测量 STF 的流变性能,图 2 所示为质量分数 62%、65%、70% 的 STF 流变粘度曲线。可见,STF 的质量分数越高,其初始粘度越大;随着剪切率的提高,各 STF 粘度开始缓慢下降,这一

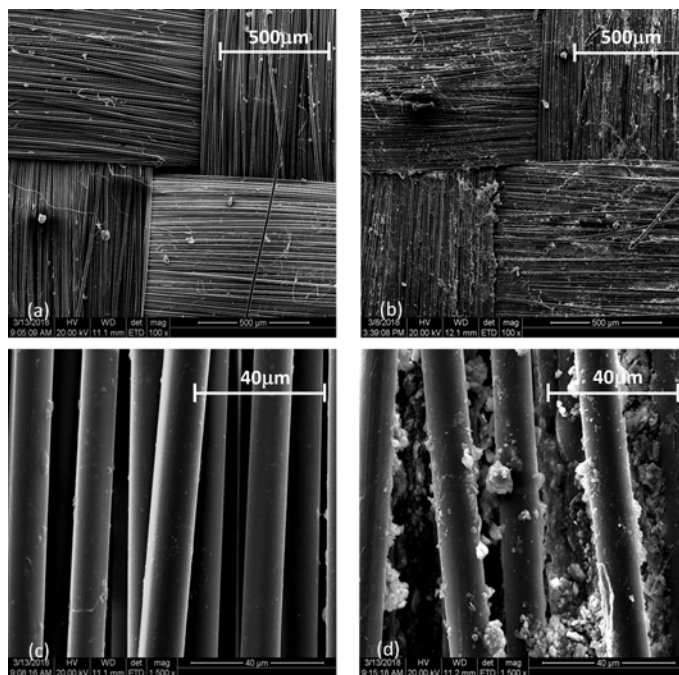


图 3 Kevlar49 平纹织物 SEM 扫描电镜图,坯布(a)50×和(c)1500×,浸渍布(b)50×和(d)1500×

Fig.3 SEM images of Kevlar49 plain fabric, neat fabric at a magnification of (a) 50× and (c) 1500×, STF-impregnated fabric at a magnification of (b) 50× and (d) 1500×

图 3(a)与图 3(c)中可观察到胚布的光滑表面和清洁的纤维,只有少量的灰尘颗粒附着在整洁的织物上,这与 Kevlar 织物的制备和储存环境有关。相比之下,在 STF 浸渍布中观察到粗糙的纤维表面,如图 3(b)和图 3(d)所示,STF 颗粒紧密附着在纤维表面。

2 实验过程

单纱拉出测试的基本原理如图 4 所示,织物试件在经纬纱方向上均具有 65 个编织波(130 个经纬纱交织点)。在图 4(a)中,织物试件由夹具夹持并且不施加横向预紧力,用试验机(Instron 3345)夹持织物试件中间预留的单纱,采用位移控制方式从织物中拉出纱线。在实验中织物试件上首个被拉出的编织波位于织物试件的底端。织物试件出现了整体的剪切变形,如图 4(b)所示,图中的 θ 被定义为织物试件剪切角。为了考虑拉拔速率的影响,实验中选择了 100mm/min、500mm/min 和 1000mm/min 三个拉拔速率。纱线拔出前后的实验照片如图 4(c)和图 4(d)所示。

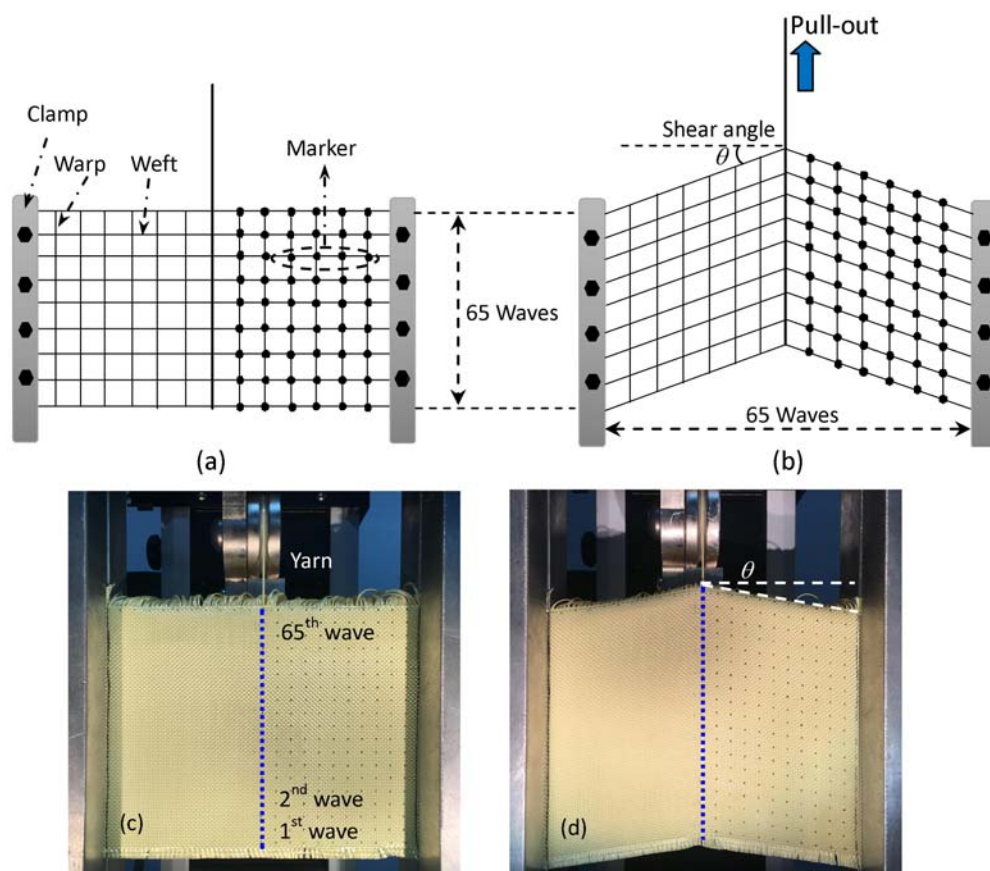


图 4 (a)受拉前和(b)受拉后的纱线拉拔测试示意图,对应的(c)受拉前和(d)最大变形时的织物照片

Fig. 4 Schematics of yarn pullout test (a) before and (b) after tension, corresponding to the fabric photos (c) before tension and (d) under maximum deformation, respectively

同时,通过数字图像相关的标记点法测量纱线拔出过程中标记点的位移,来评价织物试件在纱线拔出过程中的面内剪切变形。在织物试件右侧水平及垂直方向上每隔 5mm 做一个标记点,从而在织物试件右侧形成一个标记点矩阵。对应三种速率在纱线拔出过程中,分别以 5fps、16fps、16fps 的帧率拍照,采集的图像尺寸为 1024×768 pixel。

3 结果与讨论

3.1 载荷-位移曲线

织物坯布和 STF 浸渍布在纱线拉拔速率为 100mm/min 的纱线拔出测试中所得的典型载荷-位移曲线如图 5 所示。对于坯布,如图 5(a)所示,载荷-位移曲线分为两个阶段:静摩擦阶段和动摩擦阶段。静摩擦阶段反映了受拉纱线的拉直及延伸过程,拉拔载荷随着位移近似线性地增加,直到其达到最大极限载荷。在动摩擦阶段,受拉纱线在织物试件中开始滑移,受拉纱线上的剩余波数减少,导致负载逐渐减小,且当受拉纱线每滑过两个交织点时,即完成一个“滑入-滑出”过程,对应载荷产生一次波动,如图 5(b)中的虚线矩形区域所示。

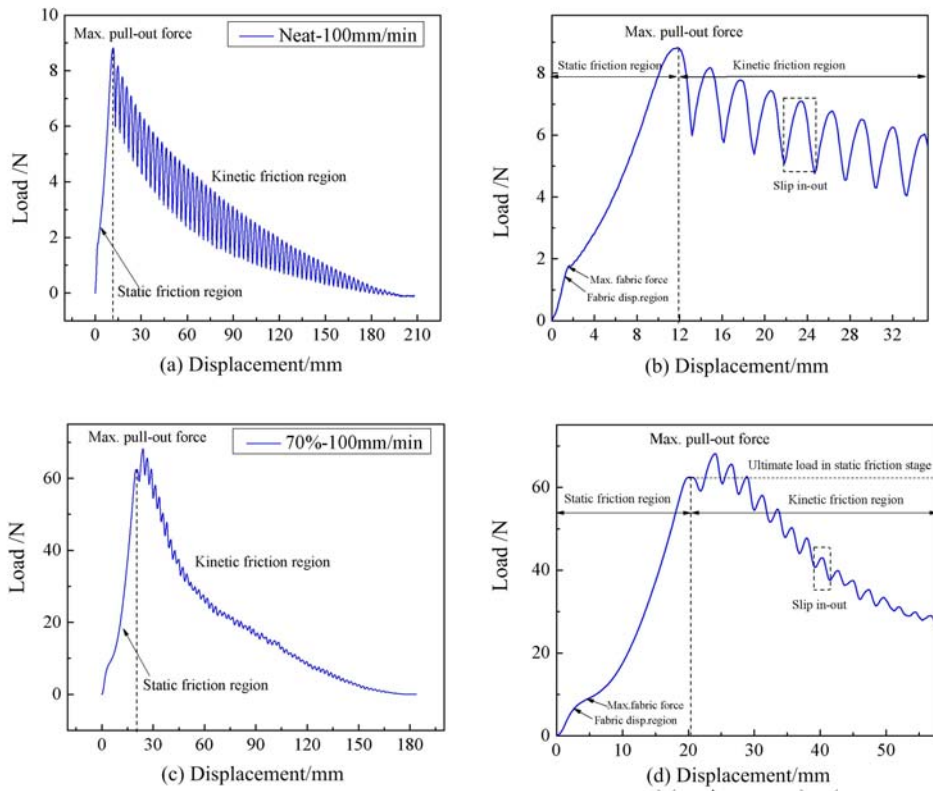


图 5 纱线拉拔速率为 100mm/min 时 (a) 坯布和 (c) 70% STF 浸渍布的载荷-位移典型曲线, (b) 和 (d) 分别对应 (a) 和 (c) 的局部放大

Fig. 5 Load-displacement typical curve of (a) neat fabric and (c) 70% STF-impregnated fabric at 100mm/min pulling speed, (b) and (d) are the local enlargement of (a) and (c), respectively

对于质量分数为 70% 的 STF 浸渍布试件,如图 5(c)所示,在拉拔速率为 100mm/min 的情况下,其载荷-位移曲线与坯布试件具有相同的整体趋势。值得注意的是,STF 浸渍布的拉出载荷明显高于坯布,并且极限载荷大约是坯布试件的 7 倍,这表明 STF 明显增加了纱线之间的摩擦,从而导致极限载荷的大幅增加。另外,浸渍布试件的纱线拉拔极限载荷发生在动摩擦阶段,从图 5(d)中可见,在静摩擦阶段后的连续三个波峰均高于静摩擦阶段的峰值载荷。这种现象说明 STF 本身应变率相关特性导致了纱线间的动摩擦力大于静摩擦力,使得纱线拔出极限载荷发生在动摩擦阶段。对于其他拉拔速率时,仍然出现了这种现象。

对于三种不同的拉拔速率 100mm/min、500mm/min 和 1000mm/min 的情况,坯布的载荷-位移曲线没有明显的差异,如图 6(a)所示,极限拔出载荷基本相等,这说明坯布的载荷响应与拉拔速率基本无关。不同的是,对于相同质量分数的 STF 浸渍布而言,如图 6(b-d)所示,随着拉拔速率的增加,极限载

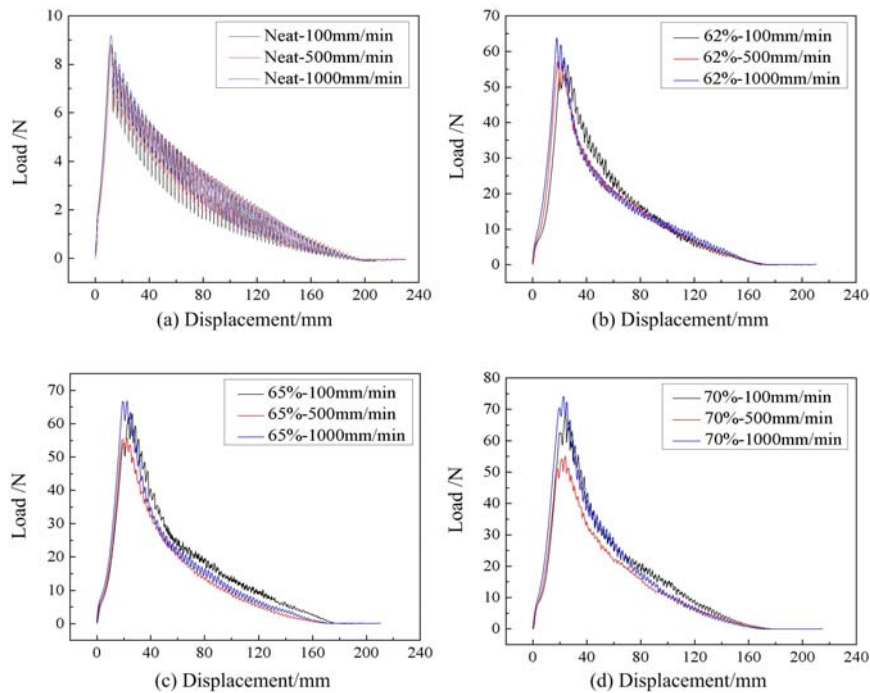


图6 (a)坯布及(b-d)62%、65%、70%浸渍布在三种纱线拉拔速率下的载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of (a) neat fabric and (b-d) 62%, 65%, 70% STF-impregnated fabric under three pullout speeds

荷表现出先降后升的趋势,其数据列在表3中。这是由于在500mm/min的拔出速率下出现STF剪切稀化作用,使粘度减小而导致拔出极限载荷有一定的降低;而在1000mm/min的拔出速率下出现STF剪切增稠作用,使粘度增加而导致极限拔出载荷升高。

表3 拉拔实验的极限载荷

Tab. 3 Ultimate load of yarn pullout test

种类	质量分数	极限载荷/N		
		100mm/min	500mm/min	1000mm/min
坯布	—	8.827	8.730	9.190
	62%	57.295	57.439	63.795
浸渍布	65%	62.983	55.672	66.829
	70%	68.604	55.194	74.198

由表3可见,当拉伸速率从100mm/min上升至1000mm/min时,坯布的极限载荷变化较小,变动幅度在0.5N内。对于三种质量分数的STF浸渍布而言,在不同拉伸速率下,极限载荷均显著高于坯布的极限载荷。这说明STF浸渍布的处理方式可增加纱线之间的摩擦,从而消耗更多拔出能量,这有助于增加柔性织物的抗冲击性能。

3.2 能量吸收分析

在织物的弹道侵彻实验中,织物耗散的子弹的动能主要沿与子弹接触的主纱传播,辅纱消耗能量较少^[20]。冲击能量耗散的类型分为主要纱线的应变能量、主纱和辅纱的摩擦能量、主纱的动能、辅纱的动能和应变能。但是,在弹道穿透实验中的冲击过程瞬间发生,无法对上述几种能量耗散模式进行单独的详细分析。

纱线拉拔测试可用于量化分析单纱拔出过程中的摩擦能消耗,根据积分的思想,纱线拉拔力所做功

等于图 6 载荷一位移曲线下的面积,对于动摩擦阶段的第 i 个波所对应的面积可定义为对应该波纱线被拔出时所消耗的能量。这样对图 6 的拉拔载荷一位移曲线动摩擦阶段的不同波数下的面积进行积分统计,可以给出坯布和浸渍布在纱线拔出过程中的能量—拔出波数的关系曲线,如图 7 所示。

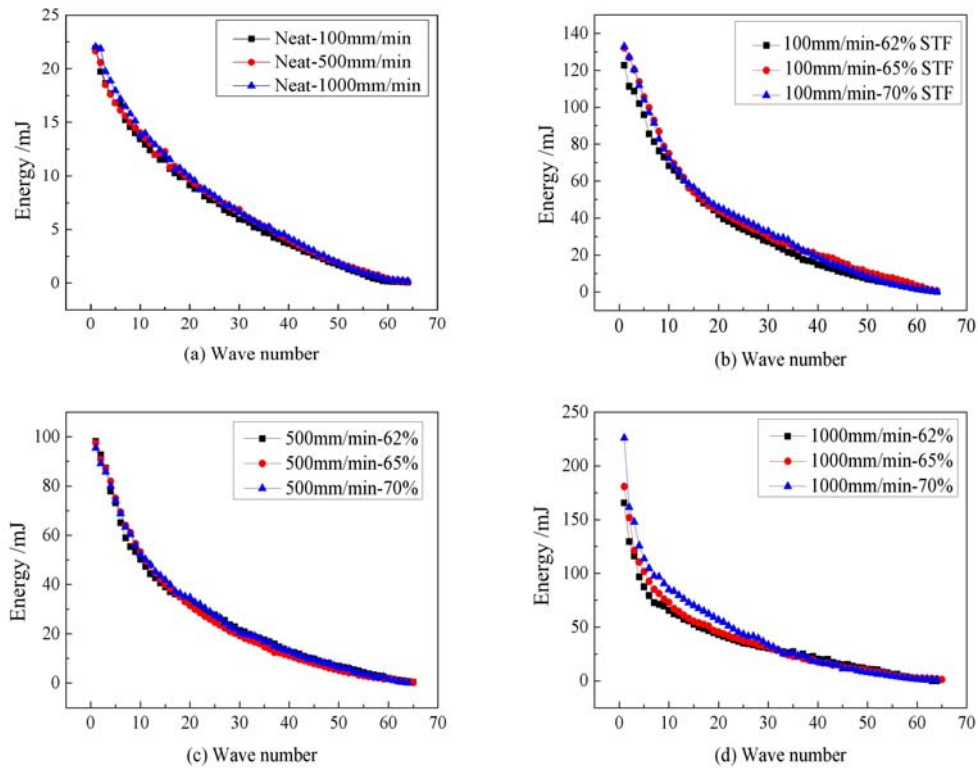


图 7 (a) 坯布与 STF 浸渍布在 (b) 100mm/min, (c) 500mm/min 和(d) 1000mm/min 三种拉拔速率下的能量吸收曲线

Fig. 7 Energy absorption curve of (a) neat fabric and STF-impregnated fabric at (b) 100 mm/min, (c) 500 mm/min and (d) 1000 mm/min pullout speed

针对坯布而言(图 7(a)),在三种不同纱线拉拔速率下,拔出能量变化趋势相同:随着拔出波数的增加,拔出能量下降,且相邻两个拔出波数的拔出能量相差较小。

表 4 初始拔出能量

Tab. 4 Initial pullout energy

种类	质量分数 /(wt%)	初始拔出能量 /(mJ)		
		100mm/min	500mm/min	1000mm/min
坯布	—	21.922	21.644	22.055
	62%	122.744	98.104	165.656
浸渍布	65%	132.109	97.497	180.764
	70%	132.844	95.548	225.929

针对浸渍布而言(图 7(b-d)),拔出能量衰减与坯布有类似的趋势,而且明显与 STF 质量分数和拉拔速率相关。将图 7 中的初始拉拔能量总结在表 4 中,在拉拔速率为 100mm/min 时,随着 STF 质量分数的增加,纱线拔出的初始能量略微增加。然而,在 500mm/min 的拉拔速率下,STF 质量分数的变化对纱线拔出的初始能量没有明显的影响。在拔出速率为 1000mm/min 时,随着 STF 质量分数的增加,纱线拔出的初始能量明显增加。另外,在纱线滑移开始时,两个相邻波数之间拔出能量的差异明显增加,这是因为较高的拉出速率会导致 STF 的剪切增稠现象。

3.3 织物的剪切变形

在图8中给出的是坯布及质量分数为62%浸渍布在纱线拔出过程中的极限剪切变形及剩余剪切变形。在纱线拔出实验中,当坯布与浸渍布达到最大剪切变形后,纱线开始滑移抽出,同时织物剪切变形逐渐减小,并在纱线完全拔出后织物仍然保留一定的剩余剪切变形。从图8(a)和图8(c)可见,浸渍布的极限剪切变形明显大于坯布的,而且在受拉纱线完全拔出之后,浸渍布的剩余剪切变形也略大于坯布试件,如图8(b)和图8(d)所示。

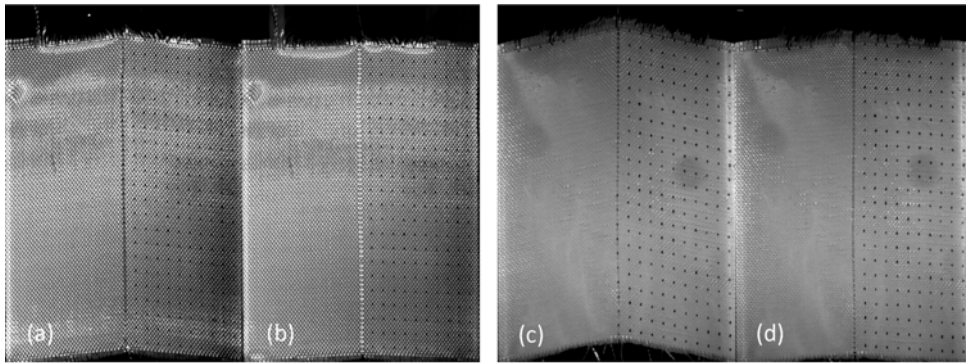


图8 坯布在100mm/min拉拔速率下(a)极限剪切变形和(b)剩余剪切变形,62%STF浸渍布在1000mm/min拉拔速率下的(c)极限剪切变形和(d)剩余剪切变形

Fig. 8 The (a) ultimate and (b) residual shear deformation of neat fabric at 100mm/min pullout speed,

the (c) ultimate and (d) remaining shear deformation of 62% impregnated fabric at 1000mm/min pullout speed

根据织物试件右侧的标记点矩阵,应用数字图像相关标记点法对织物剪切变形进行分析。在坯布的纱线拔出过程中,织物表面同一列数的标记点变形位移基本一致^[6],故本文中仅对织物试件其中一行标记点的位移-时间曲线进行分析。

在100mm/min拉拔速率下的纱线拔出过程中,织物表面第一行所有10个标记点在y方向上的位移-时间曲线如图9所示。可见,经STF浸渍布的面内变形明显高于普通坯布,坯布的面内最大位移为6mm(图9(a)),62%STF浸渍布的最大位移超过了13.5mm(图9(b))。这说明在纱线拔出过程中STF的引入使得织物面内变形明显增大,这与纱线拔出极限载荷和拔出能量的趋势相对应。对于65%和70%质量分数STF浸渍布也有相似的趋势,而且质量分数对于浸渍布面内变形影响较小。

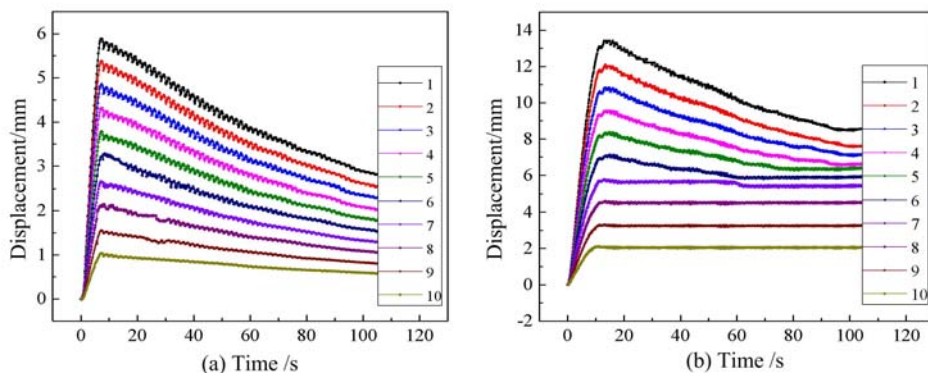


图9 在100mm/min拔出速率下标记点y方向面内位移-时间曲线,(a)坯布和(b)62%浸渍布

Fig. 9 Displacement-time curve along the y-direction of (a) neat fabric and

(b) 62% STF-impregnated fabric at 100mm/min pullout speed

进一步对纱线拔出过程中织物剪切角的变化情况进行分析,织物面内首行标记点对应的剪切角正切值-时间曲线如图10所示。

从图10(a)可见,在初始静摩擦阶段,织物剪切角近线性增加,坯布相比于浸渍布更快地达到极限

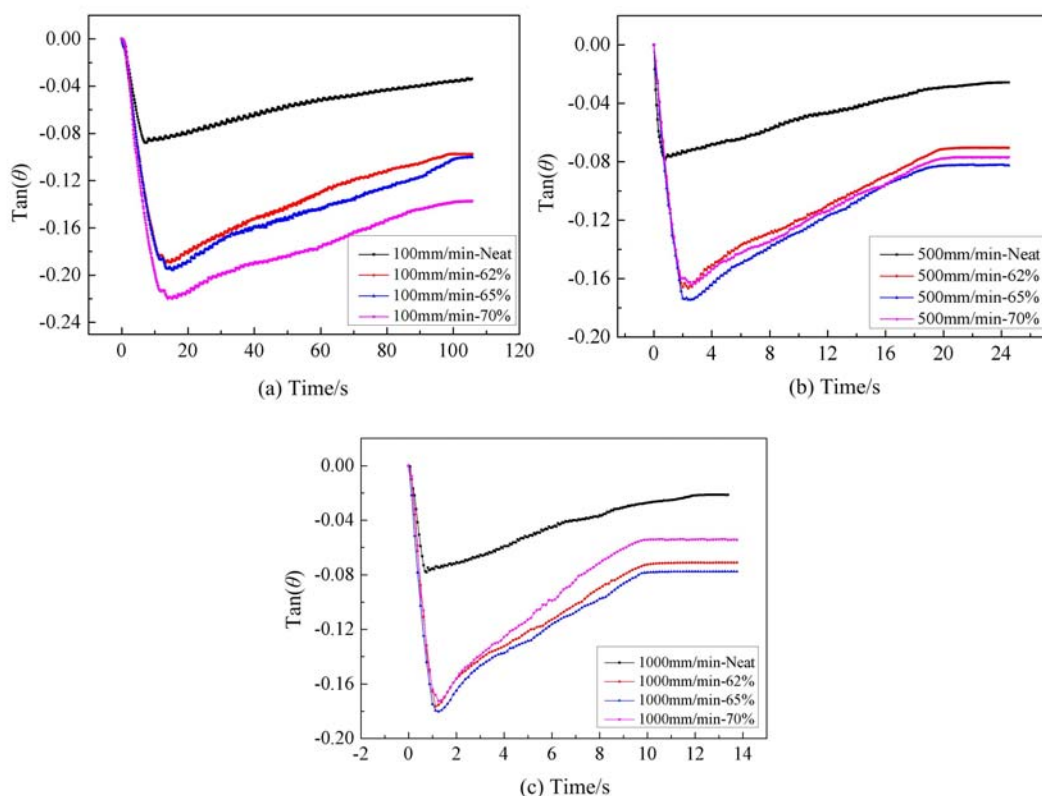


图10 坯布、浸渍布在(a)100mm/min、(b)500mm/min和(c)1000mm/min三种拔出速率下的剪切角正切值—时间曲线

Fig. 10 Shear angle $\text{Tan}(\theta)$ -time curve of neat fabric and STF-impregnated fabric at (a) 100mm/min, (b) 500mm/min and (c) 1000mm/min pullout speed

剪切角,并且浸渍布的极限剪切角明显大于坯布的。接下来的动摩擦阶段,剪切角值缓慢下降,直到纱线完全拔出。纱线完全拔出后织物仍然残留一定的剪切变形,这是由于织物纱线卷曲延伸造成的残留变形。

对比图10(a-c)中三种拉拔速率下的剪切角—时间曲线,坯布的极限剪切角基本保持不变,可见拔出速率的变化对坯布不造成明显影响。相比之下,图中浸渍布的极限剪切角和动摩擦阶段的剪切角曲线与拔出速率和STF质量有一定关系,这是由于剪切稀化和剪切增稠效应改变了浸渍布的刚度,造成了极限剪切角及变化趋势的差异。

4 结论

本文开展了不同质量分数STF浸渍布的单纱拉出测试,结果表明随着STF质量分数的增高,浸渍布的纱线拔出载荷比坯布有明显升高,而且在纱线拔出速率较高的情况下,剪切增稠现象发生,纱线的极限拔出载荷进一步增加,提升纱线拔出能量。同时,使用数字图像相关标记点法对纱线拔出过程中织物的剪切变形进行测量,结果表明STF浸渍布的极限剪切角明显高于坯布的,在动摩擦阶段的坯布和浸渍布剪切角缓慢减小,直到纱线完全拔出。由于STF浸渍布的纱线表面粗糙度增加,显著增加了纱线间的摩擦力耗能,这对织物的防刺性能改进具有积极意义。

致谢 作者感谢中国科学技术大学近代力学系宣守虎课题组在剪切增稠液制备工艺上的悉心指导。

参考文献:

- [1] Duan Y, Keefe M, Bogetti T, et al. numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(8): 1299–1312.
- [2] Duan Y, Keefe M, Bogetti T, et al. Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(8):996–1012.
- [3] Wang Y, Chen X, Young R, et al. Finite element analysis of effect of inter-yarn friction on ballistic impact response of woven fabrics[J]. *Composite Structures*, 2016, 135:8–16.
- [4] Tapie E, Guo Y, Shim V. Yarn mobility in woven fabrics—a computational and experimental study [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2016, 80:212–226.
- [5] Nilakantan G, Merrill R, Keefe M, et al. Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of kevlar fabrics[J]. *Composites Part B*, 2015, 68:215–229.
- [6] Bai R, Li W, Lei Z, et al. Experimental study of yarn friction slip and fabric shear deformation in yarn pull-out test[J]. *Composites Part A*, 2018, 107:529–535.
- [7] Zhu D, Soranakom C, Mobasher B, et al. Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar® 49 fabric[J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2011, 42(7):868–879.
- [8] Sueki S, Soranakom C, Mobasher B, et al. Pullout-slip response of fabrics embedded in a cement paste matrix[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(9):718–727.
- [9] Bilisik K. In-plane shear properties of para-aramid (Kevlar®) fabric by yarn pull-out method[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2012, 42(1):76–96.
- [10] Zhang X, Li W, Gong X. The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper[J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(3):035027.
- [11] 周鸿, 闫立勋, 陈潜, 等. 剪切增稠液阻尼器隔冲性能的实验研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(6):741–750 (ZHOU Hong, YAN Lixun, CHEN Qian, et al. Experimental study of shock isolation performance of shear thickening fluid damper[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(6):741–750 (in Chinese))
- [12] Decker M, Halbach C, Nam C, et al. Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics [J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(3):565–578.
- [13] Feng X, Li S, Wang Y, et al. Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids[J]. *Materials & Design*, 2014, 64(9):456–461.
- [14] Cao S, Chen Q, Wang Y, et al. High strain-rate dynamic mechanical properties of Kevlar fabrics impregnated with shear thickening fluid[J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 2017, 100:161–169.
- [15] Lee B, Kim I, Kim C. The influence of the particle size of silica on the ballistic performance of fabrics impregnated with silica colloidal suspension[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(23):2679–2698.
- [16] Hassan T, Rangari V, Jeelani S. Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2010, 527(12):2892–2899.
- [17] Kang T, Hong K, Mi R. Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material[J]. *Fibers & Polymers*, 2010, 11(5):719–724.
- [18] Yu K, Cao H, Qian K, et al. Synthesis and stab resistance of shear thickening fluid (STF) impregnated glass fabric composites[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2012, 95(6):126–128.
- [19] Majumdar A, Butola B, Srivastava A. An analysis of deformation and energy absorption modes of shear thickening fluid treated Kevlar fabrics as soft body armour materials[J]. *Materials & Design*, 2013, 51(5):148–153.
- [20] Hou Y, Sun B, Gu B. An analytical model for the ballistic impact of three dimensional angle-interlock woven fabric penetrated by a rigid cylindro-spherical projectile[J]. *Textile Research Journal*, 2011, 81(12):1287–1303.

Study on single-yarn pullout test of flexible fabric modified by shear thickening fluid

MA Yu, LEI Zhen-kun, FENG Yang, BAI Rui-xiang

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The impregnation of flexible fabric with shear thickening fluid (STF) is a potential method for surface modification of bullet-proof fabrics, which can significantly increase the pullout force and pullout energy of yarns, thereby increasing the impact resistance of flexible fabrics. In this work, the STF-impregnated Kevlar 49 plain fabric with SiO_2 as the disperse phase and ethylene glycol (EG) as the dispersant is prepared. The yarn pullout tests are performed on the neat fabric and the STF-impregnated fabric respectively, showing that the load-displacement curves of the neat fabric and the STF-impregnated fabric present similar tendency and can be divided into two stages of static friction and dynamic friction. Unlike the neat fabric, the ultimate pullout load of the STF-impregnated fabric occurs in the dynamic friction stage and is significantly larger than that of the neat fabric. In addition, the pullout energy and the in-plane shear deformation of the STF-impregnated fabric are significantly improved, which are related to the mass fraction of STF and the yarn pullout rates.

Keywords: STF; energy absorption; shear deformation; flexible fabric