

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.01.010

单束 STF 强化 Kevlar 织物力学性能研究

刘 晓 陈 伟 刘璐璐 赵振华

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

摘要:高强度 Kevlar 纤维机织织物被广泛应用于发动机机匣包容上,剪切增稠液(Shear thickening fluid, SFT)被发现可以有效增加 Kevlar 织物的能量吸收能力。通过设计针对单束纤维束的相应加强片与夹具,在 MTS 材料试验机与霍普金森拉杆上开展室温下的(20 °C)力学性能试验,得到单束纯 Kevlar 纤维与不同浓度 STF 强化 Kevlar 的准静态与动态拉伸力学性能。对比分析了准静态与动态试验下织物破坏形态和力学性能的区别,得到 STF 溶液浓度对弹性模量、应力极限与拉伸强度的影响,为 STF 增强 Kevlar 织物的动态响应分析提供参考。

关键词:STF-Kevlar;单束纤维束;准静态;动态拉伸;拉伸强度

中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)01-0071-10

Study on Mechanical Properties of STF-Kevlar Single Yarn

LIU Xiao, CHEN Wei, LIU Lulu, ZHAO Zhenhua

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: High-strength Kevlar fiber woven fabrics are widely used in engine casing containment. The shear thickening fluid (STF) is found to be effective in increasing the energy absorption capacity of Kevlar fabrics. By designing the stiffener and fixture for the single yarn of fiber, the mechanical property tests at room temperature (20 °C) are carried out at the MTS material testing machine and the split Hopkinson bar. The quasi-static and dynamic tensile mechanical properties of a single yarn of pure Kevlar fiber and different concentrations of STF treated Kevlar are studied. The effects of quasi-static and dynamic mechanical properties and the effects of different STF solution concentrations on stress limit, elastic modulus and tensile strength are obtained by comparing the failure modes and mechanical properties of fabric in quasi-static and dynamic tests.

Key words: STF-Kevlar; single yarn of fiber; quasi-static; dynamic tensile; tensile strength

高强度 Kevlar 纤维机织织物被广泛应用于能量吸收领域,针对其高速冲击特性、力学行为与数值分析方法已经开展了大量研究。近年来,剪切增稠液体(Shear thickening fluid, STF)被发现可以有效增强 Kevlar 织物的防弹及防刺性能,减少织物层数,用于人体防护装甲中,可使其更薄,柔韧性与弹性更好,具有良好的应用效果^[1]。

2000 年,文献[2,3]参考美国防弹标准对

STF-Kevlar 织物复合材料的防弹特性进行了研究,结果表明 STF 能有效增加织物的防弹性能,随着浸入 STF 溶液体积增加,在 Kevlar 织物层数相同的情况下,Kevlar 织物的防弹性能也随之增加,而且 STF-Kevlar 织物在厚度和柔软性方面都优于相同条件下的纯 Kevlar 织物;同时,在 STF-Kevlar 织物受到高速冲击后,STF 的中的 SiO₂ 纳米粒子能够防止纱线在高速冲击下导致的相对滑

基金项目:国家自然科学基金(51575262)资助项目;航空科学基金(2015ZB52008)资助项目。

收稿日期:2017-10-31;**修订日期:**2017-12-26

通信作者:陈伟,男,教授,博士生导师,E-mail:chenwei@nuaa.edu.cn。

引用格式:刘晓,陈伟,刘璐璐,等.单束 STF 强化 Kevlar 织物力学性能研究[J].南京航空航天大学学报,2018,50(1):71-80. LIU Xiao, CHEN Wei, LIU Lulu, et al. Study on mechanical properties of STF-Kevlar single yarn[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 71-80.

移,从而使得纱线中的更多纤维通过拉伸变形吸收能量。文献[4,5]中研究了 STF-Kevlar 织物的防刺性能,试验发现在面密度相同的情况下,12 层的 STF-Kevlar 织物的防刺性能优于 15 层的纯 Kevlar 织物。文献[6]中研究了 STF-Kevlar 织物的变形形式和能量吸收机制,试验研究发现纯 Kevlar 织物只有那些和弹片接触的纱线吸收了冲击的能量,由于纱线的相对滑移,织物的其他部分并未被扰动,所以导致能量吸收较低;然而,在 STF-Kevlar 织物中,STF 在高速冲击中变成像固体一样的形态,使织物从网状结构变成像基体一样的整体结构,使得整个 STF-Kevlar 织物都吸收冲击带来的能量,冲击失效更多的表现为纱线中的纤维断裂,基于此 STF-Kevlar 织物的能量吸收更高。文献[7]对 STF-Kevlar 织物开展了冲击速度在 1 000~2 000 m/s 条件下的高速冲击试验,STF 可以显著增加 Kevlar 织物对冲击能量的吸收,其能量吸收能力提高大约 70%,研究表明 5 层 STF-Kevlar 织物与 8 层纯 Kevlar 织物吸收能量相同,因此将 STF-Kevlar 运用在软壁机匣包容上是对其包容能力及减重性能的提升,具有广阔的应用前景。

对纤维增强复合材料来说,纤维是主要承载者,纤维的力学性能强烈地影响着复合材料的力学性能。在这些应用中常会遇到冲击拉伸及高速应变等问题,因此它们的冲击拉伸力学性能也就是高应变率下的力学响应越来越受到人们的重视^[8]。

通过准静态拉伸试验,文献[9]发现:在静态载荷作用下,复合材料表现为线弹性特征,直到试样断裂;而在反复载荷作用下,复合材料的刚度随着加载次数的增加而增加。文献[10]对从编织织物中抽取出的不同长度的 Kevlar49 纱线进行静态拉伸试验,获得需要的动静摩擦系数。

文献[11]对 Kevlar49 纤维增强复合材料在 1.8×10^{-4} , 10 和 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 这 3 种应变率下的拉伸性能进行了测试。发现极限应变随着应变率的增加而增加,在应变率小于 $10\ \text{s}^{-1}$ 时拉伸强度与应变率无关,均约为 400 MPa。当应变率为 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 时,拉伸强度有约 25% 的提高。文献[12]分别采用 MTI 微型拉伸试验机和 MTS 微机控制电子万能试验机对纤维丝和纤维束进行了单向拉伸试验,发现纤维丝和纤维束的力学性能与试样的标距及结构尺度存在很大相关性,试样的拉伸强度会随着其标距的增加和结构尺度从纤维丝增大到纤维束而降低;随后,按照 Weibull 分布对试验数据进行统计分析,量化了不同标距下纤维丝和纤维束拉伸

强度的随机变化程度,研究出不同尺度下 Kevlar49 单丝(微观)和单束(细观)的拉伸力学性能。

文献[13]成功地进行了纤维束在应变率为 $50 \sim 200\ \text{s}^{-1}$ 范围内的冲击拉伸实验,获得了纤维束应力应变曲线。文献[14]中使用霍普金森杆在 $150, 400$ 和 $1\ 500\ \text{s}^{-1}$ 这 3 个应变率下对 Kevlar49 酚醛树脂复合材料进行了拉伸试验,发现随着应变率的增加,弹性模量和拉伸强度均有所增加,同时给出了弹性模量拉伸强度与应变率的函数关系。2016 年,朱德举等^[15]研究了 Kevlar49 芳纶纤维布增强环氧树脂复合材料在高应变率作用下的力学响应和断裂行为,发现在相同温度 $25\ ^\circ\text{C}$ 下,随着应变率的增加,弹性模量和拉伸强度均先增大(初始应变率介于 $25 \sim 50\ \text{s}^{-1}$ 范围内)后减小(初始应变率介于 $50 \sim 200\ \text{s}^{-1}$ 范围内),极限应变则呈现出相反的变化趋势,而韧性随应变率的变化幅度不大。

单根纤维束由于质量轻、体积小和力学性能弱而难以获取其参数,本文设计了一种与霍普金森拉杆系统适配的新型夹具,对不同浓度 STF 强化的 Kevlar 纤维束开展准静态与动态拉伸试验,获取其力学性能。对比分析了准静态和动态试验材料力学性能和破坏形态的区别,并得出不同浓度 STF 溶液对 Kevlar 织物性能的影响。

1 STF-Kevlar 准静态拉伸试验

为了得到不同浓度 STF 强化的 Kevlar 纤维束准静态条件下的力学性能,在 MTS370-2.5 材料试验机上开展室温($20\ ^\circ\text{C}$)下 $0.000\ 1$ 和 $0.001\ \text{s}^{-1}$ 两种不同应变率的拉伸试验。试验件的有效试验长度为 40 mm,用两种拉伸速度即 0.004 和 $0.04\ \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$,对纯 Kevlar 及 15%, 20%, 25% 三种质量浓度 STF 强化的纤维束试验件进行准静态拉伸试验。每组试验得到了至少两组有效数据。

1.1 试件及试验仪器

本文中试验材料为江苏天鸟股份有限公司制造的纯 Kevlar49 芳纶纤维,这是芳香族聚酰胺家族中的一种有机纤维,具有独特的高韧性、高模量、高强度以及热稳定性,是一种优质的航空航天和现代工业材料,现已广泛应用在众多行业中。Kevlar49 平纹织物由纤维束编织而成,纤维束由纤维丝组成。纯 Kevlar49 纱线的典型性质如下:纱线 Denier 为 1 490 g/9 000 m,纤维根数为 768 根,纤维丝直径为 $12\ \mu\text{m}$,密度为 $1.44\ \text{g}/\text{cm}^3$ 。由于 SFT 并不改变织物的几何参数,其参数与纯 Kevlar 织物相同,每根纤维束的横截面积为

0.115 mm²[16]。

配制 STF 过程中采用性质较为稳定的、无毒无害的 650 nm SiO₂ 作为分散相粒子,由于当分散相粒子的粒径小于 1 μm 时,形成的悬浮液较为稳定,不易产生沉淀,可以保证流体悬浮的稳定性。分散剂采用两种分子量分别为 200 和 400 的聚乙二醇(PEG)复配得到,这类分散介质的沸点高于 200 °C,凝固点低于 -12.6 °C,可以满足各种气候条件的使用。在室温条件下,称取适当质量的 SiO₂ 和 PEG(PEG200 : PEG400=1 : 2)机械搅拌混合,充分混合后,直到肉眼可见悬浮液中质地均匀,之后将样品放在 25 °C 的真空干燥箱中真空除泡 24 h,制备得到不同 SiO₂ 质量浓度(15%,20%,25%)的 STF 溶液,其制备过程和制作成品如图 1,2 所示。

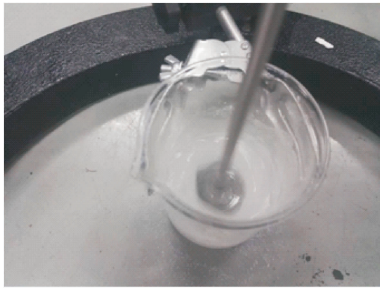


图 1 STF 溶液制备过程

Fig. 1 STF solution preparation process

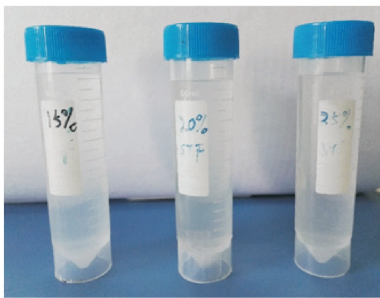


图 2 STF 溶液成品

Fig. 2 STF solution samples

为了使 STF 在 Kevlar 织物中获得渗透均匀的效果,采用无水乙醇对 STF 进行稀释,将稀释后的 STF 悬浮液搅拌均匀,直到观测不到明显颗粒状的黏性 STF 为止,之后将用无水乙醇稀释后的 STF 溶液倒入盛放织物的托盘中进行浸渍,最后将放入混合液中浸渍后的织物取出后晾干,从而得到 STF-Kevlar 织物。

试验材料选用机织的纯 Kevlar49 织物和 3 种不同浓度的 STF 浸渍后的 Kevlar49 织物(后文中

用 SK 表示),如图 3 所示。试验件的尺寸为 200 mm×100 mm,为了准确地确定纤维束在实际使用中的真实强度,需要考虑织造过程中造成的损伤,因此测试用纤维束试样均为间隔相同距离直接从织物中抽取得到。

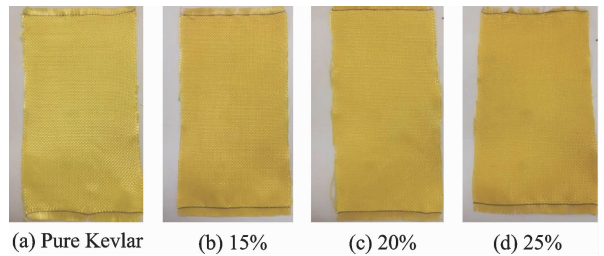


图 3 纯 Kevlar 和 STF-Kevlar 试验件

Fig. 3 Pure Kevlar and STF-Kevlar test pieces

首先从不同浓度 STF 强化过后的 Kevlar 中沿径向间隔相同距离抽取多根纤维束备用,接着用 AB 胶将两个铝质加强片按照标距 40 mm 夹持在纤维束两端,最后去除两端多余纤维,用记号笔在 40 mm 标距两端做记号作为检验试件滑移与否的标准,在室温环境下放置 20 h。准静态试验中,其压紧压力为 5 MPa,在 MTS 材料试验机上的夹持效果图如图 4 所示。

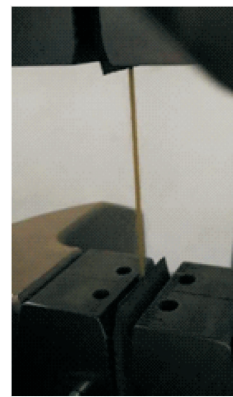


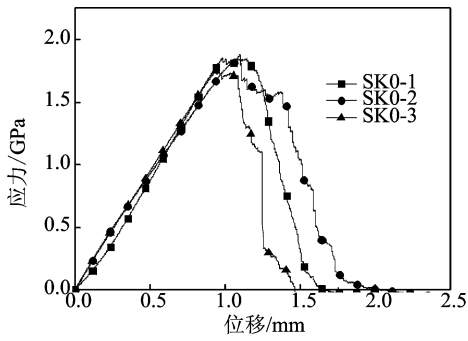
图 4 试验件夹持图

Fig. 4 Test piece clamping chart

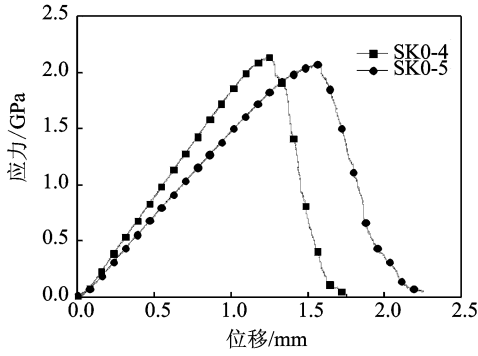
1.2 试验结果及分析

处理试验所得的力和位移数据,试验编号中 SK 指的是 STF 强化 Kevlar,随后的数字代指 STF 溶液的质量浓度,“-”之后的数字代表试验的组号。如“SK15-1”指 15%质量浓度 STF 溶液强化 Kevlar 第一组准静态拉伸试验。得到的纯 Kevlar 拉伸试验两种应变率下的应力位移曲线如图 5 所示。

15%STF 强化 Kevlar 试件在两种应变率下拉伸试验的应力位移曲线如图 6 所示。

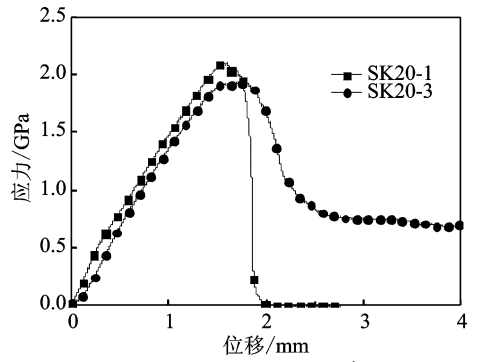


(a) Strain rate 0.001 s^{-1}

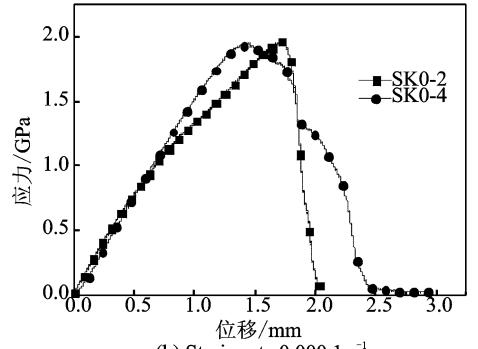


(b) Strain rate $0.000 1 \text{ s}^{-1}$

图5 纯 Kevlar 纤维束准静态应力位移曲线
Fig. 5 Quasi-static stress-displacement curves of pure Kevlar fiber bundle



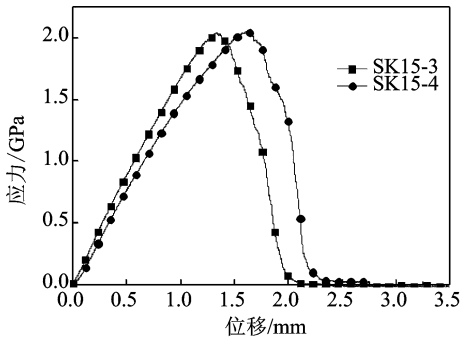
(a) Strain rate 0.001 s^{-1}



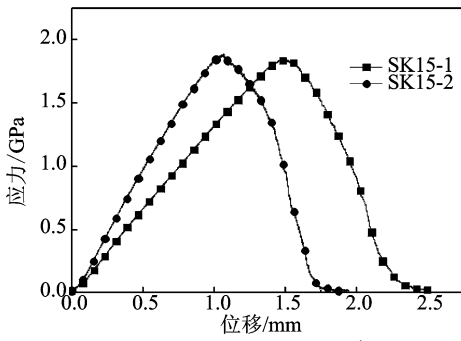
(b) Strain rate $0.000 1 \text{ s}^{-1}$

图7 20%SK 纤维束准静态应力位移曲线
Fig. 7 Quasi-static stress-displacement curves of 20% SK fiber bundle

25%STF 强化的 Kevlar 试件在两种应变率下拉伸试验的应力位移曲线如图 8 所示。

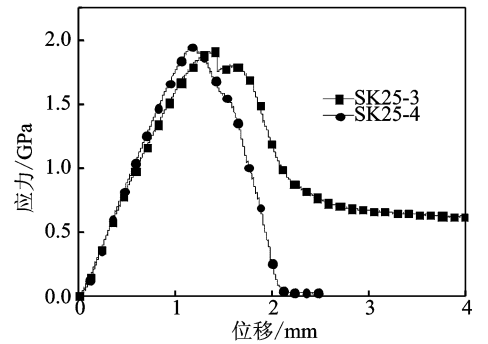


(a) Strain rate 0.001 s^{-1}

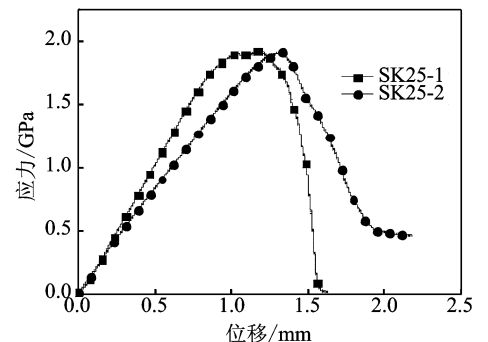


(b) Strain rate $0.000 1 \text{ s}^{-1}$

图6 15%SK 纤维束准静态应力位移曲线
Fig. 6 Quasi-static stress-displacement curves of 15% SK fiber bundle



(a) Strain rate 0.001 s^{-1}



(b) Strain rate $0.000 1 \text{ s}^{-1}$

图8 25%SK 纤维束准静态应力位移曲线
Fig. 8 Quasi-static stress-displacement curves of 25% SK fiber bundle

20%STF 强化的 Kevlar 试件在两种应变率下拉伸试验的应力位移曲线如图 7 所示。

纤维束的破坏应力 σ_b (最大应力) 和失稳位移 X_b (与最大应力对应的位移) 在各组应变率下的平均值见表 1。

表 1 SK 织物准静态拉伸试验结果

Tab. 1 Quasi-static tensile test results of SK fabrics

Strain rate/ s^{-1}	STF concentration/%	Stress at failure σ_b /GPa	Instability displacement X_b /mm
0.001	0	1.82	1.00
	15	2.03	1.44
	20	2.02	1.68
	25	1.90	1.48
0.000 1	0	2.07	1.36
	15	1.86	1.32
	20	1.96	1.60
	25	1.92	1.92

对比分析试验件准静态试验破坏形态图如图 9 所示,发现纯 Kevlar 比较蓬松,且纤维束中的纤维丝存在明显的断裂情况。STF 强化 Kevlar 由于加入 STF 产生了束捻现象,纤维丝之间充斥的 SiO_2 等微观粒子使摩擦增大,准静态拉伸过程中内部断裂的纤维丝贴在未断裂纤维丝上,所以观察不到明显的断裂情况。黑色标记仍然在试验件两端位置,可见夹持方式达到无滑移要求,加载过程中由于部分纤维丝断裂无法继续承载而开始卸载,所以试验件并没有完全拉断。

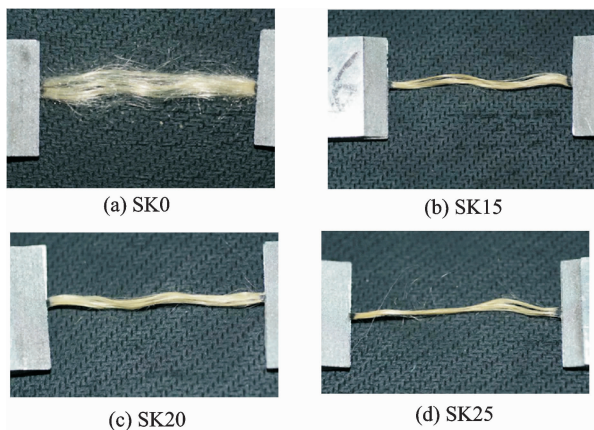


图 9 纯 Kevlar 和不同浓度 SK 准静态试验破坏形态图
Fig. 9 Failure morphologies of pure Kevlar and different concentrations of SK quasi-static test

针对准静态试验,由图 5~9 及表 1 可以看出:

(1)纤维束的应力位移曲线是非线性的,这是由于纤维的强度是统计分布的。当应力达到破坏应力 σ_b 时,纤维束中已经有相当数量的纤维丝发生破坏,使得整个纤维束不能继续承载,造成失稳破坏,所以准静态条件下试验件均没有完全拉断。

(2)纯 Kevlar 随着应变率的升高,破坏应力与失稳位移均呈现下降趋势,而且从曲线中可以看出,试验过程中出现了突然卸力现象,这是由于位移控制方式使得纤维丝断裂导致应力急剧下降而导致的。

(3)STF 强化的 Kevlar 随着应变率的升高,破坏应力与失稳位移均呈现上升趋势,表现出了应变率强化效应。对于相同应变率试验,20%浓度 STF 强化 Kevlar 失稳位移最大,25%浓度的次之,15%浓度的最小。

2 动态拉伸试验

2.1 试验设备及原理

反射式霍普金森拉杆装置如图 10 所示。

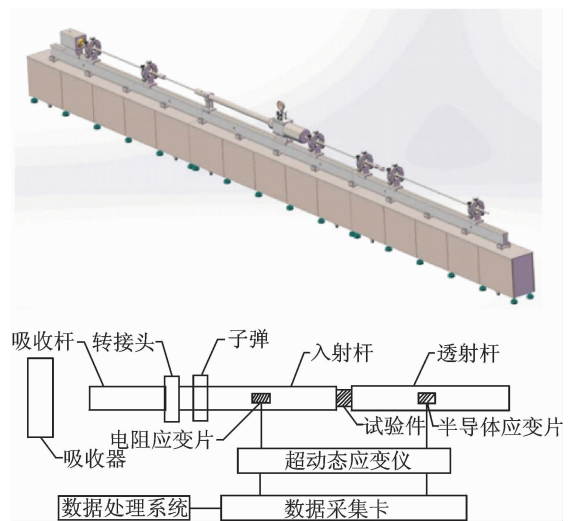


图 10 动态试验装置实物图及原理图
Fig. 10 Device physical map of dynamic test and its schematic diagram

试验中气枪发射套筒式子弹以一定速度沿轴向撞击转接头,转接头连接入射杆与吸收杆。

入射杆中产生入射应力波脉冲,在输入杆与试件的界面上,部分应力波传入试件,而另一部分经过反射回到了入射杆中;同样,一个透射应力波传入透射杆。通过在入射透射杆上粘贴应变片采集变形电信号,该信号经超动态应变仪放大后输入示波器,最后输入计算机中进行数据处理。

试验中认为波导杆为弹性变形并且波导杆和试件均处于一维应力状态,假设试件中应力保持均匀。因此,通过对波导杆上入射波、反射波和透射波的测试,以一维应力波理论作为分析基础,运用式(1)^[17],可求得试件中的平均应力、平均应变和平均应变率,进而得到试件材料在某一应变率下的动态拉伸工程应力-应变曲线。

$$\begin{cases} \epsilon_s = -\frac{2C_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_R dt \\ \dot{\epsilon}_s = \frac{d\epsilon_s}{dt} = -\frac{2C_0}{l_0} \epsilon_R \\ \sigma_s = \frac{F_1 + F_2}{2A_s} = \frac{E_{\text{杆}} A}{A_s} \epsilon_T \end{cases} \quad (1)$$

本套试验装置具体参数为:入射杆、透射杆及套筒式子弹的材料均为钢,直径均为 14.5 mm,弹性模量为 206 GPa,密度 $\rho = 7\ 850\ \text{kg/m}^3$ 。所以,式中弹性纵波波速 $C_0 = 5\ 122\ \text{m/s}$, l_0 为试验件的标距, $E_{\text{杆}}$ 为波导杆的弹性模量, A 为波导杆的横截面积, A_s 为试件的横截面积, ϵ_r, ϵ_t 分别为反射波和透射波引起的应变。其中入射杆为电阻应变片,灵敏系数 $K_1 = 2.22$,透射杆为半导体应变片,灵敏系数 $K_2 = 110$ 。工程应力和工程应变可通过式(2)转换成真实应力和真实应变

$$\begin{cases} \sigma_t = \sigma_s (1 + \epsilon_s) \\ \epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_s, ϵ_s 分别为工程应力和工程应变; σ_t, ϵ_t 分别为真实应力和真实应变。

2.2 夹具与试样设计

考虑到单束 Kevlar 纤维的质量很轻,在霍普金森拉杆试验装置上的普通夹具不能满足试验要求,需要设计新的夹具,其 UG 图如图 11 所示。

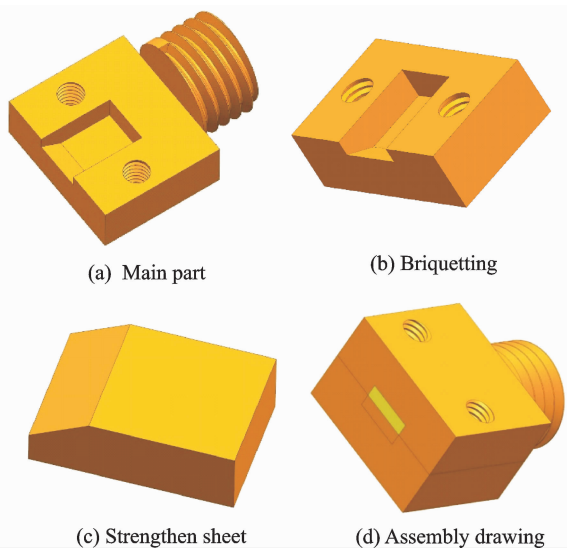


图 11 动态拉伸夹具图

Fig. 11 Fixture map of dynamic tensile test

入射杆与透射杆连接处有 M8 的内螺纹,所以夹具主体由两部分组成: M8×1 的外螺纹和连接块。夹具的压块部分即为主体的连接块部分,两者是对称分布的,通过两个螺钉连接。连接块正中央有带斜面的凹槽,用于夹持加强片连接的试验件。加强片为厚度为 2 mm 的铝片,其中一个短边设有

30°的斜面,用于增大与夹具之间的摩擦,避免夹持好的试验件从夹具中滑脱。

首先从不同浓度 STF 强化过后的 Kevlar 织物中沿径向间隔相同距离抽取多根纤维束备用,接着用 AB 胶将 2 mm 厚带斜槽的铝质加强片按照标距 40 mm 夹持在纤维束两端,用记号笔在 40 mm 标距两端做记号作为检验试件滑移与否的标准,最后去除两端多余纤维,在室温环境下放置 20 h。根据霍普金森拉杆试验装置要求设计的动态拉伸试验件如图 12(a)所示,杆上夹持好的试验件如图 12(b)所示。

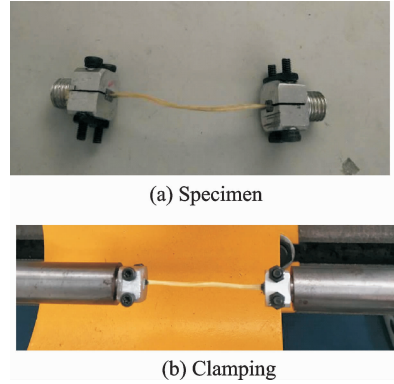


图 12 动态拉伸试件及其夹持

Fig. 12 Dynamic tensile specimen and its clamping

2.3 试验结果及分析

图 13 给出了 STF 强化 Kevlar 单束纤维动态拉伸试验测得的典型波形图(SKDT0-1),CH1 通道采集的是入射波与反射波,CH2 通道采集的是透射波,均为电压信号。试验编号中 SK 代指的是 STF 强化 Kevlar,DT 代指的是动态拉伸,随后的数字代指 STF 溶液的浓度,“-”之后的数字代表试验的组号。如“SKDT15-1”指 15% 浓度 STF 溶液强化 Kevlar 第一组动态拉伸试验,“SKDT0”指纯 Kevlar。对 SHTB 试验的数据进行处理,即可获得相应应变率下的真实应力应变曲线。

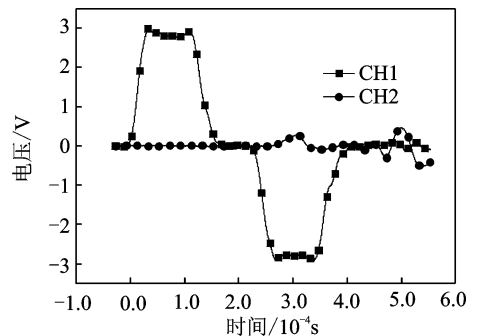


图 13 动态拉伸试验波形图

Fig. 13 Typical waveform diagram of dynamic tensile test

通过试验得到不同浓度 STF 强化的 Kevlar 纤维束在准静态条件下的真实应力-应变关系,通过曲线发现每组应力值从 500 MPa 到最大值之间近似满足线性,拟合线性关系,斜率即为材料初始弹性模量。纤维束的初始弹性模量 E 、破坏应力 σ_b (最大应力) 和失稳应变 ϵ_b (与最大应力对应的应变) 在各组应变率下的值见表 2。

表 2 SK 织物动态力学性能试验结果

Tab. 2 Results of dynamic mechanical properties of SK fabrics

Sample	Launch pressure/ MPa	Gauge distance/ mm	Strain rate/ s^{-1}	Elastic modulus/ GPa	Stress at failure/ MPa	Instability strain
SKDT0-1	0.5	40.20	313	111.7	2 128	0.018 0
SKDT0-2	0.5	39.66	296	125.9	2 075	0.018 0
SKDT0-3	0.5	41.78	307	102.3	1 994	0.019 0
SKDT0-4	0.5	41.52	258	109.7	1 938	0.017 0
SKDT15-1	0.5	38.92	326	103.0	2 070	0.017 0
SKDT15-2	0.5	39.96	268	107.1	2 090	0.016 0
SKDT15-3	0.5	39.24	317	105.2	2 149	0.018 0
SKDT15-4	0.5	39.76	295	116.7	2 175	0.017 0
SKDT20-1	0.5	39.90	234	80.0	1 586	0.016 0
SKDT20-2	0.5	38.70	296	70.0	1 501	0.018 0
SKDT20-3	0.5	38.64	316	84.7	1 560	0.015 0
SKDT20-4	0.5	40.00	317	74.7	1 552	0.018 0
SKDT25-1	0.5	38.92	364	97.1	2 021	0.017 0
SKDT25-2	0.5	38.60	264	118.9	1 927	0.019 5
SKDT25-3	0.5	40.00	239	115.9	1 880	0.014 0
SKDT25-4	0.5	40.42	317	100.5	1 860	0.015 0

不同应变率的真实应力应变曲线如图 14 所示。不同浓度 STF 强化 Kevlar 织物的弹性模量如图 15 所示,每种浓度下均有 4 组试验。不同浓度 STF 强化 Kevlar 织物的破坏应力如图 16 所示,每种浓度下均有 4 组试验。将得到的弹性模量、失效应力及失效应变去除最大最小值以后取平均值,其力学参数如表 3 所示。

表 3 不同浓度 STF 强化 Kevlar 织物动态力学性能表

Tab. 3 Dynamic mechanical properties of Kevlar fabrics treated with different concentrations STF

STF concentration/ %	Elastic modulus/ GPa	Stress at failure/ MPa	Instability strain
0	110.7	2 034.5	0.018
15	106.2	2 119.5	0.017
20	82.4	1 556.0	0.017
25	108.2	1 903.5	0.016

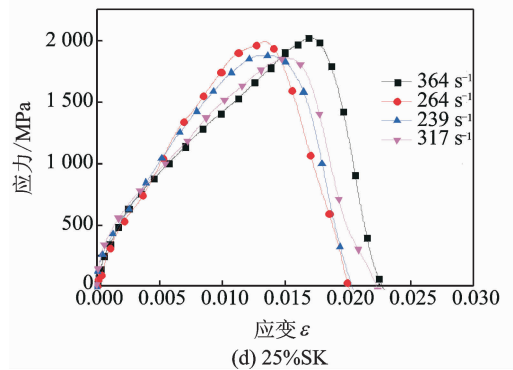
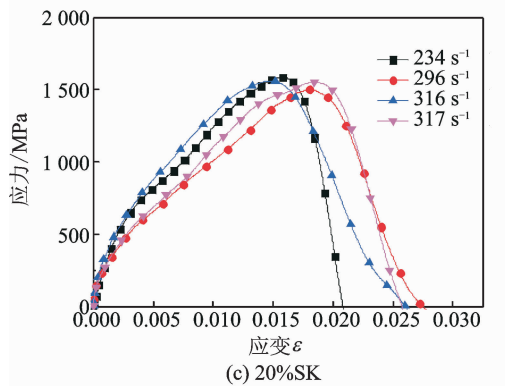
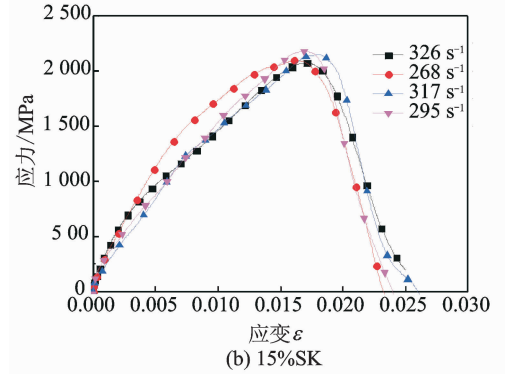
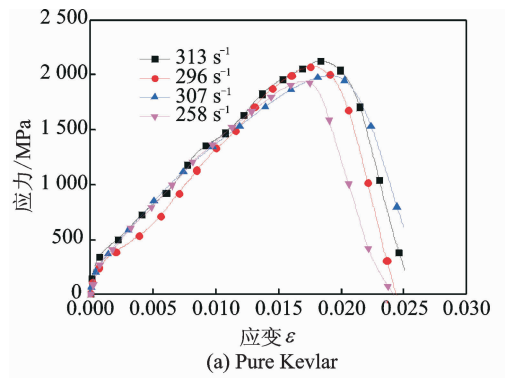


图 14 不同浓度 SK 织物纤维束动态拉伸应力应变曲线
Fig. 14 Dynamic tensile strain-strain curves of fiber bundles with different concentrations of SK fabrics

纯 Kevlar 和不同浓度 STF 强化 Kevlar 单束纤维试验件的破坏形态如图 17 所示。对动态拉伸后的纤维束试验件进行 SEM 扫描电镜观测,得到的微观纤维丝图如图 18 所示。

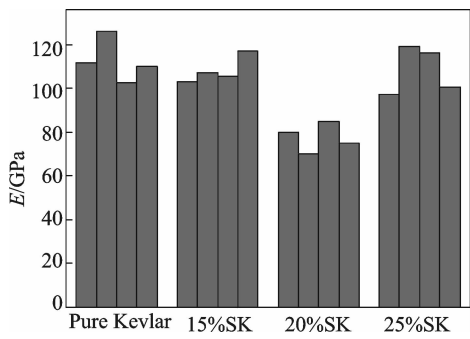


图 15 不同浓度 SK 织物弹性模量图

Fig. 15 Elastic modulus of SK fabrics with different concentrations

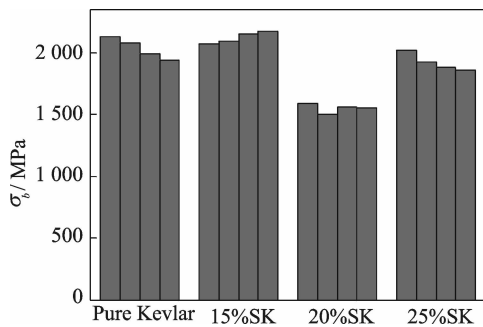


图 16 不同浓度 SK 织物破坏应力图

Fig. 16 Defect stress map of SK fabrics with different concentrations

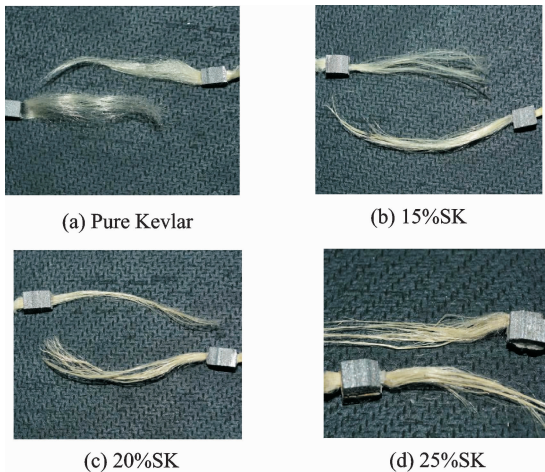
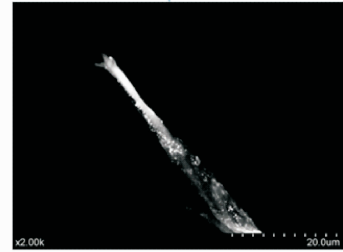
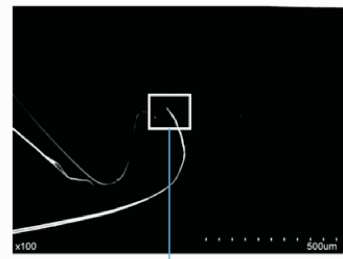


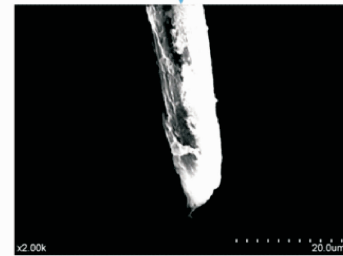
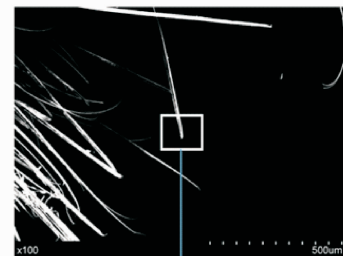
图 17 纯 Kevlar 和不同浓度 SK 织物动态试验破坏形态图

Fig. 17 Failure morphologies of pure Kevlar and different concentrations of SK fabrics in dynamic test

根据图 17, 18 得到, 动态拉伸试验中, 高压下所有的试验件均完全断裂, 且黑色标记在试验件两端, 达到了无滑移要求。比较纯 Kevlar 和 STF 强化 Kevlar 织物后发现, 纯 Kevlar 断裂后更分散, 纤维丝之间没有接触, 而加了 STF 后的织物, 纤维丝断裂后仍然会黏在一起, 产生束捻现象, 这是由于 STF 和纤维丝之间的摩擦增加导致的。



(a) Pure Kevlar



(b) 25%SK

图 18 纤维丝 SEM 扫描电镜图

Fig. 18 Filament scanning electron microscopy

SEM 电镜中放大 2 000 倍可以明显观测到纤维丝, 纯 Kevlar 纤维丝的表面光滑, 且断面不断收缩; 加入 STF 后的 Kevlar 纤维丝表面可以看到 STF 溶液, 且观测不到明显的断面收缩现象。

由表 2, 3 和图 14~18 可以看出:

(1) 动态试验中, 纤维束的应力应变曲线是非线性的, 得到的动态力学性能参数为 STF 强化 Kevlar 织物的动态冲击响应提供参考; 高应变率下纤维束均完全断裂, 纯 Kevlar 表面光滑, 断裂后很分散; 而 STF-Kevlar 纤维束由于加入 STF 后纤维丝摩擦增加, 导致其断裂后仍然会黏在一起, 产生束捻现象。

(2) 由于 STF 在 Kevlar 织物中分布的不均匀性、试验件的束捻及制作过程中纤维丝的断裂等因素, 所以数据有一定的离散性。动态试验中, 纯

Kevlar 弹性模量最大,其破坏应力与准静态试验结果接近,都在 2 GPa 左右。

(3)相同发射压力对应相同的应变率范围,300 s⁻¹应变率附近,20%浓度 STF 强化的 Kevlar 的破坏应力较小,抗拉强度较弱。而 15%和 25%浓度 STF 强化的 Kevlar 与纯 Kevlar 的动态力学性能参数较为接近。分析认为,STF 溶液强化 Kevlar 织物通过将 SiO₂ 粒子充斥在纤维丝中,所以对力学性能的影响不大,而是主要体现在纤维间的摩擦上,这也是其吸收能量方式的主要区别。

3 结 论

本文通过在 MTS 材料试验机开展准静态试验和霍普金森拉杆上对 STF 强化 Kevlar 织物开展单束纤维动态拉伸试验,得到结论如下:

(1)准静态试验中,试验件未完全断裂前即开始卸载,且位移控制方式会导致应力急剧下降。随着应变率的升高,纯 Kevlar 的破坏应力与失稳位移均呈现下降趋势;而 STF 强化 Kevlar 织物的破坏应力与失稳位移均呈现上升趋势,表现出了应变率强化效应。对于相同应变率试验,20%浓度 STF 强化 Kevlar 失稳位移最大,25%浓度的次之,15%浓度的最小。

(2)准静态试验条件有限,无法获取准确的应变,应力则与动态试验趋于一致。准静态与动态条件下试件破坏形态方面截然不同:由于纤维丝之间充斥的 SiO₂ 等微观粒子而摩擦增大,准静态拉伸过程中内部断裂的纤维丝贴在未断裂纤维丝上,观察不到明显的断裂情况;而动态条件下由于加载的迅速性,纤维束均完全断裂。

(3)动态拉伸试验中,试验件在高发射压力且完全夹紧状态下均完全断裂,破坏形态与准静态截然不同。20%浓度 STF 强化 Kevlar 的破坏应力较小,抗拉强度较弱。其余浓度 STF 强化 Kevlar 动态力学性能参数较为接近,所以分析认为,STF 溶液对 Kevlar 织物的增强并不是在力学性能参数上,而是主要体现在纤维间的摩擦上,这也是其吸收能量方式的主要区别。高应变率下 STF-Kevlar 的力学行为与准静态下有较大区别,为以后的高速冲击数值仿真分析提供参考。

参考文献:

[1] 马勇,陈宏书,王结良,等. 基于剪切增稠液体防护装甲的研究[J]. 高分子通报, 2012(6):49-53.
MA Yong, CHEN Hongshu, WANG Jieliang, et al. Based on shear thickening liquid protection armor

[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2012 (6): 49-53.
[2] LEE Y S. Advanced body armor utilizing shear thickening fluids[C]// 23rd Army Science Conference. Orlando, FL:[s. n.], 2002: 2-5.
[3] WAGNER N, WETZEL E D. Advanced body armor utilizing shear thickening fluids[P]. America, US 7498276 B2, 2009.
[4] WETZEL E D, LEE Y S, EGRES R G, et al. The effect of rheological parameters on the ballistic properties of shear thickening fluid (STF)-Kevlar composites[J]. Numiform Proceedings, 2004, 712(1): 288-293.
[5] WETZEL E D. Stab resistance of shear thickening fluid(STF)-kevlar composites for body armor applications[C]// Proceedings of the 24th Army Science Conference. Orlando, USA:[s. n.], 2004.
[6] MAJUMDAR A, BUTOLA B S, 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.
[7] PARK Y, KIM Y H, BALUCH A H, et al. Empirical study of the high velocity impact energy absorption characteristics of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 72(4):67-74.
[8] 熊杰,王家俊,施楣梧,等. 高聚物纤维材料的高应变率响应行为研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(5):143-147.
XIONG Jie, WANG Jiajun, SHI Meiwu, et al. Study on high strain rate response behavior of polymer fiber materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2002, 18(5): 143-147.
[9] GANCZAKOWSKI H, BEAUMONT P. The behaviour of Kevlar fibre-epoxy laminate under static and fatigue loadings. Part I-Experimental [J]. Composites Science and Technology, 1989, 36(4):299-319.
[10] Rajan S D, Mobasher B, Stahlecker Z, et al. Explicit finite element analysis modeling of multilayer composite fabric for gas turbine engines containment systems, Phase III, Part 2; Arizona State University fabric material tests[R]. 2011.
[11] WELSH L M, HARDING J. Effect of strain rate on the tensile failure of woven reinforced polyester resin composites[J]. Le Journal De Physique Colloques, 1985, 46(8):450-455.
[12] 朱德举,张晓彤,欧云福,等. Kevlar 49 单丝和单束的随机破坏及有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1):213-223.

- ZHU Deju, ZHANG Xiaotong, OU Yunfu, et al. Stratic failure and finite element simulation of Kevlar 49 monofilament and single beam [J]. Chinese Journal of Composites, 2016, 33 (1): 213-223.
- [13] 董立民,夏源明,杨报昌. 纤维束的冲击拉伸实验研究[J]. 复合材料学报,1990, 7(4) :9-15.
DONG Limin, XIA Yuanming, YANG Baochang. Experimental study on impact tensile of fiber bundles [J]. Journal of Materials Science, 1990, 7(4): 9-15.
- [14] WANG Y, XIA Y. A modified constitutive equation for unidirectional composites under tensile impact and the dynamic tensile properties of KFRP[J]. Composites Science and technology,2000,60(4):591-596.
- [15] 朱德举,张晓彤,张怀安. 动态拉伸载荷下应变率和温度对 Kevlar49 芳纶纤维布增强环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报,2016,33(3):459-468.
- ZHU Deju, ZHANG Xiaotong, ZHANG Huai'an. Effect of strain rate and temperature on mechanical properties of Kevlar49 aramid fiber reinforced epoxy resin composites under dynamic tensile loading[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 33(3):459-468.
- [16] ZHU D J, MOBASHER B, RAJAN S D. Dynamic tensile testing of Kevlar49 fabrics [J]. Textile Research Journal,2001,71(11):960-964.
- [17] 卢芳云. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京:科学出版社, 2013.
LU Fangyun. Hopkinson bar experimental technology[M]. Beijing:Science Press, 2013.

(编辑:孙静)

