

文章编号:1001-4888(2018)03-0366-11

不同标距及应变率下纤维丝间摩擦 对 Kevlar 49 纤维束力学性能的影响^{*}

朱德举, 黄蒙影

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: 为了研究在不同标距和应变率下摩擦对 Kevlar 49 纤维束力学性能的影响, 首先, 利用 MTI 微型拉力试验机对不同标距(12.5mm, 25.0mm, 40.0mm)的 Kevlar 49 纤维丝力学性能进行拉伸测试。然后, 利用 MTS 万能试验机对不同标距(25.0mm, 50.0mm, 100.0mm, 200.0mm)的 Kevlar 49 纤维束在处理(涂油润滑)和未处理两种情况下进行静态拉伸测试。采用 Instron 落锤冲击系统对标距为 25.0mm 的纤维束(处理和未处理)进行动态拉伸测试(应变率为 40s^{-1} , 80s^{-1} , 120s^{-1} 和 160s^{-1})。最后, 利用 Weibull 分布模型对实验数据进行统计分析, 量化了纤维强度的离散性。结果表明: 在一定范围内, Kevlar 49 纤维丝的拉伸强度、韧性、峰值应变均随标距的增加而降低, 弹性模量随标距的增加而增大。处理和未处理的纤维束静态拉伸强度、韧性、峰值应变及弹性模量相近, 即在静态拉伸作用下减小纤维丝之间的摩擦对不同标距下的纤维束力学性能影响不大。随着应变率增大, 相对于未处理的纤维束, 经过处理的纤维束强度逐渐降低, 降低幅度呈递增趋势, 这表明在高应变率作用下纤维丝之间的摩擦对纤维束的力学性能影响显著。

关键词: 对位芳香族聚酰胺纤维 Kevlar 49; 纤维丝; 纤维束; 标距; 应变率; 摩擦

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-036

0 引言

Kevlar 又称聚对苯二甲酰苯二胺(PPTA), 是一种高强度软体复合材料, Kevlar 纤维本身的结构特征使它具有极好的力学特性, 即: 强度高、弹性模量大、密度小、韧性高和抗冲击性高, 因而被广泛应用在军事、航空航天等领域, 其中 Kevlar 纤维的抗冲击性研究对于军事及航空航天有着特殊的意义。

诸多学者对高强织物吸收冲击能量进行了大量研究, 主要从以下几个因素考虑: 纱线特性、织物结构、弹体的几何形状、冲击速度、边界条件、织物的布层数以及摩擦。Tabiei 等^[1]认为纤维摩擦越大, 在冲击过程中吸收能量越多, 并指出子弹冲击织物过程中摩擦形式有三种: 纤维丝之间、纱线之间以及织物和弹体之间; Briscoe 等^[2]通过添加润滑剂来获得不同摩擦特性的纤维织物, 并对不同摩擦特性的纤维织物进行抗冲击实验; Duan 等^[3-7]运用有限元模拟方法研究了摩擦系数和纱线力学性能对防弹性能的影响; 王东宁等^[8]应用有限元软件 LS-DYNA 模拟了钢弹冲击时纱线之间的摩擦系数对织物防弹性能的影响, 并指出在一定范围内纱线之间的摩擦系数越大, 织物防弹性能越好; 史春旭等^[9]利用 LS-

^{*} 收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-04-13

基金项目: 装备预研教育部联合基金(青年人才)项目(6141A02033602), 湖南省重点研发计划项目(2017GK2130), 国防科技创新特区项目(17-H863-03-ZT-003-008-06), 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(2016GK4016)

通讯作者: 朱德举, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为高性能纤维/织物增强水泥基和树脂基复合材料、仿生材料、冲击和高应变率实验技术、防弹高性能纤维布的力学特性和有限元分析。Email: dzhu@hnu.edu.cn

DYNA 模拟了平头弹体对四边固定织物的冲击过程,结果表明弹体与纱线之间的摩擦对织物吸能特性的影响很小,纱线与纱线之间的摩擦在冲击过程中对织物吸能特性的影响起主要作用;Nilakantan^[10]通过由纤维丝组成的纤维布来模拟子弹冲击实验,得出当子弹与纤维丝摩擦系数为 0.18 时,增大纤维丝之间的摩擦系数,子弹的剩余速度有很大降低,说明增大纤维丝之间的摩擦力可以增强织物的耗能作用。现有的资料对于弹体与纱线、纱线与纱线的摩擦影响已有大量研究,但是纤维丝之间的摩擦对于纤维束力学性能的影响这一问题近乎空白。

通过对单丝纤维的力学性能进行精确测量可以为充分利用纤维、优化产品性能以及建立和验证微尺度力学模型,提供必要的实验数据^[11]。在微尺度力学性能测试中,微拉伸实验可以获得弹性模量、韧性及极限应变等多个力学性能参数,是最直接、最具有代表性的力学测试方法之一。雷振坤等^[12]、王怀文等^[13]使用数字标记点识别方法对纤维单丝进行拉伸测试,结果表明微观结构的差异导致纤维单丝拉伸性能的不同;Lim 等^[14]对单丝纤维(Kevlar, Kevlar 129)进行了不同标距下的拉伸力学性能测试;朱德举等^[15-17]对 Kevlar 29 和 Kevlar 49 进行了单丝拉伸测试及有限元模拟。尽管如此,对于 Kevlar 49 纤维单丝的研究仍相对较少。除此之外,Zhu 等^[18-20]的研究结果表明纤维束的力学性能除了与摩擦有关还与标距、应变率等有着密不可分的联系。

本文主要研究 Kevlar 49 纤维单丝在不同标距下的力学性能参数,以及在不同标距及应变率下纤维丝之间的摩擦对于 Kevlar 49 纤维束力学性能的影响。

1 实验材料及实验方法

1.1 实验材料

Kevlar 49 纤维布(图 1(a))由经纬双向纤维束平纹编织而成,纤维束编织密度均为 6.7×6.7 束/ cm^2 ,纤维束由成百上千根纤维丝组成。Kevlar 49 纤维布体密度为 $1.44 \text{g}/\text{cm}^3$,线密度为 $1.656 \text{g}/\text{cm}$,单根纤维束的截面面积(截面面积等于线密度除以体密度)为 $1.15 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ ^[16]。

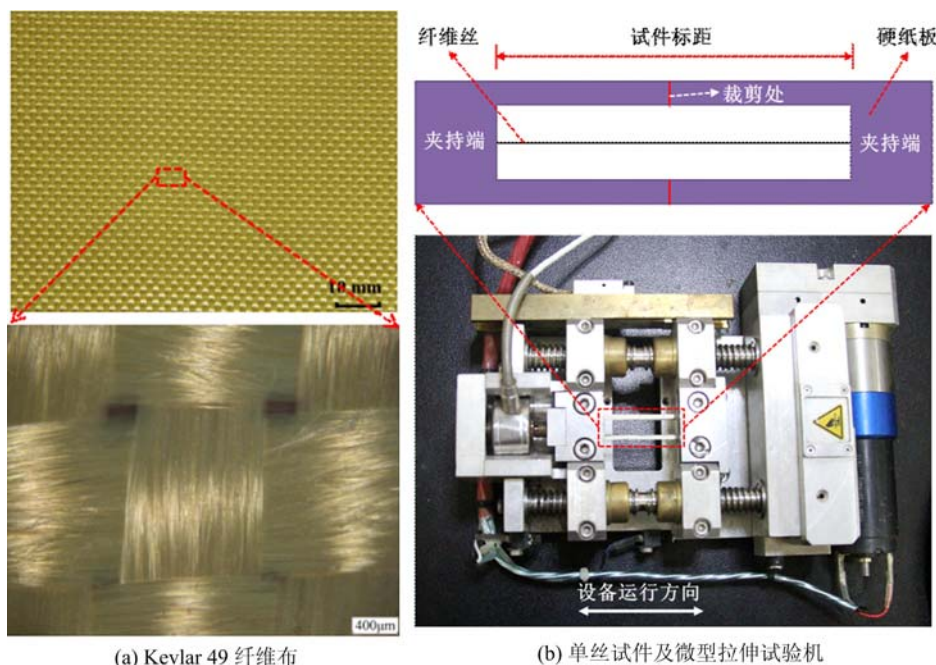


图 1 Kevlar 49 纤维布、单丝拉伸试件和 MTI 微型拉伸试验机

Fig. 1 Kevlar 49 fabric, single filament specimen for tensile test and MTI miniature tensile tester

1.2 测试方法

1.2.1 纤维丝试样

纤维丝的直径为 $12 \mu\text{m}$ ^[16],这对于实验测试仪器及试件制作都提出了很高的要求,选用微型拉伸试

验机(MTI)(图 1(b))进行拉伸测试,拉伸过程中的速率为 $0.5\text{mm}/\text{min}$ ^[15-17]。

试件制作方法:1)在硬纸板上分别开 $12.5\text{mm}\times 5.0\text{mm}$, $25.0\text{mm}\times 5.0\text{mm}$, $40.0\text{mm}\times 5.0\text{mm}$ 的矩形孔;2)从 Kevlar 49 单束纤维中随机抽取数根纤维丝备用;3)将硬纸板的两端各滴一滴强力胶(502 胶),然后将纤维丝一端放上去,将 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的方形纸沿矩形孔边缘覆盖以固定纤维丝,用同样方法固定另一端。由于仪器的最大测试间距为 47mm ,为研究标距对纤维丝力学特性的影响,选取 12.5mm 、 25.0mm 和 40.0mm 三个标距对 Kevlar 49 进行纤维单丝拉伸测试。由于纤维丝离散性比较大,每组做 50 个试样。

1.2.2 纤维束试样

1)沿 Kevlar 49 纤维布经向抽取单根纤维束;2)将铝片用夹具砸出齿纹(防止纤维束被拔出铝片),并对折;3)将环氧树脂胶涂抹到铝片上;4)根据指定标距(25.0mm 、 50.0mm 、 100.0mm 和 200.0mm)将铝片固定于纤维束两侧;5)将试件放置两天待胶体硬化,剪去铝片两端多余的纤维束;6)将试件摆放整齐,对需要处理的纤维束滴植物油使纤维丝浸渍在植物油中,以消除纤维丝之间的摩擦。

采用 MTS (C43.304) 型微机控制电子万能试验机^[18]对不同标距(25.0mm 、 50.0mm 、 100.0mm 和 200.0mm)的纤维束(处理和未处理)进行准静态拉伸测试,拉伸速率为 $2.5\text{mm}/\text{min}$ ^[15-18]。由于纤维束静态拉伸离散性相对较小,每组实验选取 40 个试件;使用 Instron (Ceast 9340)落锤系统^[18]对标距为 25.0mm 的纤维束(处理和未处理)进行不同应变率下动态拉伸测试,由于落锤系统冲击速度在 $0.77\sim 4.65\text{m}/\text{s}$ 之间,因此设定实验的冲击速度为 $1\text{m}/\text{s}$ 、 $2\text{m}/\text{s}$ 、 $3\text{m}/\text{s}$ 和 $4\text{m}/\text{s}$ 。根据定义应变速率等于速度除以标距,可得应变速率为 40s^{-1} 、 80s^{-1} 、 120s^{-1} 和 160s^{-1} ,分别对处理和未处理的 Kevlar 49 (25.0mm)纤维束进行动态拉伸实验^[18-20]。动态冲击离散性相对较大,每组实验 80 个试件。

2 测试结果与分析

2.1 不同标距下 Kevlar 49 纤维丝拉伸实验

Kevlar 49 纤维丝应力—应变曲线如图 2 所示。Kevlar 49 纤维丝发生脆性破坏,然而曲线并不是光滑的曲线,这主要是由于纤维单丝的极限承载力很小(0.3N 左右),仪器运行过程中的震动使其产生微小波动,但是对实验结果的准确性基本没有影响。

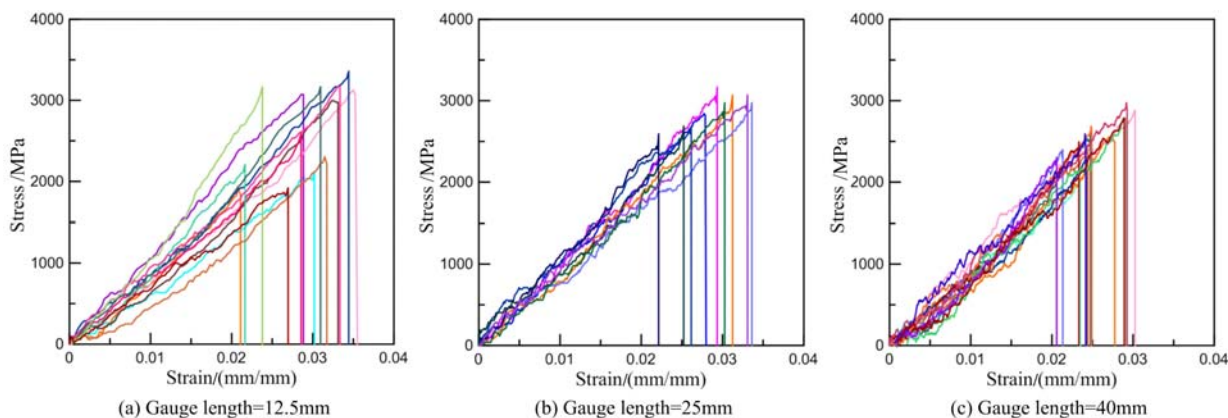


图 2 不同标距下纤维丝的应力—应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of filaments under different gauge lengths

不同标距下的纤维丝力学参数见表 1。通过对比可知,随着标距从 12.5mm 增加到 40.0mm ,拉伸强度、峰值应变、韧性分别从 $(2903\pm 472)\text{MPa}$, $(0.0333\pm 0.0032)\text{mm}/\text{mm}$, $(43.3\pm 9.7)\text{MPa}$ 降低到 $(2523\pm 180)\text{MPa}$, $(0.0261\pm 0.0035)\text{mm}/\text{mm}$, $(30.2\pm 6.4)\text{MPa}$,降低幅度分别为 13.09% 、 21.62% 、 30.25% ;相反,弹性模量从 $(88.9\pm 10.4)\text{GPa}$ 增加到了 $(97.0\pm 12.6)\text{GPa}$,增幅为 9.11% 。结果表明标距对于 Kevlar 49 纤维单丝力学特性有较为明显的影响,这与朱德举等^[17]对 Kevlar 29 纤维束在不同标距下的力学性能研究结论一致。

表 1 标距对 Kevlar 49 单丝纤维力学性能参数的影响

Tab. 1 Gauge length effect on mechanical properties of Kevlar 49 filaments

Gauge length (mm)	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Ultimate strain (mm/mm)	Toughness (MPa)
12.5	88.9±10.4	2903±472	0.0333±0.0032	43.3±9.7
25.0	90.9±17.7	2780±280	0.0292±0.0038	37.7±7.7
40.0	97.0±12.6	2523±180	0.0261±0.0035	30.2±6.4

2.2 不同标距下摩擦的影响

处理和未处理的纤维束应力—应变关系曲线如图 3 所示,由图可知,曲线在上升段离散性很小,而在下降段离散性相对较大,这主要是因为纤维束是由纤维丝缠绕而成,纤维材料本身并不均匀,同时由纤维强度统计分布规律可知在应力—应变曲线上上升段,纤维处于低应力状态,对于材料的非均匀性不敏感,而在下降段,未断裂纤维处于高应力状态,对于材料的非均匀性十分敏感^[21]。

对比图 2 和图 3 可以发现,纤维丝应力—应变曲线呈线性,纤维束应力—应变曲线为非线性,这是由于纤维束是由成百上千根纤维丝组成,根据纤维强度统计分布规律可知,纤维束在达到最大应力时已有相当数量的纤维丝断裂,导致纤维本身不能继续承载而发生失稳破坏^[21]。

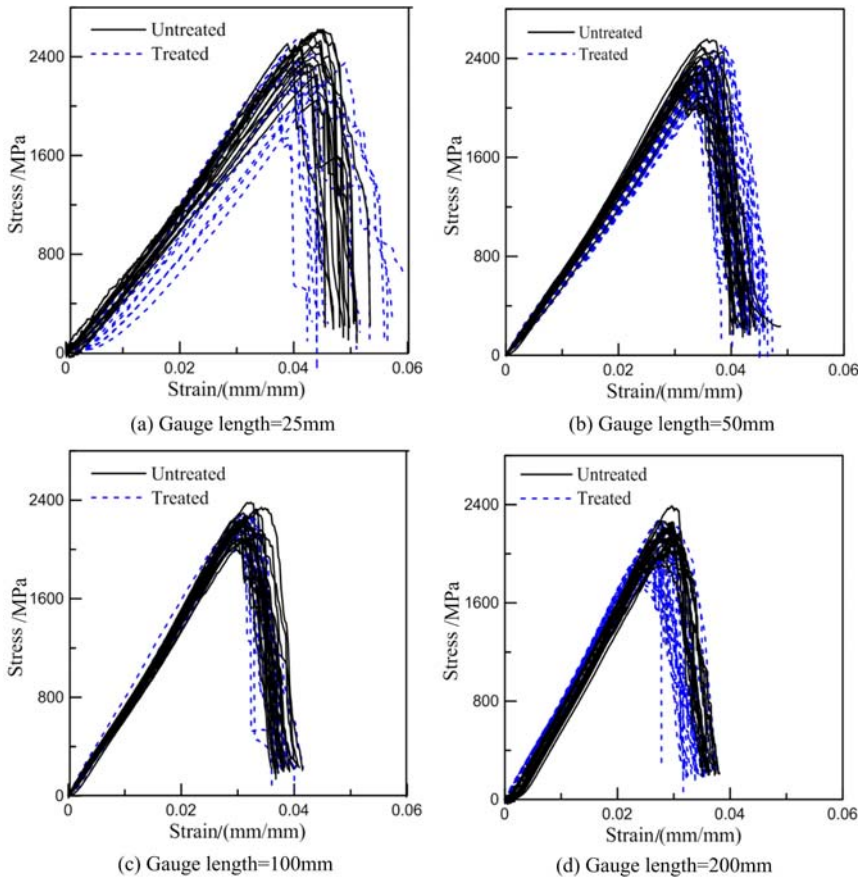


图 3 不同标距下 Kevlar 49 纤维束应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain behavior of Kevlar 49 yarns with different gauge lengths

标距和摩擦对于纤维束力学特性的影响如图 4 和表 2 所示,在静态荷载作用下,当标距由 25.0mm 逐渐增加到 200.0mm,处理纤维束(同一标距)由于纤维丝间没有摩擦造成纤维束的拉伸强度分别降低了 0.34%、0.93%、1.07%、8.68%,而不同标距纤维束(处理)的拉伸强度(相对于标距为 25.0mm)降低幅度分别为 1.13%、7.52%、17.77%。对未处理的纤维束而言,拉伸强度(相对于标距为 25.0mm)降低幅度分别为 0.50%、6.79%、10.22%。对应的纤维束其他力学参数亦有类似变化趋势。对比可

知,静态荷载作用下标距对纤维束力学性能的影响明显大于摩擦力对其的影响。这主要是由于在静态荷载拉伸过程中纤维丝有足够的时间调整彼此之间的相对位置,纤维可以更均匀受力,因此摩擦对于纤维束在静态拉伸作用下影响很小。但是随着纤维束标距的增加,纤维丝固有的内部缺陷亦成倍增加,纤维破坏始于最弱的缺陷处,因此标距增加会加大纤维破坏的概率,纤维束更容易发生破坏,所以纤维丝间的摩擦对纤维束静态力学性能的影响比标距的影响更微小。

表 2 标距和纤维丝间摩擦对 Kevlar 49 纤维束力学参数的影响

Tab. 2 Effects of gauge length and friction between filaments on mechanical properties of Kevlar 49 yarns					
Influence factors	Gauge length	Tensile strength	Young's modulus	Toughness	Ultimate strain
Friction (The treated yarns relative to the untreated ones)	25.0	-0.34%	-0.33%	-0.99%	+2.15%
	50.0	-0.93%	-2.27%	-2.22%	+2.87%
	100.0	-1.07%	-3.21%	-3.23%	+5.39%
	200.0	-8.68%	-3.39%	-15.00%	+7.02%
Gauge length	25.0	—	—	—	—
	50.0	-1.13%	+14.05%	-11.98%	-16.16%
	100.0	-7.52%	+19.67%	-25.29%	-26.70%
	200.0	-17.77%	+31.90%	-42.59%	-39.34%
Frictionless (Treated)	25.0	—	—	—	—
	50.0	-1.13%	+14.05%	-11.98%	-16.16%
	100.0	-7.52%	+19.67%	-25.29%	-26.70%
	200.0	-17.77%	+31.90%	-42.59%	-39.34%
Frictional (Untreated)	25.0	—	—	—	—
	50.0	-0.50%	+16.31%	-10.87%	-16.75%
	100.0	-6.79%	+23.22%	-23.55%	-28.95%
	200.0	-10.22%	+36.08%	-33.11%	-42.11%

注:—表示以此为基准。

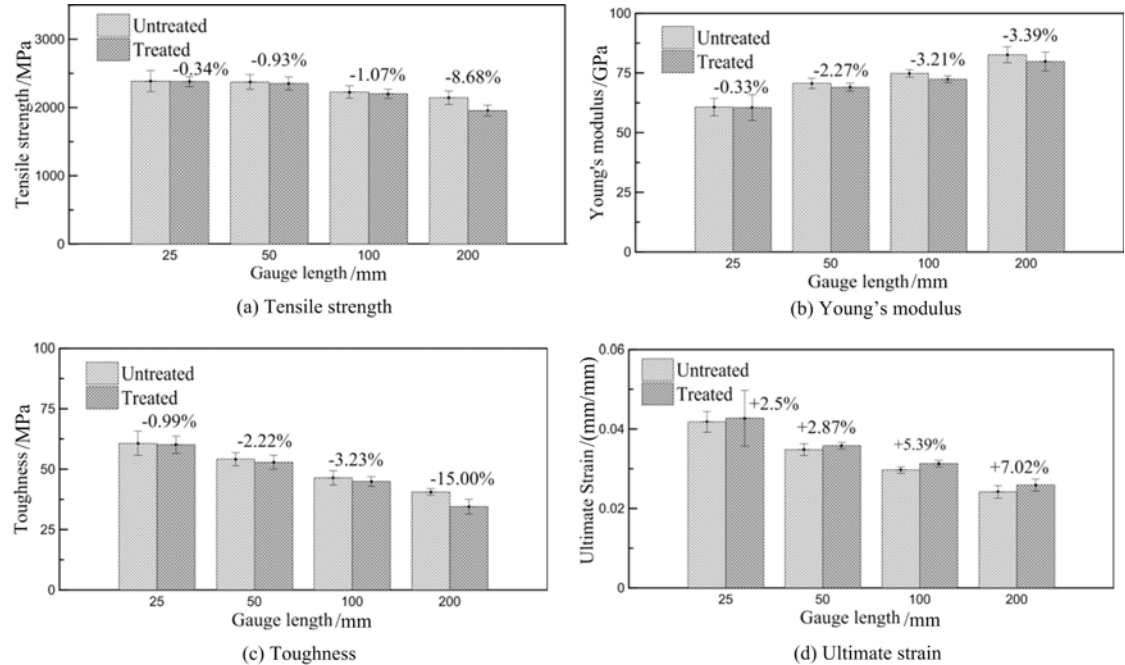


图 4 不同标距下处理及未处理 Kevlar 49 纤维束的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of treated and untreated Kevlar 49 yarns with different gauge lengths

2.3 不同应变率下摩擦的影响

不同应变率下处理和未处理纤维束应力—应变曲线以及力学性能分别如图 5 和图 6 所示,由图可

知,随着应变率的增加,两种纤维束的抗拉强度差值越来越大,即经过处理纤维束的强度相对于未处理纤维束强度逐渐减小,减小幅度的应变率增加逐渐增大。具体来说,随着应变率的增加,经过处理的纤维束相对于未经处理的纤维束抗拉强度、弹性模量逐渐降低,降低幅度从 -0.29% 、 -0.33% 逐步递减到 -11.18% 、 -38.00% ,而韧性、极限应变逐渐增加,增加幅度从 $+2.23\%$ 、 $+21.53\%$ 逐步递增至 $+12.86\%$ 、 $+33.95\%$,结果表明纤维丝间的摩擦对于不同应变率下的纤维束力学性能影响较大。

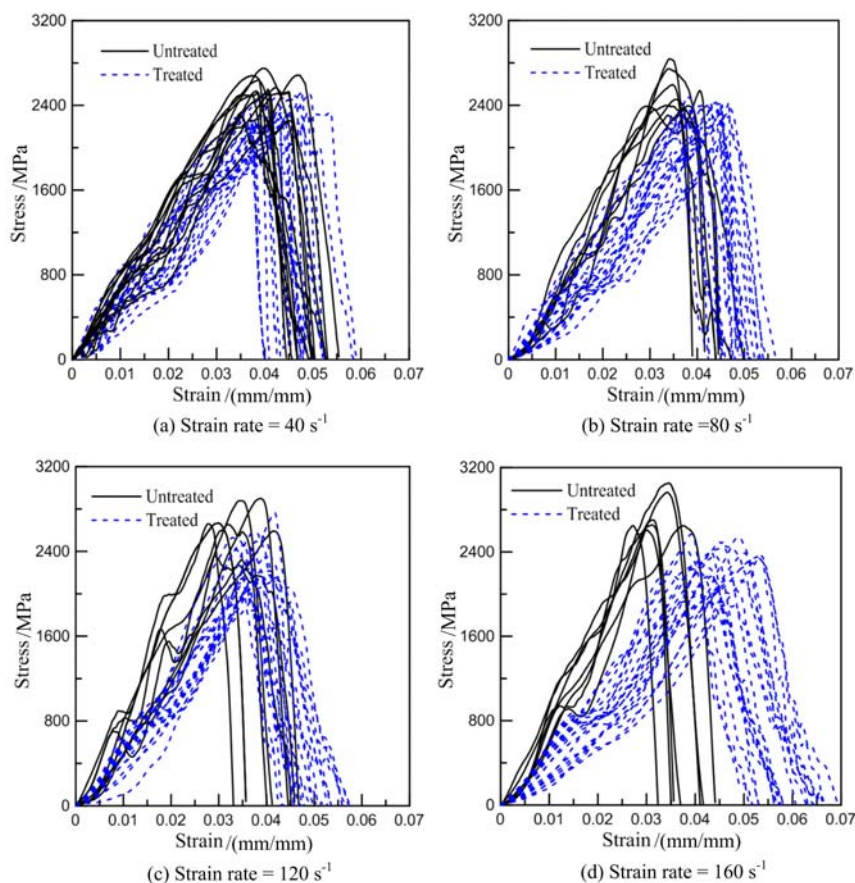


图5 不同应变率下处理和未处理Kevlar 49纤维束应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of Kevlar 49 yarns treated and untreated under different strain rates

综合分析图3~图6,处理纤维束相对于未处理纤维束静态力学参数值差别不大,而动态力学参数值差别显著,这是由于在低速率荷载作用下,纤维束(处理和未处理)中当部分纤维丝断裂时,未断裂纤维丝均有足够的反应时间以调整空间相对位置,纤维束整体受力均衡,因而其力学参数变化相对较小。而在高速冲击作用下当部分纤维丝发生断裂时,由于经过处理的纤维束中纤维丝之间的摩擦较小,容易调整相对位置,受力均衡,因而随应变率增加其力学参数变化幅度不大;未处理纤维束中纤维丝之间的摩擦较大,摩擦力越大纤维丝之间的相互作用力越强,未断裂纤维丝越不易调整相对位置,且摩擦力随应变率增加而增大^[18],因此随应变率增加,未处理纤维束力学参数变化显著。

2.4 Weibull 分析

以往的研究表明,纤维束中单丝的强度具有一定的离散性,离散性的大小直接影响纤维束的强度和实验结果,因此找出一个和实际情况吻合的分布函数,来描述和预测大量纤维单丝的强度,对分析纤维质量、预报复合材料强度断裂过程的计算机模拟都有着重要的意义。目前,用于描述材料强度的分布函数有Weibull三参数分布、Weibull二参数分布、正态分布、指数分布、Gauss分布等,以Weibull二参数分布应用最为广泛。

Weibull二参数分布函数为:

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{\sigma}{\sigma_0}\right]^m\right\} \quad (1)$$

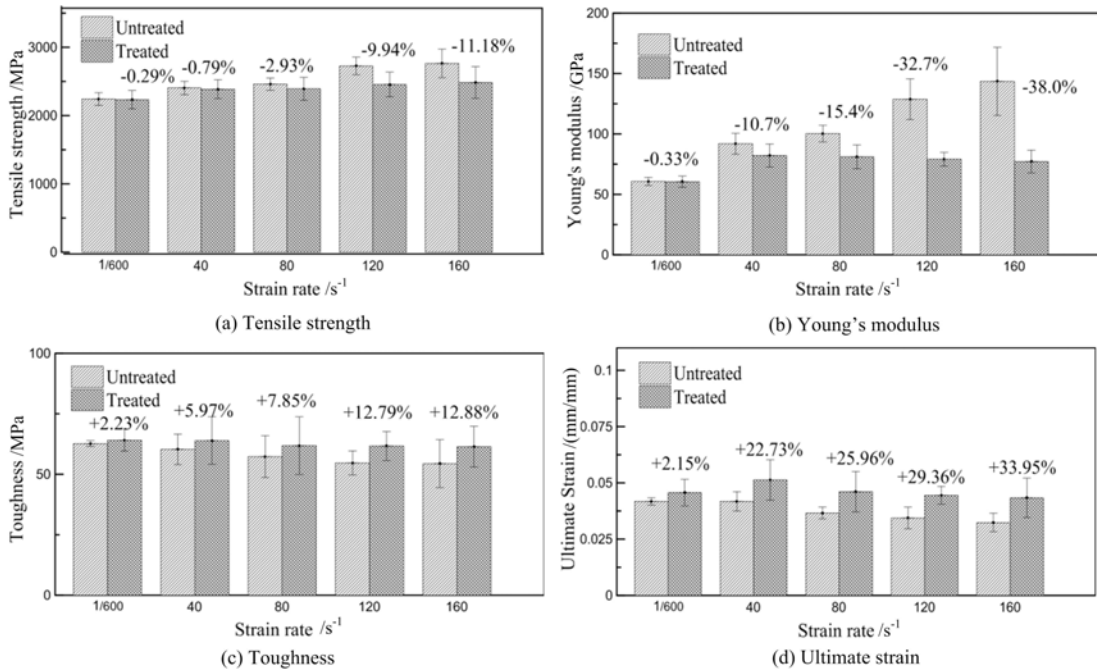


图 6 不同应变率下处理和未处理 Kevlar 49 纤维束的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of treated and untreated Kevlar 49 yarns under different strain rates

式中, σ 是拉伸强度; m 为形状参数; σ_0 为与 m 相关的尺度参数。

一定应力水平的失效概率 F 可用公式(2)表示:

$$F = \frac{i}{N+1} \quad (2)$$

式中, i 为将测试获得的强度数据按由小到大排序后的序列号; N 为测试试样的个数。

为了得到 Weibull 分布函数的形状参数 m 和尺度参数 σ_0 , 将(1)式的两边分别取两次对数, 得到公式(3):

$$\ln\ln\left(\frac{1}{1-F}\right) = m\ln\sigma - m\ln\sigma_0 \quad (3)$$

式中, 方程的斜率 m 是 Weibull 方程的形状参数, 截距 σ_0 是 Weibull 方程的尺度参数。

形状参数 m 决定了曲线的形状特征。一方面, m 值越大材料的均匀性越好, 可靠性越高, 是评价材料力学性能的重要指标; 另一方面, 形状参数 m 反映了实验结果的离散性, m 值越小, 离散性越大。

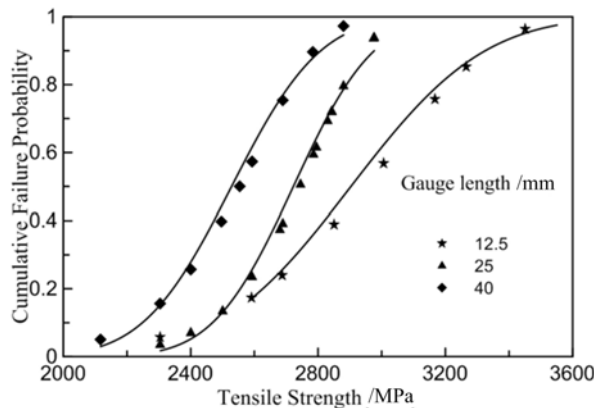


图 7 不同标距下 Kevlar 49 纤维丝拉伸强度的 Weibull 分布

Fig. 7 Weibull distribution of tensile strength of Kevlar 49 filaments with different gauge lengths

由图 7 可知, 随着标距的增大, Kevlar 49 纤维丝拉伸强度 Weibull 曲线向 Y 轴偏移。由表 3 可见, 纤维丝的尺度参数 σ_0 随标距的增加而递减, 与不同标距下纤维丝的平均应力 σ 变化趋势是一致的, 但

并不完全相同,这是由于尺度参数 σ_0 与形状参数 m 具有相关性。

表 3 不同标距下 Kevlar 49 纤维丝拉伸强度的 Weibull 参数

Tab. 3 Weibull parameters for tensile strength of Kevlar 49 filaments with different gauge lengths

Gauge length(mm)	σ_0 (MPa)	m	R^2
12.5	2880	6.5	0.9747
25.0	2779	8.8	0.9576
40.0	2566	11.9	0.9654

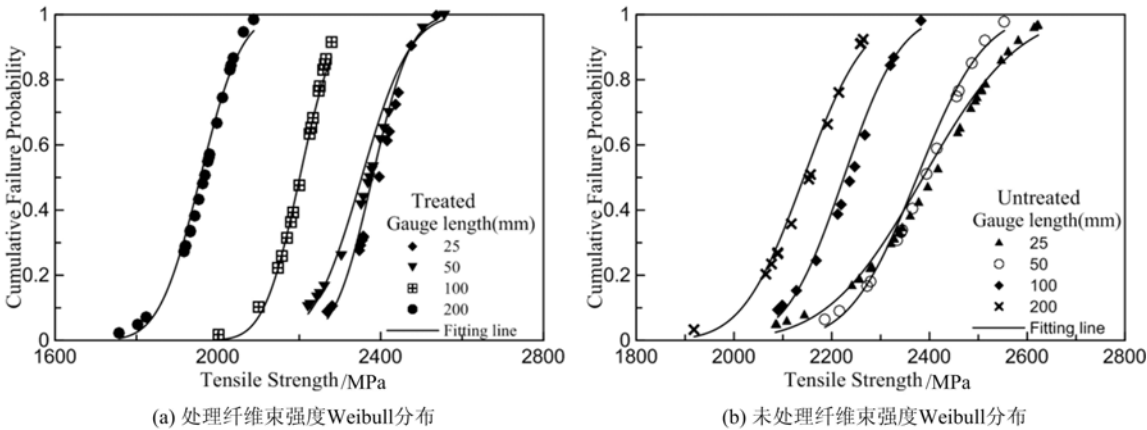


图 8 不同标距下 Kevlar 49 纤维束拉伸强度的 Weibull 分布

Fig. 8 Weibull distribution of tensile strength of Kevlar 49 yarns with different gauge lengths

由图 8(a)和(b)可知,随着标距的增加,拉伸强度累计概率曲线总体上向低应力区偏移,进一步论证了纤维束拉伸强度随标距的增大而降低;由表 4 可知,无论是经过处理纤维束还是未处理纤维束,尺度参数 σ_0 随标距的增加而逐渐减小,这与 σ 变化趋势一致。

表 4 不同标距下 Kevlar 49 纤维束拉伸强度的 Weibull 参数

Tab. 4 Weibull parameters for tensile strength of Kevlar 49 yarns with different gauge lengths

Specimen types	Gauge length(mm)	σ_0 (MPa)	m	R^2
Treated	25.0	2399	32.36	0.9672
	50.0	2377	25.82	0.9854
	100.0	2229	41.85	0.8922
	200.0	1986	31.94	0.9244
Untreated	25.0	2450	16.24	0.9584
	50.0	2415	21.61	0.9697
	100.0	2254	23.64	0.9810
	200.0	2177	23.80	0.9269

不同应变率下经过处理和未经处理的 Kevlar 49 纤维束拉伸强度的 Weibull 分布如图 9(a)和(b)^[20]所示,整体上拉伸强度概率密度曲线随应变率的增加向高应力区偏移。

相较于表 4、表 5 中纤维束的形状参数 m 来说,表 3 中纤维丝的形状参数 m 较小,这主要是因为单根纤维束中有成百上千根纤维丝,单根纤维丝中某个缺陷的存在对于纤维丝本身性质来说影响显著,但对于纤维束来说影响不大。对比表 4 和表 5,不同标距下静态拉伸实验的 m 值整体上大于不同应变率下纤维束动态拉伸实验 m 值,表明动态实验的离散性比静态大。尺度参数 σ_0 约等于平均强度 σ ,但是 σ_0 又受到形状参数 m 的制约,对比结果发现,尺度参数与平均强度变化趋势一致,当未处理纤维束应变率为 $160s^{-1}$ 时,二者相差较大,这是由于形状参数 m 的突变,致使 σ_0 变小。通过观察对比进一步了解

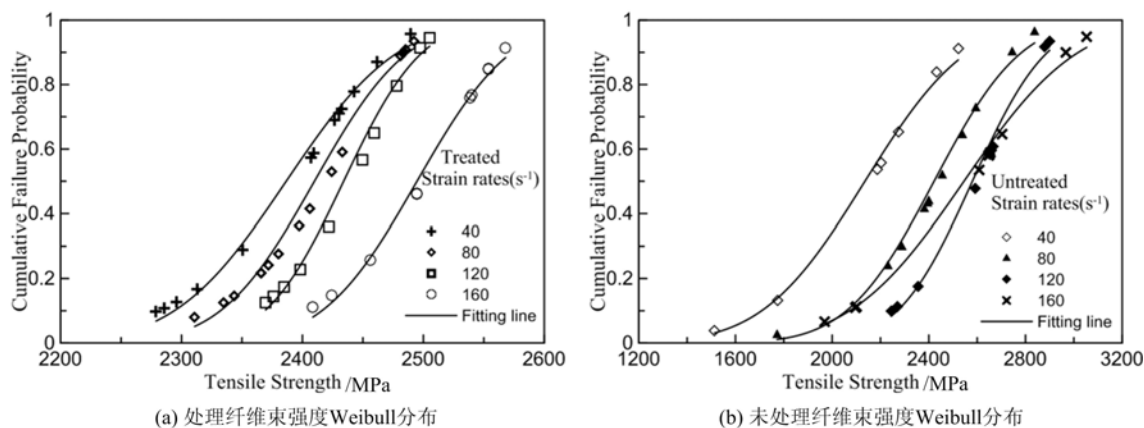


图 9 不同应变率下 Kevlar 49 纤维束拉伸强度的 Weibull 分布

Fig. 9 Weibull distribution of tensile strength of Kevlar 49 yarns under different strain rates

到,在静态和动态测试条件下,对于处理纤维束(25.0mm)拉伸强度变化较小,未处理纤维束强度变化幅度较大,因此减小纤维丝之间的摩擦可以大大削弱应变率对纤维束力学特性的显著影响。

表 5 不同应变率下处理及未处理纤维束拉伸强度的 Weibull 参数

Tab. 5 Weibull parameters for tensile strength of Kevlar 49 yarns treated and untreated with different strain rates

Specimen types	Strain rate (s^{-1})	α_0 (MPa)	m	R^2
Treated	40	2419	19.05	0.990
	80	2428	16.70	0.9796
	120	2485	20.42	0.9916
	160	2487	13.11	0.9858
Untreated	40	2448	27.26	0.9728
	80 *	2461	16.57	0.9296
	120 *	2738	14.81	0.9935
	160 *	2656	5.29	0.9940

注:带有 * 的数据源自文献[18]。

3 结论

对不同标距下的 Kevlar 49 纤维单丝及纤维束(处理和未处理)进行拉伸实验,在不同应变率下对处理和未处理 Kevlar 49 纤维束进行动态拉伸测试,得出以下结论:

(1) 在一定的标距范围内,随着标距的增大,纤维丝及纤维束(处理和未处理)拉伸强度、韧性、峰值应变均逐渐降低,弹性模量均逐渐增加。

(2) 在一定的标距范围内,随着标距的增大,经过处理的 Kevlar 49 纤维束相对于未处理的纤维束拉伸强度、模量、韧性递减,极限应变递增,但是变化基本在 5% 左右,因此在静态力学作用下摩擦对于纤维束的影响相对较小,可以忽略不计。

(3) 随着应变率的增大,未处理纤维束力学参数变化显著,经过处理(涂油)可以明显降低纤维束中单丝间摩擦,削弱应变率对纤维束力学特性的影响。

(4) 随着应变率的增大,对处理和未处理纤维束(同一应变率)的力学参数进行分析,经过处理的纤维束相对于未经处理的纤维束拉伸强度、模量递减,韧性、极限应变递增,且力学参数变化幅度随应变率的增加而增大。

参考文献:

[1] Tabiei A, Nilankantan G. Ballistic impact of dry woven fabric composites: A Review[J]. Applied Mechanics

- Review, 2008, 61(1):010801.
- [2] Briscoe B J, Motamedi F. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction[J]. *Wear*, 1992, 158(1-2):229—274.
- [3] Rao M P, Duan Y, Keefe M, 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.
- [4] Rao M P, Duan Y, Keefe M, et al. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric[J]. *Composite Structures*, 2009, 89(4):556—566.
- [5] Duan Y, Keefe M, Bogetti T A, et al. A 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.
- [6] Duan Y, Keefe M, Bogetti T A, et al. Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 2006, 48(1):33—43.
- [7] Duan Y, Keefe M, Bogetti T A, et al. Modeling the role of friction during ballistic impact of a high-strength plain-weave fabric[J]. *Composite Structures*, 2005, 68(3):331—337.
- [8] 王东宁, 王利平, 佐同林, 等. 有限元模拟摩擦效应对织物防弹性能的影响[J]. *天津纺织科技*, 2015, 4(1):15—22 (WANG Dongning, WANG Liping, ZUO Tonglin, et al. Finite-element modeling the effects of friction on the ballistic impact of fabric armor[J]. *Tianjin Textile Science & Technology*, 2015, 4(1):15—22 (in Chinese))
- [9] 史春旭, 段一平, 任家骏. 界面摩擦对 Kevlar 织物吸收冲击能量能力的影响[J]. *复合材料学报*, 2015, 9(1):57—63 (SHI Chunxu, DUAN Yiping, REN Jiajun. Effect of interfacial friction on the impact energy of Kevlar fabric[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 9(1):57—63 (in Chinese))
- [10] Nilakantan G. Filament-level modeling of Kevlar KM2 yarns for ballistic impact studies[J]. *Original Research Article Composite Structures*, 2013, 104:1—13.
- [11] 刘大彪, 何玉明, 胡鹏, 等. 单纤维微拉伸力学性能测试与分析[J]. *实验力学*, 2012, 27(1):61—69 (LIU Dabiao, HE Yuming, HU Peng, et al. On the mechanical properties in micro-tensile testing of single fiber[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(1):61—69 (in Chinese))
- [12] 雷振坤, 亢一澜, 王怀文, 等. 单纤维细丝微观力学性能实验研究[J]. *实验力学*, 2005, 20(1):72—76 (LEI Zhenkun, KANG Yilan, WANG Huaiwen, et al. Micromechanical tensile characterization of single fiber[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20(1):72—76 (in Chinese))
- [13] 王怀文, 亢一澜, 富东慧, 等. 数字标记点识别方法及其在材料性能测试中的应用[J]. *实验力学*, 2002, 17(4):433—437 (WANG Huaiwen, KANG Yilan, FU Donghui, et al. Recognition method of digital marker and its application in testing of material properties[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(4):433—437 (in Chinese))
- [14] Lim J, Zheng J Q, Masters K, et al. Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38:219—227.
- [15] Ou Y, Zhu D, Huang M, et al. The effects of gage length and strain rate on tensile behavior of Kevlar 29 single filament and yarn[J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(1):109—123.
- [16] 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. Probabilistic failure and finite element simulation of Kevlar 49 single filament and single yarn[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(1):213—223 (in Chinese))
- [17] 朱德举, 欧云福, 张晓彤, 等. Kevlar 29 纤维多尺度力学行为的实验研究和有限元模拟[J]. *工程力学*, 2016, 33(9):242—256 (ZHU Deju, OU Yunfu, ZHANG Xiaotong, et al. Experimental study and finite element modeling of the multi-scale mechanical behavior of Kevlar 29 fibers[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(9):242—256 (in Chinese))
- [18] 朱德举, 欧云福. 标距和应变率对 Kevlar 49 单束拉伸力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(2):225—232 (ZHU Deju, OU Yunfu. Effects of gauge length and strain rate on tensile mechanical properties of Kevlar 49 single yarn[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(2):225—232 (in Chinese))
- [19] Zhu D, Mobasher B, Erni J, et al. Strain rate and gage length effects on tensile behavior of Kevlar 49 single yarn

- [J]. Composites Part A, 2012, 43(1):2021–2029.
- [20] Ou Y, Zhu D, Li H. Strain rate and temperature effects on the dynamic tensile behaviors of basalt fiberbundles and reinforced polymer composite[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(10):040161-101.
- [21] 汪洋, 夏源明. 不同应变率下 Kevlar 49 纤维束拉伸力学性能的实验研究[J]. 复合材料学报, 1999, 16(1):45–51 (WANG Yang, XIA Yuanming. Experimental study on the tensile mechanical behavior of Kevlar 49 fibre bundles under different strain-rates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(1):45–51 (in Chinese))

On the effect of inter fiber friction on mechanical properties of Kevlar 49 fiber bundle under condition of different gauge lengths and strain rates

ZHU De-ju, HUANG Meng-ying

(Department of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the friction effect on mechanical properties of Kevlar 49 fiber bundle under condition of different gauge lengths and different strain rates, firstly, tensile experiment for measurement of mechanical properties of Kevlar 49 fiber bundle with different gauge lengths (12.5 mm, 25.0mm and 40.0mm) was carried out respectively, based on MTI micro tensile testing machine. Then, static tensile experiment for measurement of mechanical properties of Kevlar 49 fiber bundle with different gauge lengths (25.0mm, 50.0mm, 100.0mm, 200.0mm) was carried out respectively, based on MTS microcomputer control electron universal testing machine under condition of treated (lubricated with oil) and untreated specimens respectively. By using Instron drop-weight impact system, dynamic tensile experiment was carried out for treated and untreated Kevlar 49 respectively, under condition of strain rates are 40s^{-1} , 80s^{-1} , 120s^{-1} , 160s^{-1} respectively and with same gauge length of 25.0mm. Finally, Weibull distribution model statistical analysis was conducted to quantify the dispersion of fiber strength. Results show that in a certain range, with the increase of gauge length, the tensile strength, toughness and ultimate strain of Kevlar 49 fiber bundle decreases, while the elastic modulus increases. Tensile strength, toughness, ultimate strain and modulus of elasticity of treated and untreated Kevlar 49 fiber bundle are similar. This indicates that friction between filaments has a little effect on the quasi-static mechanical parameters of fiber bundle. Comparing with untreated yarn, with the increase of strain rate, the tensile strength of treated fiber bundle decreases gradually, and decreasing amplitude shows increasing trend. These results indicate that friction between filaments has significant effect on mechanical behavior at high strain rate.

Keywords: para-aromatic polyamide fiber Kevlar 49; filament; fiber bundle; gauge length; strain rate; friction