

Kevlar/丙纶织物交织阻力及其 STF 复合材料的防弹性能

祝成炎, 翁浦莹, 孙西超, 李艳清, 康凌峰

(浙江理工大学先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 采用 Kevlar 纤维作为原料, 改变并织丙纶参数, 试制 14 种平纹织物, 以剪切增稠液体 (STF) 修饰织物, 按照一定的复合工艺制备 STF-Kevlar 织物复合材料; 采用万能材料试验机对织物进行交织阻力测试, 借助气控高速发射装置测试复合材料的防弹性能, 探讨不同的丙纶参数对复合材料性能的影响。结果表明: 随着 Kevlar 织物中丙纶线密度的增加, 加强纱线间的结合, 织物交织阻力增大, 复合材料的防弹性能变优; 织物交织阻力与并织丙纶根数呈线性关系, 纱线结合度高的区域扩大, 复合材料防弹性能加强; 织物中丙纶分布较密, 复合材料在单位面积上吸收的能量较多。

关键词: Kevlar 纤维; 丙纶; 复合材料; 交织阻力; 防弹性能; STF

中图分类号: TS941.48 **文献标志码:** A

0 引言

防弹服在保护人体减少伤害的同时也追求舒适性, 目前复合材料的众多研究就在于使其具备相同防弹性能的同时达到轻质柔软的效果。用高性能纤维作为原料制成的柔性复合材料^[1-2]质轻、柔韧性好、防弹效果佳, 因而发展前景广阔。将剪切增稠液体 (STF)^[3-5]应用于防弹领域, 能有效提高织物的防弹性能。本课题组的前期研究, 初步形成 STF 液体制备工艺, 并验证了 STF 对 Kevlar 织物的增强效果^[6-7]。复合材料在高速物体子弹冲击作用下, 主要的吸能方式是纱线变形、断裂及被拔脱损耗的能量, 故作为增强体的织物结构对材料防弹性能具有较大的影响。而织物的交织阻力^[8-11]表示织物在组织点处经纬纱线之间的摩擦力, 即从一定尺寸织物中拉拔出单根纱线所受到的最大阻力, 测定织物的交织阻力, 可以评价织物的剪切变形, 在一定程度上可以衡量高性能纤维织物复合材料的防弹性能。

本文优选高性能纤维 Kevlar 为主要原料, 改变并织丙纶参数, 试制 14 个平纹织物。确定 STF 制备工艺、复合工艺, 制得 STF-Kevlar 织物复合材料作为试样。测试 Kevlar 织物的交织阻力及复合材料防弹性能, 分析丙纶线密度、丙纶根数及并织丙纶间距对 STF-Kevlar 织物复合材料防弹性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料

试验织物选用 Kevlar、丙纶作为原料, Kevlar 基本参数如表 1 所示。制备 STF 所用原料: SiO₂ (粒径为 20 nm), PEG 的相对分子质量为 200。

表 1 纤维原料基本参数

原料名称	细度 /tex	断裂强度 / (cN · tex ⁻¹)	断裂伸长率 / %	原料产地
Kevlar	122	116.40	3.86	杜邦公司

1.2 试验方法与设备

1.2.1 试样制备

a) 织造。设计织物规格为平纹, 上机经密与上

收稿日期: 2014-09-08

基金项目: 浙江省国际科技合作专项(合作研究)项目(2012C24013); 浙江省纺织科学与工程重中之重一级学科 2014 年学生科研创新计划项目(11110231271302); 浙江理工大学研究生创新研究项目(11110032481408)

作者简介: 祝成炎(1962-), 男, 浙江余姚人, 教授, 硕士, 主要从事 3D 织制技术与纺织复合材料等方面的研究。

机纬密均为 100 根/10 cm, 设定 5 号箱, 2 穿入, 改变并织丙纶参数, 根据表 2 所示。设计经纱排列: 每个循环由 10X 根 Kevlar 纱线与 N 根丙纶组成; 纬纱排列: 依次织入 10X 根 Kevlar 纱线与 N 根丙纶, 最终织物表面将形成网格状。其中, X 表示经纬向上间距, N 为丙纶根数。利用 ASL2000-20-E 型电脑小样机, 制备 14 个试样织物。

表 2 并织丙纶参数

试样编号	丙纶线密度/tex	丙纶根数 N/根	经纬向上间距 X/cm
A	0.0	0	0
B1	33.3	4	8
B2	66.7	4	8
B3	100.0	4	8
B4	133.3	4	8
C1	33.3	4	4
C2	33.3	4	8
C3	33.3	4	16
D1	100.0	1	8
D2	100.0	2	8
D3	100.0	3	8
D4	100.0	4	8
D5	100.0	5	8
D6	100.0	6	8

b) 热压。采用 XLB25-D 型平板硫化机, 设定温度 180℃、压力 1.25 MPa、工作时间为 30 min, 使得丙纶融化。

c) STF-Kevlar 织物复合材料制备。第一步: 采用 JJ-1 增力电动搅拌器, 以 PEG-200 为分散介质, SiO₂ 作为分散相粒子制备具有显著增稠现象的 STF 分散体系, 其中 SiO₂ 固含量为 30%。第二步: 将 STF 与无水乙醇以 1:1.5 的质量比进行稀释, 并用 KQ-250DE 型超声波震荡仪处理 30 min, 其温度设为 25℃, 使 STF 与无水乙醇均匀混合。第三步: 将 Kevlar 织物浸入稀释液中 5 min, 而后取出放置在 75℃ LC-213 型鼓风干燥箱中 13 min 去除无水乙醇, 制得单层 STF-Kevlar 织物复合材料。通过对 STF 浸润前后质量称重, 单层复合材料克重增加率平均为 28.09%。第四步: 将五层同种规格的 STF-Kevlar 织物复合材料以 45°层间夹角形式铺层, 且层与层之间用 TPU 薄膜连接, 其中 TPU 尺寸为 17 cm×0.5 cm, 制得弹道侵彻试验所需试样, 规格为 17.5 cm×17.5 cm。经测量其试样质量为 35.20~35.24 g, 波动幅度较小。

1.2.2 交织阻力测试

采用 Instron 3367 万能材料实验机, 参照标准

FZ/T 01054.3—1999 测试织物的交织阻力。设定实验牵引速度为 50 mm/min, 上下夹持器距离为 30 mm。

1.2.3 防弹性能测试

采用浙江理工大学定制的气控高速发射装置进行弹道侵彻试验, 测试 STF-Kevlar 织物复合材料的防弹性能, 初速度控制在 200 m/s 左右。结果得到子弹穿过试样的入射速度 v_1 与剩余速度 v_2 , 根据以下公式计算得到单位面积吸收能量 I_m 。 I_m 值越高, 表示复合材料防弹效果越佳。

$$E = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (1)$$

$$I_m = \frac{E}{\rho} \quad (2)$$

其中: E 为吸收能量(J); m 为子弹的质量(kg); v_1 为子弹的入射速度(m/s); v_2 为子弹的剩余速度(m/s); I_m 为单位面积吸收能量(J·m²/kg); ρ 为复合材料的面密度(kg/m²)。

2 结果与分析

2.1 丙纶参数对织物交织阻力的影响

2.1.1 丙纶线密度对织物交织阻力的影响

Kevlar 织物中丙纶线密度与其交织阻力关系的实验结果如图 1 所示, 二项式回归方程为:

$$Y = 0.61353 + 0.29291x - 0.000877209x^2, \\ R^2 = 0.98277.$$

由图 1 可见, 保持织物中并织丙纶根数与经纬向上丙纶间距不变, 随着丙纶线密度增大, 织物交织阻力随之增加, 但当线密度达到一定程度后, 增加幅度减小。纯 Kevlar 织物交织阻力为 1.19 MPa, 在经纬向间距 8 cm 处并织 4 根 33.3 tex 丙纶的织物交织阻力增加到 7.69 MPa。这是因为丙纶在高温下融化, 在织物中起到粘合剂的作用, 加强了纱线间的结合, 有效阻止纱线之间的移动, 使得织物交织阻

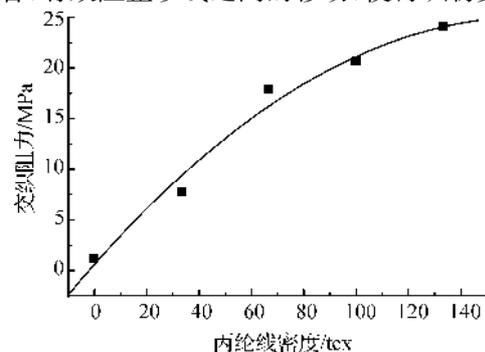


图 1 织物交织阻力与丙纶线密度的关系

力显著提高。可见,织物织造中并织丙纶,有助于加强纱线之间的结合度,且随着丙纶线密度增大,结合越紧密,纱线移动阻力越大。

2.1.2 丙纶根数对织物交织阻力的影响

织物中丙纶线密度及经纬向上间距固定不变,改变丙纶根数,得到织物交织阻力与并织丙纶根数的关系,如图2所示,其中线性回归方程为:

$$Y=0.301\ 07+5.345\ 36x,R=0.995\ 65.$$

图2显示,织物并织丙纶根数与织物交织阻力呈线性关系,随着丙纶根数的增加,织物交织阻力增强。一定间距内,丙纶根数增多,纱线粘结宽度增大,故结合度越高,将一根纱线从织物中拉拔出来的阻力越大。因而融化后的丙纶,有助于提高纱线间的结合度,对于增强织物交织阻力具有显著效果。

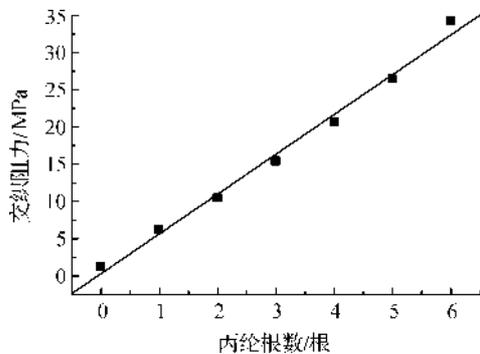


图2 织物交织阻力与丙纶根数的关系

2.2 丙纶参数对复合材料防弹性能的影响

本文选用五层 STF-Kevlar 织物复合材料作为试样,试样均被射来的子弹穿透。由于 STF 复合前后,复合材料质量增重率范围为 27.6%~28.13%,表明 STF 液体有效渗入到织物中,纳米 SiO₂ 附着在 Kevlar 纤维表面,可增强纤维间的摩擦。鉴于各试样在浸入 STF 后增重差异较小,因而本文主要分析丙纶参数对复合材料防弹性能的影响因素。

2.2.1 丙纶线密度对复合材料防弹性能的影响

复合材料单位面积吸收能量与丙纶线密度呈线性关系,如图3所示,其线性回归方程为:

$$Y=81.799\ 99+0.048\ 3x,R=0.995\ 9.$$

图3中可见,丙纶线密度越大,试样单位面积内吸收能量随之增大,即防弹性能越强。在受到弹头冲击作用下,织物中的纤维发生了位移、变形及断裂,这是复合材料吸收能量的主要方式。丙纶线密度增大,织物交织阻力增加,因而试样中纱线间的结合力加强,使得纤维破坏所需要的能量更多,因而提高了试样的防弹性能。

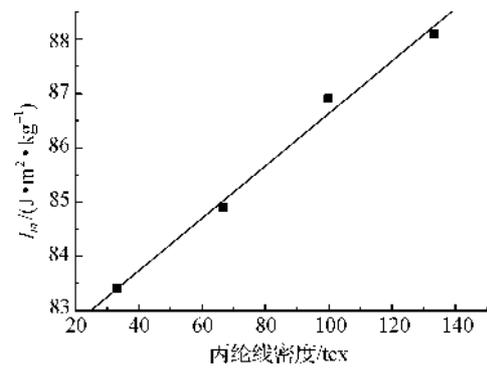


图3 复合材料单位面积吸收能量与丙纶线密度的关系

2.2.2 丙纶根数对复合材料防弹性能的影响

试样防弹性能与其并织丙纶根数的关系如图4所示。图4可见,丙纶根数从2根增加到4根,单位面积内吸收能量提高11%;与丙纶根数为4根时相比,当丙纶根数增加到6根时单位面积吸收能量上升4.2%。织物并织丙纶根数增加,试样交织阻力提升,受冲击破坏中吸收的能量加大,防弹性能随着丙纶根数的增多而提高,但上升幅度逐渐减小,丙纶根数增加到一定数量后,防弹性能提升效果变弱。

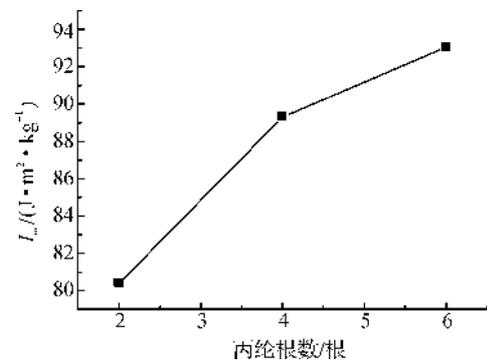


图4 复合材料单位面积吸收能量与丙纶根数的关系

2.2.3 丙纶间距对复合材料防弹性能的影响

试样中保持丙纶线密度与丙纶根数一定,改变并织丙纶间距,测得单位面积吸收能量的平均值的变化如图5所示。图5显示,丙纶经纬向上间距从

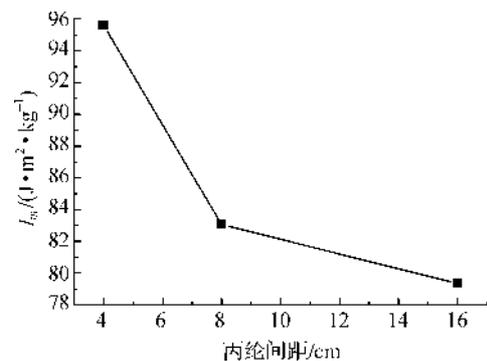


图5 复合材料单位面积吸收能量与丙纶间距的关系

4 cm 扩大到 16 cm,试样单位面积吸收能量的平均值从 $95.60 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 下降到 $79.35 \text{ J} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。可见,并织丙纶间距越小,即丙纶分布越密,试样单位面积内吸收能量越多,防弹性能越强。这是由于融化后的丙纶使得纱线间结合更紧密,丙纶分布较密,扩大了结合度较高的纤维的面积,有效提高了纤维被拔出和变形的阻力,加强复合材料防弹性能。

3 结 论

a) STF-Kevlar 织物复合材料的制备中加入丙纶,能有效提高织物的交织阻力,交织阻力随着丙纶线密度的增大而提高,丙纶融化使得纤维间结合牢固,加大了纱线间的摩擦力,从而提高复合材料承受冲击力的能力。

b) 织物交织阻力与并织丙纶根数的变化呈线性关系,丙纶根数越多,结合度高的区域越大,致使交织阻力增大,纱线变形、断裂需要吸收的能量增加,一定程度上削减了子弹前进的速度,即复合材料防弹性能增强。

c) 制备试样中并织丙纶的间距缩小,即丙纶分布密度增大,纤维间结合度较高的面积扩大,使拉拔出纱线的阻力增大,纤维吸能作用提高,提高了复合材料的防弹性能。

参考文献:

[1] 王 波. 高性能纤维防弹材料的基本种类、结构及其防弹性能[J]. 轻纺工业与技术, 2010, 39(4): 22-24.

- [2] 顾肇文. 柔性复合防刺服机理研究[J]. 纺织学报, 2006, 27(8): 80-84.
- [3] Wetzel E D, Wagner N J. Advanced body armor utilizing shear thickening fluids [C]// 23rd Army Science Conference. Orlando, FL: The Assistant Secretary of the Army for Acquisition, Logistics and Technology, 2002.
- [4] Decker M J, Halbach C J, Nam C H, et al. Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(3/4): 565-578.
- [5] 徐素鹏, 郑 伟, 张玉芳. 剪切增稠液体增强织物防刺性能的机理研究[J]. 天津工业大学学报, 2012, 31(3): 15-19.
- [6] 孙西超, 李艳清, 詹小芳, 等. 剪切黏稠液体的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2014, 35(08): 5-9.
- [7] 孙西超, 李艳清, 伍 仲, 等. STF-柔性复合材料的防弹性能研究[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(2): 127-131.
- [8] 陈惠兰, 姚 穆. 织物交织阻力与撕裂性能的分析 and 测试[J]. 纺织学报, 1992, 13(9): 13-14.
- [9] 张玉扬. 梭织物撕裂分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2005: 28-39.
- [10] Kirkwood K M, Kirkwood J E, Lee Y S. Yarn pull-out as a mechanism for dissipation of ballistic impact energy in Kevlar[®] KM-2 fabric: part I[J]. Textile Research Journal, 2004, 74(10): 920-928.
- [11] 李金茗. 织物撕裂和撕裂性能测试相关性研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2012: 6-9.

Interweaving Resistance of Kevlar/PP Fiber Fabrics and Bulletproof Performance of STF-Kevlar Composites

ZHU Cheng-yan, WENG Pu-ying, SUN Xi-chao, LI Yan-qing, KANG Ling-feng

(Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper used Kevlar as raw materials and prepared 14 plain weave fabrics through changing PP fiber parameters. STF-Kevlar composites were prepared according to certain compound technology. Besides, universal material testing machine was used to carry out interweaving resistance test for the fabrics. Bulletproof property of composites was tested with the help of the pneumatic high-speed launcher. Effects of different PP fiber parameters on composite property were discussed. The results show that as the linear density of Kevlar fabrics rises and the combination between yarns is enhanced, interweaving resistance of fabrics increases and bulletproof properties of composites become optimal; interweaving resistance of fabrics presents a linear relation with the number of PP fibers; the zone with high yarn combination degree expands; bulletproof property of composites reinforces; PP fiber is distributed densely, and more energy is absorbed by the composites on unit area.

Key words: Kevlar fiber; PP fiber; composites; interweaving resistance; bulletproof performance; STF

(责任编辑: 张祖尧)