

针织轴向织物理论在防弹复合材料领域的应用

狄维鑫^{1,2}, 姜亚明^{1,2}, 董赵勇^{1,2}

(1.天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387;

2.天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

摘要:文中对多轴向经编织物面内拉伸力学公式做出推导与完善,并受针织轴向织物理论与针织轴向经编织物结构启发,设计并制备一种8向UD结构防弹复合材料,纤维轴旋转角包括0°、22.5°、45.0°、67.5°、90.0°、112.5°、135.0°、157.5°共8个方向,采用超高分子量聚乙烯纤维制备。理论计算显示该结构可提高其模量,设计并开展防弹性能测试,对多向UD结构防弹板与传统UD结构防弹板凹陷深度进行测试分析,结果显示:多向UD结构使背凹深度下降约21%,且背凹面积更大、形状接近圆形,证实了理论计算结果。经过分析是由于多向结构使弹道侵入过程中响应纤维数量增加,且冲击波传播方向更多、距离更远,最终实现减少背凹深度效果。

关键词:针织轴向织物;UD结构;面内拉伸;防弹复合材料;形变;背凹深度

中图分类号:TS 186.1

文献标志码:A

文章编号:1000-4033(2025)03-0005-06

Application of Knitted Axial Fabric Theory to Ballistic Composites

Di Weixin^{1,2}, Jiang Yaming^{1,2}, Dong Zhaoyong^{1,2}

(1.School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2.Key Laboratory of Advanced Textile Composite of Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract:In this paper, the in-plane tensile mechanics formulae of multi-axial warp-knitted fabrics are deduced and perfected, and inspired by the theory of knitted axial fabrics and the structure of knitted axial warp-knitted (MWK) fabrics, an 8-directional UD structural ballistic composite material is designed and prepared with eight directions, including the fiber axis rotation angles of 0°, 22.5°, 45.0°, 67.5°, 90.0°, 112.5°, 135.0°, 157.5° in eight directions, and is prepared by using ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers. Theoretical calculations show that the structure can improve its modulus, design and carry out ballistic performance testing, test the multidirectional UD structure bulletproof plate and the traditional UD structure bulletproof plate depth of the depression. The results show that the multidirectional UD structure decreases the depth of backdent by about 21%, and the area of backdent is larger and the shape is close to round, which confirms the theoretical calculation results. The analysis is due to the fact that the multidirectional structure increases the number of response fibers in the process of ballistic penetration, and the shock wave propagates in more directions and farther distances, which ultimately achieves the effect of reducing the depth of backdent.

Key words:Knitted Axial Fabrics; Unidirectional Structure; In-face Stretch; Ballistic Composites; Deformation; Depth of Back Concavity

随着现代先进纺织复合材料技术的发展和航空航天等高科技领域要求的不断提高,三维壳体复

合材料制件得到了快速发展。针织轴向织物(包括经编轴向织物和纬编轴向织物)作为三维曲面复合材

料的先进增强体,由于具有生产成本低、生产速度快、结构整体、设计灵活、厚度方向强力有改善、成形

获奖情况:“第九届(2023年)全国针织创新技术研讨会”优秀论文。

作者简介:狄维鑫(1998—),男,硕士研究生。主要从事防弹复合材料的研究。

通讯作者:姜亚明(1971—),男,教授。E-mail:jiangyaming@tiangong.edu.cn。

性较好以及对树脂渗透性好等优点而被广泛用于汽车材料、航空航天、造船、民用建筑及土木工程等领域^[1]。美国及德国在经编轴向织物的开发及应用上已取得很大成功,而美国曾多次把针织轴向织物增强复合材料研究引入 National Aeronautics and Space Administration(美国国家航空航天局,简称 NASA)重点项目中^[2-4]。

Multi-axial Warp-knitted(经编轴向,简称 MWK)织物出现于 20 世纪 80 年代初,主要应用于土工布、张拉建筑材料、灯箱布、包装袋及工业用布等。进入 20 世纪 90 年代,这种织物进入结构复合材料领域,应用于飞机构件、造船及汽车生产。美国及德国在 MWK 织物开发及应用上获得很大成功。德国 Liba 公司和 Karl Mayer 公司在生产 MWK 织物机械设备方面表现尤为突出,开发出一系列的专用设备^[5-11]。MWK 织物同梭织物相比,其机械性能优异,在产业用纺织品市场极具潜力,因此从它一出现便引起人们广泛关注和极大兴趣。

由于 MWK 织物中没有交织结构,多组衬纱相互平行且处于无屈曲波高顺直状态,高性能纤维性能得以充分发挥,因此其具有织物尺寸稳定性好、面内力学性能高、对应力的响应速度快等优点,克服了梭织物中纱线屈曲、强力利用率低、纤维损伤大的问题^[12-13]。图 1 为 MWK 织物典型结构,包含 4 个衬纱系统,为衬经纱(0°)、衬纬纱(90°)、两组斜向衬纱及一个绑缚系统,通过绑缚系统把 4 个衬纱系统捆绑在一起形成整体,斜向衬纱角 θ_0 可在 $30.0^\circ\sim 90.0^\circ$ 变化。

1 针织轴向织物发展及研究现状

1.1 MWK 织物力学性能研究

Ko 及其合作者对 MWK 织物

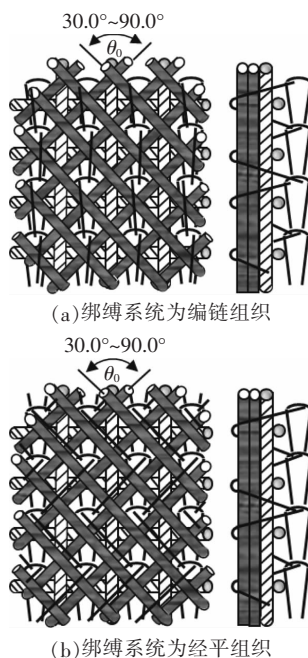


图 1 带有 4 个衬纱系统的 MWK 织物

生产工艺、机器设备、几何结构、力学性能及复合材料性能进行大量研究^[14-19]。其中,对力学性能研究基本是定性的,在 MWK 织物拉伸、弯曲及剪切方面并未给出力学模型。

Gao et al^[12]、Jiang et al^[10]对经编织物弯曲性能分析,通过 KES-FB2 试验对 MWK 织物进行弯曲试验,发现玻璃纤维经平地组织弯曲性能与其他织物不同,织物弯曲不仅有衬入纱线伸直,还有衬入纱线弯曲,这具有明显无规律和不对称性,这些非正交弯曲纱遵循不同半径螺旋线,提出不同方向弯曲性能预测模型及任意曲面弯曲刚度。

Jin et al^[20]利用芳纶纤维良好抗冲击性能,将芳纶纤维 MWK 织物增强复合材料与梭织物、单向板比较,表明芳纶纤维 MWK 织物表现出良好能量吸收特性。

Lyer^[21]研究 MWK 织物结构、生产工艺、力学优点及抗撕裂性能。Dexter et al^[4,22]研究通过 RTM 工艺加工得到的多轴向经编复合材料力学性能及应用前景。

姜亚明^[23]研究了 MWK 织物

拉伸、弯曲及剪切性能,利用半球冲压试验法研究 MWK 织物成形性能,首次推导出 MWK 织物单向拉伸模型和弯曲模型。研究发现 MWK 织物在机械力学性能及成形性能方面有许多不同于传统梭织物的特点。该研究成果将为 MWK 织物力学可设计性研究及成形加工中的织物设计和成形工艺参数的控制奠定基础。

Sun et al^[24]通过对玻璃纤维 MWK 织物增强复合材料分别在经向、纬向和斜向进行高速拉伸测试,认为在准静态拉伸下破坏形式为拉伸方向的树脂剪切破坏、纱线断裂,而在高速拉伸下破坏形式为纱线抽拔、界面脱黏。

Sun et al^[25]为了验证玻璃纤维多层 MWK 织物增强复合材料在厚度方向上的性能,对玻璃纤维多层 MWK 织物增强复合材料在厚度方向的准静态和高应变率载荷下抗压性能进行研究。结果表明,抗压刚度、最大压应力和压应力均对应变有很强敏感性,材料破坏形式为剪切破坏模式,对 Sun et al^[25]的研究进行有力补充,使对玻璃纤维多层 MWK 织物增强复合材料力学性能的分析更深入和全面。

1.2 MWK 织物成形性能研究

Molker et al^[13]对 MWK 织物成形性能进行研究,详细论述经编双斜向织物成形特点,发现双斜向衬纱试图向织物纬向并拢,并且两个方向衬纱夹角与测量到半球长轴之间的垂直距离基本呈线性关系,关系曲线斜率与半球半径大小也呈线性关系,并且半球半径大于 7 cm,此项研究有力推动了轴向衬纱织物曲面成形性能研究,为以后纬编轴向衬纱织物研究奠定基础。

姜亚明等^[26]通过大量经编轴向织物和纬编轴向织物球面铺覆

观察以及拉伸、弯曲等基础力学性能研究,分析纬编轴向衬纱织物在高性能头盔方面应用的优势。

1.3 MWK 织物数学模型研究

针织复合材料力学性能受多因素协同作用影响,主要包括基体材料特性、纤维体积分数、衬纱配置参数及线圈拓扑结构等。其中,线圈结构微观力学机制研究作为关键领域,普遍采用代表性体积单元(RVE)作为几何建模基础框架。在经编轴向织物建模领域,Zhao^[27-28]取得了突破性进展,其创新性体现在将捆绑纱抽象化为直线-螺旋复合弹性体,同时基于衬纬纱刚性假设(忽略弯曲变形),成功构建经-编链复合组织三维线圈模型。该模型在无摩擦理想条件下,通过力学平衡方程与几何约束条件实现制造工艺参数逆向推导,其理论预测值与试验测量值呈良好吻合度。

针对经编轴向(MWK)织物建模难题,Du et al^[14]提出离散化处理策略:将纱线简化为线性单元,通过横截面积、体积占比及取向角等构建简化模型。尽管该模型未考虑经编线圈拓扑影响,但其创新性引入织造边界约束条件,建立工艺参数与结构特征间量化关系,为MWK增强复合材料的多尺度力学分析奠定了基础。

Hu et al^[11]和 Gao et al^[12]在宏观建模领域取得重要突破:首先构建非均匀应变场下织物拉伸模型,有效解决了异质结构单元协同变形难题;继而通过单丝铺展行为、弯纱起拱效应及滞后曲线特征,建立可表征任意弯曲路径的力学模型。该模型创新性实现了全向弯曲模量的曲率相关性解析。

基于经编双轴向织物抗冲击特性,Jin et al^[29]开展弹道冲击破坏机制跨尺度研究。通过等效层合板

假设与有限元建模技术,构建包含损伤演化冲击响应预测模型。数值模拟与弹道冲击试验数据验证模型可靠性,揭示能量吸收微观机制。

陈南梁等^[30]综合运用微分几何、材料力学与数值计算方法,系统解析经编针织双轴向立体骨架织物线圈构效关系,其建立的线圈长度解析公式为工程化生产提供工艺优化依据,显著提升织物质量控制水平。

Gommers et al^[31]提出离散化建模方法,将线圈轨迹离散为多段线性单元,实现纱线节点坐标精确描述。这种参数化建模为复杂织物结构数字化重构提供有效工具。

2 针织轴向织物理论分析

在过去的 20 多年里,姜亚明课题组一直致力于针织轴向织物基础力学研究,期间产生的研究成果极大地推动了针织轴向织物发展。尤其对于多轴向经编织物应变的误差分析与修正,课题组做了大量工作,取得了卓越成果。

MWK 织物中单根衬纱受力变形图见图 2。为了便于寻找衬纱变形前后几何关系,将单根衬纱从 MWK 织物中分离出来。

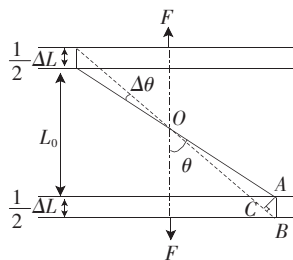


图 2 单根衬纱的单向拉伸变形模型

单根衬纱的实际应变值用 ε_i 表示,见式(1)。

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon \cdot \cos \theta_i}{\cos(\theta_i - \Delta\theta_i)} + \frac{\cos \theta_i}{\cos(\theta_i - \Delta\theta_i)} - 1 \quad (1)$$

式中: θ_i 为力的方向与衬纱轴线之间夹角, ($^\circ$); $\Delta\theta_i$ 为力的方向与衬

纱轴线之间夹角的转角, ($^\circ$); ε 为试样伸长率, %; ε_i 为单根纱线的实际伸长率(其中 $i=1,2,3,4,\dots$), %。

多轴向织物中单根衬纱在单向拉伸力 F 作用下的转角见式(2)。

$$\Delta\theta_i = \arctan \left(\frac{\varepsilon \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \theta_i}{1 + \varepsilon \cdot \cos^2 \theta_i} \right) \quad (2)$$

以下对 N 轴向经编织物进行受力与模量计算。

单向拉伸 N 轴向经编织物时,分配在单根衬纱上的力见图 3。通过织物密度(n)的外部荷载,可以计算出单根衬纱上合力,见式(3)。

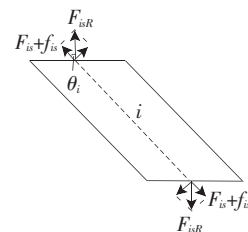


图 3 作用在单根衬纱上的力

$$F_{is} = F_{isR} \cos \theta_i - f_{is} \rightarrow F_{isR} = \frac{F_{is} + f_{is}}{\cos \theta_i} \quad (3)$$

式中: F_{is} 为沿单根衬纱轴向上合力, kg/cm; F_{isR} 为拉伸方向上作用在单根衬纱上拉伸力, kg/cm; f_{is} 为沿单根衬纱轴向上摩擦力, kg/cm。

当沿不同方向拉伸织物时,拉伸纱线的密度会随拉伸角度的不同而发生变化,见图 4,则垂直于衬纱轴线方向的衬纱密度(n)与垂直于拉伸方向的衬纱密度(n')的几何关系见式(4)。

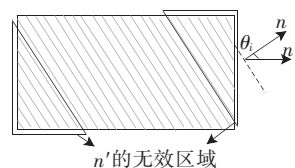


图 4 n 与 n' 的几何关系

$$n' = n \cdot \cos \theta_i \quad (4)$$

式中: $i=1,2,3$ 。

单根衬纱的荷载-应变关系见式(5)。

$$F_{is} = f_i(\varepsilon_i) = E_L \varepsilon_i \quad (5)$$

式中: $f_i()$ 为单根衬纱应力-应变函数, kg/cm; E_L 为单根衬纱拉伸模

量, kg/cm; $i=1, 2, 3$ 。

根据单根衬纱受力可计算出作用在织物上合力, 见式(6)。

$$F = \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^N n_i' F_{isR}(W_0 - L_0 \tan \theta_i) + F_L(\varepsilon) \quad (6)$$

式中: L_0 为试样拉伸前的长度, cm; W_0 为试样宽度, cm; F_L 为作用在单根衬纱单位长度上拉伸力, kg/cm。

将式(3)—式(5)代入式(6), 可得式(7)。

$$F = \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^N n_i [f_i(\varepsilon_i) + f_{is}(\varepsilon_i)] (W_0 - L_0 \tan \theta_i) + F_L(\varepsilon) \quad (7)$$

式中: n_i 和 ε_i 表示三轴向经编织物的结构参数; $f_i()$ 和 $F_L()$ 表示单根衬纱的力学性能和拉伸行为; $f_{is}()$ 表示单根衬纱系统间的相互作用; 除了 $f_{is}()$ 之外, 其他项都能通过简单测试获得; $i=1, 2, 3$ 。

当 W_0 远大于 L_0 时, 即 $W_0 \gg L_0$ 时, 式(7)进一步简化为式(8)。

$$F = \sum_{i=1}^N n_i [f_i(\varepsilon_i) + f_{is}(\varepsilon_i)] - \frac{n_i}{W_0} L_0 \tan \theta_i f_i(\varepsilon_i) + f_{is}(\varepsilon_i) + \frac{1}{W_0} F_L(\varepsilon) \quad (8)$$

$W_0 \gg L_0$ 时, $W_0 \rightarrow \infty$, 则公式可简化为式(9)。

$$F = \sum_{i=1}^N n_i [f_i(\varepsilon_i) + f_{is}(\varepsilon_i)] \quad (9)$$

此时 $f_{is}() \rightarrow F_L()$, 则得式(10)。

$$F = \sum_{i=1}^N n_i f_i(\varepsilon_i) = \sum_{i=1}^N n_i E_L \varepsilon_i \quad (10)$$

将上述单根纤维实际应变式(1)代入式(10), 得到式(11)。

由式(11)和式(12)可计算出 N 轴向经编织物在任意伸长率下单根衬纱的受力与模量。

3 针织轴向织物理论对防弹复合材料的启发

3.1 单向防弹复合材料研究现状

Unidirectional(单向, 简称UD)防弹复合材料是指以超高分子量

$$F = \sum_{i=1}^N n_i f_i(\varepsilon_i) = \sum_{i=1}^N n_i E_L \left[\frac{\varepsilon \cdot \cos \theta_i}{\cos(\theta_i - \Delta \theta_i)} + \frac{\cos \theta_i}{\cos(\theta_i - \Delta \theta_i)} - 1 \right] \quad (11)$$

$$F = E \varepsilon \rightarrow$$

$$E = \sum_{i=1}^N n_i E_L \left[\frac{\cos \theta_i}{\varepsilon \cdot \cos(\theta_i - \Delta \theta_i)} + \frac{\cos \theta_i}{\cos(\theta_i - \Delta \theta_i)} - \frac{1}{\varepsilon} \right] \quad (12)$$

聚乙烯(UHMWPE)纤维为代表的**高强、高模纤维**作为增强材料, 以单向正交(UD)结构为主要增强体结构, 以热塑性树脂体系为主要树脂基体, 通过铺展、复合和热压工艺制备的一种高性能纤维增强树脂基复合材料。其具有能有效抵挡弹丸或破片的弹道侵彻行为, 从而有效避免或降低装配者所承受的弹道侵彻伤害的功能特性。UD结构使每层长纤维都顺直、平行地排列在基体材料中, 在加工过程中纤维强度损失极小, 能充分发挥高性能纤维本身的独特优势, 所以成品抗弹性能优异。

3.2 针织轴向织物理论与防弹复合材料的融合应用

尽管目前UD防弹复合材料性能优异, 但仍存在许多问题。由于目前UD防弹材料中纤维轴旋转角度多为 0° 、 90.0° 、 0° 、 90.0° 交叉铺层, 仅有两个方向, 导致目前UD防弹材料力学性能各向异性且经弹道侵彻作用下响应的高性能纤维数量少, 防弹材料变形程度大, 弹着点背凹深度大, 抗弹性能仍有发展空间。

本文从针织轴向经编(MWK)织物结构中获得启发, 设计并制备一种多向UD防弹复合材料, 以期增加着弹时防弹板纤维响应根数与冲击波传播面积。根据针织轴向经编(MWK)织物理论分析, 当纤维轴向数达8向时, 其UD防弹材料已基本实现各向同性, 在此基础上增加纤维轴向对UD材料各向同性度提升已不显著, 故采取8向铺覆; 根据 N 轴向经编织物衬纱受

力与模量公式(10)和公式(11), 代入相关参数, 得到的模量值相比传统UD结构复合材料防弹板大幅提升。以下通过制备样品并进行相关防弹性能测试验证计算结果。

4 试验

4.1 原材料

采用UHMWPE 0° 、 90.0° 2UD布(沈阳际华三五四七特种装具有限公司)。

4.2 试验方案

为探究8向铺覆防弹板相较于传统 0° 、 90.0° 防弹板的防弹性能, 使用UHMWPE 2UD布制备编号为1、2号的防弹板, 将纤维轴向数作为唯一变量, 进行凹陷深度检测。1号板纤维轴向设置为传统(纤维仅有 0° 、 90.0° 两个方向), 2号板纤维轴向设置为8向(纤维轴旋转角为 0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 、 90.0° 、 112.5° 、 135.0° 、 157.5° 共8个方向)。

4.3 样品制备

对于1号板, 直接在原材料UD布上使用切割机裁出64片矩形单片, 并将其按照表面纤维同向(0° 、 90.0°) 叠层放置于液压机中, 在特定压制工艺下, 制备成UHMWPE纤维复合材料防弹板。

对于2号板, 先将原材料UD布用切割机裁成数片正方形单片, 然后在单片上裁出数片8个旋转角的矩形单片, 最后将其按特定铺层顺序叠层放于液压机中, 在特定压制工艺下, 制备成8向UHMWPE纤维复合材料防弹板, 见图5。

4.4 防弹性能测试

参照标准GA141—2010《警用防弹衣》中2级防护要求, 测试1、2

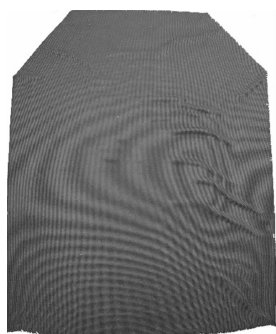


图 5 8 向 UHMWPE 纤维复合材料防弹板

号板的凹陷深度,采用 54 式 7.62 mm 手枪装配 51 式铅芯弹,弹速 (445 ± 10) m/s,对每块 UHMWPE 纤维复合材料防弹板进行 6 发弹道侵彻试验,并对样品贯穿情况和 Backface Signature(背部胶泥凹陷深度,简称 BFS)进行记录。

5 试验结果与分析

弹道侵彻试验结果见表 1,分析数据可知,射击 6 发中 8 向 UD 结构带来的背凹深度下降均值约为 21%,且射序越靠前,8 向 UD 结构提升越大,这可能是由于随着射击进行,防弹插板的内部结构会被逐渐破坏,使由 8 向 UD 结构带来的性能提升消失。对于射序 1—3,8 向 UD 结构带来的背凹深度下降约 31%,效果更加显著。

同时,8 向结构 UHMWPE 纤维复合材料防弹板的背凹面积相比传统 UD 结构 UHMWPE 纤维复合材料防弹板更大,且背凹形状接近圆形(传统靶板背凹形状为十字形),见图 6、图 7,这意味着有更多纤维参与了拉伸吸能,且着弹冲击波可以沿着 8 个方向传播,使传播范围更广且背凹形状更接近圆形,最终达成降低背凹深度的目标。

6 结论

6.1 以姜亚明课题组 20 多年对于针织轴向织物基础力学的大量研究作为基础,对多轴向经编织物面内拉伸力学公式做出推导与完

表 1 防弹插板凹陷深度检测结果

射序	1 号弹速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 号背凹深度/ mm	2 号弹速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2 号背凹深度/ mm	1 号弹速与 2 号 弹速差值/mm
1	444.0	11.09	448.0	6.18	4.91
2	446.0	18.59	446.0	12.73	5.86
3	445.0	18.78	440.0	14.56	4.22
4	439.0	15.92	443.0	18.65	-2.73
5	448.0	20.29	444.0	11.51	8.78
6	445.0	19.01	439.0	18.32	0.69
均值	444.5	17.28	443.3	13.66	3.62

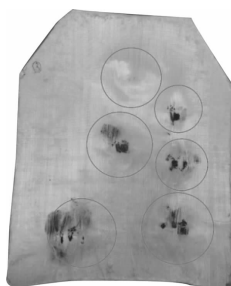


图 6 弹道侵彻后传统 UD 防弹板

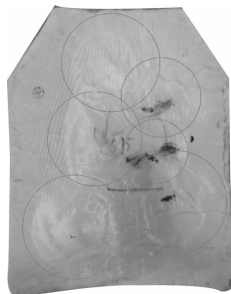


图 7 多向 UD 防弹板背凹形貌

善,并将该理论延伸至防弹复合材料,经理论计算得出的模量值相较于传统 UD 结构提升明显,后续弹道侵彻试验验证了计算结果。

6.2 基于针织轴向经编(MWK)织物理理论设计的多向 UD 结构能够提升超高分子量聚乙烯复合材料防弹板抗 7.62 mm×25.00 mm 铅芯弹的弹道侵彻性能,对于减少防弹板着弹背凹深度(BFS)效果显著,前 3 发子弹减少幅度约为 31%。这是由于多向 UD 结构增加了着弹后的响应纤维根数,使更多的高性能纤维参与了防弹吸能过程。

6.3 在多发弹道侵彻后,防弹板背凹变形形貌相较于传统 UD 结构复合材料防弹板有显著差别,要体

现在多向 UD 结构防弹板背凹形状接近于圆形而非传统 UD 结构防弹板的十字形,且面积更大、BFS 更低。这是由于弹道侵彻中由于子弹带来的冲击波在 8 向结构中可延 8 个方向均匀传播,使冲击波传播范围更广且形状更接近圆形。

参考文献

- [1]VIGO T L, ALBIN F, TURBAK. High-tech fibrous materials: composites, biomedical materials, protective clothing, and geotextiles[M].Washington DC: American Chemical Society,1991.
- [2]RAYMOND J, PALMER M B, SMITH J, et al. Development of stitching reinforcement for transport wing panels[C]// First NASA Advanced Composites Technology Conference. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration,1991:621-646.
- [3]DEXTER H B. An overview of the NASA textile composites program [C]// Fiber-tex 1992: The Sixth Conference on Advanced Engineering Fibers and Textile Structure for Composites. University: National Aeronautics and Space Administration,1992:1-31.
- [4]DEXTER H B, HASKO G H. Mechanical properties and damage tolerance of multiaxial warp-knit composites [J]. Composites Science and Technology, 1996,56(3):367-380.
- [5]WANG Y J, LI J, DO P B. Properties of composite laminates reinforced with E-glass multiaxial non-crimp fab-

- rics[J].Journal of Composite Materials, 1995,29(17):2317-2333.
- [6]VAN VUURE A W, KO F K, BEVERS C. Net-shape knitting for complex composite preforms[J].Textile Research Journal,2003,73(1):1-10.
- [7]DU G W, KO F K. Analysis of multiaxial warp-knit preforms for composite reinforcement[J].Composites Science and Technology, 1996,56(3):253-260.
- [8]KO F K, HU J L, JIANG Y M. Bending properties of multiaxial warp knitted fabrics[J].Textile Asia,1998,29(2):45-48.
- [9]HU J L, JIANG Y M. Modeling uniaxial tensile properties of multiaxial warp knitted fabrics[J].Textile Research Journal,1998,68(11):828-834.
- [10]JIANG Y M, HU J L. Characterizing and modeling bending properties of multiaxial warp knitted fabrics[J].Textile Research Journal,1999,69(9):691-697.
- [11]HU J L, JIANG Y M. Modeling formability of multiaxial warp knitted fabrics on a hemisphere[J].Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,2002,33(5):725-734.
- [12]GAO Z, MA P, JIANG G, **et al.** Experimental investigation on the quasi-static penetration behavior of curved multi-axial-knitted composites[J].Fibers and Polymers,2016,17(9):1497-1504.
- [13]MOLKER H, WILHELMSSON D, GUTKIN R, **et al.** Orthotropic criteria for transverse failure of non-crimp fabric-reinforced composites[J].Journal of Composite Materials,2016,50(18):2445-2458.
- [14]DU G W, KO F K. Analysis of multiaxial warp-knit preforms for composite reinforcement[J].Composites Science and Technology,1996,56(3):253-260.
- [15]CHO T W, KO F K. Textile structural composites [C]//Textile Structural Composites. Elsevier,1989:129-169.
- [16]KO F K, BRUNER J, PASTORE A, **et al.** Development of multi-bar weft-insert warp knit fabric for industrial applications [J].Journal of Manufacturing Science and Engineering,1980,102(4):333-341.
- [17]KO F K, FANG P, PASTORE C. Multilayer multidirectional warp knit fabrics for industrial applications[J].Journal of Industrial Fabrics,1985,4(1):12-25.
- [18]KO F K, KRAULAND K, SCARDINO F. Weft insertion warp knit for hybrid composites [J].Progress in Science and Engineering of Composites,1982(1):1169-1176.
- [19]KO F K, PASTORE C, YANG J M, **et al.** Structure and properties of multilayer multidirectional warp knit fabric reinforced composites[J].Composites Recent Advances in Japan and the United States,1986(2):21-28.
- [20]JIN T K, CHEOL K. Energy-absorption mechanisms in Kevlar multiaxial warp-knit fabric composites under impact loading[J].Composites Science and Technology,2000,60(5):773-784.
- [21]IYER C. Directionally-oriented inlay warp knits: some aspects of production and application[J].Indian Journal of Fibre & Textile Research,1994,19(3):195-202.
- [22]DEXTER H B, HASKO G H. Performance of resin transfer molded multiaxial warp knit composites [C]//Third NASA Advanced Composites Technology Conference. Long Beach, California; National Aeronautics and Space Administration,1993:231-261.
- [23]姜亚明.多轴向经编织物的力学性能及成形性研究[D].天津:天津工业大学,1999.
- [24]SUN B Z, HU H, RONG J, **et al.** Tensile impact behavior of multiaxial multilayer warp knitted (MMWK) fabric reinforced composites[J].Journal of Reinforced Plastics and Composites,2006,25(12):1305-1315.
- [25]SUN B Z, HU H, GU B H. Compressive behavior of multi-axial multilayer warp knitted (MMWK) fabric composite at various strain rates [J].Composite Structures,2007,78(1):84-90.
- [26]姜亚明,邱冠雄,刘梁森.纬编双轴向多层衬纱织物增强高性能头盔[J].针织工业,2005(12):4-8.
- [27]ZHAO N J. The geometry of weft-inserted warp-knitted. Part I: model of the structures [J].Journal of the Textile Institute,1991,82(3):361-371.
- [28]ZHAO N J. The geometry of weft-inserted warp-knitted. Part II: experimental validation of the theoretical models [J].Journal of the Textile Institute,1991,82(3):373-387.
- [29]JIN L M, HU H, SUN B Z, **et al.** A simplified microstructure model of biaxial warp-knitted composite for ballistic impact simulation[J].Composites Part B,2010,41(5):337-353.
- [30]陈南梁,敖伟.经编针织双轴向立体骨架织物的线圈几何模型研究[J].东华大学学报:自然科学版,2002,28(5):22-25,59.
- [31]GOMMERS B, VERPOEST I, VAN H P. Modeling the elastic properties of knitted-fabric-reinforced composites[J].Composites Science and Technology,1996,56(6):685-694.

收稿日期 2024 年 5 月 10 日

《针织工业》以服务行业为己任，
传播、发表行业实用技术信息。
欢迎大家订阅！