

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.015

基于宏-细观耦合损伤模型的平纹机织复合材料高速冲击损伤模拟

李林, 李树虎, 徐井利, 刘岩, 王荣惠, 卢卓, 孙魁远, 梁国伟

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要:本研究结合现有的三维Hashin-Hou失效准则与渐进损伤理论,采用已建立的宏-细观耦合的多尺度仿真方法并开发的Fortran用户材料子程序,构建了楔形破片与芳纶纤维/环氧树脂体系平纹机织复合材料相互作用的弹靶仿真模型,开展了350 m/s与365 m/s两种典型速度下的冲击仿真计算,系统分析了应力传播、损伤累积及失效模式。结果显示,在350 m/s冲击速度下弹体被完全阻滞,而在365 m/s时弹体以约50 m/s剩余速度贯穿靶板,据此预测弹道极限速度(V_{50})值为357.5 m/s。通过与实验测得的 V_{50} 值413.88 m/s对比,相对误差约为13.6%,表明该方法能较准确反映冲击过程中的应力传播、损伤累积及失效模式。研究表明,所建立的宏-细观耦合多尺度模型及开发的程序能够有效模拟平纹机织复合材料在高速冲击下的力学响应与损伤演化,为复合材料抗冲击性能评估与结构设计提供了可靠的数值分析工具。

关键词:宏观;多尺度模拟;复合材料;高速冲击;渐进损伤模型

中图分类号:O341 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)04-0135-08

High-speed impact damage simulation of plain woven composites based on a macro-meso coupling damage model

LI Lin, LI Shuhu, XU Jingli, LIU Yan, WANG Ronghui, LU Zhuo, SUN Kuiyuan, LIANG Guowei

(Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

Abstract: By integrating the existing three-dimensional Hashin-Hou failure criterion and progressive damage theory, adopting the established macro-mesoscale coupled multi-scale simulation method and developed Fortran user material subroutine, a projectile-target simulation model was developed for the interaction between wedge-shaped fragments and a plain woven composite made of aramid fiber/epoxy resin system in this study. Impact simulations were conducted at two typical velocities, 350 m/s and 365 m/s, to systematically investigate stress propagation, damage accumulation, and failure modes. The results show that the projectile is completely arrested at an impact velocity of 350 m/s, while it penetrate the target with a residual velocity of approximately 50 m/s at 365 m/s. Accordingly, the ballistic limit velocity(V_{50}) is predicted to be 357.5 m/s. Compared with the experimentally measured V_{50} value of 413.88 m/s, the relative error is about 13.6%, indicating that the method can accurately reflect stress propagation, damage accumulation, and failure modes during impact. The research demonstrates that the established macro-mesoscale coupled multi-scale model and the developed program can effectively simulate the mechanical response and damage evolution of plain-woven composites under high-velocity impact, providing a reliable numerical analysis tool for assessing impact resistance and structural design of composites.

Keywords: macro-meso ; multi-scale simulation ; composite ; high-velocity impact ; progressive damage model

纤维增强复合材料以其优异的比强度、比刚度以及良好的可设计性,在航空航天等领域的关键结构中广泛应用,是实现装备轻量化与性能提升的重要材料^[1-2]。其中,平纹机织复合材料凭借其良好的面内稳定性与抗分层能力,在承受复杂载荷的结构

部件中展现出显著优势^[3]。然而,在飞行器服役过程中,此类材料常面临鸟撞、冰雹或碎片等高速冲击威胁。冲击载荷易引发纤维断裂、基体开裂及层间分层等多类损伤,此类损伤多起源于细观尺度,经逐步累积与演化后,最终导致宏观结构失效^[4],严

通信作者: 李树虎,研究员,硕士生导师,研究方向为非金属材料数字化设计、仿真计算、数据库和软件开发

收稿日期: 2026-02-16

引用格式: 李林,李树虎,徐井利,等.基于宏-细观耦合损伤模型的平纹机织复合材料高速冲击损伤模拟[J].工程塑料应用,2026,54(4):135-142.

LI Lin, LI Shuhu, XU Jingli, et al. High-speed impact damage simulation of plain woven composites based on a macro-meso coupling damage model[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 135-142.

重威胁结构安全。因此,开发能够准确预测平纹机织复合材料在高速冲击下损伤起始与演化规律的分析模型,对于提升其抗冲击设计与可靠性评估具有重要意义。

平纹机织复合材料由经纱与纬纱交织而成,其细观结构呈现明显的周期性与非均匀性^[5]。图1为平纹机织复合材料典型细观结构图,纱线的波浪状起伏导致材料局部刚度和强度弱化,并呈现各向异性与空间分布特征^[6],使得宏观力学响应强烈依赖于细观尺度上纤维、基体及界面的相互作用。传统的宏观均质化方法难以准确描述这种由细观结构主导的损伤萌生与扩展行为^[7],因此,建立能够有效关联材料细观特征与宏观响应的多尺度模型,对实现冲击动力学行为的准确模拟至关重要。

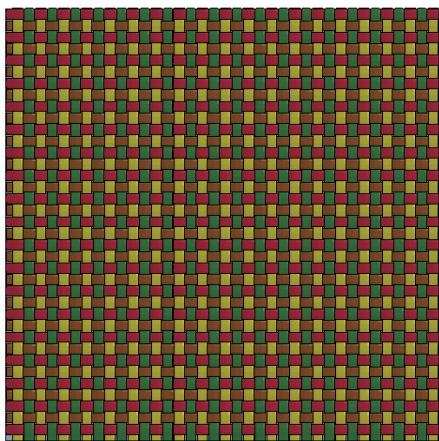


图1 平纹机织复合材料细观结构

Fig. 1 Mesostructure of plain-weave composites

近年来,多尺度建模方法在织物复合材料力学行为研究中取得了重要进展。Hu等^[8]通过建立细观损伤模型、Chen等^[9]发展基于分数阶微积分的本构描述、Xu等^[10]引入考虑纱线弯曲的渐进损伤准则、以及Liu等^[11]开发基于代表性体积单元的直接数值预测方法等方式,显著提升了对复合材料静态及准静态力学行为的模拟能力。Zhang等^[12]进一步通过理论-数值协同的策略,实现了细-宏观损伤信息的高效交互,提升了计算效率。然而,在高速冲击这类高动态、强非线性问题中,多尺度模型的耦合策略与计算效率仍面临突出挑战^[13]。一方面,损伤演化具有跨尺度的双向反馈特征,即细观损伤影响宏观刚度,而宏观应力波重分布又反作用于细观损伤路径,这对模型的双向耦合能力提出了更高要求^[14]。另一方面,尽管已有研究通过宏观唯象模型

或组分率效应叠加来刻画材料的动态行为^[15],如何在考虑应变率效应的同时兼顾计算效率与模拟精度,仍是亟待解决的问题^[16]。

为此,本研究发展了一种适用于平纹机织复合材料冲击问题的高效宏-细观耦合仿真方法。区别于传统的宏观均质化模型或计算成本高昂的全细观模型,本文的创新点在于:(1)发展了基于代表性体积单元(RVE)-等效单元(Ee)和串并联模型的宏-细观双向耦合框架,实现了冲击载荷下细观损伤起始与宏观刚度退化的实时交互;(2)基于LS-DYNA平台开发了集三维Hashin-Hou准则、基于断裂能的渐进损伤模型、应变率效应及黏性正则化于一体的自定义材料子程序(UMAT)子程序,有效解决了高动态计算中的精度与稳定性问题;(3)以芳纶纤维/环氧树脂体系为对象,通过仿真与实验的定量对比(弹道极限速度 V_{50} 误差为13.6%),系统验证了该方法在预测弹道极限、损伤形貌及能量吸收方面的工程适用性。该研究为复合材料冲击性能评估提供了可靠的数值分析工具。

1 宏-细观耦合损伤模型与抗弹仿真框架

为准确预测平纹机织复合材料在高速冲击下的抗弹性能与失效机理,本文建立了一种宏-细观协同的仿真框架。该框架的核心在于构建一条从细观损伤萌生至宏观结构失效的明确预测路径,并通过UMAT将其高效集成于显式动力分析平台中,最终实现对抗弹过程(包括弹道极限、能量吸收与损伤模式)的定量化评估。图2展示了该框架的完整实施流程^[17]。

平纹机织复合材料的抗弹性能根植于其细观尺度上纤维与基体的相互作用。为平衡计算效率与模拟精度,本框架采用基于RVE的等效建模方法。首先,从周期性编织结构中提取包含完整经、纬纱交织信息的最小重复单元作为RVE。进一步,将复杂的曲面纱线结构离散并等效为一系列规则排列等效单元(Ee)。每个Ee被表征为横观各向同性(纱线区域)或各向同性(纯基体区域)的材料单元,并通过三角函数精确描述纱线起伏,以计算局部纤维体积分数。这种几何等效方法,将复杂的二维机织结构转化为由属性已知的长方体单元构成的层合结构,为后续高效的多尺度力学计算奠定了基础。各Ee的刚度与强度是预测其抗弹行为的基础。本研究采用简洁实用的Chamis细观力学模型,

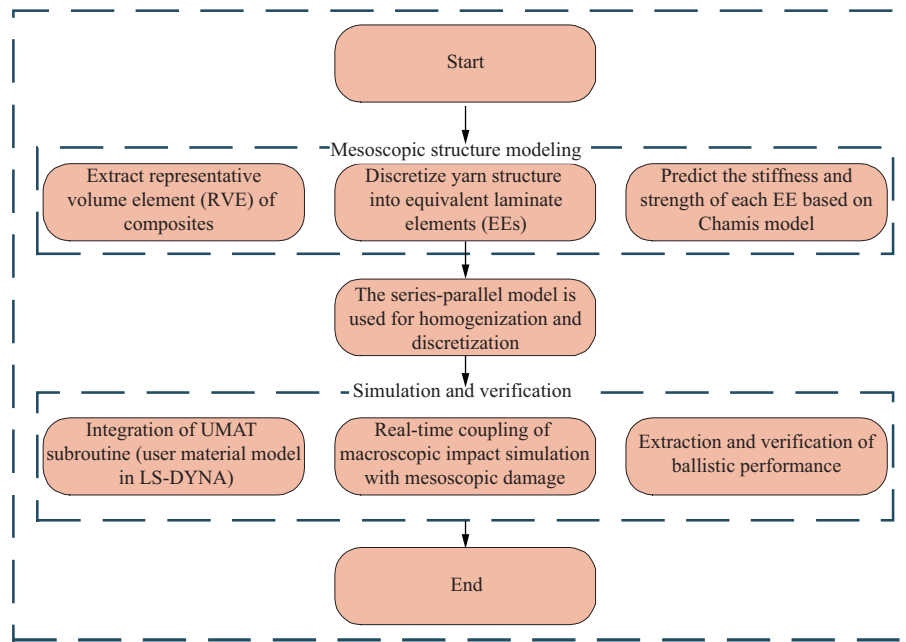


图2 宏-细观耦合抗弹性能仿真框架流程图

Fig. 2 Flowchart of macro-micro coupling ballistic resistance simulation framework

依据各EE的局部纤维体积分数,预测其工程弹性常数与多方向强度。

为捕捉高速冲击下复合材料典型的多模式损伤,在EE尺度引入了三维Hashin-Hou失效准则。该准则能有效区分并判断四种关键损伤模式的起始:纤维拉伸(FT)、纤维压缩(FC)、基体拉伸(MT)和基体压缩(MC)。对于纯基体区域,则采用最大主应力准则进行判断[纯基体拉伸(PMT)损伤和纯基体压缩(PMC)损伤]。一旦损伤起始,即采用基于断裂能的渐进损伤模型来描述损伤演化。该模型通过能量控制的方式,将材料断裂能与损伤变量的演化规律相关联,从而实现对刚度折减过程的合理化描述,避免了网格敏感性等问题,这对准确模拟冲击过程中的能量吸收与失效过程至关重要。

为实现上述宏-细观模型在高速冲击仿真中的应用,本研究基于LS-DYNA显式求解器,开发了用户UMAT。该子程序是连接多尺度理论模型与有限元求解器的核心计算引擎,其工作流程紧密围绕抗弹性能预测的需求设计。

(1)宏观应变接收与应力更新。在每一个时间步,UMAT接收来自宏观有限元积分点的应变增量。通过串并联模型双向应力-应变传递机制,快速计算出当前宏观应力。

(2)细观应力离散与损伤实时判断。利用串并联模型的逆过程,将宏观应变分解至每一个细观

EE,计算其局部应力状态,并实时调用Hashin-Hou准则判断损伤是否起始。

(3)损伤演化与材料性能退化。若发生损伤,则依据基于断裂能的模型更新损伤变量,并对受损EE的刚度矩阵进行折减,即时反馈到宏观刚度中。

(4)抗弹相关关键功能集成。

①应变率效应。通过引入对数型强化模型,动态修正材料的强度与模量,以表征高速冲击下的率相关行为。

②黏性正则化。采用Duvaut-Lions模型平滑损伤演化过程,确保高动态、强非线性冲击计算中的数值稳定性。

③单元删除准则。当单元的等效应变超过临界值时,判定其完全失效并从计算中移除,从而直观模拟出靶板的穿孔、剥落等终极失效形貌。

(5)状态变量记录与输出。所有细观损伤变量、应力-应变历史均被存储在状态变量中,为后处理中可视化损伤演化过程、分析能量吸收机制提供了完整数据链。

图3为织物复合材料UMAT算法流程图,通过这一集成化流程,本框架实现了冲击载荷-细观损伤-宏观性能退化-结构失效的全过程、双向耦合模拟,为系统评估材料的抗弹性能提供了从机理到现象的统一计算平台。

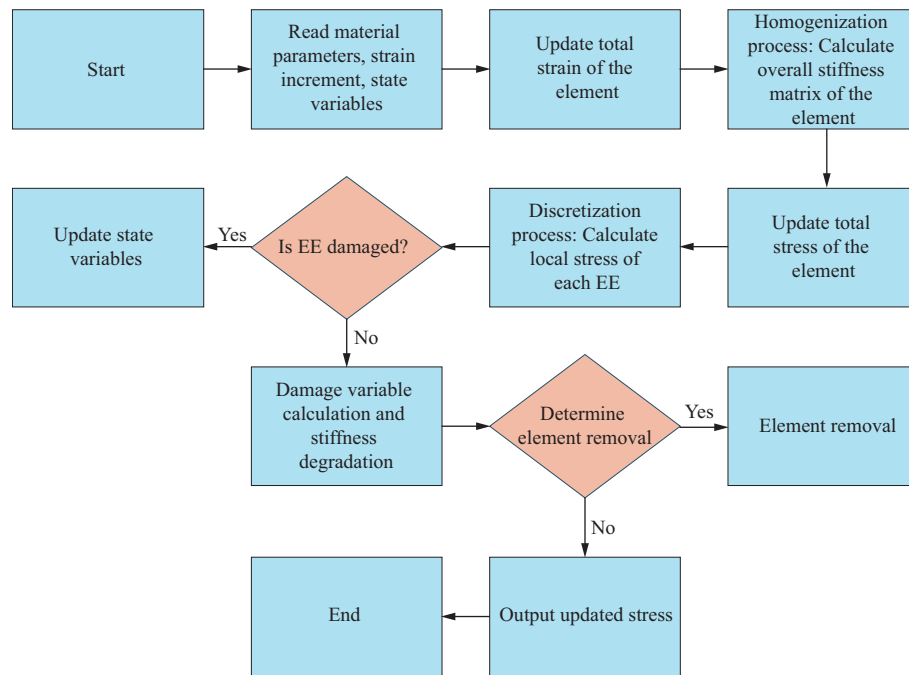


图3 织物复合材料UMAT算法流程图

Fig. 3 Flowchart of woven-composite UMAT algorithm

2 基于损伤模型的抗弹性能仿真与实验验证

为系统评估所述宏-细观耦合模型在预测平纹机织复合材料抗冲击性能方面的准确性、可靠性及工程适用性,本节将开展系统性的高速冲击仿真,并与标准的弹道极限试验结果进行对比分析。分析内容涵盖动态响应过程、损伤演化机制、弹道极限预测以及综合误差评估。

2.1 仿真模型建立、材料参数与工况设置

如图4所示,复合材料靶板采用宏-细观协同有限元建模方法,几何尺寸为 $200.2\text{ mm} \times 200.2\text{ mm} \times 8.0\text{ mm}$,沿厚度方向共铺覆32层,定义第1层中最先和弹体接触的平面为迎弹面,定义第32层中最后和弹体接触的平面为背弹面。弹体依据GJB 4300A-2012标准设计,采用45°钢材料,质量为 1.1 g ,密度为 7.85 g/cm^3 ,弹性模量为 210 GPa ,泊松比为 0.31 ,具

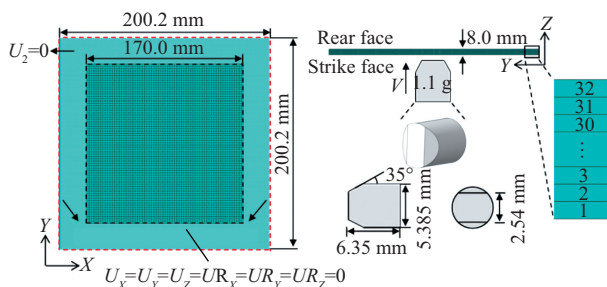


图4 45°钢弹体冲击平纹机织复合材料平板有限元模型

Fig. 4 Finite element model of 45° steel projectile impacting plain-woven composite plate

体几何参数与标准模拟破片一致。在有限元模型中,弹体与复合材料迎弹面中心区域对准,赋予其沿厚度方向的初始冲击速度。

为平衡计算精度与效率,采用SOLID164实体单元对复合材料靶板进行网格划分,其几何特性如图5所示。SOLID164实体单元可以利用Lagrange和ALE网格,在单元表面施加压力、位移等载荷,同时支持施加几种类型的温度载荷。单元尺寸设计为 $2.2\text{ mm} \times 2.2\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$,对应一个网格的几何尺寸,以保证细观结构特征在宏观模型中得到合理表征。整个靶板共划分265 576个单元。在收敛性分析中,通过逐步细化网格并比较关键响应参数,确认当前网格密度已能够有效捕捉冲击过程中的应力波传播与损伤演化趋势,计算结果具有较好的网格无关性。

为了满足试验测试时的边界条件,靶板中心的

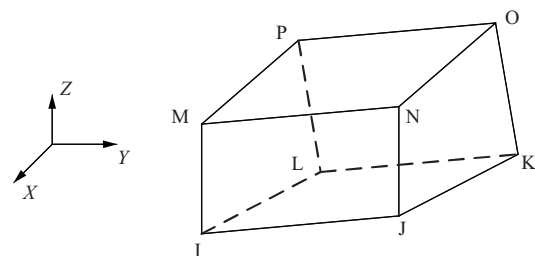


图5 SOLID164实体单元几何特性

Fig. 5 Geometric characteristics of SOLID164 solid element

170.0 mm×170.0 mm 方形区域作为弹体的冲击区域,并且不施加任何约束,用于模拟实际弹击过程中的无约束响应。同时,限制复合材料平板迎弹面和背弹面方形冲击区域外(图4中的灰色阴影区域)节点的面外位移(即 $U_z=0$),并且限制复合材料平板四边(图4中的红色虚线区域)节点的平动与转动自由度(即 $U_x=U_y=U_z=UR_x=UR_y=UR_z=0$)。

为在 LS-DYNA 中实现所述宏-细观耦合损伤模型[Hashin^[18]-Hou^[19]失效准则公式见式(1)至式(6)所示],需在用户自定义材料模型中输入一系列关键材料参数,包括纤维与基体的弹性常数、强度参数、断裂能以及损伤演化相关变量。

(a)对于FT损伤($\sigma_{xx} \geq 0$)。

$$e_{ft} = \left(\frac{\sigma_{xx}}{S_{xt}} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2}{S_{xy}^2} \right) \geq 1 \quad (1)$$

(b)对于FC损伤($\sigma_{xx} < 0$)。

$$e_{fc} = \left(\frac{\sigma_{xx}}{S_{xc}} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

(c)对于MT损伤($\sigma_{yy} \geq 0$)。

$$e_{mt} = \left(\frac{\sigma_{yy}}{S_{yt}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{yz}}{S_{yz}} \right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

(d)对于MC损伤($\sigma_{yy} < 0$)。

$$e_{mc} = \left(\frac{\sigma_{yy}}{2S_{xy}} \right)^2 + \frac{S_{yc}\sigma_{yy}}{4S_{xy}^2} - \frac{\sigma_{yy}}{S_{yc}} + \left(\frac{\tau_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

(e)对于PMT损伤。

$$e_{pmt} = \frac{\sigma_1^{pm}}{S_{mt}} \geq 1 \quad (5)$$

(f)对于PMC损伤。

$$e_{pmc} = \left| \frac{\sigma_3^{pm}}{S_{mc}} \right| \geq 1 \quad (6)$$

式中, $\sigma_{ij}(i,j=x,y)$ 代表各方向的应力; e_{ft} 、 e_{fc} 、 e_{mt} 和 e_{mc} 分别代表纱线 EE 对应的 FT、FC、MT 和 MC 的损伤指数; S_{xt} 、 S_{xz} 、 S_{xc} 、 S_{yt} 、 S_{yc} 、 S_{yz} 、 S_{xy} 、 S_{mt} 和 S_{mc} 分别表示材料在不同失效模式下的强度阈值; $\tau_{ij}(i,j=x,y)$ 为剪切应力, α 代表剪切失效参数。 e_{pmt} 和 e_{pmc} 分别代表纯基体 EE 对应的 PMT 和 PMC 的损伤指数; σ_1^{pm} 和 σ_3^{pm} 分别代表纯基体 EE 的第一主应力和第三主应力。

这些参数基于芳纶纤维/环氧树脂体系的实验数据与细观力学模型标定得到,具体取值见表1。

为准确预测平纹机织复合材料的 V_{50} 值,本研究以芳纶纤维/环氧树脂体系为对象,设计并实施了以

表1 宏-细观耦合损伤模型关键材料参数

Tab. 1 Key material parameters of macro-micro scale coupling damage model

Parameter	Value
Fiber 1-direction modulus/MPa	95 320
Fiber 2-direction modulus/MPa	9250
Fiber in-plane Poisson's ratio	0.36
Fiber out-of-plane Poisson's ratio	0.3
Fiber in-plane shear modulus/MPa	35 000
Fiber out-of-plane shear modulus/MPa	3 557
Fiber tensile strength/MPa	2 900
Fiber compressive strength/MPa	500
Matrix tensile modulus/MPa	3 082
Matrix Poisson's ratio	0.444
Matrix shear modulus/MPa	1 067
Matrix tensile strength/MPa	45.82
Matrix compressive strength/MPa	79
Matrix shear strength/MPa	45
Fiber tensile fracture energy/(J·mm ⁻²)	12.5
Fiber compressive fracture energy/(J·mm ⁻²)	12.5
Matrix tensile fracture energy/(MPa·mm)	17
Matrix compressive fracture energy/(MPa·mm)	16

350 m/s 与 365 m/s 为核心的对比冲击试验。根据预试验结果,选取上述两个临近速度作为典型冲击工况。通过对比分析该速度范围内靶板的应力分布、损伤演化过程以及弹体运动响应,可精确捕捉材料在临界状态下的力学行为与失效机制。

2.2 冲击过程动态响应与损伤演化分析

图6为冲击速度为350 m/s(未穿透)和365 m/s(穿透)时,靶板8、18、28、38 μ s 时的应力时刻云图。从图6中可清晰观察到冲击过程中应力波的传播、扩散及其与材料损伤演化的耦合行为。破片冲击产生的应力波由弹着点中心向四周传播,受平纹机织各向异性结构影响,在纤维轴向主导的波阵面形状呈现类似双纽线的分布特征,而层内的剪切波则在弹着点附近以“十”字形向四周扩散。在350 m/s 冲击下,应力波在靶板内逐渐扩散并呈现对称分布,随着时间推移,高应力区逐渐向外扩展且峰值应力逐步衰减,表明材料通过局部压缩、纤维拉伸及基体开裂等方式持续吸收能量,最终实现弹体的完全阻滞。而在365 m/s 冲击下,应力波传播更为集中,高应力区域迅速沿厚度方向穿透靶板,形成明显的贯穿通道,应力在背弹面较早出现显著集中,与弹体剩余速度的维持相对应。两工况在相同时刻的应力分布差异,直观反映了冲击速度对材料动态响应及失效模式的显著影响:较低速度下材料具备足够的能量吸收能力与损伤扩散时间,实现冲击能的

逐步耗散;而较高速度下材料局部承载能力迅速饱和,导致应力集中与早期贯穿,验证了弹道极限附近材料行为的敏感性与突变特征。

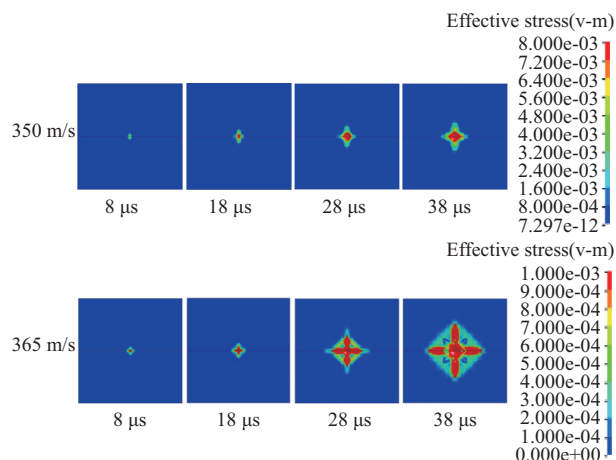


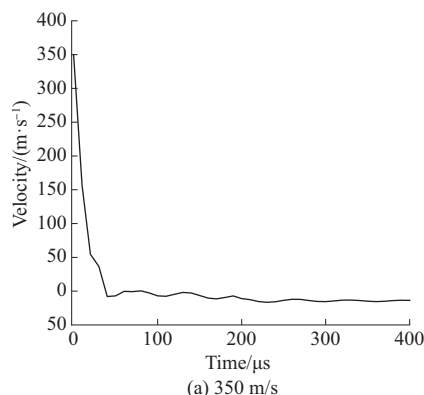
图6 不同冲击速度下复合材料板的应力分布云图(不同时刻)

Fig. 6 Stress distribution nephograms of composite plates under different impact velocities (at different time instants)

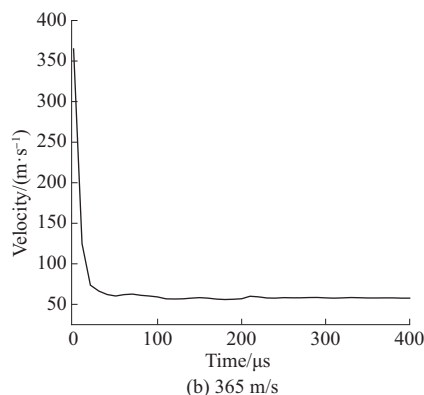
图7展示了两种冲击速度下弹体的速度-时间历程曲线。根据图7所示的子弹速度-时间历程曲线,可以清晰地观察到复合材料板在高速冲击下两种典型的终点状态。当初始冲击速度为350 m/s时,子弹速度在约70 μs内迅速衰减至零(图7a),表明复合材料板通过局部压缩、纤维拉伸与基体开裂等损伤模式持续耗能,随着损伤区域逐渐饱和与应力波扩散范围有限,材料的等效刚度逐步下降,能量吸收能力趋于稳定,最终完全阻滞弹体,属于典型的未穿透工况。

当初始速度为365 m/s时,子弹速度在经历快速下降后趋于稳定,并保留约50 m/s的剩余速度贯穿靶板(图7b)。前期速度陡降反映靶板在损伤起始与扩展过程中的大量能量吸收;后期速度保持恒定,靶板已形成贯穿性损伤,宏观承载能力丧失,弹体以剩余动能继续运动。表明靶板在达到其能量吸收极限后发生穿透,部分冲击动能转化为弹体残余动能,其余部分被靶板以损伤耗散的形式吸收。这一显著差异明确指示该复合材料的 V_{50} 值位于350~365 m/s之间,显示出其对冲击速度的极高敏感性。

两条曲线的形态差异反映了材料在弹道极限临界状态附近的敏感性:未穿透曲线(350 m/s)的速度下降速率逐渐放缓,对应于应力波在有限范围内的扩散及局部损伤的饱和;而穿透曲线(365 m/s)的速度在后期保持非零常数,则对应于子弹克服材料最终强度后以剩余动能继续运动的过程。该仿真



(a) 350 m/s



(b) 365 m/s

图7 子弹速度-时间历程曲线

Fig. 7 Velocity-time history curve of bullet

结果与图6中不同时刻的应力分布及损伤演化云图相互印证,共同验证了所构建的宏-细观多尺度模型及UMAT子程序能够准确捕捉复合材料在弹道极限附近的动态响应、损伤累积及失效模式,为预测其冲击性能与弹道极限提供了可靠的数值分析工具。

根据GB/T 32497-2016等相关标准中广泛采用的工程判定方法,在有效命中射击中,未出现混合结果速度区,并在不大于15 m/s的速度差内已存在一发穿透和一发阻断,取这两发的测点弹速求算术平均值。 V_{50} 可通过未穿透速度与穿透速度的算术平均值进行估算。计算公式见式(7)。

$$V_{50} = \frac{V_{np} + V_p}{2} \quad (7)$$

式中: V_{np} 为未穿透速度; V_p 为穿透速度。基于本文建立的宏-细观耦合模型仿真结果,在设定的冲击工况中,350 m/s为弹体被靶板完全阻滞的最高未穿透速度,365 m/s为弹体以剩余速度贯穿靶板的最低穿透速度。依据上述标准方法,仿真预测的 V_{50} 值为357.5 m/s

2.3 实验数据验证与对比

为系统验证本文建立的多尺度模型及UMAT

子程序在预测平纹机织复合材料抗弹性能方面的准确性与可靠性,本节将仿真结果与实际的弹道冲击试验数据进行对比分析。试验数据来源于浙江红旗机械有限公司防弹材料检测中心开展的 V_{50} 测试报告。

试验依据 GJB 4300A-2012 进行,使用 1.1 g 标准模拟破片(钢质),在常温常湿(20 °C、62%RH)条件下对复合材料板样品进行 V_{50} 测试。

实验获得的芳纶纤维/环氧树脂试样有效射击数据见表 2,包括各发次的冲击速度及对应的穿透/防住结果。

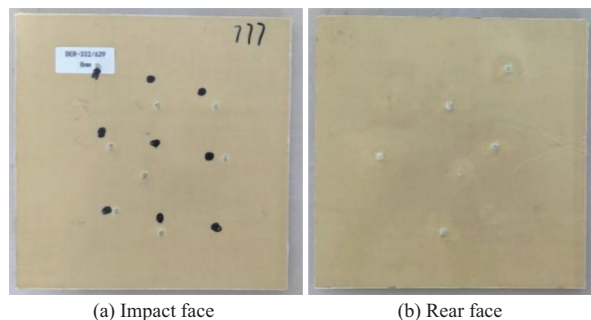
表 2 芳纶纤维/环氧树脂体系抗冲击试验结果

Tab. 2 Impact resistance test results of aramid fiber/epoxy resin system

Shot number	Velocity/(m·s ⁻¹)	Result
1	461	Penetrated
2	452	Penetrated
3	416	Non penetrated
4	449	Penetrated
5	419	Non penetrated
6	426	Penetrated
7	413	Non penetrated
8	446	Penetrated

根据上述有效弹数据,计算得到该材料在所述实验条件下的 V_{50} 值为 413.88 m/s,仿真值 357.5 m/s 的误差约为 13.6%,表现出极高的预测精度。这验证了本文所建立的多尺度理论模型、材料参数标定及 UMAT 子程序实现的有效性。

试样典型损伤形貌如图 8 所示。从图 8 可见,靶板迎弹面形成宏观弹孔,周围材料发生明显破坏;背弹面则出现以弹着点为中心的辐射状破坏区,并伴有层状剥离现象。这些形貌特征与高速冲击下的典型失效模式相符,为仿真结果的对比提供了直观的物理依据。



(a) Impact face (b) Rear face

图 8 侵彻试验靶板迎弹面与背弹面照片

Fig. 8 Photos of impact face and rear face of target plate in penetration test

3 结论

(1)针对平纹机织复合材料在高速冲击下的损伤演化与失效预测问题,构建了一套宏-细观耦合的多尺度仿真方法,并以芳纶纤维/环氧树脂体系为具体研究对象,系统开展了抗弹性能模拟与实验验证。

(2)建立的多尺度仿真方法能够准确预测平纹机织复合材料在高速冲击下的力学响应与损伤演化,仿真结果在损伤形貌、弹体速度历程及弹道极限等方面与实验数据吻合良好,验证了模型的有效性与工程适用性。

(3)对于芳纶纤维/环氧树脂体系平纹机织复合材料,该模型预测其 V_{50} 值为 357.5 m/s,与实验测得的 V_{50} 值 413.88 m/s 相比,误差约为 13.6%,表明模型具有较高的预测精度。

(4)通过将细观代表性体积单元等效为一系列等效单元,并结合三维 Hashin-Hou 失效准则与渐进损伤模型,实现了从细观损伤萌生到宏观失效的全过程模拟。该方法可通过调整纤维/基体类型、体积分数等参数,系统研究其对 V_{50} 与损伤模式的影响规律,为平纹机织复合材料的抗冲击设计与性能评估提供了可靠的仿真工具。

参考文献

- [1] ZHANG X Y, SUN G Y, WANG C, et al. A review of structural topology optimization for fiber-reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 299. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112393.
- [2] KERBER A, GARGANO A, PINGKARAWAT K, et al. Explosive blast damage resistance of three-dimensional textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 100: 170–182.
- [3] LAMON F, MARAGONI L, CARRARO P A, et al. Influence of the mesostructure on the fatigue behaviour of textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 181. DOI:10.1016/j.compositesa.2024.108114.
- [4] ZHAO Z Q, LIU P, DANG H Y, et al. Understanding the critical role of boundary conditions in meso-scale finite element simulation of braided composites[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5(1):39–49.
- [5] ZHANG H H, HUANG L H, LI C Z, et al. Experimental and numerical investigation of tensile failure behavior of triaxial woven fabric composites[J]. Composites Science and Technology, 2025, 270. DOI:10.1016/j.compscitech.2025.111303.
- [6] ARORA G, SHARMA H, BHOWMIK P, et al. Recent studies on multiscale modeling of natural fiber-reinforced composites[J].

- Archives of Computational Methods in Engineering, 2025, 32(4): 2 467–2 548.
- [7] GHOSH G, BISWAS D, BHATTACHARYYA R. Advancements in multiscale modeling of damage in composite materials: A comprehensive review[J]. Composites Part B:Engineering, 2025, 307. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112819.
- [8] HU X Y, HE C W, GE J R, et al. Progressive damage and failure analysis of three-dimensional braided composites under multiaxial loadings[J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 254/255. DOI:10.1016/J.IJSOLSTR.2022.111853.
- [9] CHEN J W, XIA Y F, ZHAO B, et al. Nonlinear characteristics and a new fractional constitutive model for warp-knitted NCF composites under normal loading conditions[J]. Polymer Testing, 2022, 107. DOI:10.1016/j.polymertesting.2021.107464.
- [10] XU S J, HE S, LI J Y, et al. A progressive damage model for quasi-static tension of 2D woven composites and FEM implementation[J]. Composite Structures, 2023, 320. DOI:10.1016/j.compstruct.2023.117168.
- [11] LIU Z F, GE J R, HE C W, et al. A direct prediction method for 3D woven composites bending properties based on unit-cell finite element model[J]. Composites Science and Technology, 2024, 248. DOI:10.1016/J.COMPSCITECH.2024.110474.
- [12] ZHANG C, WU B W, DANG H Y, et al. Theoretical-numerical integrated multi-scale model for fast prediction of progressive failure in textile composites[J]. Composites Science and Technology, 2025, 271. DOI:10.1016/j.compstruct.2025.111341.
- [13] SHIN H. Multiscale model to predict fracture toughness of CNT/epoxy nanocomposites[J]. Composite Structures, 2021, 27. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114236.
- [14] WATANABE T, KAWAGOE Y, SHIRASU K, et al. Multiscale model for failure prediction of carbon-fiber-reinforced composites under off-axis load[J]. International Journal of Solids and Structures, 2023, 283. DOI:10.1016/J.IJSOLSTR.2023.112489.
- [15] MIRSAYAR M M. A novel multiscale model for mixed-mode fatigue crack growth in laminated composites[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 255. DOI: 10.1016/J.IJMECSCI.2023.108470.
- [16] KHENG E, D' MELLO R, WAAS A. A multi-scale model for the tensile failure of twill textile composites[J]. Composite Structures, 2023, 307. DOI:10.1016/J. COMPSTRUCT.2022.116614.
- [17] DANG H Y, LIU P, ZHANG Y X, et al. Theoretical prediction for effective properties and progressive failure of textile composites: A generalized multi-scale approach[J]. Acta Mechanica Sinica, 2021, 37(8):1 222–1 244.
- [18] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2):329–334.
- [19] HOU J P, PETRINIC N, RUIZ C, et al. Prediction of impact damage in composite plates[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(2):273–281.

(上接第 102 页)

- [14] GUO H, HUANG Y Z, CHEN J, et al. Mesoscopic simulation on centrifugal melt electrospinning of polyetherimide and polyarylethernitrile[J]. Journal of Composites Science, 2024, 8(11). DOI: 10.3390/jcs8110480.
- [15] MOHTARAM F, PETERSEN M, AHRENST-MORTENSEN M, et al. Near-field direct write electrospinning of PET-carbon quantum dot solutions[J]. Materials, 2024, 17(24). DOI: 10.3390/ma17246242.
- [16] 白洋. 熔融静电纺超细纤维的细化及其可控制备研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- BAI Yang. Refining and controllable preparation of melt electrospinning fibers[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [17] RAMAKRISHNA S, FUJIHARA K, TEO W E, et al. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers[M]. Hackensack, N J: World Scientific, 2005.
- [18] ZHMAYEV E, CHO D, LAK JOO Y. Electrohydrodynamic quenching in polymer melt electrospinning[J]. Physics of Fluids, 2011, 23(7). DOI:10.1063/1.3614560.
- [19] FRATERNALI F, CIANCIA V, CHECHILE R, et al. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete[J]. Composite Structures, 2011, 93(9): 2 368–2 374.
- [20] BARRANCO-GARCÍA R, MUÑOZ-BONILLA A, CERRADA M L, et al. Phase transitions in mixtures based on poly(lactic acid) and two polymeric nucleants processed under a fast or slow cooling from the melt[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149(12):6 051–6 062.