http://pmse.scu.edu.cn

纤维树脂基复合材料弹道冲击数值模拟研究进展

马渊文[1,2]，董梦杰[2]，王美慧[2]，郭亚飞[2]，李发明[1]，郝新敏[2]
(1. 电子科技大学 材料与能源学院，四川 成都 611731；2. 军事科学院系统工程研究院，北京 100010)

摘要：弹道侵彻是一个高速非线性加载问题，涉及的侵彻损伤机理复杂且影响因素较多。随着当今计算机技术的高速发展，数值模拟成为研究弹道侵彻的主要方法之一。文中首先对纤维树脂基复合材料在各种尺度上的建模方法及研究方向进行了总结，然后对复合材料损伤模型及防弹机理进行了简要阐述，最后针对目前研究进展指出了当前研究存在的问题以及未来研究方向。

关键词：纤维树脂基复合材料；弹道冲击；数值模拟
中图分类号：TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555(2024)10-0153-09

在当今复杂多变的世界格局下，国际安全环境的不稳定性和局部冲突的频发对战场防护提出了更高的要求，特别是在个体防护方面。为应对这一挑战，复合材料以其高比强度、高比刚度、耐酸碱、盐雾和耐冲击等优越性能在防弹领域备受重视[1~3]。在众多防弹材料中，纤维树脂基复合材料发展最快且前景最为广阔，如Fig.1所示，其主要组成为增强纤维和树脂，常见的增强纤维有芳纶纤维(PPTA)、超高分子量聚乙烯纤维(UHWMPE)、碳纤维和玻璃纤维等，树脂主要分为热固性和热塑性2种。

一般来说，研究纤维树脂基复合材料的防护性能可以通过3种主要方法进行[4, 5]。一是实验验证，通过高速冲击实验对所制备的样品进行性能测试分析，从而得出特定纤维树脂基复合材料的防护性能。二是理论分析，基于材料的特性，假设一定条件并进行理论推导，预测理想情况下的防弹性能。三是数值模拟，借助计算机的发展，通过构建复合材料模型并进行高速冲击模拟实验来研究防弹性能，由于纤维与基体的两相特性，其数值模拟研究较传统的金属防护材料更为复杂。3种方法有各自的优势和局限性(Tab.1)，实际应用中使用何种方法要具体问题具体分析。

数值模拟研究范围较全面，既可以研究不同材料性能、侵彻体与材料的相互作用、侵彻体击中材料

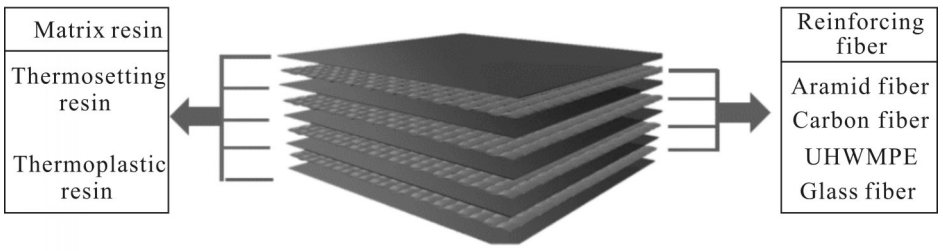


Fig. 1 Composition of composite materials

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0200
收稿日期：2023-09-12
通讯联系人：李发明，主要从事新型钙钛矿材料与器件研究，E-mail: faming.li@uestc.edu.cn；
郝新敏，主要从事功能纤维材料与防护应用研究，E-mail: xminhao@126.com

Tab. 1 Advantages and disadvantages of three methods

Research methods	Advantages	Disadvantages
Experimental validation	Macroscopic performance is accurate, and experimental results can be intuitively analyzed	Dependent on high-speed impact equipment and various analysis devices, resulting in extremely high costs
Theoretical analysis	Energy dissipation can be quantified, leading to visualizable patterns, with low costs	Results have certain limitations
Numerical simulation	Research direction is flexible, allowing for multi-scale and multi-angle analysis, with low costs	Dependent on development of computers, modeling is challenging

后的弹道变化，又可以对爆炸等冲击研究提供理论指导[6]。通过合理建模、分析和后处理，能评估新型防弹材料的性能，为设计出更有效的防弹材料提供有力支持，是当前个体防护领域的研究热点。

纤维树脂基复合材料防弹模拟依赖复合材料数值模型，因此数值模拟研究的核心问题是：(1) 针对不同的问题选择合适的纤维树脂基复合材料几何模型；(2) 建立多参数连续介质损伤模型；(3) 模型验证以及能量耗散分析。本文主要目的是梳理当前纤维树脂基复合材料模型建立方法，损伤准则选取以及数值模拟对于防弹机理的研究，指出当前研究存在的问题和进一步研究的方向。

1 纤维树脂基复合材料几何模型

纤维树脂基复合材料的建模研究从尺度上看主要有单一尺度建模与多尺度建模2种。单一尺度建模主要分为微观建模、细观建模及宏观建模。多尺度模型则是在单一尺度上发展起来的，其目的是为了得到不同尺度下复合材料的损伤模式以及节约计算资源。

1.1 微观尺度模型

微观尺度主要是纤维束尺度，其尺寸范围在10~100 μm。多数微观力学模型假设纤维周期性排列，从中提取出可以识别的重复单元（REV）[7]，然后给予适当的边界条件及荷载，通过均化理论来研究受损微观结构的本构行为[8]。如Fig.2(a)所示，一般对纤维树脂基复合材料进行微观建模，其模型主要包含纤维、基体及两相界面，其中纤维起承载力的作用，基体为骨架，两相界面主要影响纤维与基体之间的应力传导。对于防弹模拟方向来说，微观尺度的模拟研究主要集中在复合材料的树脂含量及两相界面两方面。

由于防弹板材的纤维含量非常高，建立高纤维含量的模型是一个重要的研究方向(Fig.2(b))。Ismail等[9]研究了生成纤维随机分布的微观模型的离散元方法，基于该方法以及纤维直径分布的实验数据，能够生成具有随机分布和任何指定纤维间距离的高体积分数的纤维。Koley等[10]研究了连续纤维力学性能的预测问题，通过SEM扫描图片建立了纤维体积分数为60%且纤维随机分布的REV模型，通过改变模型中纤维的数量进行对比分析，结果表明，更多的纤维随机分布的计算结果更接近实验结果。Li等[11]提出了一种基于分区随机性的随机纤维分布算法，建立了随机分布的面内纤维微观模型。该算法生成的纤维最大体积分数为75%，能够高效生成不同体积分数的随机微观结构模型，为单向纤维增强复合材料建模和分析提供了一种有前景的替代方案。

对于两相界面，学者们做了各种有意义的研究。Wass等[12]在同心圆柱模型的基础上发展了N圆柱体模型，可以以离散的方式找到每一层的基体应变和应力场，并且可以将损伤的演变定位在基体的特定层上。层间粘合力作为两相界面的重要研究方向，Ren等[13]的研究表明，PPTA和UHMWPE层之间具有中等层间粘合力的样品表现出增强的性能，而层间附着力的进一步增加显示出相反的效果。这一发现意味着界面黏附力的优化对于通过分层过程实现最大冲击能量吸收至关重要。

微观模型通过展示纤维与基体的力学行为,实现宏观性能与微观行为的关联,可以深入解释复合材料的能量耗散机制。然而,微观模型可能会产生大量的单元格,计算效率通常较低。

1.2　细观尺度模型

细观尺度模型主要体现纤维树脂基复合材料的结构,如Fig.2(c~e),纤维束为主要研究对象,其尺寸范围在0.1~10 mm。复合材料在细观尺度上具有明显的尺寸效应和增强机制[14~17]。纤维增强相分布一般是非均匀的,在建立细观模型时,纤维束的分布呈现各向异性。这样的细观模型有助于深入研究复合材料在微观尺度上的力学行为和性能表现,并在防弹领域中探究纤维束分布对材料防护性能的影响。

对于复合材料纤维的非均匀分布问题,Gao等[18]利用图像技术分离光学显微照片中的纤维与基体,基于纤维截面的形状提取纤维取向信息,使用概率函数描述了芳纶纤维增强橡胶的纤维取向分布,并建立了2D的有限元细观模型,得到的数值结果与实验结果一致。Vorobio等[19]利用网格叠加技术对纤维与基体连续网格划分进行优化,建立了3D编织复合材料的细观模型,将其应力分布与常规完整有限元模型进行对比,结果也表现出良好的一致性。Zhou等[20]构建了不同纱线的初始几何形状,并模拟了实践中压缩成型对纱线几何形状和沿纱线横截面的影响,模型中纱线体积分数超高(87%),使得此RVE模型可以很好地捕捉和解释所有机械行为和损伤演变。除此之外,纱线的层内混杂也是细观模型研究的重点,不同的纱线分布及机织方式,会产生不同的吸能方式用于提高材料的防弹性能。Sun等[21]研究了3D角联锁机织物的防弹性能以及应变率对于数值模拟的影响,建立了纬纱平放经纱束缚的5层角联锁机织物模型,其配置也与实物一致,然后对模型进行了弹道侵彻模拟。

细观模型大多以纤维束为主体,可以表征复合材料纤维束与基体的一些特征,弹道冲击过程中,能量大部分沉积在初级纱线中[22,23],通过纱线层级的细观模型,研究人员能够深入了解复合材料纤维束在弹道冲击中的行为,揭示纤维与基体之间的力学响应,以及能量传递与耗散的机制。这样的模型有助于探究复合材料在高速冲击条件下的性能和防护能力,为复合材料在防弹领域的应用和设计提供重要指导和优化方案。

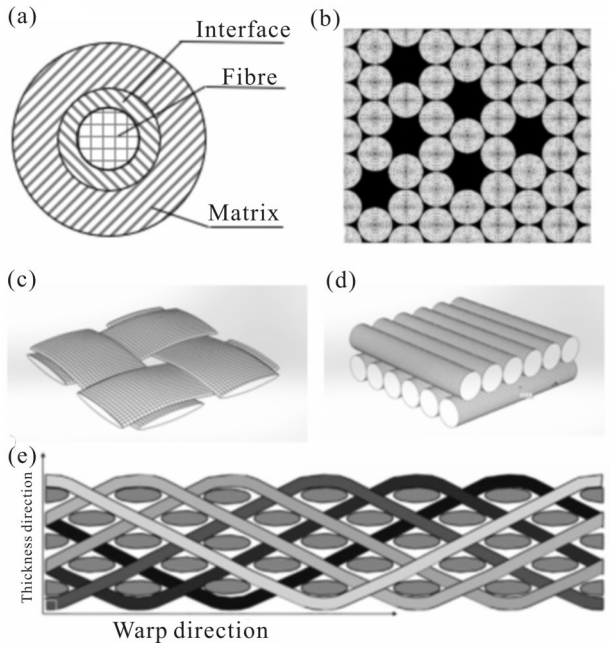


Fig. 2　Microscale model and mesoscale model[21]

1.3　宏观尺度模型

宏观模型主要用于研究复合材料破坏损伤及分层等,其尺寸一般大于10 cm,如Fig.3(a)所示,宏观模型尺度不再考虑纤维与基体这两相,将它们的性质统一到复合材料板上,更注重复合材料层与层之间的关系,将整个弹道侵彻过程进行简化,比较清晰的得到侵彻过程的能量耗散,大大降低了模型的建立难度及计算复杂性。

Fang等[24]建立了机织物的有限元模型,通过非线性有限元方法评价了单层和多层机织物在弹道冲击下的响应,先验证了单层的织物模型,然后进行了多层织物的高速和低速冲击,得到的单层与多层的模拟结果在弹丸残余速度方面与实验数据吻合较好。Ni等[25]建立了UHWMPE的层合板模型,并采用子层合板方式简化连续体模型中的界面,定义子层合板之间的失效来实现分层失效模式的数值模拟,将模拟结果与现有的实验测量结果进行比较,最终变形形态和弹道数据都取得了良好的一致性。除了分层损伤研究,层间混杂也是宏观模型研究的主要方向之一,对芳纶、碳纤维、超高分子量聚乙烯、玻璃纤维这几种材料进行了大量的混杂模拟[26~31],通过不同的吸能模式优化了材料的防弹性能。

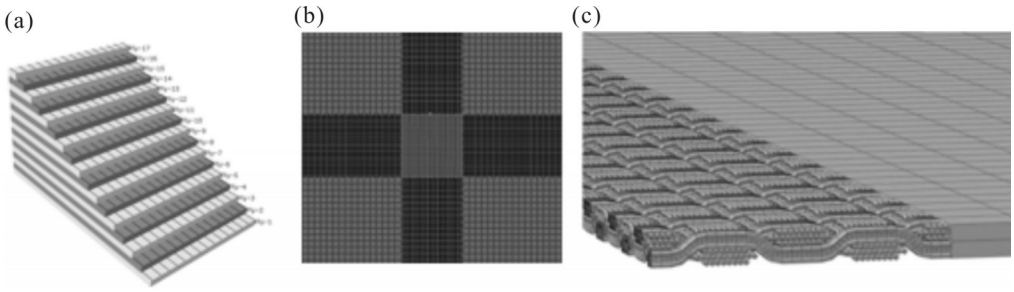


Fig. 3 Macroscale model and multiscale model[32]

Tab. 2 Advantages and disadvantages of numerical simulation at various scales in composite materials and main research directions

Modeling scale	Research object	Advantages	Disadvantages	Research direction
Microscale	Bundle of fibers	Facilitates the analysis of stress transfer within fiber matrix	High computational complexity with challenges in experimental validation	Two-phase interface and resin content
Mesoscale	Yarn	In-depth analysis of composite material structure and components	It exhibits size effects and boundary effects	Yarn structure and physical model construction
Macroscale	Laminated panel	Covers the entire material system, requires fewer material parameters, and offers fast simulation speed	It cannot predict microscale changes within material, local damage, and interface effects	Heterogeneous structure design
Multiscale	Multiple entities	Taking into account different scale characteristics and behaviors of material comprehensively	Many parameters result in increased computational complexity	Structural and layup design optimization along with material damage research

宏观尺度的建模基于均化假设，主要考虑复合材料的平均性质，因此其模型可以显著减少计算量。但是宏观模型需要进行大量的力学性能测试来获取复合材料的宏观特性，这在实践中可能较为耗时和费力。同时，由于宏观模型在描述复合材料行为时无法直接将宏观性能与微观结构联系起来，通常需要在研究中结合微观或细观模型进行分析。

1.4 多尺度模型

为了解决前述3种尺度模拟的局限[32]，研究人员结合2个或者多个模型尺度进行了建模，如Fig.3(b, c)所示，通过在冲击响应区域进行细观建模，研究了纱线和局部损伤细节，同时利用微观模型堆积形成细观模型，研究了纤维损伤模式，而在远离撞击区域，采用宏观建模研究了层与层之间的损伤模式[32]。

通过综合运用不同尺度的模型，可以在保持计算精度的同时有效降低计算成本，全面理解复合材料的力学行为和性能响应。Yang等[32]建立了一种包含纤维束和纱线的机织物模型，进行了包含纱线层面及纤维束层面的多尺度模拟，该模型考虑了纤维束、纱线支数、编织密度、纱线卷曲等参数的影响，将纱线/纱线模型、纱线/纤维模型、纤维/壳模型进行分析对比，表明纱线/纤维模型有助于研究织物结构对弹道性能的影响。除了机织物，三维织物研究也是当前的主流方向之一，Panigrahi等[33]对三维角联锁织物进行了多尺度建模分析，结合微观、细观、宏观模型研究了锥形圆柱钢弹丸冲击下的弹道行为，同时研究了弹头尖锐对于防弹性能的影响，随着弹头角度的变大，能量吸收模式也由纱线的楔入失效转变为剪切失效。

Tab.2对比了各个尺度数值模型的优缺点，多尺度凭借其综合考虑材料的不同尺度特征和行为，能够准确地表现出纤维树脂基复合材料弹道侵彻过程

中的纤维拉伸、剪切失效,基体的压缩失效及分层失效等复杂行为,能更全面了解复合材料在弹道冲击下的响应和损伤行为,对于预测材料的防弹性能具有重大意义,在弹道侵彻研究中已占据主流位置。

2　损伤模拟

复合材料的应力应变分析依赖于其本构方程。在力学分析中,常用的有各向异性本构方程和正交各向异性本构方程,但是随着损伤和强度分析的需要,众多学者提出了渐进损伤分析方法[34,35],同时基于渐进损伤以及考虑材料内部的微观结构和裂纹的扩展,引入了连续介质损伤力学模型去解释和预测材料的损伤和断裂行为。该失效模型是由于微观尺度上发生的扩散损伤(例如微裂纹、空隙和其他类型缺陷的合并和生长)导致宏观尺度上的刚度逐渐丧失[36]。

在纤维树脂基复合材料防弹板材中,主要失效形式涉及纤维与基体的多种失效情况,包括面内拉伸失效、厚度方向拉伸分层、面内剪切失效、面内压缩失效、沿厚度方向的压缩失效等。为了模拟这些失效,需要定义它们的损伤起始点,在损伤开始后通过损伤演化来确定相应材料的刚度折减。通过连续介质损伤模型,可以更准确地预测复合材料在弹道侵彻过程中的损伤和断裂行为,为纤维树脂基复合材料防弹板材的设计和性能优化提供重要的指导和理论支持。

为了定义复合材料损伤起始点,众多学者研究了各种各样的损伤准则,根据是否与失效模式相关将损伤准则分为2类。与损伤模式无关的准则在判断损伤起始的时候认为复合材料层合板整体发生失效,彻底失去承载能力,其中主要有最大应力、应变准则、Tsai-Hill准则、Hoffman准则等一系列准则。与失效模式有关的准则考虑到复合材料不同损伤的失效机制,其代表性的有Hashin准则、Puck准则等。如Tab.3所示,可以看到常见的损伤准则的特点,数值模型通常从研究方向出发来选择合适的损伤准则。

对于损伤演化一般分为直接退化方法和连续介质损伤退化方法。直接退化中一旦材料满足某种失效准则,则材料的应力、强度或者模量会立刻降低为0或者一个极小的值。而连续介质损伤退化除了引入的损伤准则外,还引入了损伤演化,它用来控制损伤的发展,其主要包括指数形式和线性形式2种刚度折减方式,由于考虑了损伤积累对于材料刚度的影响,使其在研究弹道冲击过程中能够更准确地预测材料的防弹性能。

Kim等[37]通过使用3D Hashin准则及连续损伤力学建立了玻璃纤维热塑性塑料的退化模型,其采用了指数形式的渐进失效公式并通过UMAT实现,最后通过弯曲实验及冲击实验对模型进行了验证。

Tab. 3　Common damage criteria and their characteristics

Damage criteria	Characteristics
Maximum stress	Stress in the material's principal direction must be less than the corresponding strength in each respective direction, otherwise, failure occurs
Maximum strain	Strain in the material's principal direction must be less than the corresponding strength in each respective direction, otherwise, failure occurs
Tsai-Hill	This theory considers the interaction between various stress components under complex stress conditions while neglecting the differences in tensile and compressive strength
Hoffman	Taking into account the differences in tensile and compressive strength on the basis of Tsai-Hill
Tsai-Wu	Considering the interaction between different failure modes and differences in tensile and compressive strength
Hashin	Capable of considering various stress states, including tension, compression, shear, in different directions, and accounting for multiple failure modes in composite laminate panels
Puck	Classifying failure modes into fiber failure and inter-fiber failure
Chang-Chang	Accounting for the material's shear nonlinearity behavior

Tab. 4 Analysis of numerical simulation results for damage

Results analysis	Function
V50	Validate the accuracy of numerical model
BFD	Validate the accuracy of numerical model
Stress	Direction and velocity of stress transmission
Transient	Damage modes of a single-layer composite material
Energy	Energy loss of the penetrator during impact process

Xia等[38]研究了天然纤维玄武岩和芳纶纤维及氧化铝陶瓷复合材料的弹道性能，其基于连续介质损伤模型，层间损伤演化采用内聚力单元，损伤起始及演化采用Yen的模型[39]，以解释主要的纤维失效模式（拉伸、压缩、冲压剪切和挤压载荷），通过改变PPTA3D层和玄武岩3D层的堆叠顺序来进行参数研究，确定了复合材料层压板厚度的最佳堆叠顺序，据此设计轻型装甲，并将更好的结果用于减少装甲板的厚度。

连续介质损伤力学模型是目前复合材料损伤分析的重点，但损伤演化当前没有统一的标准，主要依赖于试验拟合得到的材料参数[40]。因此，在当前的研究中，涉及大量参数的三维的连续介质损伤模型研究是一个主要方向，有必要建立高效的三维连续介质损伤模型来研究复合材料的防弹机理，为材料设计和性能优化提供更精确的预测和指导。

3 防弹机理研究

数值模拟结果进行冲击过程分析一般主要聚焦在子弹速度及防弹板形变这2个方面，数值模拟的一大优点就是可以量化防弹板在不同阶段的能量衰减情况，另一个优点就是可对防弹靶板进行变形和破坏分析。在复合材料防弹板的冲击过程中，通常出现典型的局部变形破坏和整体弯曲变形特征[41]，借助数值模拟结果可以清晰地观察到复合材料靶板的等效应力分布以及子弹冲击区域的局部鼓包变形，通过观察应力云图随时间的变化得到弹道冲击过程中复合材料及弹丸的各个损伤破坏阶段。

复合材料防弹性能从宏观层面来看主要表现在弹道极限(V50)及背部变形(BFD)2个方面，从细观方面涉及到纱线的拉伸断裂及基体开裂等，从微观方面涉及到纤维的抽拔、断裂等。对于不同的复合材料层压板，其冲击侧和背面损伤区域表现出不同的损伤模式[42]，一般沿弹体冲击方向，将冲击破坏演变分3个阶段，第1阶段为靶板迎弹面的剪切破坏，第2阶段为复合材料分层破坏，第3阶段为靶板背面拉伸破坏[43,44]。如Tab.4所示，数值模拟的结果最终需要和实验结果进行相互验证，并从微观、瞬时、能量耗散等方面对复合材料的弹道冲击过程做出分析，并对进一步的性能优化做出指导。

学者们也研究了不同的复合材料模型的防弹性能。Pandya等[44]研究了刚性圆柱弹丸撞击的二维机织织物复合层压板的弹道冲击行为，发现能量耗散主要集中在分层破坏和拉伸破坏，而Jiao等[43]研究了层间剪切性能对超高分子量聚乙烯纤维树脂基复合材料层压板弹道响应的影响，复合材料内部损伤形态表明，剪切断裂和分层断裂是弹道冲击过程中的主要失效模式。Majumdar等[45]研究比较了PPTA、UHWMPE和聚对苯二甲酰-2,6-苯并异噁唑机织物制成的平纹编织物软装甲的防弹性能，并证明了纱间摩擦的重要性。Nilakantan等[46]使用有限元分析模拟了PPTA纱线的单纱横向冲击试验，模型的高分辨率对弹道纱的撞击行为提供了宝贵的洞察力，并证明了撞击响应对长丝摩擦、材料特性、扩展和再分布的敏感性。Khoramishad等[47]研究了带有芳纶纤维层和玻璃层的混合碳纤维增强聚合物复合材料在承受高速冲击载荷时的能量吸收能力，发现在不增加层压板质量的情况下，通过考虑适当的层压板铺设，可以大大提高能量吸收能力。

弹道侵彻是一个复杂的过程，受到弹丸和复合材料本身特性的影响，导致侵彻过程多变且多样。在防弹研究中，仅靠实验验证和理论分析将消耗大

量人力物力资源,相比之下,数值模拟能够全面揭示复合材料在冲击过程中的力学行为和损伤特性,进而可以深入研究防弹机理。

4　结语与展望

依赖于当前计算机技术的发展,数值模拟作为防弹研究的一个重要方向得到了快速的发展,从几何模型建立到损伤模型研究再到防弹机理都有很多学者在研究。对于复合材料的防弹性能,当前的研究更多的是基于参数法的理想模型,其模型一般具有周期性边界,与实际材料有些不同。在侵彻损伤过程的研究中,多尺度数值模拟凭借自身优点成为当前研究热点,将失效准则及损伤演化方面的研究应用于数值模拟得到了完整的弹道侵彻过程,但其结果与实验仍然有一些差距。因此有三方面工作亟需开展:(1)建立更加符合纤维树脂基复合材料实际结构的多尺度几何模型;(2)选择合适的损伤准则及损伤演化方向,建立多因素的连续介质损伤模型;(3)通过数值模拟结果与实验验证和理论研究三者相互印证综合研究复合材料的防弹机理,对材料防弹性做出全面预测。

综上所述,数值模拟在研究复合材料的防弹性能中扮演着重要角色,其应用有助于为防弹材料的研发和优化提供关键的信息和指导。通过合理建模和准确分析,数值模拟可以成为深入研究复合材料弹道侵彻行为的有力工具,为个体安全冲击防护装备的进步贡献力量。

参考文献:

[1] 李玥, 叶林, 赵晓文. 碳纤维增强环氧树脂复合材料盐雾腐蚀行为及其老化分子机制[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(5): 91-97.
Li Y, Ye L, Zhao X W. Salt-spray corrosion behavior and aging molecular mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(5): 91-97.

[2] 冯振宇, 解江, 迟琪琳, 等. 湿热环境对复合材料单向板拉伸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 37-43.
Feng Z Y, Xie J, Chi Q L, *et al*. Influence of hygrothermal environment on tensile property of unidirectional composite laminates[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11): 37-43.

[3] 田明月, 王蕊宁, 孙润军, 等. UHMWPE织物/剪切增稠液防刺复合材料的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(11): 109-116.
Tian M Y, Wang R Y, Sun R J, *et al*. Preparation and properties of uhmwpe fabric/shear thickening fluid stab- resistant composite materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36 (11): 109-116.

[4] Abtew M A, Boussu F, Bruniaux P, *et al*. Ballistic impact mechanisms -a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110966.

[5] Dogan U, Sunbuloglu E. A novel simplified ballistic impact theory for woven composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 177: 104530.

[6] 蔡军锋, 傅孝忠, 易建政. 超高分子量聚乙烯-聚氨酯泡沫复合材料的抗爆实验与数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29 (11): 79-83.
Cai J F, Fu X Z, Yi J Z. Anti-explosion experiment and numerical simulation of UHMWPE- PUF composite[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(11): 79-83.

[7] Li S. On the unit cell for micromechanical analysis of fibre-reinforced composites[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1999, 455: 815-838.

[8] Vaughan T J, McCarthy C T. Micromechanical modelling of the transverse damage behaviour in fibre reinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71: 388-396.

[9] Ismail Y, Yang D, Ye J. Discrete element method for generating random fibre distributions in micromechanical models of fibre reinforced composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 90: 485-492.

[10] Koley S, Mohite P M, Upadhyay C S. A micromechanical study and uncertainty quantification for effective properties of unidirectional fibre reinforced Composites[J]. Composite Structures, 2019, 225: 111141.

[11] Xiao J, Li M, Li S, *et al*. High-fidelity random fiber distribution algorithm based on fiber spreading process[J]. Polymer Composites, 2023, 44: 4669-4681.

[12] Patel D K, Hasanyan A D, Waas A M. N- layer concentric cylinder model (NCYL): an extended micromechanics- based multiscale model for nonlinear composites[J]. Acta Mechanica, 2017, 228: 275-306.

[13] Zhu L, Gao W, Dikin D A, *et al*. Anti-ballistic performance of PPTA/UHMWPE laminates[J]. Polymers, 2023, 15: 2281.

[14] Kakavas P A, Anifantis N K, Baxevanakis K, *et al*. The effect of interfacial imperfections on the micromechanical stress and

strain distribution in fibre reinforced composites[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 4541-4548.

[15] Vaughan T J, McCarthy C T. A micromechanical study on the effect of intra-ply properties on transverse shear fracture in fibre reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42: 1217-1228.

[16] Grujicic M, Hariharan A, Pandurangan B, *et al*. Fiber- level modeling of dynamic strength of kevlar KM2 ballistic fabric[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21: 1107-1119.

[17] 赵帅. 两相复合材料损伤与失效的多尺度模拟方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
Zhao S. Study on muti-scale simulation methods for damage and ailure of two-phase composite materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.

[18] Gao J, Jiao F, Zhang H, *et al*. Meso research on the fiber orientation distribution of aramid fiber- reinforced rubber composite[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31: 3281-3291.

[19] Vorobiov O, Tabatabaei S A, Lomov S V. Mesh superposition applied to meso- fe modelling of fibre- reinforced composites: cross- comparison of implementations: mesh superposition applied to meso- fe modelling of composites[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2017, 111: 1003-1024.

[20] Zhou G, Sun Q, Li D, *et al*. Meso-scale modeling and damage analysis of carbon/epoxy woven fabric composite under in-plane tension and compression loadings[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 190: 105980.

[21] Wei Q, Yang D, Gu B, *et al*. Numerical analysis of strain rate effect on ballistic impact response of multilayer three dimensional angle- interlock woven fabric[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2021, 30: 923-944.

[22] Chen X, Zhu F, Wells G. An analytical model for ballistic impact on textile based body armour[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45: 1508-1514.

[23] Yang Y, Chen X. Study of energy absorption and failure modes of constituent layers in body armour panels[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 98: 250-259.

[24] Fang H, Gutowski M, DiSogra M, *et al*. A numerical and experimental study of woven fabric material under ballistic impacts[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 96: 14-28.

[25] Zhang R, Qiang L S, Han B, *et al*. Ballistic performance of UHMWPE laminated plates and UHMWPE encapsulated aluminum structures: numerical simulation[J]. Composite Structures, 2020, 252: 112686.

[26] Ćwik T K, Iannucci L, Curtis P, *et al*. Design and ballistic performance of hybrid composite laminates[J]. Applied Composite Materials, 2017, 24: 717-733.

[27] Li Z, Xue Y, Sun B, *et al*. Ballistic penetration damage for hybrid carbon/Kevlar/UHMWPE fiber laminated composites: experimental and numerical techniques[J]. Composite Structures, 2023, 316: 117037.

[28] Xu J, Tang L, Liu Y, *et al*. Hybridization effects on ballistic impact behavior of carbon/ aramid fiber reinforced hybrid composite[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 181: 104750.

[29] Vescovini A, Balen L, Scazzosi R, *et al*. Numerical investigation on the hybridization effect in inter- ply S2- glass and aramid woven composites subjected to ballistic impacts[J]. Composite Structures, 2021, 276: 114506.

[30] Joo K, Jin K T. Numerical analysis of multi-ply fabric impacts[J]. Textile Research Journal, 2007, 77: 359-368.

[31] Shahkarami A, Vaziri R. A continuum shell finite element model for impact simulation of woven fabrics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 104-119.

[32] Yang Y, Liu Y, Xue S, *et al*. Multi-scale finite element modeling of ballistic impact onto woven fabric involving fiber bundles[J]. Composite Structures, 2021, 267: 113856.

[33] Dewangan M K, Panigrahi S K. Multi-scale modeling of three-dimensional angle interlock woven composite subjected to ballistic impact using FEM[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 31: 3079-3094.

[34] Sun Y, Zeng H, Xin J. Thermal and mechanical properties of plain woven ceramic matrix composites by the imaged- based mesoscopic model[J]. Heat Transfer Engineering, 2023, 44: 2062-2078.

[35] 拓宏亮. 先进复合材料损伤分析方法及应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
Tuo H L. Damage analysis methods of advanced composite material and applications[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.

[36] Mukhopadhyay S, Hallett S R. A directed continuum damage mechanics method for modelling composite matrix cracks[J]. Composites Science and Technology, 2019, 176: 1-8.

[37] Kim D H, Jung K H, Lee I G, *et al*. Three- dimensional progressive failure modeling of glass fiber reinforced thermoplastic composites for impact simulation[J]. Composite Structures, 2017, 176: 757-767.

[38] Ao W, Zhuang W, Xing B, *et al*. Finite element method of a progressive intralaminar and interlaminar damage model for woven fibre laminated composites under low velocity impact[J].

Materials & Design, 2022, 223: 111256.

[39] Yen C F. A ballistic material model for continuous- fiber reinforced composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 46: 11-22.

[40] 罗嘉. 基于宏一细观多尺度建模的机织复合材料渐进损伤和失效分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Luo J. Progressive damage and failure of woven composites based muti- scale macro- meso modelling method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[41] 肖露. 混杂热固性树脂基防弹复合材料的制备及侵彻机理研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
Xiao L. A study on the preparation and ballistic penetration properties of hybrided thermosetting resin bulletproof composite [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.

[42] Pathak R K, Patel S, Gupta V K, *et al*. A computational analysis of the high- velocity impact performance of lightweight 3D hybrid composite armors[J]. Applied Composite Materials, 2023, 30: 727-751.

[43] He Y, Jiao Y, Zhou J Q, *et al*. Ballistic response of ultra- high molecular weight polyethylene laminate impacted by mild steel core projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 169: 104338.

[44] Pandya K, Kumar C V S, Nair N, *et al*. Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of 2D woven fabric composites[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2015, 24: 471-511.

[45] Bajya M, Majumdar A, Butola B S. Criticality of inter- yarn friction in high- performance fabrics for the design of soft body armour[J]. Composites Communications, 2022, 29: 100984.

[46] Nilakantan G. Filament-level modeling of Kevlar KM2 yarns for ballistic impact studies[J]. Composite Structures, 2013, 104: 1-13.

[47] Mousavi M V, Khoramishad H. Investigation of energy absorption in hybridized fiber- reinforced polymer composites under high-velocity impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103692.

Advances in Numerical Simulation of Ballistic Impact on Fiber-Reinforced Resin Matrix Composites

Yuanwen Ma[1,2], Mengjie Dong[2], Meihui Wang[2], Yafei Guo[2], Faming Li[1], Xinmin Hao[2]

(*1. School of Materials and Energy, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Systems Engineering Institute, Academy of Military Sciences(AMS) , Beijing 100010, China*)

ABSTRACT: The ballistic penetration entails high- speed nonlinear loading, involving intricate penetration and damage mechanisms influenced by various factors. With the rapid evolution of computer technology, numerical simulation has emerged as a primary avenue for investigating ballistic penetration. This article began by summarizing modeling techniques and research orientations concerning fiber- reinforced resin matrix composites across different scales. Additionally, it briefly elucidated composite material damage models and ballistic resistance mechanisms. Finally, considering the current state of research advancement, the paper underscored prevailing challenges and outlined prospective avenues for future investigations.

Keywords: fiber-reinforced resin matrix composites; ballistic impact; numerical simulation