



纤维增强复合材料弹道极限速度理论与数值模型研究进展

丛超男¹, 朱文清², 刘俊杰³, 韦小丁^{2*}

1. 中国农业大学理学院应用力学系, 北京 100083;

2. 北京大学工学院力学与工程科学系, 湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871;

3. 北京工业大学力学系, 北京 100124

* 联系人, E-mail: xdwei@pku.edu.cn

2024-04-13 收稿, 2024-05-25 修回, 2024-05-28 接受, 2024-05-29 网络版发表

国家自然科学基金(12325202, 12172005)和国家重点研发计划(2022YFB3806100)资助

摘要 纤维增强复合材料具有质量轻、比强度和比刚度高、抗冲击等特点, 已成为冲击防护领域的重要结构材料。深入研究纤维增强复合材料在高速冲击下的能量吸收机制, 准确预测纤维增强复合材料的弹道极限速度, 对于启发新一代防弹复合材料的优化设计具有重要的科学意义和潜在应用前景。本文从理论分析和数值模拟两个方面回顾了近年来关于纤维增强复合材料弹道极限速度的研究进展, 探讨了纤维增强复合材料的组分性质和微观结构以及子弹特征等因素对弹道极限速度的影响。通过对现有研究结果的总结与分析, 展望了纤维增强复合材料弹道极限速度研究的方向, 期望为防弹复合材料的研究和开发提供参考。

关键词 纤维增强复合材料, 弹道极限速度, 能量吸收, 冲击, 侵彻

冲击侵彻是指弹体以高速或超高速撞击目标结构的某一部位, 继而嵌入或穿透目标结构的动力学过程。冲击侵彻问题的研究最初主要来自军事领域, 例如穿甲弹和钻地武器的设计和改进。近年来, 有关冲击侵彻问题的研究逐渐扩展到民用领域, 如车辆、船舶、建筑和航空航天器的耐撞性设计等^[1-4]。20世纪70年代以来, 复合材料开始在冲击防护工程中大量使用, 其中纤维增强复合材料作为一种新型轻质结构材料, 相比于金属材料具有高比强度和比模量, 相比于陶瓷材料具有较高的韧性和抗冲击性能, 逐渐成为飞机、高速车辆的防护材料以及军事装备(如防弹头盔和防弹背心)的热门选择^[5-8]。弹体贯穿靶板的能力通常采用弹道极限速度(ballistic limit)进行描述, 在该速度下子弹穿透复合材料靶板的几率为50%, 它是以下两种速度的平

均值: 一是弹体头部恰好透过靶板背面并嵌于靶板的速度; 二是弹体尾部恰好通过靶板背部的速度^[9]。弹道极限速度实际上也反映了靶板的防弹能力。了解纤维增强复合材料的弹道冲击响应, 准确预测弹道极限速度, 对于抗冲击复合材料的优化设计非常重要。

冲击侵彻问题的主要特征是载荷强度高、作用时间短^[10]。在冲击侵彻过程中, 子弹与靶板的接触区域会产生高应力分布, 导致靶板发生塑性变形和破坏失效^[11-18]。纤维增强复合材料靶板在子弹冲击下的响应一般可分为总体响应和局部响应, 且在不同的冲击速度作用下会呈现出不同的破坏模式^[19]。在低速冲击下, 靶板的局部响应和总体响应耦合明显。在高速撞击下, 靶板被子弹完全贯穿。弹体贯穿后, 靶板的变形可能还未传递至边界, 因此整体变形不明显, 而子弹与靶板接

引用格式: 丛超男, 朱文清, 刘俊杰, 等. 纤维增强复合材料弹道极限速度理论与数值模型研究进展. 科学通报, 2024, 69: 3238–3251

Cong C N, Zhu W Q, Liu J J, et al. Advances in analytical and numerical models for ballistic limits of fiber-reinforced composites (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 3238–3251, doi: [10.1360/TB-2024-0399](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0399)

触区附近的局部损伤为主要破坏形式。在超高速撞击下,靶板的响应类似于流体。纤维增强复合材料的冲击侵彻是一个复杂的动态过程,此过程中复合材料靶板的变形和失效模式的影响因素众多^[20~25],主要包括如下几方面:(1)靶板组分:纤维和基体力学性能、界面性能、纤维体积分数等;(2)靶板结构:纤维混杂、铺层顺序、层间距等;(3)子弹特征:子弹形状、尺寸、质量和入射倾角等。

弹道冲击下子弹与纤维增强复合材料的作用机理受上述各因素的综合影响,因此,纤维增强复合材料弹道极限速度的准确预测是具有挑战性的问题。几十年来,研究者一直致力于发展能够准确预测纤维增强复合材料弹道冲击响应的理论和数值模型,探索各种内外因素对纤维增强复合材料弹道冲击行为的影响。本文主要针对纤维增强复合材料弹道极限速度近年来在理论和数值模型方面的重要研究进展进行梳理和总结,期望为纤维增强复合材料弹道极限速度的研究以及先进防弹复合材料设计提供参考。

1 半经验方法

冲击侵彻是一个高度非线性问题,其中靶板的变形和破坏机理与众多因素有关,加上纤维增强复合材料本身的复杂性,对子弹侵彻贯穿纤维增强复合材料靶板过程进行准确的描述很困难。鉴于问题的复杂性和研究方法的限制,早期对纤维增强复合材料弹道极限速度的研究主要以实验为基础,然后通过对大量实验数据的分析和归纳,得到弹道极限速度的半经验公式^[26~33]。

Cunniff^[34]假设子弹的初始动能等于纤维中的总应变能,给出了弹道极限速度 V_L 的半经验表达式:

$$V_L = 2^{-1/3} c \varepsilon_f^{2/3} f, \quad (1)$$

其中, c 为纤维波速, ε_f 为纤维失效应变, f 为靶板和子弹面密度之比的函数。Phoenix和Porwal^[35]将靶板简化为薄膜模型,并给出了函数 f 的表达式。随后,Wen^[36,37]假设在冲击侵彻过程中子弹所受平均阻力包括静阻力 σ_s 和动阻力 σ_d 两部分,其中静阻力由靶板材料弹塑性变形所引起,其值等于靶板沿厚度方向压缩时的线弹性极限 σ_c 。动阻力由速度效应引起,其表达式为

$$\sigma_d = \beta(\rho_t / \sigma_c)^{1/2} V_0 \sigma_c, \quad (2)$$

其中, ρ_t 为纤维增强复合材料的密度, V_0 为子弹初始速

度。 β 为与弹头形状有关的常数,该常数通过实验标定。对于扁鼻弹, $\beta=2$ 。对于锥鼻弹, $\beta=2\sin(\theta/2)$,其中 θ 为弹头锥角。根据能量守恒,即子弹击穿靶板的最小动能与子弹克服平均阻力所做的功相等,可得纤维增强复合材料靶板的弹道极限速度,其表达式为

$$V_L = \frac{\pi\beta\sqrt{\rho_t\sigma_c}D^2H}{2m_p} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2m_p}{\pi\beta^2\rho_t D^2H}} \right], \quad (3)$$

其中, m_p 为子弹质量, D 为子弹直径, H 为靶板厚度。He等人^[38]在Wen^[36,37]所提模型的基础上,假设侵彻过程中纤维增强复合材料靶板对弹体施加的平均阻力不再是常数,而是与瞬态侵彻速度有关的函数,进而获得弹体侵彻过程中的瞬态响应和纤维增强复合材料的弹道极限速度。该模型对Kevlar纤维增强复合材料和玻璃纤维增强复合材料弹道极限速度预测的试验吻合优于对碳纤维增强复合材料弹道极限速度的预测。上述模型仅考虑了子弹高速冲击过程中纤维增强复合材料的局部响应。

Reddy等人^[39]进一步考虑了纤维增强复合材料在冲击载荷作用下的总体变形,给出了子弹冲击过程中靶板总吸收能量 E_{Total} 的计算公式:

$$E_{\text{Total}} = \phi(E_{\text{frac}} + E_{\text{def}}), \quad (4)$$

其中, E_{frac} 为与弹头接触区域靶板断裂的耗散能, E_{def} 为靶板总体变形吸收的能量。 ϕ 为动态增强因子,其表达式为^[40]

$$\phi = \begin{cases} 1 + B(V_0/V_c), & V_0 < V_c, \\ 1 + B, & V_0 > V_c, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $V_c = c\varepsilon_f$, B 为经验常数。根据能量守恒,得到纤维增强复合材料的弹道极限速度表达式为

$$V_L = \sqrt{2\phi(E_{\text{frac}} + E_{\text{def}})/m_p}. \quad (6)$$

Wu等人^[41]进一步考虑了纤维增强复合材料靶板分层对侵彻能量的贡献,提出了弹道极限速度计算公式:

$$V_L = \sqrt{2\phi(E_{\text{def}} + E_{\text{frac}} + E_{\text{del}})/m_p}, \quad (7)$$

其中, E_{del} 为靶板分层耗散的能量。此外,Wu等人^[41]还给出了复合材料靶板总体失效模式与局部失效模式的转换条件。上述模型能够较好地预测以总体变形模式失效的纤维增强复合材料的弹道极限速度。

Gellert等人^[42]通过实验观察到不同厚度的玻璃纤维增强复合材料靶板在弹道冲击下的破坏形态不同. 薄板的破坏形状如图1(a)所示, 为一个锥形破碎区; 对于厚板, 从撞击面向下, 破坏形式为叠放的两个破碎锥, 如图1(b)所示. 此外, 靶板的破坏模式也是不同的. 对于薄板, 破坏模式为拉伸弯曲破坏和层间分层. 对于厚板, 厚度 H_E 以上的区域破坏模式为冲击压缩破坏, 同时存在纤维层板的层间脱黏分层现象; 厚度 H_E 以下的区域破坏模式为冲击拉伸弯曲破坏, 同时也存在层间分层. Gellert等人^[42]根据玻璃纤维增强复合材料靶板在冲击侵彻过程中的能量吸收机制定义了厚板和薄板, 薄板和厚板的划分主要取决于材料、弹丸和撞击速度等. 在上述实验结果的基础上, Du等人^[43]发现玻璃纤维增强复合材料厚靶的损伤特征尺寸取决于子弹直径 D , 并给出了如下关系式:

$$\begin{aligned} D_1 &= 2.15D, \quad D_B = 1.2D, \\ H_E &= 2D, \quad D_E = 5H_E + D_B. \end{aligned} \quad (8)$$

通过计算纤维断裂、分层和压缩失效所吸收的能量, Du等人^[43]给出了玻璃纤维增强复合材料厚靶的弹道极限速度的半经验公式:

$$V_L = \left(\frac{\pi D_B (h_0 - H_E)^2 \sigma_{YS} + 0.075 \pi D^2 \tau_s (h_0 - H_E) + \varepsilon_r \sigma_{LS} H_E / (0.91 f(a))}{m_p} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

其中, h_0 为靶板厚度, σ_{LS} 为拉伸应力极值, σ_{YS} 为垂直于板面方向上压缩应力极值, τ_s 为横向截面的剪切应力极值, ε_r 为最大破坏应变. Du等人^[43]采用式(9)计算了玻璃纤维增强复合材料的弹道极限速度, 并进行了试验验证, 其结果一致性较好.

半经验模型的优点在于形式简单, 计算方便, 在工程应用中可以满足绝大部分工作的要求. 但半经验模

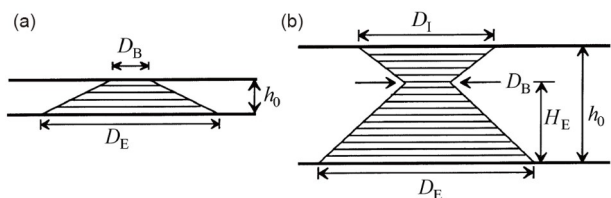


图1 受锥形尖头弹冲击的玻璃纤维增强树脂复合材料靶板损伤区域示意图^[42]. (a) 薄靶板; (b) 厚靶板
Figure 1 Damage patterns of glass fiber/resin composite targets impacted by conically tipped projectiles^[42]. (a) Thin target; (b) thick target

型适用范围较小, 通用性不高, 并且依赖于实验数据, 所获得的公式的准确性取决于所收集实验数据的准确性和完整性, 对纤维增强复合材料防弹性能的优化设计缺乏足够的指导意义.

2 理论方法

纤维增强复合材料弹道极限速度的理论模型可为材料弹道性能的优化设计提供指导, 在工程应用中有着重要的价值. 由于子弹在冲击侵彻过程中没有质量损失, 理论研究中通常将子弹简化为刚体. 相比之下, 纤维增强复合材料靶板会出现多种失效模式. 近年来, 很多研究者致力于探索纤维增强复合材料在冲击侵彻过程中的能量吸收机制, 发展能量分析模型来预测纤维增强复合材料弹道极限速度, 并研究组分特性及靶板结构对纤维增强复合材料弹道性能的影响.

2.1 能量吸收机制与能量分析模型

Morye等人^[44]借助高速摄影捕捉到复合材料靶板背面在冲击侵彻过程中会形成锥体(图2), 他们认为子弹动能以形成局部变形锥的方式耗散, 并提出了冲击侵彻过程中的3个能量吸收机制, 即主纱线拉伸失效、次级纱线弹性变形、变形锥运动. 基于此, Morye等人^[44]给出了冲击侵彻过程中纤维增强复合材料吸收总能量:

$$E_{\text{Total}} = E_{\text{TF}} + E_{\text{ED}} + E_{\text{KE}}, \quad (10)$$

其中, E_{TF} 和 E_{ED} 分别为主纱线拉伸失效和次级纱线弹性变形吸收的能量, E_{KE} 为变形锥动能. 根据能量平衡方程, 得到了纤维增强复合材料弹道极限速度的计算公式:

$$V_L = \sqrt{2E_{\text{Total}} / m_p}. \quad (11)$$

对于该模型中的重要参数, 即锥形变形区半径, 采用剪切波理论和高速摄影试验观测确定, 而高速摄影无法捕捉到复合材料刚好发生拉伸破坏时刻的画面, 只能得到复合材料拉伸破坏之前(图2第3帧)和之后(图2第4帧)的圆锥体半径, 因此Morye等人^[44]的模型只能给出纤维增强复合材料弹道极限速度的范围, 而非确切的预测结果.

Naik等人^[46,47]认为, Morye等人^[44]提出的模型对能量吸收机制考虑得不完整. 他们指出, 在子弹冲击过程中, 对于脆性较大的复合材料, 靶板正面会发生剪切冲

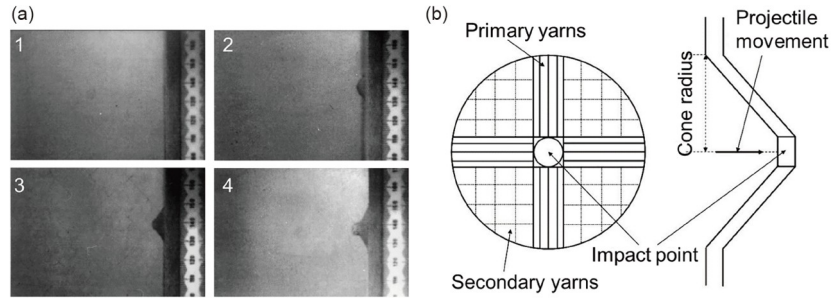


图2 尼龙纤维增强复合材料靶板冲击侵彻分析。(a) 速度为512 m/s的钢球撞击下靶板背面照片^[44], 第1~4帧之间的时间间隔均为15 ms。(b) 靶板变形锥示意图, 左图为靶板背面的平面图, 右图为侧视图^[45]

Figure 2 Impact and penetration of nylon fiber-reinforced composite targets. (a) High-speed photograph of the back face of the target upon impact by a steel sphere at 512 m/s strike velocity. The time interval between frames 1–4 was 15 ms each^[44]. (b) Schematic of the deformation cone formed in the target. The left figure shows the plan of the back face and the right figure shows the side view^[45]

塞(shear plugging); 此外, 在类似双扭线形状的区域内容会发生靶板分层和基体开裂。在所有纱线拉伸失效以及剪切冲塞形成后, 子弹须克服贯穿靶板的摩擦阻力。基于上述能量吸收机制的分析, Naik等人^[46,47]将冲击侵彻过程中复合材料吸收总能量分为7部分, 并给出了总吸收能量表达式:

$$E_{\text{Total}} = E_{\text{KE}} + E_{\text{SP}} + E_{\text{ED}} + E_{\text{TF}} + E_{\text{DL}} + E_{\text{MC}} + E_{\text{F}}, \quad (12)$$

其中, E_{SP} 为剪切冲塞耗散的能量, E_{DL} 和 E_{MC} 为分别为靶板分层和基体开裂耗散的能量, E_{F} 为摩擦耗散的能量。Naik等人^[46,47]基于前人对复合材料冲击侵彻问题的波传播分析^[48,49], 给出了式(12)中各能量的计算公式, 并根据能量平衡得到了纤维增强复合材料弹道极限速度的计算公式。基于所提出的模型, Naik等人^[46,47]比较了玻璃纤维/环氧树脂复合材料和碳纤维/环氧树脂复合材料的弹道冲击行为, 发现在相同的子弹冲击条件下, 玻璃纤维/环氧树脂复合材料的弹道极限速度高于碳纤维/环氧树脂复合材料, 这其中重要的原因是玻璃纤维的失效应变高于碳纤维的失效应变。此外, Naik等人^[46,47]的模型还揭示了次级纱线弹性变形和主纱线拉伸失效是玻璃纤维/环氧树脂复合材料在冲击侵彻过程中的主要吸能机制, 而碳纤维/环氧树脂复合材料主要通过次级纱线弹性变形和剪切冲塞吸收能量。

Naik等人^[46,47]在计算纤维增强复合材料冲击侵彻过程吸收的能量时, 只考虑了沿着复合材料靶板表面传播的横波和纵波, 因此, Naik等人^[46,47]的模型适用于柔性薄板。Bresciani等人^[50]提出冲击侵彻过程中, 复合材料靶板中的纵波和横波还会沿着靶板厚度方向传播, 且相较于沿靶板表面传播的波, 沿厚度方向传播的纵

波具有更高的速度, 致使层合板发生层间凸起变形。基于此, Bresciani等人^[50]提出了冲击侵彻过程中的两个新的能量吸收机制, 即靶板弯曲和层间压缩, 并将Naik等人^[46,47]的模型拓展到了厚板弹道冲击响应的分析。结果表明, Bresciani等人^[50]提出的模型预测的玻璃纤维/乙烯基酯复合材料薄靶和厚靶弹道极限速度与实验数据都非常吻合。

超高分子量聚乙烯(ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)纤维具有轻质、高强、抗冲击等特点, 已逐步替代Kevlar纤维成为个体防弹领域的首选材料^[20-25], UHMWPE纤维增强复合材料的能量吸收机制及弹道极限速度的理论模型一直是研究者关注的问题。Nguyen等人^[51]通过实验观察到UHMWPE纤维增强复合材料靶板的冲击侵彻过程分为两个阶段, 如图3所示, 第一阶段为剪切冲塞, 这个阶段中纤维剪切失效为主要的能量吸收机制。第二阶段为凸起形成, 这个阶段中靶板的行为类似薄膜拉伸失效, 靶板中的纤维拉伸失效是主要的能量吸收机制。根据上述实验现象, Nguyen等人^[51]建立了预测UHMWPE纤维增强复合材料厚板弹道极限速度的两阶段侵彻模型。剪切冲塞阶段吸收的能量 E_{S} 为

$$E_{\text{S}} = \tau_{\text{max}} \pi r_{\text{p}}^2 t_{\text{S}}, \quad (13)$$

其中, τ_{max} 为层合板沿板厚度方向的等效剪切强度, r_{p} 为子弹半径, t_{S} 为剪切冲塞阶段的靶板厚度。凸起形成阶段吸收的能量 E_{B} 为

$$E_{\text{B}} = \frac{1}{2} m_{\text{p}} V_{\text{B}}^2, \quad (14)$$

其中, V_{B} 为凸起产生前夕的子弹速度, 该速度由动量守

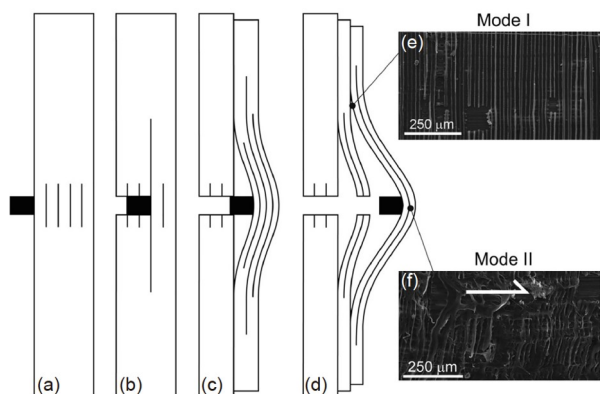


图3 UHMWPE纤维增强复合材料靶板侵彻破坏机制^[51]. (a) 分层; (b) 剪切冲塞; (c) 凸起; (d) 凸起中侵彻发展; (e) 远离侵彻处的断面照片; (f) 靠近侵彻处的断面照片

Figure 3 Penetration and damage mechanisms of UHMWPE-reinforced composite targets^[51]. (a) Delamination; (b) shear plugging; (c) bulging; (d) penetration and development in bulging; micrographs of the fracture surface away from (e) and close to (f) the penetration site

恒计算得到, 其表达式为

$$V_B = V \left(1 + \beta^2 \pi r_p^2 t_B \rho_t / m_p \right), \quad (15)$$

其中, V 为凸起刚形成时的子弹速度, β 为半径 r_p 的无量纲乘数. 最终, 根据如下能量守恒方程获得了 UHMWPE 纤维增强复合材料厚板弹道极限速度:

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2} m_p V_L^2 = E_s + E_B. \quad (16)$$

算例结果表明, 两阶段侵彻模型预测的厚靶板弹道极限速度与实验结果非常一致, 而对于薄 UHMWPE 纤维增强复合材料靶板, Phoenix 和 Porwal^[35] 所提出的薄膜模型预测结果更准确.

近年来, 各种 UHMWPE 纤维增强复合材料能量吸收机制被相继提出. 例如, Langston^[52] 考虑 5 种能量吸收机制, 即纤维拉伸变形、变形锥分层、复合材料质量加速、基体开裂以及复合材料剪切破坏, 建立了 UHMWPE 纤维增强复合材料弹道极限速度的理论模型. Li 和 Liu^[53] 提出子弹冲击侵彻 UHMWPE 纤维增强复合材料的过程分为 4 个阶段, 包括挤压阶段、压缩剪切阶段、拉伸剪切阶段、纤维失效以及分层阶段. 在上述假设的基础上, Li 和 Liu^[53] 建立了 UHMWPE 纤维增强复合材料弹道极限速度的理论模型, 并研究了靶板厚度对弹道极限速度的影响.

最近的研究还发现基体的含量和力学性能对纤维增强复合材料的弹道冲击行为产生了很大影响^[54-57],

对纤维增强复合材料的弹道冲击实验表明采用力学性质较差的基体反而能够有效提高复合材料的抗冲击性能^[58,59]. 为了解释这一有趣的实验现象, Liu 等人^[60] 建立了动剪滞模型来探索冲击过程纤维增强复合材料中黏性基体的能量耗散, 并给出了描述基体黏性耗散能力的能量耗散率频谱 Φ . Zhu 等人^[61] 将动剪滞模型拓展到层合板尺度, 建立了预测纤维增强复合材料弹道极限速度的多尺度模型(图4). 该模型假设子弹的初始动能等于纤维断裂吸收的能量加上基体通过黏性耗散的能量, 其中, 纤维断裂吸收的能量由式(1)计算, 基体黏性耗散能通过动剪滞模型给出的能量耗散率 Φ 计算. 基于此, Zhu 等人^[61] 给出了弹道极限速度的解析表达式:

$$V_L = 2^{-1/3} c \varepsilon_f^{2/3} f(1 + \Phi)^{(n+1)/2}, \quad (17)$$

其中, n 为冲击过程中弹性波扫过的动剪滞单胞的个数. 模型分析结果表明, 能量耗散率 Φ 与基体模量呈非单调关系, 因此, 在一定范围内降低基体模量, 会提高纤维增强复合材料的弹道极限速度.

2.2 靶板特征的影响

近年来, 很多研究者基于能量分析模型探索了靶板特征对纤维增强复合材料弹道极限速度的影响, 主要包括靶板厚度、纤维混杂、铺层方式、层间距、纳米填充物、基体性质等的影响.

2.2.1 靶板厚度的影响

Shaktivesh 等人^[62] 建立了玻璃纤维增强环氧树脂复合材料弹道极限速度的理论模型, 并考察了靶板厚度对复合材料弹道冲击行为的影响. 模型揭示了不同厚度的复合材料靶板的主要能量吸收机制. 当靶板较薄时, 剪切冲塞为主要能量吸收机制, 并且该过程吸收的能量随着靶板厚度增加非单调变化, 在靶板厚度为 12 mm 时达到峰值. 此外, 模型分析结果表明玻璃纤维增强环氧树脂复合材料弹道极限速度随着靶板厚度变化呈现更加复杂的非单调变化趋势. Li 和 Liu^[53] 建立了 UHMWPE 纤维增强复合材料弹道极限速度的理论模型, 并考察了靶板厚度的影响. 模型分析结果表明, 在子弹冲击过程中, 靶板吸收的冲击能量主要转化为压缩能、剪切能以及弹性变形能, 且压缩能和剪切能随着靶板厚度的增加而增加. 此外, Li 和 Liu^[53] 的模型表明 UHMWPE 纤维增强复合材料弹道极限速度与靶板厚度呈线性关系. Langston^[52] 也建立了 UHMWPE 纤维增强复合材料弹道极限速度的理论模型, 然而该模型

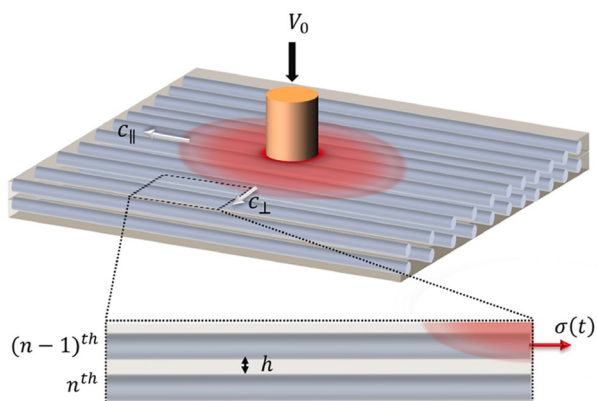


图4 纤维增强复合材料弹道极限速度多尺度模型^[61]
Figure 4 Multiscale model for the ballistic limit of the fiber-reinforced composite^[61]

表明厚UHMWPE纤维增强复合材料板和薄UHMWPE纤维增强复合材料板的能量吸收特性相似, 其中, 主要的能量吸收机制为纤维拉伸变形, 其次是变形锥质量加速和分层。

2.2.2 靶板结构的影响

靶板结构的多样性主要体现为纤维混杂、铺层方式以及层间距的变化等方面。Shanazari等人^[63]建立了混杂纤维复合材料弹道冲击行为的理论模型, 并研究了由机织物和单向纤维混杂的复合材料靶板在弹道冲击过程中的变形以及能量吸收。模型研究表明, 混杂复合材料的弹道极限速度高于非混杂复合材料的弹道极限速度。Sánchez-Gálvez等人^[64]对碳纤维增强复合材料和碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料的冲击侵彻行为进行了理论分析。分析结果表明, 碳纤维与玻璃纤维的混杂提升了复合材料的弹道极限速度, 作者指出这是由于玻璃纤维具有更高的失效应变, 因此能够在碳纤

维断裂失效后继续阻碍子弹的侵彻。Velmurugan等人^[65]基于Naik等人^[46,47]的模型, 研究了纤维取向对碳纤维增强复合材料层合板弹道冲击响应的影响。研究结果表明, 铺层角度为(0/90)的层合板相较于其他铺层角度的层合板具有更高的能量吸收能力及弹道极限速度。Sikarwar等人^[66,67]对铺层顺序分别为(0/90)、(0/90/30/-60)、(0/90/45/-45)、(30/-60/60/-30)的玻璃纤维/环氧树脂层合板的弹道行为进行了分析。研究结果表明, 与其他铺层顺序的层合板相比, (0/90)层层合板的弹道极限速度最高。Porwal和Phoenix^[68]采用薄膜模型研究了层间距对纤维增强复合材料柔性层合板的弹道冲击行为的影响。模型分析结果表明, 层合板弹道极限速度随着层间间距的增加首先逐渐降低而后趋于常值。Mamivand和Liaghat^[69]的模型分析结果中也观察到了相似的变化趋势, 他们将弹道极限速度下降停止对应的层间距命名为层解耦阈值。Ha-Minh等人^[70]基于能量守恒和应变波理论建立了纤维增强复合材料弹道冲击行为的理论模型, 并研究了层间距对弹道极限速度的影响。他们指出层间距对防弹性能产生影响的根本原因在于子弹和靶板之间动量交换的次数与层间距密切相关。层间距较小时, 层间相互作用较强, 因此靶板的防弹性能较好。

2.2.3 组分性质的影响

Liu等人^[60]的动剪滞模型分析结果表明, 纤维增强复合材料的能量耗散能力可以通过使用软基体来改善。如图5(a)中的红色虚线所示, 通过调节基体的剪切模量和黏度, 可以实现纤维增强复合材料最优的能量耗散能力。Zhu等人^[61]的多尺度模型成功捕捉到了基体力学性能对碳纤维增强复合材料弹道极限速度的影响, 这一模型预测结果与前人^[71,72]的实验研究结果相符(图5

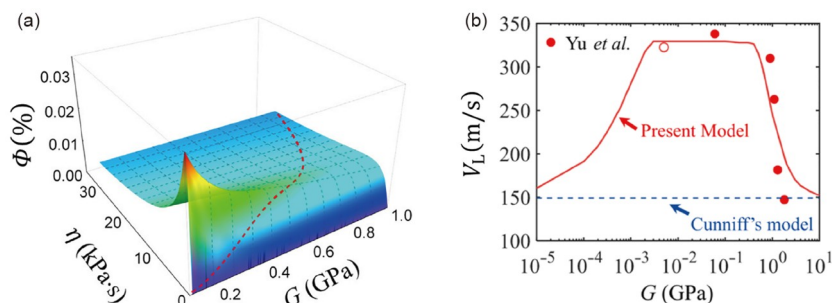


图5 黏性基体对纤维增强复合材料弹道冲击行为的影响。(a) 冲击过程中纤维增强复合材料能量耗散率 ϕ 随基体黏度 η 和剪切模量 G 的变化^[60]; (b) 碳纤维增强复合材料弹道极限速度实验数据与多尺度模型预测结果对比^[61]
Figure 5 Effect of the viscous matrix on the ballistic performance of fiber-reinforced composites. (a) Variation of dissipative energy ratio spectrum ϕ with matrix viscosity η and shear modulus G ^[60]; (b) comparison between the experimentally measured ballistic limits of the carbon fiber-reinforced composites and multiscale model predictions^[61]

(b)). Balaganesan等人^[73]提出了纳米黏土增强玻璃纤维/环氧树脂复合材料弹道极限速度的理论模型,并考察了纳米填充物对复合材料靶板弹道极限速度的影响.模型分析表明纳米黏土的引入提高了复合材料靶板通过各种失效模式吸收的能量,因此,相较于不含纳米黏土的玻璃纤维/环氧树脂复合材料,含纳米黏土的复合材料的弹道极限速度更高.

现有的纤维增强复合材料弹道极限速度的理论模型大多忽略了复合材料的应变率效应,此外,关于复合材料冲击侵彻过程中基体黏性耗散作用的研究相对较少.另一方面,大多数理论研究关注靶板厚度、靶板结构和组分性质等内部因素对复合材料弹道极限速度的影响,关于外部因素影响的讨论较为缺乏.

3 数值方法

数值方法可以再现子弹冲击侵彻纤维增强复合材料的完整过程,开展不同条件下的高速冲击仿真模拟,获得侵彻过程中各种物理量(如侵彻速度、侵彻力等)的变化,已成为纤维增强复合材料防弹性能优化的重要工具之一.早期冲击侵彻问题的数值研究以有限差分法为主,经典的有限差分程序包括HELP、HEMP、TOODY等.但有限差分方法处理复杂边界的能力较差,而有限元方法对边界的适应性更强,可以方便地处理边界形状复杂、存在物质界面、材料属性相差较大的物理问题,因此逐渐成为当前纤维增强复合材料弹道冲击行为的主流数值分析方法.经典的结构动力响应有限元计算程序包括DYNA、EPIC、LUSAS、ABAQUS/Explicit、MSC.DYTRAN等^[74].

3.1 有限元方法

3.1.1 材料模型

纤维增强复合材料的不均匀性和各向异性给其在冲击侵彻过程中损伤行为的准确描述带来了巨大困难.围绕这一难点,近年来,学者们致力于发展能够准确描述纤维增强复合材料冲击损伤行为的本构模型和失效准则,目前常用的复合材料失效准则有Tsai-Hill准则、Tsai-Wu准则、Hashin准则以及Puck准则^[75],在这些失效准则的基础上逐渐发展出复合材料渐进损伤理论.渐进损伤理论考虑复合材料在渐进损伤过程中刚度的退化,并在复合材料刚度矩阵中引入与纤维断裂、基体材料横向开裂和基体与纤维材料间界面的剪切开裂相关的损伤变量.Cheng等人^[76]在连续损伤力学的基础

上建立了纤维增强复合材料厚靶板的损伤本构模型,该模型通过3个基于应力的失效准则描述纤维增强复合材料的3种主要破坏模式,即冲孔、纤维断裂和分层,并在此基础上建立了纤维增强复合材料厚靶板弹道冲击响应的有限元模型.然而,Cheng等人^[76]的模型只适用于二维对称结构的分析.Nandlall等人^[77]提出了玻璃纤维/乙烯基酯复合材料的连续损伤本构模型,该模型通过独立的损伤变量描述材料损伤后不同方向上的力学性能的下降.基于所提的损伤本构模型,Nandlall等人^[77]建立了玻璃纤维/乙烯基酯复合材料弹道极限速度的数值分析模型.Nandlall等人^[77]的本构模型基于平面应力假设,无法考虑层合板分层这一损伤模式,有限元模拟得到的玻璃纤维/乙烯基酯复合材料弹道极限速度低于实验结果.Rajaneesh等人^[78]在Ladevèze^[79]的层内细观损伤模型基础上,通过引入双线性软化定量,进一步考虑了层合板的层间断裂能和原位强度,并使用LS-DYNA研究了碳纤维增强复合材料的弹道响应.模拟结果表明,Rajaneesh等人^[78]提出的修正模型可以准确预测铺层顺序为(0/90/30/-60)层合板的弹道响应.

材料的动态力学行为通常为非线性,且具有率相关性^[80-84].应变率对材料的力学性能和破坏模式均会产生显著影响^[85-89],在模拟子弹冲击侵彻纤维增强复合材料靶板过程中考虑靶板和子弹材料的应变率效应是非常重要的.Gama和Gillespie Jr^[90]采用应变率相关的弹塑性模型对玻璃纤维增强环氧树脂复合材料厚板的冲击侵彻过程进行了有限元模拟.其中,纤维增强复合材料的应变率效应通过对数函数描述,该对数函数采用4个率参数描述材料强度、面内杨氏模量、剪切模量以及贯穿厚度模量的应变率效应.模拟结果证实了材料的应变率效应对玻璃纤维增强环氧树脂复合材料弹道极限速度产生显著影响.对于大多数金属材料,常采用Johnson-Cook^[91,92]、Zerilli-Armstrong^[93]等模型表示各应变率条件下材料的本构关系,而在损伤模型中最为常用的是Johnson-Cook损伤模型^[91]和JH-2模型^[94].Silva等人^[95]对Kevlar纤维增强复合材料的弹道极限速度进行了有限元分析,其中,子弹的率相关变形行为通过Johnson-Cook本构模型描述,本构模型中屈服面为塑性应变、应变率和温度的函数;材料的失效由塑性应变累积准则来判断,失效准则中断裂应变表示为应力三轴度、应变率和温度的函数.Silva等人^[95]通过有限元模拟给出的复合材料靶板在子弹冲击侵彻过程中的变形和损伤与实验结果吻合较好.

3.1.2 靶板特征影响

(1) 靶板厚度的影响. Wang等人^[96]利用LS-DYNA建立了Kevlar纤维增强复合材料靶板的3D模型,并模拟了复合材料的冲击侵彻过程.数值模拟结果表明,Kevlar纤维增强复合材料的弹道极限速度随着厚度的变化呈现一个拐点,拐点出现在靶板厚度约为2倍弹径附近.在靶板厚度小于2倍弹径时,靶板的弹道极限速度随靶板厚度增加线性增加,而在拐点以后靶板的弹道极限速度增长趋于缓慢.Nunes等人^[97]数值模拟了Kevlar纤维增强环氧树脂复合材料厚板和薄板的弹道冲击响应,模拟结果揭示了薄板的主要破坏机制为纤维断裂,而厚板的主要破坏机制为分层.

(2) 靶板结构的影响.大量有限元模拟结果表明纤维增强复合材料层合板的结构会对弹道极限速度产生显著影响.例如,Sevkat^[98]利用AUTODYN数值研究了纤维混杂对复合材料弹道极限速度的影响,如图6(a)所示,石墨纤维/玻璃纤维混杂复合材料相较于石墨纤维增强复合材料具有更高的弹道极限速度.Karthick和Ramajeyathilagam^[99]利用LS-DYNA模拟了以不同方式混杂的纤维增强复合材料的弹道冲击响应,并比较了非混杂纤维复合材料与混杂纤维复合材料的破坏模式.数值模拟研究揭示了碳纤维/玻璃纤维混杂复合材料由于破坏应变较高,其损伤区域远大于碳纤维增强复合材料的损伤区域(图6(b)),因此具有更高的能量吸收能力.Bandaru等人^[100]采用有限元方法研究了纤维混杂方式和铺层顺序对复合材料弹道极限速度的影响.数值模拟中,所研究的复合材料由3种不同的纤维(即Kevlar纤维、玻璃纤维和碳纤维)任选两种混杂而成.模拟结果表明,纤维混杂方式和铺层顺序均对复合材料弹道冲击响应影响显著,且最外层纤维为Kevlar纤维的碳

纤维/玻璃纤维混杂复合材料密度低且具有最大的弹道极限速度.然而,Bandaru等人^[100]假设复合材料靶板层间理想结合,忽略了靶板的分层.Stephen等人^[101]利用LS-DYNA对碳纤维/玻璃纤维/环氧树脂复合材料进行了高速冲击模拟,并研究了铺层角度对复合材料弹道极限速度的影响,模拟结果表明(0/90)铺层结构防弹性能最好.

3.1.3 子弹特征影响

Kumar等人^[102]利用AUTODYN模拟了Kevlar增强环氧树脂复合材料在圆柱平头弹冲击下的响应,并研究了子弹质量和直径对弹道极限速度的影响.模拟结果表明,保持子弹直径不变的情况下,Kevlar增强环氧树脂复合材料弹道极限速度随子弹质量增加而降低;而保持子弹质量不变的情况下,Kevlar增强环氧树脂复合材料弹道极限速度随子弹直径增加而增加.Zhikhar-ev等人^[80,103]利用LS-DYNA研究了子弹冲击角度对玻璃纤维增强环氧酚醛树脂复合材料弹道极限速度的影响,模拟结果表明,与子弹垂直冲击情况相比,子弹斜向冲击情况下复合材料的弹道极限速度增加,并且子弹速度的切向分量对纤维增强复合材料的防弹性能产生负面影响.Millán等人^[104]利用ABAQUS模拟了各种形状子弹冲击下Kevlar纤维增强复合材料靶板响应,模拟结果表明,相较于薄板,厚板的弹道极限速度对子弹形状更敏感;此外,在锥-锥头子弹冲击下,Kevlar纤维增强复合材料弹道极限速度最低.

3.2 其他方法

3.2.1 有限元与人工神经网络结合方法

纤维增强复合材料高速冲击响应的数值模拟通常需要花费大量的时间和经济成本.为了降低研究成本,

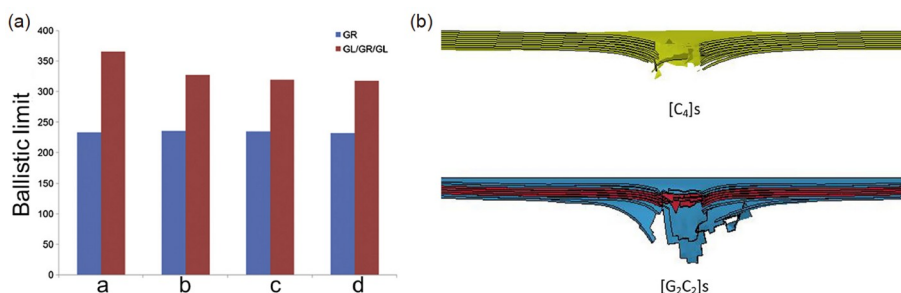


图6 纤维混杂对复合材料弹道冲击性能的影响. (a) 石墨纤维/玻璃纤维混杂复合材料与石墨纤维增强复合材料弹道极限速度对比^[98]; (b) 碳纤维增强复合材料与混杂复合材料破坏模式^[99]

Figure 6 Effect of hybridization on the ballistic performance of composites. (a) Comparison of the ballistic limit between graphite fiber-reinforced composites and hybrid composites made of glass fiber and graphite fiber^[98]; (b) damage patterns of carbon fiber-reinforced composites and hybrid composites^[99]

近期研究者开始尝试使用有限元与人工神经网络相结合的方法来预测纤维增强复合材料的弹道极限速度。例如, Mousavi和Khoramishad^[105]结合Taguchi预测模型和人工神经网络, 建立了玻璃纤维/Kevlar纤维/碳纤维增强复合材料的有限元模型, 并研究了纤维混杂对复合材料弹道极限速度的影响。Artero-Guerrero等人^[106]的研究工作证实了结合人工神经网络与有限元的分析方法可以在降低模拟分析成本的前提下, 准确预测纤维增强复合材料层合板堆叠顺序对弹道极限速度的影响。

3.2.2 光滑颗粒动力学方法

有限元方法可以模拟纤维增强复合材料弹道冲击响应, 预测复合材料的弹道极限速度, 然而, 有限元方法在计算大变形问题时网格畸变过大, 并且无法模拟次生碎片。无网格方法, 例如光滑颗粒动力学(smooth particle hydrodynamics, SPH)方法可以很好地解决上述问题。Giannaros等人^[107]采用SPH方法研究了碳纤维增强复合材料的超高速冲击响应, 并指出影响材料响应的主要SPH参数是场函数的空间导数和平滑长度。SPH方法作为一种研究纤维增强复合材料冲击侵彻问题的新方法, 目前尚处于起步阶段。为了提高模拟的准确性, 需要在很多方面进行深入研究, 例如探索新的核函数, 开发应变率相关的各向异性材料模型。

4 总结

纤维增强复合材料的不均匀性、各向异性以及损伤破坏模式的复杂性和多样性给其弹道极限速度的研究带来巨大挑战, 吸引了大批学者开展研究。本文概述了纤维增强复合材料弹道极限速度的理论和数值模拟研究, 并讨论了组分材料性质、靶板结构、靶板厚度、子弹形状、质量、直径、入射角等各种内外因素对纤维增强复合材料高速冲击响应和弹道极限速度的影响。对纤维增强复合材料弹道极限速度研究现状总结发现, 该研究领域仍存在一些问题亟待解决。一方面, 基体在纤维增强复合材料弹道性能中的作用还有待进一步研究, 前人初步探索了基体黏性对纤维增强复合材料在冲击载荷作用下能量耗散的影响, 但聚合物基体的应变梯度效应、基体-增强相之间界面对纤维增强复合材料弹道极限速度的影响仍不明确。另一方面, 纤维增强复合材料具有多层级多尺度微结构, 然而大多数现存的理论和数值模型难以准确描述纤维增强复合材料的跨尺度动态力学行为。此外, 纤维增强复合材料弹道冲击的有限元模拟需要花费大量的时间和经济成本, 因此, 新的数值研究方法, 例如人工神经网络和有限元相结合的方法、SPH方法是未来的重要发展方向之一。

致谢 本文的部分计算得到“东方”超级计算系统的支持。

参考文献

- Zheng Z, Sun Y, Pan X, et al. Failure mechanism of fiber-reinforced prestressed concrete containments under internal pressure considering different fiber types. *Materials*, 2023, 16: 1463
- Yang C, Gao Y, Guo W, et al. High-velocity impact behaviour of curved GFRP composites for rail vehicles: Experimental and numerical study. *Polym Test*, 2022, 116: 107774
- Li Y, Xiao Y, Yu L, et al. A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: Materials, structures and processes. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2022, 154: 106762
- Fan T, Sun Z, Zhang Y, et al. Novel Kevlar fabric composite for multifunctional soft body armor. *Compos Part B-Eng*, 2022, 242: 110106
- Mei Z Y, Zhu X, Liu Y H, et al. The developments of fibre-reinforced composite laminates under ballistic impact (in Chinese). *Adv Mech*, 2003, 33: 375–388 [梅志远, 朱锡, 刘燕红, 等. 纤维增强复合材料层合板弹道冲击研究进展. *力学进展*, 2003, 33: 375–388]
- Qi D T, Zhang Y H, Cheng G X, et al. A review of researches on multiaxial fatigue for fiber reinforced resin composites (in Chinese). *Adv Mech*, 2006, 36: 200–210 [戚东涛, 张耀亨, 程光旭, 等. 纤维增强树脂基复合材料多轴疲劳研究进展. *力学进展*, 2006, 36: 200–210]
- Huang Z M, Zhang H S. Current status and future trend of researches on the strength of fiber-reinforced composites (in Chinese). *Adv Mech*, 2007, 37: 80–98 [黄争鸣, 张华山. 纤维增强复合材料强度理论的研究现状与发展趋势. *力学进展*, 2007, 37: 80–98]
- Zheng X X, Zheng X T, Gou L H. The research progress on multiscale method for the mechanical analysis of composites (in Chinese). *Adv Mech*, 2010, 40: 41–56 [郑晓霞, 郑锡涛, 龚林虎. 多尺度方法在复合材料力学分析中的研究进展. *力学进展*, 2010, 40: 41–56]
- Cui T N, Qin Q H. Ballistic performance of lightweight cellular sandwich structures: A review (in Chinese). *Adv Mech*, 2023, 53: 395–432 [崔天宁, 秦庆华. 轻质多孔夹芯结构的弹道侵彻行为研究进展. *力学进展*, 2023, 53: 395–432]

- 10 He Y, Yang Y S, He Y, et al. Recent progress in impact-induced reaction mechanisms of reactive alloys (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 1211–1222 [何勇, 杨岩松, 何源, 等. 反应合金材料冲击释能机理研究进展. *科学通报*, 2024, 69: 1211–1222]
- 11 Wei X, de Vaucorbeil A, Tran P, et al. A new rate-dependent unidirectional composite model—Application to panels subjected to underwater blast. *J Mech Phys Solids*, 2013, 61: 1305–1318
- 12 Wei X, Tran P, de Vaucorbeil A, et al. Three-dimensional numerical modeling of composite panels subjected to underwater blast. *J Mech Phys Solids*, 2013, 61: 1319–1336
- 13 Espinosa H D, Dwivedi S, Lu H C. Modeling impact induced delamination of woven fiber reinforced composites with contact/cohesive laws. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2000, 183: 259–290
- 14 Xu Z Y, Zhang R J. The overall elastic-viscoplastic response of fiber-reinforced composite material (in Chinese). *Acta Mech Solida Sin*, 2002, 23: 335–339 [许震宇, 张若京. 单向纤维加强复合材料的总体弹粘塑性响应. *固体力学学报*, 2002, 23: 335–339]
- 15 Li Y, Luo Y. Mechanical properties and applications of natural fiber reinforced composites (in Chinese). *Acta Mech Solida Sin*, 2010, 31: 613–630 [李岩, 罗业. 天然纤维增强复合材料力学性能及其应用. *固体力学学报*, 2010, 31: 613–630]
- 16 Li Y, Zhong J, Fu K. Low-velocity impact and compression-after-impact behaviour of flax fibre-reinforced composites. *Acta Mech Solid Sin*, 2020, 33: 431–448
- 17 Sun Z, Song Z, Song J, et al. Structural optimization of fiber-reinforced material based on moving morphable components (MMCs). *Acta Mech Solid Sin*, 2022, 35: 632–646
- 18 Czech K, Oliwa R, Krajewski D, et al. Hybrid polymer composites used in the arms industry: A review. *Materials*, 2021, 14: 3047
- 19 Abrate S. Impact on laminated composite materials. *Appl Mech Rev*, 1991, 44: 155–190
- 20 Mert Y, Ahmet A, Mehmet Ş, et al. Ballistic performance of Kevlar49/UHMW-PEHB26 hybrid layered-composite. *Int J Eng Res Dev*, 2015, 7: 21–27
- 21 Zee R H, Hsieh C Y. Energy absorption processes in fibrous composites. *Mater Sci Eng A*, 1998, 246: 161–168
- 22 Zhang Y D, Wang Y L, Huang Y, et al. Preparation and properties of three-dimensional braided UHMWPE fiber reinforced PMMA composites. *J Reinf Plast Compos*, 2006, 25: 1601–1609
- 23 Tan V B C, Tay T E, Teo W K. Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. *Int J Solids Struct*, 2005, 42: 1561–1576
- 24 Dong Z, Sun C T. Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2009, 40: 1863–1869
- 25 Karahan M, Ulcay Y, Eren R, et al. Investigation into the tensile properties of stitched and unstitched woven aramid/vinyl ester composites. *Textile Res J*, 2009, 80: 880–891
- 26 Cantwell W J, Morton J. Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic. *Compos Sci Technol*, 1990, 38: 119–141
- 27 Lee B L, Song J W, Ward J E. Failure of Spectra® polyethylene fiber-reinforced composites under ballistic impact loading. *J Compos Mater*, 1994, 28: 1202–1226
- 28 Parga-Landa B, Hernández-Olivares F. An analytical model to predict impact behaviour of soft armours. *Int J Impact Eng*, 1995, 16: 455–466
- 29 Sun C T, Potti S V. A simple model to predict residual velocities of thick composite laminates subjected to high velocity impact. *Int J Impact Eng*, 1996, 18: 339–353
- 30 Goldsmith W, Dharan C K H, Chang H. Quasi-static and ballistic perforation of carbon fiber laminates. *Int J Solids Struct*, 1995, 32: 89–103
- 31 Potti S V, Sun C T. Prediction of impact induced penetration and delamination in thick composite laminates. *Int J Impact Eng*, 1997, 19: 31–48
- 32 Chocron Benloulo I S, Sánchez-Gálvez V. A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors. *Int J Impact Eng*, 1998, 21: 461–471
- 33 Jenq S T, Kuo J T, Sheu L T. Ballistic impact response of 3-D four-step braided glass/epoxy composites. *Key Eng Mater*, 1997, 141-143: 349–366
- 34 Cunniff P M. A semiempirical model for the ballistic impact performance of textile-based personnel armor. *Textile Res J*, 1996, 66: 45–58
- 35 Phoenix S L, Porwal P K. A new membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems. *Int J Solids Struct*, 2003, 40: 6723–6765
- 36 Wen H M. Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes. *Compos Struct*, 2000, 49: 321–329
- 37 Wen H M. Penetration and perforation of thick FRP laminates. *Compos Sci Technol*, 2001, 61: 1163–1172
- 38 He T, Wen H M, Qin Y. Penetration and perforation of FRP laminates struck transversely by conical-nosed projectiles. *Compos Struct*, 2007, 81: 243–252
- 39 Reddy T Y, Wen H M, Reid S R, et al. Penetration and perforation of composite sandwich panels by hemispherical and conical projectiles. *J Press Vessel Technol-Trans ASME*, 1998, 120: 186–194
- 40 Wen H M, Reddy T Y, Reid S R, et al. Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading. *Key Eng Mater*, 1997, 141-143: 501–552
- 41 Wu Q G, Wen H M, Qin Y, et al. Perforation of FRP laminates under impact by flat-nosed projectiles. *Compos Part B-Eng*, 2012, 43: 221–227

- 42 Gellert E P, Cimpoeru S J, Woodward R L. A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites. *Int J Impact Eng*, 2000, 24: 445–456
- 43 Du Z H, Zhao G Z, Wang X M, et al. Engineering analysis model of bullet-proof property of composite laminates (in Chinese). *Ordn Mater Sci Eng*, 2002, 25: 8–10 [杜忠华, 赵国志, 王晓鸣, 等. 复合材料层合板抗弹性的工程分析模型. *兵器材料科学与工程*, 2002, 25: 8–10]
- 44 Morye S S, Hine P J, Duckett R A, et al. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 2631–2642
- 45 García-Castillo S K, Sánchez-Sáez S, López-Puente J, et al. Impact behaviour of preloaded glass/polyester woven plates. *Compos Sci Technol*, 2009, 69: 711–717
- 46 Naik N K, Shrirao P, Reddy B C K. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *Int J Impact Eng*, 2006, 32: 1521–1552
- 47 Naik N K, Shrirao P. Composite structures under ballistic impact. *Compos Struct*, 2004, 66: 579–590
- 48 Roylance D, Wilde A, Tocci G. Ballistic impact of textile structures. *Textile Res J*, 1973, 43: 34–41
- 49 Smith J C, McCrackin F L, Schiefer H F. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading. *Textile Res J*, 1958, 28: 288–302
- 50 Bresciani L M, Manes A, Giglio M. An analytical model for ballistic impacts against plain-woven fabrics with a polymeric matrix. *Int J Impact Eng*, 2015, 78: 138–149
- 51 Nguyen L H, Ryan S, Cimpoeru S J, et al. The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite. *Int J Impact Eng*, 2015, 75: 174–183
- 52 Langston T. An analytical model for the ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene composites. *Compos Struct*, 2017, 179: 245–257
- 53 Li J T, Liu M B. An analytical model to predict the impact of a bullet on ultra-high molecular weight polyethylene composite laminates. *Compos Struct*, 2022, 282: 115064
- 54 Li Y, Li F, Qu Y, et al. The ballistic performance of composites reinforced by continuous basalt fiber. *Eng Plast Appl*, 2011, 39: 26–28
- 55 Yand X, Chen X. Research on anti-bullet properties of continuous basalt fiber reinforced composites. *Fiber Reinf Plast/Compos*, 2008, 3: 27–29
- 56 Liu G, Yang D, Mei S. Study on the optimal resin content of high strength bulletproof glass fiber reinforced plastics. *Fiber Reinf Plast/Compos*, 2001, 2: 13–15
- 57 Cong C, Liu J, Yu Z, et al. Trans-scale dynamic shear-lag model for the impact performance of fiber-reinforced composites. *Compos Struct*, 2024, 327: 117688
- 58 Karthikeyan K, Russell B P, Fleck N A, et al. The soft impact response of composite laminate beams. *Int J Impact Eng*, 2013, 60: 24–36
- 59 Karthikeyan K, Russell B P, Fleck N A, et al. The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates. *Eur J Mech-A Solids*, 2013, 42: 35–53
- 60 Liu J, Zhu W, Yu Z, et al. Dynamic shear-lag model for understanding the role of matrix in energy dissipation in fiber-reinforced composites. *Acta Biomater*, 2018, 74: 270–279
- 61 Zhu W, Liu J, Wei X. A multiscale model for the prediction of ballistic performance of fiber-reinforced composites. *Int J Impact Eng*, 2021, 154: 103889
- 62 Shaktivesh , Nair N S, Sesha Kumar C V, et al. Ballistic impact performance of composite targets. *Mater Des*, 2013, 51: 833–846
- 63 Shanazari H, Liaghat G H, Hadavinia H, et al. Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/woven composite panels. *J Thermoplast Compos Mater*, 2015, 30: 545–563
- 64 Sánchez-Gálvez V, Paradelo L S, Gálvez F. Analytical simulation of high-speed impact onto hybrid glass/carbon epoxy composites targets. *Procedia Eng*, 2014, 88: 101–108
- 65 Velmurugan R, Naresh K, Shankar K. Influence of fibre orientation and thickness on the response of CFRP composites subjected to high velocity impact loading. *Adv Mater Process Technol*, 2018, 4: 120–131
- 66 Sikarwar R S, Velmurugan R, Gupta N K. Influence of fiber orientation and thickness on the response of glass/epoxy composites subjected to impact loading. *Compos Part B-Eng*, 2014, 60: 627–636
- 67 Sikarwar R S, Velmurugan R. Impact damage assessment of carbon fiber reinforced composite with different stacking sequence. *J Compos Mater*, 2019, 54: 193–203
- 68 Porwal P K, Phoenix S L. Modeling system effects in ballistic impact into multi-layered fibrous materials for soft body armor. *Int J Fract*, 2005, 135: 217–249
- 69 Mamivand M, Liaghat G H. A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets. *Int J Impact Eng*, 2010, 37: 806–812
- 70 Ha-Minh C, Imad A, Boussu F, et al. On analytical modelling to predict of the ballistic impact behaviour of textile multi-layer woven fabric. *Compos Struct*, 2013, 99: 462–476
- 71 Yu B, Karthikeyan K, Deshpande V S, et al. Perforation resistance of CFRP beams to quasi-static and ballistic loading: The role of matrix strength. *Int J Impact Eng*, 2017, 108: 389–401

- 72 de Ruijter C, van der Zwaag S, Stolze R, et al. Liquid crystalline matrix polymers for aramid ballistic composites. *Polym Compos*, 2009, 31: 612–619
- 73 Balaganesan G, Velmurugan R, Srinivasan M, et al. Energy absorption and ballistic limit of nanocomposite laminates subjected to impact loading. *Int J Impact Eng*, 2014, 74: 57–66
- 74 Hamouda A M S, Hashmi M S J. Modelling the impact and penetration events of modern engineering materials: Characteristics of computer codes and material models. *J Mater Process Technol*, 1996, 56: 847–862
- 75 Fan Z Z, Wen S W, Zhang P, et al. Research progress on constitutive models for fiber reinforced composites (in Chinese). *Mater Rep*, 2018, 32: 560–564 [樊卓志, 温树文, 张鹏, 等. 纤维增强复合材料本构模型研究进展. 材料导报, 2018, 32: 560–564]
- 76 Cheng W L, Langlie S, Itoh S. High velocity impact of thick composites. *Int J Impact Eng*, 2003, 29: 167–184
- 77 Nandlall D, Williams K, Vaziri R. Numerical simulation of the ballistic response of GRP plates. *Compos Sci Technol*, 1998, 58: 1463–1469
- 78 Rajaneesh A, Ponthot J P, Bruyneel M. High velocity impact response of composite laminates using modified meso-scale damage models. *Int J Impact Eng*, 2021, 147: 103701
- 79 Ladevèze P. A damage computational method for composite structures. *Comput Struct*, 1992, 44: 79–87
- 80 Zhikharev M V, Sapozhnikov S B. Two-scale modeling of high-velocity fragment GFRP penetration for assessment of ballistic limit. *Int J Impact Eng*, 2017, 101: 42–48
- 81 Ma D, Wang Z, Giglio M, et al. Influence of strain-rate related parameters on the simulation of ballistic impact in woven composites. *Compos Struct*, 2022, 300: 116142
- 82 Gaur B, Patel M, Patel S. Strain rate effect on CRALL under high-velocity impact by different projectiles. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2023, 45: 103
- 83 Ma D, Manes A, Amico S C, et al. Ballistic strain-rate-dependent material modelling of glass-fibre woven composite based on the prediction of a meso-heterogeneous approach. *Compos Struct*, 2019, 216: 187–200
- 84 Grujicic M, Pandurangan B, Snipes J S, et al. Multi-length scale-enriched continuum-level material model for Kevlar®-fiber-reinforced polymer-matrix composites. *J Mater Eng Perform*, 2013, 22: 681–695
- 85 Karkkainen R L. Dynamic micromechanical modeling of textile composite strength under impact and multi-axial loading. *Compos Part B-Eng*, 2015, 83: 27–35
- 86 Gerlach R, Siviour C R, Wiegand J, et al. In-plane and through-thickness properties, failure modes, damage and delamination in 3D woven carbon fibre composites subjected to impact loading. *Compos Sci Technol*, 2012, 72: 397–411
- 87 Zhang F, Liu K, Wan Y, et al. Experimental and numerical analyses of the mechanical behaviors of three-dimensional orthogonal woven composites under compressive loadings with different strain rates. *Int J Damage Mech*, 2014, 23: 636–660
- 88 Boey Y K, Kwon Y W. Progressive damage and failure strength of notched woven fabric composites under axial loading with varying strain rates. *Compos Struct*, 2013, 96: 824–832
- 89 Hou Y, Hu H, Sun B, et al. Strain rate effects on tensile failure of 3-D angle-interlock woven carbon fabric. *Mater Des*, 2013, 46: 857–866
- 90 Gama B A, Gillespie Jr J W. Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites. *Int J Impact Eng*, 2011, 38: 181–197
- 91 Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Eng Fract Mech*, 1983, 21: 541–548
- 92 Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng Fract Mech*, 1985, 21: 31–48
- 93 Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. *J Appl Phys*, 1987, 61: 1816–1825
- 94 Baranowski P, Kucewicz M, Janiszewski J. JH-2 constitutive model of sandstone for dynamic problems. *Sci Rep*, 2024, 14: 3339
- 95 Silva M A G, Cismaşiu C, Chiorean C G. Numerical simulation of ballistic impact on composite laminates. *Int J Impact Eng*, 2005, 31: 289–306
- 96 Wang Y C, He H, Zeng S Y. Numerical simulation of anti-resilience for Kevlar fiber laminate (in Chinese). *J Sichuan Ordn*, 2011, 32: 17–20 [王云聪, 何煌, 曾首义. Kevlar纤维层合板抗弹性能的数值模拟. 四川兵工学报, 2011, 32: 17–20]
- 97 Nunes S G, Scazzosi R, Manes A, et al. Influence of projectile and thickness on the ballistic behavior of aramid composites: Experimental and numerical study. *Int J Impact Eng*, 2019, 132: 103307
- 98 Sevkate E. Experimental and numerical approaches for estimating ballistic limit velocities of woven composite beams. *Int J Impact Eng*, 2012, 45: 16–27
- 99 Karthick P, Ramajeyathilagam K. Numerical study on ballistic impact behavior of hybrid composites. *Mater Today-Proc*, 2022, 59: 995–1003
- 100 Bandaru A K, Vetiyatil L, Ahmad S. The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors. *Compos Part B-Eng*, 2015, 76: 300–319

- 101 Stephen C, Behara S R, Shivamurthy B, et al. Finite element study on the influence of fiber orientation on the high velocity impact behavior of fiber reinforced polymer composites. [Int J Interact Manuf](#), 2022, 16: 459–468
- 102 Kumar S, Durga Shankar Gupta S, Singh I, et al. Behavior of Kevlar/epoxy composite plates under ballistic impact. [J Reinforced Plasts Compos](#), 2009, 29: 2048–2064
- 103 Zhikharev M V, Kudryavtsev O A, Pavlovskaya M S. Experimental and numerical study of the behavior of a glass fiber reinforced plastic plate under oblique impact. [J Compos Mater](#), 2020, 55: 1167–1178
- 104 Rodríguez Millán M, Moreno C E, Marco M, et al. Numerical analysis of the ballistic behaviour of Kevlar® composite under impact of double-nosed stepped cylindrical projectiles. [J Reinf Plast Compos](#), 2015, 35: 124–137
- 105 Mousavi M V, Khoramishad H. The effect of hybridization on high-velocity impact response of carbon fiber-reinforced polymer composites using finite element modeling, Taguchi method and artificial neural network. [Aerosp Sci Technol](#), 2019, 94: 105393
- 106 Artero-Guerrero J A, Pernas-Sánchez J, Martín-Montal J, et al. The influence of laminate stacking sequence on ballistic limit using a combined Experimental/FEM/Artificial Neural Networks (ANN) methodology. [Compos Struct](#), 2018, 183: 299–308
- 107 Giannaros E, Kotzakolios A, Kostopoulos V, et al. Hypervelocity impact response of CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics method: Implementation and validation. [Int J Impact Eng](#), 2019, 123: 56–69

Summary for “纤维增强复合材料弹道极限速度理论与数值模型研究进展”

Advances in analytical and numerical models for ballistic limits of fiber-reinforced composites

Chaonan Cong¹, Wenqing Zhu², Junjie Liu³ & Xiaoding Wei^{2*}

¹ Department of Applied Mechanics, College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

² State Key Laboratory for Turbulence and Complex System, Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

³ Department of Mechanics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

* Corresponding author, E-mail: xdwei@pku.edu.cn

In recent years, fiber-reinforced polymer (FRP) composites have become increasingly popular in protective design and engineering due to their low specific gravity, high specific strength and stiffness, and exceptional impact resistance. A comprehensive understanding of the energy absorption of the FRP composites during the impact and penetration and precise prediction of the ballistic threshold would provide helpful guidance for the construction of sophisticated bulletproof composites. The main characteristics of impact and penetration of the FRP composites are high loading intensity and short action time. High stress is distributed over the contact area of the projectile and FRP composite target during the impact and penetration process, leading to the plastic deformation and failure of the target. The impact and penetration of the FRP composites are complex dynamic processes, in which the deformation and failure modes of composite targets are influenced by various internal and external factors. The ballistic response of the FRP composites subjected to a ballistic impact mostly depends on a combination of internal and external factors in a synchronous manner. Therefore, accurately forecasting the ballistic limits of FRP composites is challenging. This challenge poses a substantial obstacle to the development of advanced bulletproof composites. This paper reviews the analytical and numerical models for the ballistic limit prediction for FRP composites and summarizes the associated energy absorption mechanisms, expecting to provide a reference for the modeling of the ballistic limits of FRP composites and the design of bulletproof composites. Besides, the effects of target component characteristic, target structure, and projectile characteristic are discussed. The early research on the ballistic limits of FRP composites was mainly focused on proposing semi-empirical models. The semi-empirical models can provide simple and highly applicable formulas for predicting the ballistic limit of FRP composites. However, the accuracy of the obtained formulas depends on the completeness of the collected data. Since the early 2000s, researchers established energy analysis models for high-speed impact problems by analyzing various energy-absorbing mechanisms of FRP composites during the ballistic impact, thereafter, analytical research on the ballistic limits of FRP composites rapidly grew. Further efforts are needed to develop theoretical analysis models that include more comprehensive energy-absorbing mechanisms. Also, most theoretical research focuses on exploring the effects of target characteristics, while there is limited research on the effects of external factors. The finite element method is currently the mainstream numerical method for the ballistic performance of FRP composite. In addition, several researchers are committed to developing novel methods, such as the combined finite element method/artificial neural networks methodology and meshless methods for predicting the ballistic limit of FRP composites. The development of these novel methods for accurately predicting the ballistic limit of FRP composites is one of the most important directions in the future.

fiber-reinforced composites, ballistic limit, energy absorption, impact, penetration

doi: [10.1360/TB-2024-0399](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0399)