



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目： 复合材料低速冲击行为的研究现状
作者： 成正强，夏杰，刘文浩，吴健莹，戴昕爻，钟怡郅，刘虎，康国政
收稿日期： 2025-12-04
网络首发日期： 2026-06-16
引用格式： 成正强，夏杰，刘文浩，吴健莹，戴昕爻，钟怡郅，刘虎，康国政. 复合材料低速冲击行为的研究现状[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20260616.1426.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25120007

复合材料低速冲击行为的研究现状

成正强, 夏杰, 刘文浩, 吴健莹, 戴昕爻, 钟怡郅, 刘虎, 康国政*

(西南交通大学 力学与航空航天学院 先进结构材料力学行为与服役安全四川省重点实验室, 四川成都 610031)

摘要: 纤维增强复合材料在低速冲击载荷下的损伤行为及性能预测备受航空航天领域关注。本文综述了复合材料低速冲击的实验、理论建模、数值模拟和基于机器学习建模等方面的研究进展。围绕单因素和多因素耦合作用, 总结了层合板在低速冲击下的损伤机理与演化特征, 阐明了典型失效模式及其耦合机制。结合单次与多次冲击工况, 归纳了数值模拟在应变率效应、分层、内部损伤演化及多尺度分析策略方面的研究进展。理论建模方面, 分析了能量平衡模型与弹簧质量模型在冲击响应与损伤预测中的应用和拓展。此外, 总结了机器学习方法在冲击损伤识别、参数优化与性能预测中的应用。未来研究需加强高保真试验数据库构建, 发展多物理场耦合模型, 引入物理信息机器学习方法, 推动实验、理论、仿真与智能建模的深度融合, 实现复合材料低速冲击行为从机理认知到预测控制的跨越式发展。

关键词: 复合材料; 低速冲击; 损伤机理; 多尺度建模; 机器学习

中图分类号: V258..3 **文献标志码:** A

A state of the art review on low-velocity impact behaviors of fiber-reinforced polymer composites

CHENG Zhengqiang, XIA Jie, LIU Wenhao, WU Jianying, DAI Xinyao, ZHONG Yizhi, LIU Hu, KANG Guozheng*

(Advanced Structural Materials Mechanical Behavior and Service Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The damage behavior and performance prediction of fiber-reinforced composite materials under low-velocity impact have attracted considerable attention in the aerospace field. This paper reviewed the research progress in low-velocity impact studies of composites, covering experimental investigations, theoretical modeling, numerical simulation, and machine learning-based modeling approaches. Focusing on single-factor and multi-factor coupling effects, the review summarized the damage mechanisms and evolution characteristics of composite laminates under low-velocity impact, and clarifies typical failure modes and their coupling mechanisms. By integrating single and repeated impact scenarios, it outlined the advancements in numerical simulation concerning strain-rate effects, delamination, internal damage evolution, and multi-scale analysis strategies. In the realm of theoretical modeling, the applications and extensions of energy-balance models and spring-mass models in impact response and damage prediction were analyzed. Additionally, the applications of machine learning methods in impact damage identification, parameter optimization, and performance prediction were summarized. Future research should prioritize the construction of high-fidelity experimental databases, the development of multi-physics coupled models, the integration of physics-informed machine learning methods, and the promotion of deep integration among experimental, theoretical, simulation, and intelligent modeling approaches, to achieve a leap-forward development in the low-velocity impact behavior of composite materials from mechanistic cognition to predictive control.

Keywords: composite materials; low-velocity impact; damage mechanism; multi-scale modeling; machine learning.

收稿日期: 2025-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12502399, 12393782); 四川省自然科学基金资助项目 (2024NSFSC1332)

第一作者: 成正强 (1994—), 男, 四川南充人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: zhengqiangcheng@swjtu.edu.cn

***通信作者:** 康国政 (1969—), 男, 贵州遵义人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: guozhengkang@swjtu.edu.cn

引用格式: 成正强, 夏杰, 刘文浩, 等. 复合材料低速冲击行为研究现状[J]. 国防科技大学学报

Citation: Cheng Zhengqiang, Xia Jie, Liu Wenhao, et al. A state of the art review on low-velocity impact behaviors of fiber-reinforced polymer composites[J]. Journal of National University of Defense Technology

纤维增强聚合物复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 凭借其轻质高强、耐腐蚀和优异的疲劳性能, 已在航空航天、轨道交通和风电行业等领域中得到广泛应用, 并在结构轻量化与性能提升方面发挥了重要作用^[1]。其中, 碳纤维增强复合材料作为最具代表性的复合材料体系之一, 已成为现代飞行器机身蒙皮、机翼壁板以及尾翼等承力结构的核心材料^[1]。然而, 在复杂服役环境和外部载荷作用下, 复合材料结构仍然面临诸多失效风险, 其中冲击引发的损伤问题尤为突出^[2-6]。

高速冲击 (冲击速度大于 10 m/s) 一般导致复合材料结构发生穿透、冲塞及大面积破碎等损伤。目前主要借助气枪/轻气炮^[7]与霍普金森杆^[8]等实验设备研究其弹道极限、极限承载能力、能量吸收能力等。复合材料结构发生高速冲击损伤后需要立即检修, 其对长期服役安全性影响较大。低速冲击 (low-velocity impact, LVI) 通常指冲击速度低于 10 m/s 的外部载荷工况, 如工具跌落、跑道异物冲击或地面装配碰撞等。这类载荷虽不足以导致构件瞬时断裂, 但极易在复合材料内部诱发隐性损伤, 包括基体开裂、纤维/基体界面脱黏及层间分层等。这类损伤通常使得复合材料表现出“外观完好、内部受损”的典型特征, 难以通过常规目视检测手段发现, 且这类隐性损伤会显著削弱复合材料的承载能力, 对结构的长期服役安全构成重大威胁^[9]。与高速冲击引起穿透性损伤不同, 低速冲击因其高频发生性、隐蔽性与渐进损伤特性, 成为影响复合材料结构损伤容限与剩余强度的关键因素。

已有研究表明, 复合材料在低速冲击作用下的损伤演化机理复杂, 涉及多尺度的非线性响应、大变形效应及多损伤模式的协同作用^[10]。在冲击载荷循环或多次冲击工况下, 复合材料还会发生累积损伤造成力学性能劣化, 使得其低速冲击损伤容限问题更加复杂。如何准确表征复合材料在低速冲击下的损伤起始与扩展规律, 揭示其能量吸收与耗散机制, 进而建立可靠的损伤预测模型, 是当前该领域亟待解决的科学难题, 也是工程应用中的瓶颈问题。

为了深入认识 LVI 作用下复合材料的损伤机理并提升结构抗冲击设计水平, 传统研究主要依赖实验测试、数值模拟与理论模型三类方法。实验方面, 广泛采用落锤冲击试验研究冲击接触力、位移及损伤形态, ASTM D7136 标准^[11]的建立为该类型实验提供了统一规范。在数值模拟层面, 有限元方法凭借其在多尺度损伤建模与能量耗散分

析中的优势, 广泛用于预测复合材料的低速冲击行为分析^[12]。此外, 理论模型方法通过引入简化假设, 对冲击动力学响应进行理论建模, 能够有效预测复合材料损伤起始阈值和载荷-位移关系, 在一定程度上弥补了实验与数值方法的不足^[13]。总体而言, 实验、数值与理论方法的结合构成了复合材料低速冲击研究的传统框架, 为损伤机理揭示与结构安全评估提供了坚实的基础。

随着实验监测手段与数值模拟的不断发展, 复合材料低速冲击研究逐渐积累了海量试验数据与仿真结果, 这为机器学习等数据驱动方法的引入提供了可能。与传统的机理模型相比, 基于数据驱动方法能够在复杂多尺度损伤机理难以完全解析的情况下, 利用已有数据挖掘潜在的损伤模式、建立高效的预测模型, 并为复合材料及其结构的损伤容限设计提供新的解决思路。因此, 结合实验、数值模拟、理论模型与机器学习的多元化研究范式, 正在成为复合材料低速冲击研究的重要发展方向。

鉴于复合材料低速冲击损伤问题的复杂性与重要性, 国内外学者已从实验研究、数值模拟、理论建模与基于机器学习建模等方面开展了大量工作, 并取得了诸多有意义的成果。本文将针对复合材料在低速冲击作用下的损伤机理与性能演化进行综述, 重点总结现有研究成果与发展趋势, 并在此基础上对未来研究方向进行展望。

1 复合材料低速冲击实验研究

本节聚焦于复合材料低速冲击实验研究。近年来, 国内外学者采用落锤冲击实验机 (如图 1^[14]所示), 依据 ASTM D7136 标准^[11]开展实验, 系统探究了复合材料在低速冲击下的力学行为。重点关注了环境温度、冲击头形状和尺寸、冲击角度、能量水平、冲击次数、铺层顺序、层合板几何尺寸、边界条件以及多因素耦合作用对复合材料低速冲击响应与损伤机制的影响。

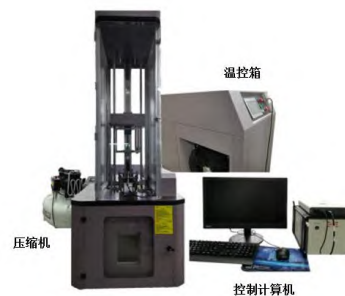
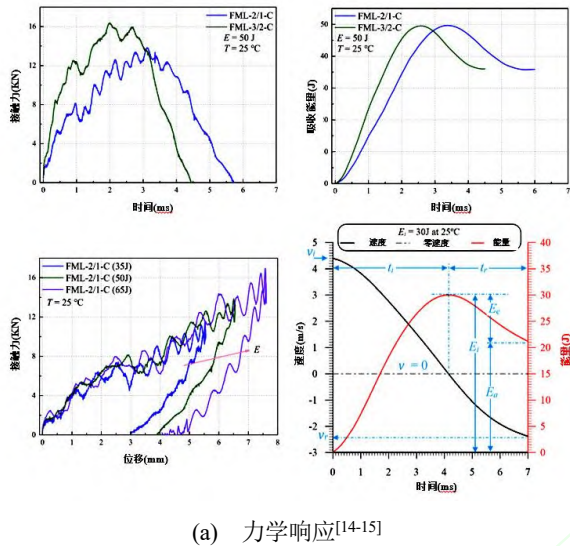


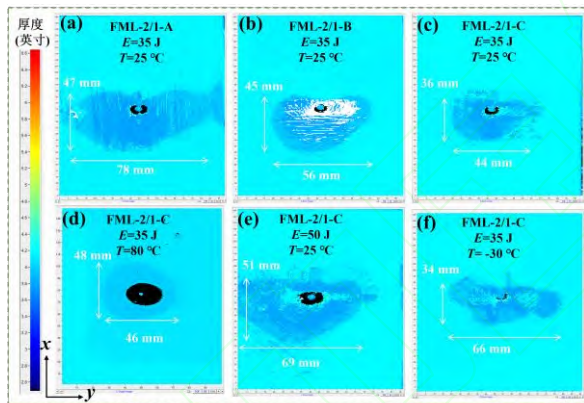
图1 落锤实验机^[14]

Fig.1 Drop-weight impact testing machine^[14]

图 2^[14-15]总结了复合材料层板在低速冲击下的力学响应规律、损伤演化机制及破坏特征。这些研究^[14-15]不仅加深了对复合材料低速冲击损伤机理的理解，也为低速冲击数值模型的建立提供了重要支撑，同时为后续的理论研究与基于机器学习的方法奠定了坚实的基础。



(a) 力学响应^[14-15]



(b) 超声 C 扫描损伤^[14]

图 2 低速冲击力学响应与超声 C 扫描损伤^[14-15]

Fig.2 Low-velocity impact mechanical responses and ultrasound C-scan damage^[14-15]

1.1 环境温度

环境温度对复合材料的低速冲击损伤模式、能量吸收能力以及剩余承载性能具有显著影响。在低温或高温环境下，基体性能和纤维/基体界面特性发生变化，从而改变损伤的起始与扩展机制。研究表明^[14-16]：高温（50~100 °C）下基体软化，导致复合材料抗冲击能力下降，损伤主要表现为纤维断裂及塑性变形；在低温（-25~-55 °C）下树脂脆性增强，更易出现基体裂纹和分层损伤，且损伤扩展呈随机性和不可预测性^[14-17]。此外，温

度升高通常会引引起损伤尺寸、周长及面积增加，同时凹坑深度加大，背面纤维断裂数量增多，整体抗冲击性能下降^[15,17-19]。在-20~80 °C条件下，分层面积随温度升高减小，而永久凹坑深度增加，损伤形态由圆锥形逐渐向圆柱形转变^[19]。对于纤维金属层板，高温下阈值力显著降低，而低温下基体裂纹和分层更为严重^[14]。康少付等^[20]的研究进一步表明：在-100 °C、-45 °C和 20 °C条件下，层间改性玻璃纤维/环氧乙烯基酯复合材料的损伤面积随温度降低而增大，其低温环境下的冲击性能受纤维/层间增韧结合程度、层间残余热应力及基体脆化效应的影响显著，导致抗冲击能力和损伤容限下降。

文献^[14-16,20]已明确指出环境温度对复合材料的低速冲击损伤机理产生显著影响。然而，当前的研究大多是通过损伤结果来逆向推导不同环境温度条件下的冲击损伤机制，对于冲击过程中实时损伤的监测存在明显不足。鉴于此，未来有必要进一步提升在环境温度条件下开展低速冲击实验研究的能力，从而深入探究不同环境温度下复合材料低速冲击的失效机理。

1.2 冲击头形状和尺寸

冲击头的形状和尺寸直接影响复合材料在低速冲击下的损伤模式和能量吸收机制（见图 3^[21-22]）。研究表明^[21,23]：在相同冲击能量下，小直径或锐利冲击头由于接触面积小，在复合材料层板试样的正面形成明显凹坑，并在背面诱发纤维断裂甚至“十字形穿孔”，对于夹芯层合板，还会出现大范围芯材压溃；大直径或钝冲击头则表现为更分散的载荷分布，复合材料层板正面凹坑较浅，背面损伤轻微，整体破坏程度降低。此外，冲击头形状对裂纹扩展路径和损伤形态起决定性作用，半球形冲击头冲击时，裂纹多从复合材料层板正面冲击点向四周扩展，背面裂纹则与纤维铺层方向一致；锐利冲击头冲击时，正面损伤形态与冲击头几何形状相似，背面裂纹沿纤维方向扩展^[24]。在力学响应方面，平端冲击头表现出更短的接触时间和更高的最大载荷，而半球形冲击头导致更大的位移^[25]。不同几何形状冲击头还会影响损伤分布，例如：直刃冲击头在正面诱发明显裂纹，而球形冲击头则产生较深凹坑但背面损伤有限；圆柱形冲击头则主要在正面形成圆形凹坑^[22]。小直径或锐利冲击头倾向于诱发更严重的局部损伤和破坏，而大直径或钝冲击头则更多表现为局部凹坑和有限范围损伤。此外，不同材质的

冲击头同样对层合板有显著影响^[26]：刚性冲击头在较低冲击载荷下即可引起层合板严重分层和显著变形；橡胶冲击头即使在高冲击载荷下也未对复合材料层合板造成损伤。



图3 冲击头形状和尺寸^[21-22]

Fig.3 Shape and size of the impactor^[21-22]

已有研究^[21-26]证实冲击头的几何构型、尺寸参数及材质特性对复合材料低速冲击损伤模式及能量吸收机制有显著调控作用。鉴于此，为提升实验结果在工程实际场景中的适用性与可靠性，如何选择冲击头特征参数以精准模拟真实工况下的冲击事件，将成为后续研究中需重点突破的关键技术问题。

1.3 冲击角度

随着冲击角度的变化，损伤形态和能量吸收特性均表现出明显差异（见图 4^[27-28]）。研究表明^[27]：玻璃纤维层合板在不同角度下均呈现类似圆形的凹坑，且凹坑深度随冲击角度减小而降低；在大角度冲击下，损伤区伴随发散裂纹，而在 40° 时，表面裂纹几乎消失，仅保留圆形损伤区。在夹层蜂窝结构中，斜向冲击（45°）导致的峰值载荷和能量吸收均高于垂直冲击（90°），且位移持续时间更长^[29]。对于碳纤维与玻璃纤维层合板，峰值能量吸收随冲击角增大而降低；在相同角度下，玻璃纤维层合板吸收的能量更高，其损伤形态表现为典型的十字形，而碳纤维层合板则更接近冲击头几何形状^[30]。此外，二维与三维机织复合材料在不同角度冲击下的结果表明^[28]：正面损伤面积随冲击角度增大而增加，而背面损伤面积则相应减小，这主要与冲击头接触面积的增加有关。



(a) 冲击角度 60° , 70° 和 80° ^[27]



(b) 冲击角度 0°, 10° 和 20°^[28]

图4 冲击角度^[27-28]

Fig.4 Impact angle^[27-28]

过去的研究工作^[27-30]已证实冲击角度对复合材料层合板及夹层结构在低速冲击过程中的损伤形态与能量吸收特性有重要影响。尽管当前研究已针对不同材料体系在固定冲击角度下的低速冲击行为开展了系统性分析，但现有实验设计中冲击角度被预设为固定参数，而真实服役环境中上述参数往往呈现显著的随机性特征（如多角度随机冲击）。这种实验条件与实际工况的差异，导致现有研究难以全面揭示复合材料在复杂随机冲击载荷条件下的力学响应特征、损伤演化规律及失效机制，进而限制了实验结论在工程实践中的适用性。

1.4 冲击能量

冲击能量是影响复合材料损伤模式和损伤程度的主要因素。在低能量冲击下，通常仅在冲击点附近形成局部凹坑或轻微基体裂纹，损伤范围有限，残余挠度几乎为零，能量吸收能力变化不大^[23,31-33]。随着能量升至中等水平，基体开裂、分层及局部纤维断裂逐渐出现，裂纹沿冲击点径向扩展，范围随能量增加而扩大，此时残余挠度开始增大，能量吸收能力明显提升^[23,31-34]。在高能量冲击下，损伤显著加剧，表现为大面积分层和纤维断裂，甚至导致试样完全断裂，其能量吸收趋于上限，且破坏时间明显缩短^[35]。此外，研究表明^[36-37]：不同材料类型和层合结构对能量敏感性存在差异，碳纤维层合板在中低能量出现较为严重的损伤，而玻璃纤维层合板的损伤不明显，其原因是碳纤维比玻璃纤维更脆，在相同的冲击能

量下,更多的碳纤维断裂导致碳纤维层合板出现更严重的损伤。三维编织复合材料的裂纹呈径向扩展,裂纹的数量和尺寸随冲击能量升高而增加^[33]。纤维金属层板在不同能量下正面均出现与冲击头直径相近的凹坑,背面则出现鼓包,并在高能量下产生临界裂纹^[32]。由此可知,低速冲击下复合材料的损伤形式随冲击能量增加而逐渐变化,从局部凹坑与基体裂纹,发展至分层与纤维断裂,最终导致结构完全破坏。在针对不同冲击能量下的实验研究中,相应的损伤检测与表征方法也在不断发展,以准确捕捉并量化复合材料的冲击损伤状态。例如,在检测技术层面,将闪光热成像与超声 C 扫描融合,可实现表面裂纹与内部分层的互补可视化,提升复合材料损伤检测的可解释性与完整性^[38]。基于光纤传感器的监测方法实时获取应变分布,并基于应变相关性构建损伤指数,能够对不同能量冲击下的损伤状态进行有效判别^[39-40]。此外,结合高速成像与三维数字图像相关技术(3D-DIC)的研究有效揭示出复合材料低速冲击损伤的三阶段特征:低能量阶段(≤ 5 J)以不可见损伤为主,中能量阶段(5-25 J)裂纹长度与冲击能量呈线性关系,高能量阶段(>25 J)则进入损伤形态饱和状态^[41]。

现有研究^[23,31-41]已系统揭示冲击能量对复合材料低速冲击损伤模式及损伤程度的影响。尽管这些研究已构建了定性趋势的认知框架,但在量化表征层面仍存在局限,具体表现为对裂纹扩展长度、分层区域面积、凹坑深度变化及能量吸收率等关键参数的系统性量化分析不足。随着原位监测技术(如数字图像相关技术、光纤光栅传感)在冲击实时监测方面的发展与应用,上述局限正逐步得到克服,未来有望推动复合材料低速冲击损伤研究向更精细化、量化、系统化的方向发展。

1.5 冲击次数

在实际服役环境中,复合材料结构往往遭受多次冲击作用,其形式既包括不同位置的多点冲击,也包括同一位置的单点重复冲击。因此,有必要进一步探讨多次冲击下的损伤演化规律与力学响应特征。在多点冲击方面,损伤演化不仅与冲击间距密切相关,还受到冲击能量的协同作用影响。研究表明^[42-43]:当冲击间距较小时,高能量冲击会显著加剧损伤累积和刚度退化,而随着间距增大,冲击区逐渐分离,损伤干扰效应减弱。在较低能量条件下,若两次冲击存在相关性,第

二次冲击的总能量耗散小于第一次,而其位移则大于第一次冲击^[44]。在单点多次冲击方面,初始冲击形成的分层会降低层合板的弯曲刚度,从而降低后续冲击的损伤阈值,导致分层更易扩展、中心位移增大^[45]。随着冲击次数的增加,峰值载荷逐渐下降,而位移与损伤面积不断增加^[46-47]。进一步研究表明^[48]:首次冲击能量在损伤积累过程中起关键作用,若冲击能量较高,层合板在初始冲击或少数几次冲击后即发生穿透;能量中等时,需经历十余次冲击才会导致穿透;而在较低能量下,即使经历上百次冲击,试样也仅在试样表面出现凹坑而无明显开裂。不同类型的材料在多次冲击时,损伤特征和力学响应也存在差异,对于热塑性复合材料,重复低速冲击过程可分为三个阶段:初始鼓起变形阶段、基体塑性饱和后的“伪稳定”阶段,以及累积损伤诱发大面积纤维断裂的结构失效阶段^[49]。此外,复合夹层结构在不同冲击位置间距下的力学响应与层合板具有一致性,复合夹层结构第二次冲击位移大于第一次冲击,在高冲击能量下观察到更严重的损伤^[50]。由此可知,多次冲击的损伤演化规律不仅取决于冲击间距和次数,还受首次冲击能量及材料类型影响,高能量或累积冲击可显著加速损伤发展,降低结构承载能力。

文献^[42-50]已系统阐明多次低速冲击加载下复合材料的损伤累积规律,揭示了冲击间距、冲击次数等参数对力学响应的影响机制。然而,现有实验设计多基于固定冲击位置与能量参数,缺乏对随机冲击位置、多角度冲击及非规则冲击头形状等多变量耦合条件下多次冲击响应的系统量化分析。因此,构建能反映真实工况随机性的多变量耦合冲击实验方法,已成为深化多次冲击损伤机理研究的关键。

1.6 铺层顺序

不同的铺层角度与层合方式会显著改变冲击接触力、能量吸收以及分层损伤特征。研究发现^[51]:以 $0^\circ/90^\circ$ 为中心铺层的层合板通常表现出更高的冲击接触力和优异的抗分层性能,而 $45^\circ/-45^\circ$ 铺层组合则在较高冲击能量下能够吸收更多能量。在 $[0/90]_{4s}$ 与 $[\pm 45]_{4s}$ 层合板的对比中,前者峰值力更高,但能量吸收低于后者,且分层面积更大,这主要归因于弯曲刚度的差异^[52]。进一步研究表明^[53]:弯曲刚度的高低直接决定峰值载荷和位移大小,刚度越高,峰值载荷越大、位移越小。然而,高比例的 0° 铺层易在纤维方向诱发基体裂纹

并加剧分层损伤。铺层顺序的差异还会导致冲击正、背面损伤出现差异。例如,表面存在 0° 层时更易产生明显开裂和凹坑,而 90° 表面铺层则更容易在背面形成细密裂纹^[54]。此外,面板铺层方式对夹芯板的低速冲击性能有显著影响。在引入 $\pm 45^\circ$ 层后,夹芯层合板表现出更高的柔韧性,从而提升了抗冲击能力。在相同冲击能量下,铺层为 $[45/0/-45/90]_s$ 的夹芯板表现出更优的抗冲击性能,其分层面积明显小于 $[0/90]_4$ 铺层结构;而在高能量冲击条件下, $[0/90]_4$ 铺层的损伤面积最大^[55]。这表明铺层顺序不仅影响层合板的低速冲击力学响应和损伤特征,也对夹芯板的力学行为和损伤发展起到重要调控作用。由此可知,复合材料的低速冲击响应对铺层顺序高度敏感,其中 0° 层的比例及其在层合板中的位置是决定损伤模式的关键因素。

已有研究^[51-55]总结了不同铺层角度和层合方式对复合材料低速冲击响应的影响,涵盖了接触力、能量吸收、刚度及分层特征等多个关键指标。然而,其研究多集中于常规的 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 铺层组合,对非传统铺层方式(如螺旋铺层或渐变铺层)的冲击响应尚缺乏系统研究,限制了对复杂铺层体系下损伤机理与抗冲击性能的全面理解。

1.7 层合板几何尺寸

复合材料层合板在低速冲击下的力学响应不仅取决于材料本身性能,还与几何尺寸密切相关。厚度和平面内尺寸会显著影响其承载能力、变形特征及损伤模式。闵伟等^[56]发现:泡沫夹芯层合板随着夹芯层泡沫膨胀倍率增加,峰值载荷降低,峰值位移和吸收能量则随之增加,损伤面积也随冲击能量增加而扩大。对于层合板而言,当冲击能量低于分层阈值时,层合板的厚度显著影响其冲击响应与损伤机理。薄层合板因膜效应作用表现出非线性力-位移关系,并在分层前易发生背面劈裂,而厚层合板则呈线性响应并通过厚度方向剪切裂纹耗散能量;当冲击能量超过分层阈值时,层合板表现出典型的载荷突降现象,其幅值与厚度密切相关,并伴随分层扩展、残余位移增加及纤维断裂等损伤模式。较薄层合板在超过目视勉强可见冲击损伤阈值时易出现明显凹坑和结构失效,而较厚层合板凹坑深度较小且与分层发展密切相关^[57]。不同厚度层合板在高能量冲击下均表现出位移与分层面积随能量增加而扩大,同时伴随基体开裂加剧^[58]。较厚层合板因具有更高弯曲刚度和层间剪应力,在相同条件下更易诱发分层

及其扩展,且在分层发生前能够累积更多应变能^[10]。此外,凹坑深度随冲击能量增加而加大,但厚度具有明显调节作用,在相同能量下,薄板更易发生穿孔,而厚板仅产生较浅凹坑^[59]。除厚度外,平面内尺寸也会影响冲击响应和损伤扩展。文献^[10,56-59]表明:在平面尺寸增大时峰值载荷和吸收能量减小,而最大位移显著增加,这是由于弯曲刚度降低所致。由此可知,复合材料层合板的厚度主要影响低速冲击承载能力、分层扩展及凹坑深度,且其平面尺寸显著改变低速冲击变形与吸能特性。

现有研究^[56-59]系统阐述了复合材料层合板厚度和平面尺寸对低速冲击响应的影响规律,从承载能力、能量吸收、位移特征及分层模式等多个方面揭示了几何尺寸对冲击力学行为的影响。然而,厚度和平面尺寸的影响被分别讨论,缺乏两者耦合效应的综合分析;此外,现有研究未充分考虑大尺寸层合板在复杂边界条件下的低速冲击响应特征。

1.8 边界条件

不同的夹具形式、约束条件及预紧力类型会显著改变复合材料层合板试样的受力与变形特征,从而影响峰值载荷、位移、接触时间和损伤模式。研究表明^[60]:边界条件对复合材料层合板的冲击力学响应和损伤特性有重要影响,在标准四角夹具约束下,层合板表现出更陡的载荷上升趋势、更高的峰值载荷、更小的变形以及更短的接触时间,这说明刚性边界可增强层合板的抗冲击能力。无论冲击能量如何变化,这一趋势均保持一致。此外,单轴拉伸预紧力可显著增强热塑性和热固性层合板的面外刚度,表现为峰值载荷增加、最大位移减小和接触时间缩短;而单轴压缩预紧力则可能产生“软化”效应,使位移增大且材料损伤加剧^[61]。对于压缩预紧力,试样吸收的能量通常高于拉伸预紧力作用下的情况,并可减少冲击正面金属板裂纹的出现^[62-63]。对于纤维金属层合板,拉伸预紧力对冲击接触时间影响不显著,而压缩预紧力则会缩短接触时间。值得注意的是,在压缩预紧力作用下,冲击正面金属层未出现裂纹,这是因为预紧力抵消了冲击头引起的压缩弯曲应力。此外,压缩预紧力会增大层合板挠度,从而导致更严重的损伤,同时导致层合板吸收了更多能量^[64]。由此可知,无论是通过调整夹具类型还是施加预紧力以改变低速冲击边界条件,这些措施均会影响层合板的峰值载荷、位移、接触

时间及能量吸收特性，从而对冲击损伤的演化过程产生重要影响。

过去的研究工作^[60-64]聚焦于传统边界条件（如经典四角夹具、拉伸/压缩预紧力加载）对复合材料低速冲击响应的影响机制，尚未探讨全边界刚性约束——即通过矩形/圆形刚性框架对试样四周实施均匀约束的连续边界条件。相较于传统的加载方式，全边界刚性约束形式与实际工程结构（如航空复合材料面板在机身框架中的嵌入固定）具有更高的相似性，能更真实地模拟结构在服役环境中因嵌入约束产生的应力分布特征，对揭示复合材料在真实约束条件下的冲击损伤机理、能量耗散路径及失效模式具有重要意义。

1.9 多因素耦合作用

在实际服役环境中，复合材料结构遭遇的低速冲击损伤通常是多种环境与载荷因素共同作用的结果。与单一因素下的冲击响应不同，多因素耦合作用会引发更复杂的损伤演化和非线性结构行为，导致损伤机制难以通过独立变量的简单叠加来准确描述。研究表明^[15,18]：在一般条件下，复合材料低速冲击损伤程度随冲击能量和环境温度的升高而加剧。然而，也存在异常情况：在较低的冲击能量（10 J）与室温（25 °C）条件下，复合材料冲击损伤较为严重；然而，当冲击能量提升至 30 J 且温度升高至 75 °C 时，损伤反而减小。这是由于大部分能量已在试样边缘剧烈损伤过程中耗散，裂纹以非对称方式由边缘向中心扩展，冲击头正下方仅出现微小凹坑，导致损伤面积和损伤直径反而小于低能量与室温组合下的结果。相比之下，在低温（如 -55 °C）与高能量（如 225 J）耦合条件下，复合材料的损伤最为显著，这主要归因于低温下树脂基体脆化与高冲击能量对材料抗冲击性能的协同削弱效应。冲击能量与冲击次数的耦合作用研究发现^[65]：在不超过 20 J 的重复冲击条件下，层板的最大位移随冲击次数的增加逐渐增大，但增长速率在第三次冲击后趋于平缓；而在 30 J 的冲击能量下，最大位移不仅随冲击次数持续累积，更呈现出逐次加快的加速增长趋势。冲击能量与试样厚度的耦合影响研究表明^[23]：玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的冲击响应受试样厚度与冲击能量影响显著。在 6 层至 10 层厚度范围内，峰值载荷随冲击能量增加而持续上升。然而，在位移响应方面，6 层与 8 层试样的位移明显大于 10 层试样，表明吸收能量随冲击能量增加而增加，较薄试样在相同冲击能量下表现出更

大的变形。

已有研究^[15,18,23,65-66]主要集中于研究双因素耦合作用对复合材料低速冲击行为的影响，如环境温度与冲击能量、冲击能量与冲击次数、冲击能量与试样厚度等组合。这些研究揭示了双因素交互下的非线性响应特征，为理解复合材料在特定耦合条件下的损伤机制提供了基础。然而，实际服役环境中复合材料结构往往面临更为复杂的多场耦合工况，涉及温度、湿度、冲击能量、冲击次数、冲击角度、试样几何参数及边界条件等多因素的共同作用，其间的协同效应尚未得到系统性研究。在未来的实验研究中，应系统开展多因素耦合作用下的复合材料低速冲击力学行为研究，重点关注多场、多参数协同作用下的损伤响应机理与失效演化规律。

2 复合材料低速冲击的数值模拟

复合材料低速冲击实验成本较高，且实验过程中难以直接观测试样的破坏机理。数值模拟作为一种高效且低成本的研究手段，已广泛应用于复合材料低速冲击行为研究。现有研究^[21,67-70]主要集中在材料微观、细观以及宏观尺度的有限元模型建立，以及相应材料本构关系、失效准则和损伤演化模型的构建。

2.1 单次低速冲击的数值模拟

复合材料典型的失效模式可分为层间和层内两类。层间损伤主要是分层损伤，其通常采用内聚力模型（cohesive zone model, CZM）来表征损伤的起始与扩展。层内损伤包含基体开裂、纤维断裂等模式。为刻画层内损伤，国内外学者提出了多种失效判据，如最大应力/应变准则^[71]、Tsai-Wu 准则^[72]、LaRC05 准则^[73]、Puck 准则^[74]以及 Hashin 准则^[75]等。其中，最大应力/应变准则因其仅考虑单一方向强度，多用于微观尺度下纤维断裂的识别。随着对复合材料低速冲击机理研究的不断深入，传统失效准则和损伤模型在处理多尺度损伤演化和复杂应力状态下的精度仍存在局限。因此，学者开始从改进损伤模型与多尺度建模两个方向展开探索^[67-68]，以实现从宏观响应到微观损伤的统一描述。

现有的复合材料低速冲击损伤建模主要围绕应变率效应、分层与内部破坏机制及损伤耦合的精确预测展开研究。在应变率效应研究方面，常见的率相关损伤模型包括幂函数、对数函数和指数函数模型^[67-68]。为了更准确地表征不同应变率

对复合材料冲击力学响应的影响，已有研究^[76-77]引入对数强化函数对基体模量以及层内、层间损伤模型进行修正，其整体建模流程如图 5^[67]所示。

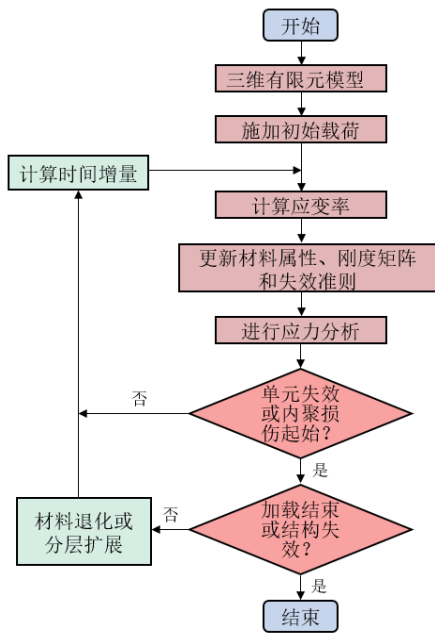


图 5 应变率相关损伤模型的仿真流程图^[67]

Fig.5 Simulation flowchart of the strain-rate-dependent damage model^[67]

研究表明^[67-68]：相较于未考虑应变率效应的模型，对数强化函数修正后的损伤模型能够更真实地反映冲击载荷下复合材料的动态响应特征。在预测表现方面，幂函数模型^[67]虽能较好描述宏观响应，但在分层损伤预测上偏差较大，指数函数模型^[67]对接触力峰值及部分损伤指标存在高估，对数函数模型^[67]在各类损伤指标上均表现出更高的精度与稳定性。在数值模拟中，率相关内聚力模型的选择需充分考虑冲击速度对应的应变率范围。针对低速冲击问题，对数模型因其合理的对数型率强化特性，在界面强度与断裂韧性的描述上最为平衡，与实验结果吻合最佳；幂函数模型虽可近似描述损伤扩展，但因未考虑界面强度率强化，其预测略逊于对数模型。指数模型则因在低速冲击下过度强化界面响应，导致损伤显著高估，因而不适用于低速冲击工况。对于中高速冲击问题，模型适用性可能发生显著变化。

对数模型的平缓增长特性可能使其能够描述材料性能趋于饱和的趋势，在中高速下仍保持较好稳健性，但其在极高应变率下的强化幅度可能不足。指数模型因具有急剧增长的函数形式，可能更匹配高应变率下的界面动态强化机制，若模型参数经过高速率实验标定，其适用性有望显著提升。幂函数模型则因固有缺陷（仅强化断裂韧性）在中高速下局限性加剧。随着界面强度率效应成为主导，该模型可能因严重低估承载能力而产生更大偏差^[67]。

另外，已有研究^[21,69-70,76]从失效准则、损伤演化策略以及界面本构关系等方面对内聚力模型进行了系统分析与改进。例如，Shabani 等^[21]针对冲击下的复杂破坏行为，引入层内局部内聚力单元以模拟纤维断裂与基体开裂，并在 LaRC05 准则纤维失效项中加入剪切应力控制项，从而提升在多轴应力条件下的预测能力。在失效准则与损伤演化策略方面，Huang 等^[69]通过引入损伤累计指标对不同准则、演化模式及界面内聚力模型的组合效果进行了评价。结果表明^[69]：Puck 准则、线性损伤演化与有限厚度内聚力模型的组合在预测精度方面最优。在界面分层预测方面，已证实各向异性特征会显著影响裂纹扩展路径，因此，Jakubczak 等^[70]构建了基于局部坐标映射的各向异性内聚力界面模型，在裂纹路径和分层形貌预测上明显优于传统内聚力模型。为进一步提高复合材料低速冲击损伤模拟的准确性，于飞等^[76]在损伤起始准则中引入相邻铺层的损伤耦合项和应力项，新型内聚力损伤模型能够更真实地反映层合板的冲击损伤特征。结果表明^[76]：该模型在不同铺层顺序下对分层面积及尺寸的预测较为准确，且分层面积在厚度方向的分布规律与实验一致，充分体现了冲击背部基体裂纹对界面分层的促进作用。

在多尺度建模方面，根据图 6^[77]所示的建模思路，通过将宏观结构响应与微观纤维/基体损伤演化相结合，实现对不同尺度损伤机理的统一描述，从而提升仿真结果的物理一致性与预测精度。目前，多尺度建模方法已逐渐成为复合材料低速冲击研究的重要方向，具体总结如下：

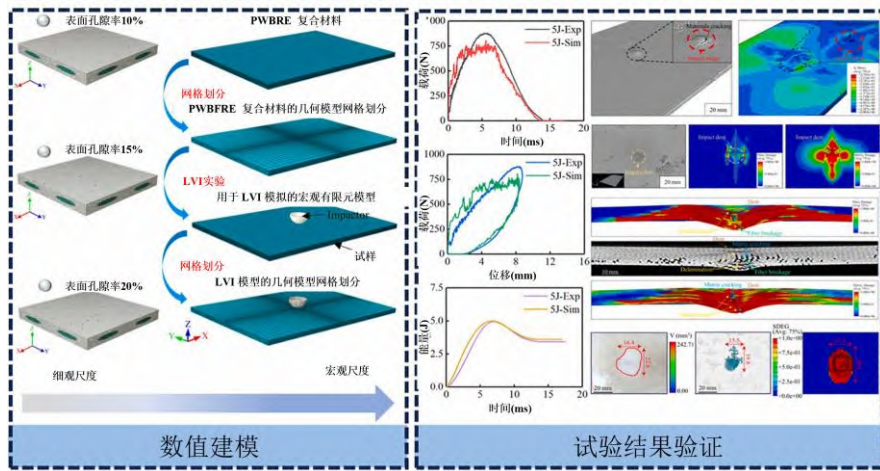


图 6 低速冲击多尺度建模流程^[77]

Fig.6 Multi-scale modeling process of LVI^[77]

Yao 等^[77]以平纹竹纤维增强环氧树脂复合材料为例，通过 X 射线计算机断层扫描 (X-CT) 获取纤维织物结构的内部几何特征，在微观/介观尺度建立代表性体积单元 (RVE) 模型，采用均质化方法将介观尺度的材料性能向宏观尺度传递，从而构建宏观冲击响应的有限元模型。该模型在微/介尺度阶段考虑了天然竹纤维织物的波纹结构、织物层间结构不均匀性以及天然纤维本身的缺陷特征；随后将获得的等效材料参数用于宏观层合板模型来模拟不同冲击能量 (5 J、7.5 J、10 J) 下的冲击载荷-时间响应和最大位移。结果表明^[77]：模拟的峰值冲击载荷、最大位移与实验值之间的误差在 8.3% 以内。此外，针对纤维金属层合结构在低速冲击载荷下的损伤演化与力学响应，姚潞等^[78]利用微观尺度 RVE 模型，获得复合材料等效力学参数，结合纤维断裂与基体开裂等微观失效准则，建立了宏-微损伤耦合的渐进损伤演化模型 (见图 7^[78])；同时将复合材料模型与铝合金塑性

模型及界面脱粘模型耦合，建立了整体有限元冲击分析体系。数值结果与实验峰值载荷及损伤形貌吻合良好，验证了该方法的准确性与可行性^[78]。针对缝合泡沫夹芯复合材料的低速冲击响应，马健等^[79]提出了一种多尺度数值建模方法，从微观、介观到宏观三个层面分别建立模型，并通过均质化理论推导出材料在各方向上的等效弹性模量；随后，借助商用有限元软件 GENOA-PFA 对冲击过程进行了数值模拟。结果表明^[79]：缝线在增强界面结合强度与抑制分层扩展方面具有显著作用，而泡沫芯层密度及缝线参数的变化对整体抗冲击性能影响尤为明显。此外，复合材料 T 型加强筋低速冲击的多尺度分析表明^[80]：多尺度数值模拟能够在微观与宏观层面同时揭示材料响应，其仿真载荷-时间及能量-时间曲线与试验高度一致，误差控制在±10%以内，同时预测破坏形式与试验观测基本相符。

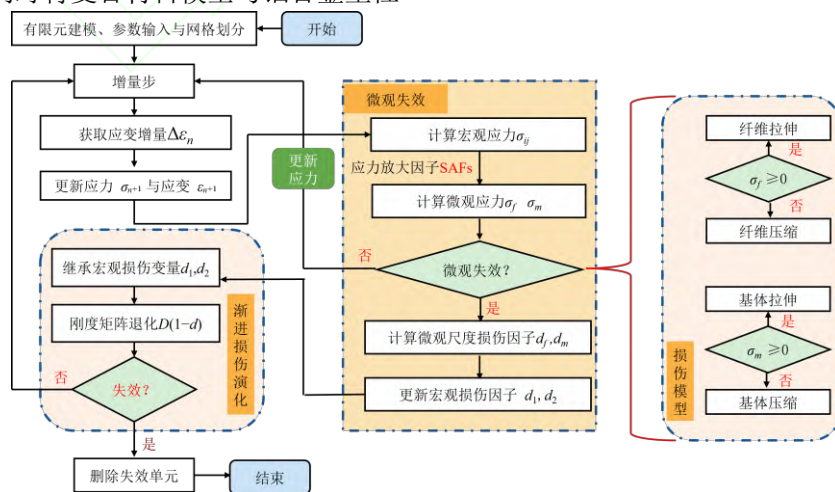


图 7 考虑纤维/基体微观损伤的复合材料渐进损伤演化程序^[78]

Fig.7 Progressive damage process of composite considering the fiber/matrix micro-damage^[78]

在细观建模方面，文献^[81-82]基于 CT 扫描建立三维机织复合材料宏-细观耦合模型，在保持宏观层合板均匀化处理的前提下，在冲击部位构建了符合真实编织结构的细观模型，从而在不显著增加计算成本的情况下提升了低速冲击损伤预测精度。针对宏观-细观耦合模型的进一步优化，Liao 等^[83]提出通过对微观 RVE 施加六种单轴载荷（轴向拉压、横向拉压等）获得宏观应力与细观应力映射关系（应力放大因子，SAFs），进而在冲击模拟中将宏观应力通过 SAFs 转换为细观应力，并根据对应失效准则进行纤维或基体损伤计算；随后将损伤变量传递至宏观刚度矩阵进行刚度退化，从而实现多种铺层顺序层合板纤维与基体损伤的高精度预测。同时，为应对冲击过程中损伤区域高度局部化的特点，可以结合 Navier 挠度解与半解析法^[84]，形成局部半解析方法，用于有限元分析中的断裂面搜索，在保证计算精度的前提下大幅提升了计算效率。

Hou 等^[85]进一步发展了微观-细观-宏观的多尺度建模方法：首先通过微观 RVE 模型获得纤维束基本力学性能；再构建具有真实编织结构的平纹细观 RVE 模型，经过局部均匀化获得 0°和 90°子胞性能，进而形成等效交叉层合板（equivalent cross-ply laminate, ECPL）单元；最后通过周期性排列 ECPL 单元构建宏观模型。该方法^[85]在还原宏观响应的同时，能够有效模拟冲击时材料内部的层内和层间损伤。类似策略也应用于三轴编织复合材料建模之中，通过在局部均匀化过程中考虑不同角度纱线的几何连续性，构建四子胞模型^[86]，从而提高了局部力学响应预测精度，但相应计算成本有所增加。

尽管现有多尺度数值模拟方法能够较为有效地反映不同结构类型复合材料在低速冲击过程中的跨尺度损伤传递规律，为复合结构的抗冲击性能预测与优化设计提供了重要的理论基础和数值支撑，但仍存在以下限制或不足：一方面，顺序多尺度建模方法只能自下而上传递等效性能参数、应力场、应变场以及损伤等信息还是在单个尺度上进行分析，不能实现各个尺度信息之间的双向传输，无法体现宏观应力状态与细观损伤之间的关系；另一方面，高保真多尺度模型往往需要精细的网格划分与复杂的本构描述，导致计算成本较高，限制了其在大尺寸结构分析中的实际应用。

2.2 多次低速冲击的数值模拟

在真实服役环境中，复合材料结构往往经历

多次低速冲击作用，不同冲击事件之间可能存在相互关联与干涉。利用数值模拟方法能够更直观地揭示和解释多次冲击间的相关性与演化规律。

在多次低速冲击条件下，复合材料层合板的力学响应与损伤演化表现出明显的累积效应。数值模拟结果表明^[47]：在多次低速冲击过程中，第一次冲击通常造成的损伤最为显著，主要表现为层内裂纹扩展、纤维断裂及层间分层面积增加；随后的冲击则主要引起轻微的分层裂纹扩展或局部损伤加剧。为准确描述多次冲击下的损伤演化规律，通常将渐进损伤模型、连续损伤理论、多轴 Hashin 或 Puck 失效准则、等效位移损伤演化模型及内聚力单元等方法有机结合，构建能够同时模拟层内、层间损伤及宏观结构损伤起始、演化与扩展的数值模型^[87]。结果表明^[87]：随着冲击次数增加，层合板结构的刚度逐渐下降，第二次及后续冲击的位移增大，冲击持续时间延长，而吸收能量则呈逐步下降趋势，这与损伤累积导致的刚度降低密切相关。针对不同复合材料体系，宏-细观多尺度建模方法广泛应用于多次冲击模拟。例如，Yang 等^[88]通过在微观层面建立 RVE 模型并验证其预测精度，然后将其与宏观层合板模型结合，能够有效反映纤维、基体及界面损伤在冲击过程中的相互作用，仿真过程的详细流程如图 8^[88]所示。结果表明^[88]：该方法能够准确预测不同编织结构层合板在多次冲击下的损伤程度，非混合编织层合板表现出较严重的损伤，而混合编织层合板的损伤则相对轻微，数值模拟结果与扫描检测实验结果高度一致。

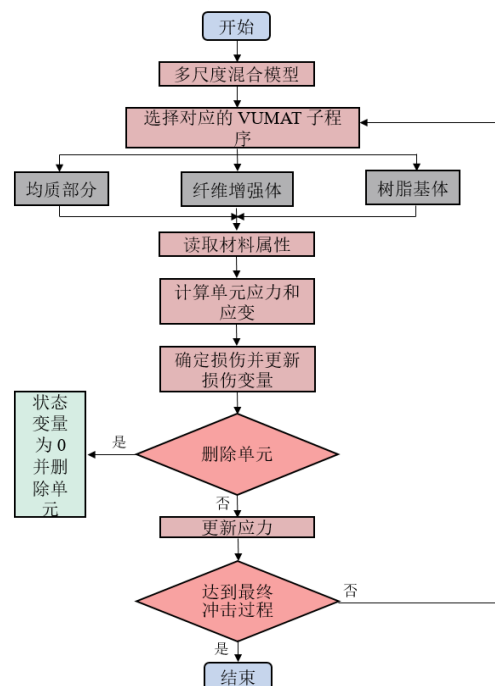


图8 数值建模过程流程图^[88]

Fig.8 Flowchart of numerical modeling process^[88]

现有研究^[47,87-88]表明多次低速冲击下复合材料层合板的损伤演化受首次冲击损伤程度、材料微观结构、铺层顺序及几何尺寸等多因素共同影响。通过渐进式、多尺度及改进损伤准则的结合，数值模拟方法能够定量预测层合板在连续冲击载荷下的刚度退化、分层扩展及吸能变化规律。然而，当前研究多聚焦复合材料层合板在单点或规则间距的低速冲击，其在多点多次低速冲击加载下的损伤干涉机制仍不清晰，且随机分布多点多次低速冲击下损伤干涉的临界判据尚缺乏定量描述，难以建立细观损伤状态与宏观力学响应之间的定量关联。

值得注意的是，复合材料低速冲击在数值模拟过程中需要平衡计算效率与模拟精度问题。隐式求解是将当前时刻节点的位移、速度和加速度，以及下一时刻的载荷向量代入动力学方程，求解下一时刻节点的位移，继而计算单元的应力和应变，以及载荷向量。通过反复迭代，使载荷向量满足迭代精度要求，从而求解出结构响应。因此，隐式求解需要进行大量的重复迭代，其在涉及分层接触模型或内聚力单元求解时，容易出现过多的迭代步而不收敛的问题。然而，其允许较长的时间增量，在收敛性较好的前提下可以节省计算时间。显式求解采用中心差分法替代微分法，由节点在当前时刻和前一时刻的位移确定节点速度和加速度。根据动力学方程，由节点速度和加速度计算下一时刻的节点位移，然后，根据几何方程和物理方程得到单元的应力和应变。显然，在低速冲击显式计算中，下一时刻的结构响应与当前时刻和上一时刻的结构响应有关。为了进行稳定的低速冲击显式计算，通常将整个分析步划分为很多较短的时间增量，且时间增量应该足够小。由于稳定时间增量限制，显式分析将耗费大量的数值计算时间，但其由于满足差分方程，收敛性强。此外，针对低速冲击中的局部损伤模拟问题，有学者提出了一种改进算法，并通过 VUMAT 用户子程序实现求解。与传统的数值方法相比，该算法在计算精度和计算效率方面均表现出明显优势^[84]。

3 复合材料低速冲击的理论研究

复合材料低速冲击的理论研究聚焦于建立解析模型与简化力学模型，预测冲击过程中的冲击力学响应过程和损伤，为理解复合材料失效机理

提供支撑。目前主要涉及两种基本理论模型框架^[89-93]：能量平衡模型和弹簧质量模型。在此基础上，进一步拓展应用上述理论模型至多类复合材料结构低速冲击损伤、载荷-挠度等响应分析。

3.1 能量平衡理论模型

考虑复合材料层合板在中心受载情况下的接触变形、弯曲和横向剪切，以及大变形引起的薄膜效应，典型的复合材料层合板低速冲击能量平衡模型^[89]的控制方程为

$$\frac{1}{2}M_1V_0^2 = E_c + E_{bs} + E_m \quad (1)$$

式中， M_1 为冲击体的质量； V_0 为冲击速度； E_c 为接触能； E_{bs} 为考虑弯曲变形和横向剪切变形时的变形能； E_m 为考虑大变形下薄膜效应的变形能。接触能可表示为

$$E_c = \frac{2}{5} \frac{P^{5/3}}{n^{2/3}} \quad (2)$$

式中， n 为与材料和冲击体几何特性有关的接触刚度参数； P 为接触力，其与层合板挠度 ω 的关系为

$$P = K_{bs}\omega + K_m\omega^3 \quad (3)$$

式中， $K_{bs} = K_bK_s / (K_b + K_s)$ 是由弯曲和剪切决定的刚度系数。 K_m 和 K_b 可以根据不同的边界条件选取； K_s 可由圆形层压体的横向加载剪切应力-应变关系推导得到。

通过对式(3)进行积分，可以得到与弯曲和剪切变形有关的能量，以及与膜变形有关的能量，即

$$\begin{cases} E_{bs} = \frac{1}{2} K_{bs}\omega^2 \\ E_m = \frac{1}{4} K_m\omega^4 \end{cases} \quad (4)$$

联合式(1)至式(4)，得到能量平衡模型的控制方程^[89]为

$$M_1V_0^2 = K_{bs}\omega^2 + \frac{K_m\omega^4}{2} + \frac{4}{5} \left[\frac{(K_{bs}\omega + K_m\omega^3)^5}{n^2} \right]^{1/3} \quad (5)$$

基于能量平衡模型预测的最大冲击接触力

(如图 9^[89]所示)在不同初始冲击速度下均与实验实测值呈现良好一致性,验证了该模型在预测复合材料低速冲击接触力方面的可靠性与准确性。

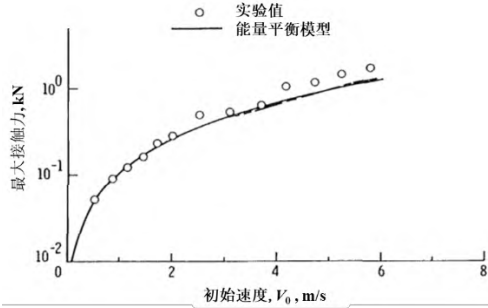


图 9 能量平衡模型预测值与实验值的对比^[89]

Fig.9 Comparison of predicted values from the energy balance model with experimental values^[89]

上述能量平衡模型考虑了复合材料层合板大变形下的薄膜效应,能够有效预测不同厚度复合材料层合板在低速冲击载荷作用下的最大冲击接触力。然而,其难以获得冲击过程中完整的冲击接触力-时间历程。

3.2 弹簧质量理论模型

弹簧质量理论模型框架如图 10^[89]所示。假设 M_p 为复合材料板的质量,令 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为冲击体和复合材料板在冲击过程中的位移响应。板的挠度 $\omega = x_2(t)$, 接触变形则为 $\alpha = x_1(t) - x_2(t)$ 。

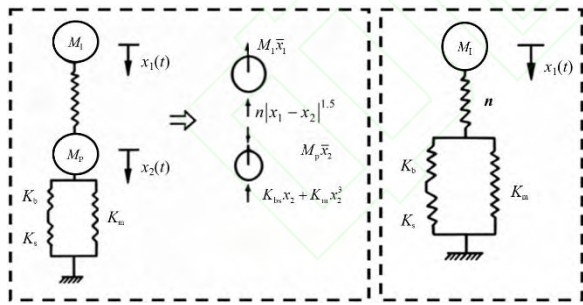


图 10 圆板低速冲击的弹簧质量模型^[89]

Fig.10 Spring-mass model of circular plate under LVI^[89]

根据牛顿第二定律,得到两个自由度的平衡方程为

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_1 + \lambda n \left| (x_1 - x_2) \right|^2 = 0 \\ M_p \ddot{x}_2 + K_{bs} x_2 + K_m x_2^3 - \lambda n \left| (x_1 - x_2) \right|^2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, n 为接触刚度系数;当 $x_1 > x_2$ 时, λ 为 1;

当 $x_1 \leq x_2$ 时, λ 为 -1。初始条件为

$$\begin{cases} x_1(0) = 0, \dot{x}_1(0) = V_0 \\ x_2(0) = 0, \dot{x}_2(0) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

当冲击体的质量大于复合材料板的质量一定倍数时(通常约 14 倍^[89]),可以忽略复合材料板的质量。双自由度弹簧质量系统退化为单自由度弹簧质量系统,相应的平衡方程为

$$M_1 \ddot{x}_1 + K_{bs} \omega + K_m \omega^3 + n \alpha^{1.5} = 0 \quad (8)$$

其中 $x_1 = \omega + \alpha$, 边界条件为

$$x_1(0) = 0 \quad \dot{x}_1(0) = V_0 \quad (9)$$

基于弹簧质量模型可以有效预测低速冲击过程中的接触力时程、挠度演化及速度变化等关键参数,且其预测的冲击持续时间与实验实测值(见图 11^[89])吻合良好,验证了该模型在低能量工况下的预测能力与工程适用性。然而,当前模型尚未考虑塑性变形效应及损伤演化机制(如基体开裂、纤维断裂、分层扩展等不可逆损伤过程),导致其仅能准确描述低能量低速冲击下的弹性响应特征,而无法表征高能量冲击下因材料非线性行为引起的复杂力学行为演变。

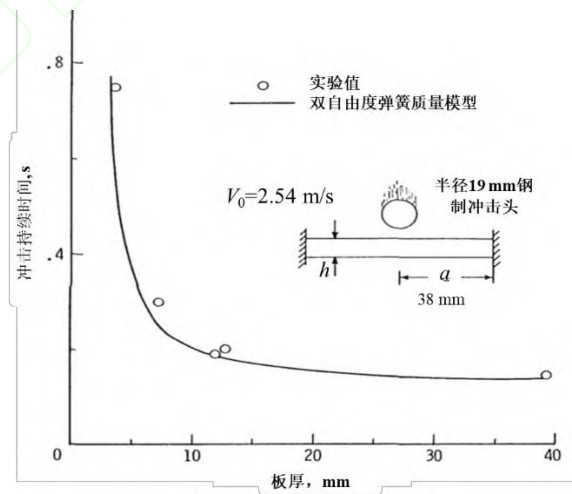


图 11 弹簧质量模型预测值与实验值的对比^[89]

Fig.11 Comparison of predicted values from the spring-mass model with experimental values^[89]

3.3 能量平衡/弹簧质量模型的进一步应用

根据能量平衡模型和弹簧质量模型理论,可以得到复合材料层合板在低速冲击载荷作用下的最大挠度 ω_{max} 。Xiao 等^[90]基于能量守恒定律和准

静态假设，将冲击问题转化为静力问题，计算冲击物与层合板之间的最大接触力，即

$$F_{\max} = \sqrt{2kE} \quad (10)$$

式中，弹簧常数 $k = F_{\max} / \omega_{\max}$ ， E 为冲击能量。在低速冲击载荷作用下，复合材料层合板的主要损伤为层间分层损伤，其由层间剪切应力驱动。Xiao 等^[90]假设将准各向同性板近似为各向同性板，并将实际的花生状分层形状等效为圆形分层。此外，将接触区域简化为中心点载荷。由此，可以根据层间剪切应力分布求出复合材料层板发生分层损伤时的临界半径 r_c 为

$$r_c = \frac{3F_{\max}}{4\pi h\tau_{\text{allowable}}} \quad (11)$$

其中， $\tau_{\text{allowable}}$ 为临界剪切应力， h 为层板厚度。需要说明的是，该方法忽略了在低速冲击过程中复合材料层合板可能发生的基体开裂和纤维断裂。

针对大质量冲击载荷作用下复合材料层合板的分层损伤问题，Olsson^[91]采用质量弹簧模型将复合材料层合板在冲击载荷作用下的复杂力学行为简化为几个混联的弹簧元件，其整体结构示意图如图 12^[91]所示，其总载荷 F_{mbs} 由与弯曲和剪切

变形有关的 F_{bs} 和与膜变形有关的 F_{m} 组成，即

$$F_{\text{mbs}} = F_{\text{bs}} + F_{\text{m}}。其中，F_{\text{m}} = k_{\text{m}} \omega_{\text{p}}^3；F_{\text{bs}} = k_{\text{bs}} \omega_{\text{p}} \leq F_{\text{cr}}。$$

F_{cr} 为复合材料层合板分层起始的临界载荷，即

$$F_{\text{cr}} = \pi \sqrt{32D^* G_{\text{IC}} / (n+2)} \quad (12)$$

式中， G_{IC} 为层间断裂韧性； n 为分层数量， D^* 为等效断裂刚度。

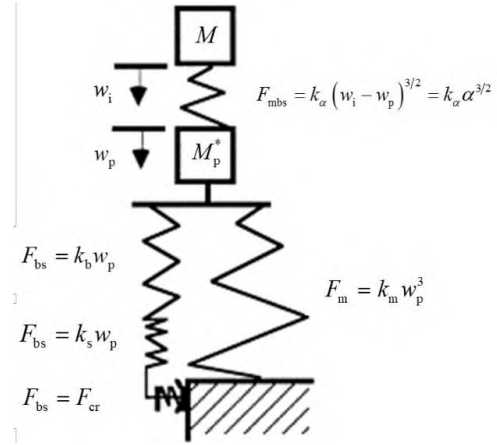


图 12 大质量冲击下弹簧质量模型示意图^[91]

Fig.12 Schematic diagram of the spring-mass model under large mass impact^[91]

Olsson^[91]进一步假设冲击过程中产生的不规则花生形分层可以等效为 n 层圆形分层，且圆形的面积与外边界相等，如图 13 所示。当 $\omega_{\text{in}} \leq \omega_{\text{p}} \leq \omega_{\text{gr}}$ 时， $F_{\text{cr}} = F_{\text{in}} \omega_{\text{in}} / \omega_{\text{p}}$ ；当 $\omega_{\text{p}} \geq \omega_{\text{gr}}$ 时，

$F_{\text{cr}} = F_{\text{gr}}$ 。其中， F_{cr} 为 $n=1$ 对应的载荷； F_{gr} 为分层饱和时对应的载荷； $\omega_{\text{in}} = F_{\text{in}} / k_{\text{bs}}$ ； $\omega_{\text{gr}} = F_{\text{gr}} / k_{\text{bs}}$ 。

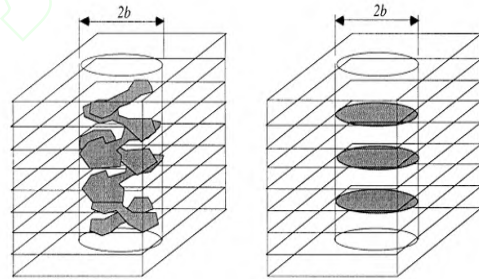


图 13 用等效圆形分层表示实际分层^[91]

Fig.13 Representation of real delaminations by equivalent circular delaminations^[91]

由此可见，等效圆形分层是模型得到解析解的关键，同时也巧妙地体现了冲击过程中复合材料层合板损伤的累积效应。在等效简化条件下，平均分层直径为

$$d = 2\sqrt{(W-U)/(n\pi G_{\text{IC}})} \quad (13)$$

式中， W 为外力功， U 为应变能，分别为

$$\begin{cases} W = W_{\text{mbs}} + W_{\alpha} = \int F d\omega + \int F d\alpha \\ U = U_{\text{b}} + U_{\text{m}} + U_{\text{s}} + U_{\alpha} \end{cases} \quad (14)$$

特别地，诸多学者^[92-101]在能量平衡/弹簧质量模型的基础上，对多类复合材料结构的低速冲击

力学响应进行了深入研究，具体包括：对复合材料薄壁圆筒同时承受内压和低速冲击载荷的作用时的应力应变分布及冲击响应参数的理论分析^[96]；结合高阶剪切理论和能量方法，对泡沫填充蜂窝增强复合材料薄壁圆筒在冲击载荷作用下的应变场、应力场、速度及冲击时间进行解析分析^[97]；考虑分层损伤和材料失效，能够同时预测冲击力和载荷-挠度曲线的复合材料薄壁圆筒低速冲击解析动力学模型构建^[98]；考虑面板破坏和芯材压溃，对低速冲击载荷作用下不同厚度复合材料夹层板的载荷-挠度行为的预测^[99-100]；以及复合材料加筋板的低速冲击行为的预测等^[101]。

现有研究已实现从简单层合板到复杂复合材料结构的低速冲击行为预测能力拓展，并重点强化了对分层损伤机制的表征能力。然而，当前理论模型在损伤模式覆盖度上仍存在显著局限性，具体表现为对纤维断裂、基体开裂等关键损伤模式的完整表征不足，导致模型难以全面反映冲击过程中多类型损伤的耦合演化规律。此外，理论模型构建尚未充分考虑环境温度、冲击头几何特征（形状、尺寸）、多次冲击等参数的影响。

4 基于机器学习的复合材料低速冲击行为研究

近年来，机器学习（machine learning, ML）作为一种强大的数据驱动范式，利用现有数据训练模型，能够学习输入变量与输出属性之间的复杂非线性映射关系，目前已在复合材料的低速冲击行为预测和结构优化方面得到了广泛应用^[102-104]。

4.1 基于机器学习的冲击响应与损伤行为研究

近年来，低速冲击下复合材料的力学响应与损伤行为在实验、数值模拟与机器学习结合的框架下得到了广泛研究。针对冲击响应的快速预测与性能优化，学者采用了多种机器学习方法。例如，结合卷积神经网络（convolutional neural network, CNN）和用于降维和特征提取的主成分分析（principal component analysis, PCA）以及遗传算法（genetic algorithm, GA）进行结构参数优化，如螺旋角或缠绕角配置，从而提升能量吸收能力^[105-106]；采用人工神经网络（artificial neural network, ANN）及多层感知器（multilayer perceptron, MLP）处理多变量输入，包括冲击能量、铺层顺序、层厚及冲击头几何特征，同时预测峰值冲击力、位移、分层面积、凹坑深度和冲击后

压缩强度等关键指标，并结合 SHAP 方法解析各因素对损伤的贡献^[105,107-109]；采用支持向量机（support vector machine, SVM）、线性回归（linear regression, LR）、多项式回归（polynomial regression, PR）及决策树（decision tree, DT）等模型进行冲击力、位移及能量吸收预测，结果表明^[107-108,110-113]多项式回归在峰值冲击力预测中表现最佳，而支持向量机在位移和能量吸收预测中精度最高；采用随机森林（random forest, RF）和多输出回归模型评估孔隙、纳米增强材料或缝合工艺对冲击性能的影响，结果表明^[108,114]该类模型既保证高精度，又显著降低计算时间。

在基于机器学习的冲击响应与损伤行为研究中，广泛结合了低速冲击实验和有限元仿真。通过落锤低速冲击试验获取载荷-位移曲线、能量-时间曲线及局部损伤信息，以及通过有限元模型生成大量训练数据，可用于机器学习模型的训练与验证^[105,112-113,115]。为了提高数值模拟的精度，文献^[106,110-112,115-116]引入增强渐进损伤模型、动态损伤阈值或 Puck 纤维间失效准则，以更真实地反映基体开裂、纤维断裂及层间分层的演化过程。

机器学习模型与优化算法（如 GA）或逆抛物线拟合法相结合^[105-106,111-112,116]，可在预测冲击响应的基础上优化铺层顺序、螺旋角、缠绕角或缝合工艺（见图 14^[105]），从而显著提升能量吸收能力、界面结合强度及整体抗冲击性能。另外，生成式深度学习模型^[117]（如向量量化变分自编码器）用于全场损伤预测，可在少量训练数据下实现三维损伤场的高精度、高鲁棒性模拟，并有效缓解过拟合问题。文献^[105-118]表明机器学习方法在复合材料低速冲击响应与损伤预测中展现出显著优势。通过结合实验数据与有限元仿真结果，模型能够高效预测冲击力、位移、能量吸收及分层扩展等关键响应指标，并可通过与进化算法或生成式模型结合实现结构参数优化，从而显著提升复合材料的抗冲击性能。然而，这类方法仍存在一定不足，如模型高度依赖高质量数据集，难以获取足够的实验与仿真样本；深度学习模型可解释性不足，尚难揭示复杂损伤演化的物理机制；此外，不同算法间的适用性与稳定性差异较大，缺乏统一的评价标准。未来研究需进一步结合物理约束与数据驱动方法，提升模型的可靠性与泛化能力，以实现复合材料低速冲击行为的高精度、可解释预测。

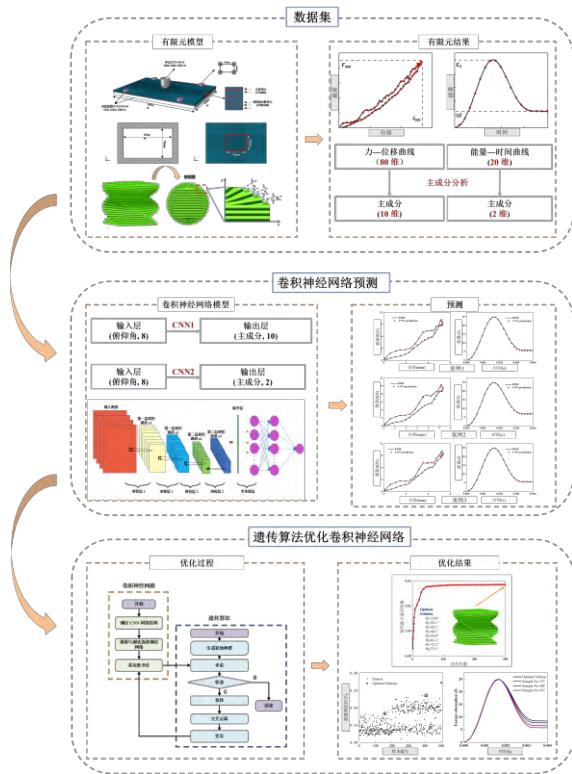


图 14 工作流程图^[105]

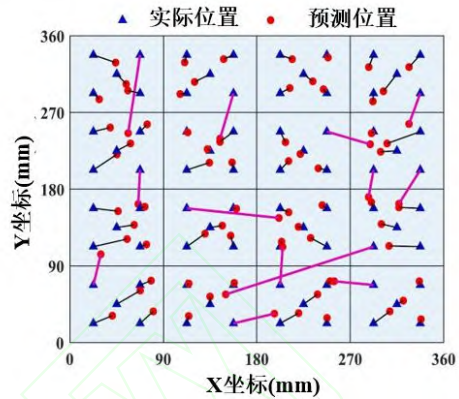
Fig.14 Work flow chart^[105]

4.2 基于机器学习的冲击损伤识别、定位与图像分析研究

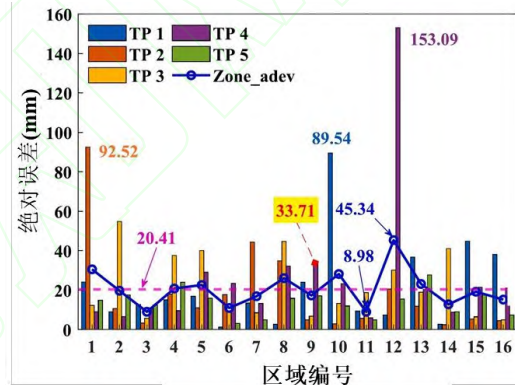
在低速冲击下复合材料结构的损伤定位与识别方面，机器学习方法亦得到了广泛应用。针对冲击定位问题，一类方法^[119]结合时间反演技术与机器学习，通过径向基函数插值扩展结构响应，并利用改进的重心法计算冲击点坐标，有效克服了传统方法对材料波速方向性和传感器配置的依赖，可在不同冲击能量下实现高精度定位，平均定位误差小于 10 mm，相比传统方法误差降低约 90%。另一类方法^[120]基于时间序列特征与 CNN 的两阶段定位策略，将一维冲击响应信号通过递归图和网格化表示转换为二维图像特征，首先利用 CNN 进行粗定位，然后在识别区域内通过几何质心加权算法完成精确定位。该方法^[120]可在各向异性及几何复杂的复合结构中，仅使用单个传感器数据实现高精度冲击点识别，并在复杂结构中保持良好定位性能。

对于损伤识别与量化，基于无监督机器学习的图像分割技术^[121]，通过统计距离优化自动确定灰度图像中损伤区域的阈值，无需人工标注或训练数据。该方法^[121]在微计算机断层扫描图像中有效识别 CFRP 试样的低速冲击损伤，并证明基于 Kullback-Leibler 散度的阈值选择能够准确识别损

伤区域，同时保证保守性和一致性。基于 GPF-2DCNN&GCW 的蜂窝结构冲击损伤精细定位结果如图 15 所示。从图 15 可以发现，所有冲击样品的平均定位误差为 14.05 mm，大多数冲击样品的定位偏差小于或接近平均值，表明该方法在冲击区域识别方面的可靠性。



(a) 精确定位结果



(b) 精确定位误差

图 15 基于 GPF-2DCNN&GCW 的蜂窝结构冲击精细定位^[121]

Fig.15 GPF-2DCNN&GCW-based impact fine localization of honeycomb structures^[121]

综上，结合时间反演或重心法的数值预测方法能够实现冲击点的快速定位，但其对结构材料参数和边界条件较为敏感，适用范围有限；基于 CNN 的图像特征提取方法可在复杂结构和单传感器数据环境下实现冲击损伤识别，但模型训练依赖大量标注数据，且泛化能力仍需提升；基于无监督图像分割的损伤量化方法具有高精度和自动化优势，但在噪声干扰或多损伤耦合情况下的稳定性较弱。总体而言，这些方法为复合材料低速冲击下的结构健康监测与无损检测提供了有效的技术手段，但仍需在鲁棒性、实时性和多源数据融合等方面进一步优化与完善。

4.3 基于机器学习的结构优化与多尺度分析研

究

在低速冲击下复合材料结构的抗损伤性能预测与优化方面,学者们主要采用了有限元、代理建模与机器学习相结合的多尺度方法。一类方法^[122-123]将高保真多尺度有限元技术与 ANN 结合,构建代理模型,实现对复合材料层合板和复杂结构(如帽型加筋面板)冲击及冲击后压缩性能的高效预测。如图 16^[122]所示,将高保真多尺度有限元技术与 ANN 相结合后预测得到的力-时间和力-位移曲线与实验结果高度吻合,表明该方法在预测复合材料低速冲击响应方面具有较高的准确性^[122-123]。

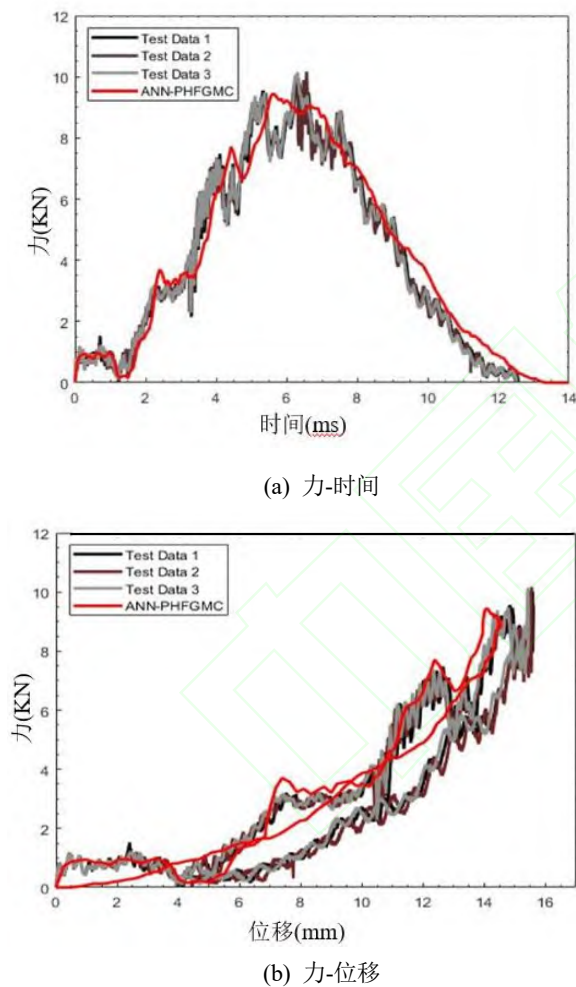


图 16 ANN-PHFGMC 方法与实验结果对比^[122]

Fig.16 Comparison between ANN-PHFGMC method and experimental results^[122]

另一类方法^[124-125]通过实验、有限元模拟与机器学习相结合,建立反向传播神经网络或随机森林代理模型,并结合优化算法对铺层配置、成型压力及冲击能量等设计变量进行优化,实现复合材料层合板损伤面积、峰值接触力和最大位移等

多目标性能的改进。在优化过程中,超声波无损检测或有限元生成的数据被用作训练集,提高了模型预测的精度与工程适用性,同时可通过多目标排序与决策方法选取最优方案,实现性能指标的平衡^[124-125]。

总体来看,多尺度高保真有限元与 ANN 结合的代理建模方法能够有效预测复杂结构的非线性冲击响应,但其模型构建过程依赖大量高保真仿真数据,计算代价较高;结合实验数据与机器学习的性能预测模型在损伤响应建模和设计优化中具有较高精度,但模型的泛化能力和对不同材料体系的适应性仍需提升;基于优化算法的多目标设计方法可在改善峰值载荷、位移和损伤面积等指标方面发挥作用,但其全局寻优效率和收敛稳定性仍受算法参数与初始条件影响。这些方法显著提高了复合材料抗冲击性能预测的效率与准确性,为层合板及混合复合材料的工程设计提供了有效工具,但在数据依赖性、模型鲁棒性及多物理耦合下的可扩展性方面仍有进一步优化空间。

近期,物理信息神经网络(physics-informed neural networks, PINN)方法在复合材料领域受到广泛关注。这类方法通过将物理定律、控制方程或多尺度力学机制嵌入神经网络的训练过程中,有效降低了传统数据驱动模型对海量高保真数据的依赖。针对宏微观跨尺度计算面临效率与精度的权衡难题,引入 PINN 可为解决复合材料多尺度力学行为分析提供新思路。例如,为了阐明复合材料结构的复杂多尺度损伤失效机制,Hu 等^[126]提出了一种有限元方法与 PINN 结合的并发多尺度损伤分析框架,利用深度神经网络替代高计算成本的微观分析,在保证损伤模拟精度的同时大幅提升了计算效率。然而,PINN 在强非连续损伤问题的求解收敛性、多物理场耦合环境的适应性以及复杂微观结构的精确建模方面仍面临挑战。

需要注意的是,尽管机器学习为复合材料低速冲击研究提供了强大研究范式,但该领域仍面临数据稀缺、模型可解释性不足以及跨尺度建模复杂等挑战。未来研究将更倾向于以下三个方面。其一,融合物理知识的物理信息机器学习(如 PINN 等),以增强模型的可靠性与外推能力。其二,发展小样本学习与生成式模型,以克服高质量数据瓶颈。其三,致力于构建贯穿制造、损伤到服役性能的全生命周期集成智能设计框架,最终实现复合材料在低速冲击载荷下的精准预测与自主优化。

5 结论与展望

复合材料低速冲击行为的研究近年来已受到广泛关注,并取得了大量进展。本文从实验研究、理论建模、数值模拟和基于机器学习建模四个方面系统回顾了相关研究成果。

(1) 实验研究方面,系统总结了环境温度、冲击头形状与尺寸、冲击能量、冲击次数、冲击角度、铺层方式、层合板几何尺寸、边界条件及多因素耦合作用等因素对复合材料低速冲击力学行为的影响,并揭示了复合材料层板在低速冲击下的典型损伤模式,包括局部凹坑、基体开裂、纤维断裂与分层等多模态破坏形式。

(2) 数值模拟方面,多尺度分析方法在分层、界面失效及损伤演化的刻画上取得了重要进展,结合内聚力模型与连续损伤力学框架,可实现对低速冲击过程的渐进模拟。

(3) 理论建模方面,基于能量平衡、质量弹簧模型的解析方法能够较好地描述损伤起始与扩展行为,可进一步拓展应用至多类复合材料结构低速冲击损伤、载荷-挠度等响应分析。

(4) 基于机器学习建模方面,代理模型与机器学习为复合材料冲击损伤的预测与结构优化提供了新思路。特别是基于深度学习与特征可解释分析的研究,已展示出良好的预测精度与设计潜力,但仍面临数据质量、模型泛化性及物理约束不足等问题。

总体而言,复合材料低速冲击研究已形成较为系统的框架,但仍存在以下待突破的关键问题:其一,实验条件多局限于理想环境,尚需深入探讨温度、湿度、腐蚀介质等环境因素对冲击损伤演化与性能退化的影响;其二,当前研究对象多为材料层面或小试件,实际构件在复杂服役载荷下的冲击—剩余强度—寿命耦合机理尚不清晰;其三,有限元模型的参数辨识及损伤准则的工程化适用性仍需验证与标准化;其四,基于机器学习方法的可解释性与跨尺度融合机制尚待完善。

未来研究需面向复杂服役环境与工程实际需求,统筹推进试验、建模与数据驱动方法的协同发展,通过多场耦合试验与原位表征构建高保真数据基础,深化对冲击损伤演化与性能退化机理的认识。在此基础上,结合稳健的参数反演、不确定性量化与标准化损伤判据,提升数值模型的可靠性与工程适用性,同时引入物理约束与跨尺度信息融合策略,增强机器学习模型的可解释性与泛化能力,从而实现数据、机理与智能方法的

有机贯通,推动复合材料低速冲击行为由定性认知向定量预测与可控设计的转变。

参考文献(References)

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.(in Chinese)
- [2] Gogoi R, Maurya A K, Manik G. A review on recent development in carbon fiber reinforced polyolefin composites[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 8: 100279.
- [3] Sadighi M, Alderliesten R. Impact fatigue, multiple and repeated low-velocity impacts on FRP composites: a review[J]. Composite Structures, 2022, 297: 115962.
- [4] Stephen C, Shivamurthy B, Mohan M, et al. Low velocity impact behavior of fabric reinforced polymer composites—a review[J]. Engineered Science, 2022, 18: 75-97.
- [5] Dhote Y, Agrawal S, Deen A J. A survey on feature selection techniques for Internet traffic classification[C]//2015 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2015: 1375-1380.
- [6] Cheng Zhengqiang, Liu Hu, Tan Wei. Advanced computational modelling of composite materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 305: 110120.
- [7] Wei Gang, Hao Chenyu, Jin Hongwei, et al. Experimental investigation of high-velocity impact response and compression after impact behavior of continuous carbon fiber thermoplastic composites[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205(Part C): 112578.
- [8] Wei Jing, Luo Guoqiang, Wei Qinqin, et al. Quantitative analysis of strain rate and failure modes in sandwich structures under high-velocity impact for ballistic performance optimization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2025, 206: 105449.
- [9] Vlot A, Krull M. Impact damage resistance of various fiber metal laminates[J]. Journal de Physique IV Proceedings, 1997, 7(C3): C3-1045-C3-1050.
- [10] Lin Shiyao, Ranatunga V, Waas A M. Experimental study on the panel size effects of the low-velocity impact (LVI) and compression after impact (CAI) of laminated composites, Part I: LVI[J]. Composite Structures, 2022, 296: 115822.

- [11] ASTM D7136/D7136M-20 Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event[S].
- [12] Abrate S. Impact on composite structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [13] Shivakumar K N, Elber W, Illg W. Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates[J]. AIAA journal, 1985, 23(3): 442-449.
- [14] Cheng Zhengqiang, Zhong Yizhi, Tan Wei, et al. Experimental investigation on the low-velocity impact responses of fibre metal laminates with various internal and external factors[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 201(Part A): 112004.
- [15] Khashaba U A. A comprehensive study of low-velocity impact behavior and damage evaluation of angle-ply thin woven GFRP composites under elevated temperatures[J]. Composites Science and Technology, 2024, 252: 110608.
- [16] Liu Sai, Rawat P, Chen Zheng, et al. Low-velocity impact behavior of carbon woven laminates after exposure to varying temperatures[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 179: 109636.
- [17] Seyyednourani M, Akgun S, Ulus H, et al. Experimental investigation on compression-after-impact (CAI) response of aerospace grade thermoset composites under low-temperature conditions assisted with acoustic emission monitoring[J]. Composite Structures, 2023, 321: 117260.
- [18] Al-Azzawi A S M, Featherston C A, Lupton C, et al. Impact characteristics of S2-glass fibre/FM94-epoxy composites under high and cryogenic temperatures: experimental and numerical investigation[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 287: 111786.
- [19] Körbelin J, Dreiner C, Fiedler B. Impact of temperature on LVI-damage and tensile and compressive residual strength of CFRP[J]. Composites Part C: Open Access, 2020, 3: 100074.
- [20] 康少付, 李进, 马鹏, 等. 玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料的层间增韧及其低温下低速冲击性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(1): 145-154.
Kang Shaofu, Li Jin, Ma Peng, et al. Interlaminar toughening of glass fiber/epoxy vinyl ester resin composite and its low-velocity impact properties at low temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(1): 145-154.(in Chinese)
- [21] Shabani P, Li L, Laliberte J. Effects of impactor geometry and multiple impacts on low-velocity impact response and residual compressive strength of fiber-reinforced composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 303: 112575.
- [22] Sevkat E, Liaw B, Delale F. Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries[J]. Materials & Design (1980-2015), 2013, 52: 67-77.
- [23] Wang Jie, Waas A M, Wang Hai. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels[J]. Composite Structures, 2013, 96: 298-311.
- [24] De Cicco D, Asaee Z, Taheri F. Low-velocity impact damage response of fiberglass/magnesium fiber-metal laminates under different size and shape impactors[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2017, 24(7): 545-555.
- [25] Liu Haibao, Liu Jun, Ding Yuzhe, et al. Effects of impactor geometry on the low-velocity impact behaviour of fibre-reinforced composites: an experimental and theoretical investigation[J]. Applied Composite Materials, 2020, 27(5): 533-553.
- [26] 邹君, 刘佳鑫, 王计真, 等. 复合材料层合板钝头体高能量低速冲击响应与损伤特性[J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3271-3278.
Zou Jun, Liu Jiabin, Wang Jizhen, et al. Response and damage characteristics of composite laminates under high-energy wide-area blunt impact[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(6): 3271-3278.(in Chinese)
- [27] Lv Tiantong, Yuan Bingxian, Liu Yufan, et al. Comparative analysis of damage and energy absorption mechanisms in various plain-weave fiber reinforced composites under multi-angle low-velocity impact[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 210: 113040.
- [28] Kazemianfar B, Nami M R. Influence of oblique low velocity impact on damage behavior of 2D and 3D woven composites: experimental and numerical methods[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 167: 108253.
- [29] Chen Yuan, Fu Kunkun, Hou Shujuan, et al. Multi-objective optimization for designing a composite sandwich structure under normal and 45° impact loadings[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142: 159-170.
- [30] Wang Zhen, Luo Quantian, Li Qing, et al. Design optimization of bioinspired helicoidal CFRPP/GFRPP hybrid composites for multiple low-velocity impact

- loads[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 219: 107064.
- [31] 王鹏程, 孙云伟, 熊欣, 等. 复合材料桨叶典型铺层低速冲击后静力及疲劳性能试验[J]. *复合材料学报*, 2026, 43(1): 505-518.
- Wang Pengcheng, Sun Yunwei, Xiong Xin, et al. Post-impact static and fatigue properties of typical skins of helicopter composite blade[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2026, 43(1): 505-518.(in Chinese)
- [32] 陈勇, 庞宝君, 郑伟, 等. 纤维金属层板低速冲击试验和数值仿真[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 733-740.
- Chen Yong, Pang Baojun, Zheng Wei, et al. Tests and numerical simulation on low velocity impact performance of fiber metal laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 733-740.(in Chinese)
- [33] Huang Jinzhao, Zheng Tao, Tay T E, et al. Effects of low-velocity impact on the quasi-static and fatigue performance of 3D woven composites[J]. *Composite Structures*, 2024, 346: 118395.
- [34] Zhao Qiaoli, Wang Weihai, Liu Yutong, et al. Multiscale modeling framework to predict the low-velocity impact and compression after impact behaviors of plain woven CFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 299: 116090.
- [35] Fang Juan, Sun Baozhong, Gu Bohong. Mode-I fracture failure mechanism of 3-D braided composites under low-velocity wedge-loaded impact[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 310: 110533.
- [36] Huang Yinyuan, Liu Ya, Liu Haohao, et al. Low-velocity impact and compression-after-impact behaviors of carbon/glass fiber hybrid composite laminates based on thin-ply carbon fiber prepreg and unidirectionally arrayed chopped strand[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 211: 113075.
- [37] Cheng Zhengqiang, Xiong Junjiang. Progressive damage behaviors of woven composite laminates subjected to LVI, TAI and CAI[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(10): 2807-2823.
- [38] Amraei J, Katunin A, Dragan K, et al. Quantification and fusion of thermography and ultrasonic non-destructive testing results for composites with low-velocity impact damage[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026, 312: 113293.
- [39] Tang Zhao, Gui Xin, Li Zhengying, et al. An impact damage monitoring method for composite materials based on strain correlation of interlayers with optical fiber sensors[J]. *Composite Structures*, 2025, 368: 119288.
- [40] Jang B W, Kim C G. Real-time estimation of delamination occurrence induced by low-velocity impact in composite plates using optical fiber sensing system[J]. *Composite Structures*, 2018, 189: 455-462.
- [41] Cuyner A, Scida D, Roux É, et al. Damage characterisation of flax fibre fabric reinforced epoxy composites during low velocity impacts using high-speed imaging and Stereo Image Correlation[J]. *Composite Structures*, 2018, 202: 1186-1194.
- [42] Lyu Qihui, Wang Ben, Guo Zaoyang. Predicting post-impact compression strength of composite laminates under multiple low-velocity impacts[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 164: 107322.
- [43] Zhou Jianwu, Liao Binbin, Shi Yaoyao, et al. Experimental investigation of the double impact position effect on the mechanical behavior of low-velocity impact in CFRP laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 193: 108020.
- [44] Liao Binbin, Wang Panding, Zheng Jinyang, et al. Effect of double impact positions on the low velocity impact behaviors and damage interference mechanism for composite laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 136: 105964.
- [45] Liao Binbin, Zhou Jianwu, Li Ying, et al. Damage accumulation mechanism of composite laminates subjected to repeated low velocity impacts[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 182: 105783.
- [46] 俞鸣明, 朱雪莉, 刘雪强, 等. 低速多次冲击下碳纤维/环氧树脂基复合材料层合板失效机制及剩余强度评估[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(9): 5359-5370.
- Yu Mingming, Zhu Xueli, Liu Xueqiang, et al. Failure mechanism and assessment of residual strength of carbon fiber/epoxy resin matrix composite laminates under multiple impacts at low velocities[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(9): 5359-5370.(in Chinese)
- [47] Rezasefat M, Gonzalez-Jimenez A, Giglio M, et al. Numerical study on the dynamic progressive failure due to low-velocity repeated impacts in thin CFRP laminated composite plates[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 167: 108220.

- [48] Sadighi M, Tooski M Y, Alderliesten R C. An experimental study on the low velocity impact resistance of fibre metal laminates under successive impacts with reduced energies[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 67: 54-61.
- [49] Pan Xin, Liu Tao, Chen Liming, et al. Mechanical response and damage accumulation of thermoplastic composite laminates under repeated low-velocity impacts[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 216(Part B): 113682.
- [50] Zhu Keyu, Zheng Xitao, Peng Jing, et al. The relationship between the impact position interference and CAI strength of composite sandwich structures under double impacts[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 268: 111092.
- [51] Anuse V S, Shankar K, Velmurugan R, et al. Compression-After-Impact analysis of carbon fiber reinforced composite laminate with different ply orientation sequences[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 167: 104277.
- [52] Caminero M A, García-Moreno I, Rodríguez G P. Experimental study of the influence of thickness and ply-stacking sequence on the compression after impact strength of carbon fibre reinforced epoxy laminates[J]. *Polymer Testing*, 2018, 66: 360-370.
- [53] Lin Shiyao, Waas A M. The effect of stacking sequence on the LVI damage of laminated composites; experiments and analysis[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 145: 106377.
- [54] Guo Z B, Liu P F. An improved non-associative plastic flow rule for CF/PEEK thermoplastic composites under low-velocity impact[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2026, 308: 112969.
- [55] 孙子恒, 王继辉, 倪爱清, 等. 不同铺层复合材料夹芯结构低速冲击与冲击后剩余强度研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(11): 102-110.
Sun Ziheng, Wang Jihui, Ni Aiqing, et al. Study on the low-speed impact performance and residual strength after impact of composite sandwich structure with different layup[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(11): 102-110.(in Chinese)
- [56] 闵伟, 程乐乐, 余木火, 等. 热膨胀工艺制备不同厚度泡沫夹芯复合材料的低速冲击性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(3): 1611-1625.
Min Wei, Cheng Lele, Yu Muhuo, et al. Low-velocity impact properties of foam sandwich composites with different thicknesses prepared via thermal expansion molding process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(3): 1611-1625.(in Chinese)
- [57] Seamone A, Davidson P, Waas A M, et al. Low velocity impact and compression after impact of thin and thick laminated carbon fiber composite panels[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 292: 112745.
- [58] Seamone A, Davidson P, Waas A M, et al. Low velocity impact and compressive response after impact of thin carbon fiber composite panels[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2022, 257: 111604.
- [59] Liu Songjing, Ding Yanwei, Feng Yu, et al. Low-velocity impact size effect of carbon fiber composite laminates: experimental and mechanism research[J]. *Thin-Walled Structures*, 2026, 218(Part B): 114028.
- [60] Ma Dayou, Rezasefat M, Aparecido da Cruz J, et al. Effect of fixture boundary conditions for low-velocity impact: a focus on composites with different matrix and fibers[J]. *Materials Letters*, 2024, 355: 135370.
- [61] Zhao Zhibin, Zhou Jianwu, Cai Hui, et al. Characterization of low-velocity impact response and damage tolerance of thermoplastic/thermoset composite laminates under strong and complex preload[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 302: 112530.
- [62] Hu Yuan, Liu Dongsheng, Guo Jian, et al. Low-velocity impact damage research on 2-dimentional UHMWPE/CF hybrid woven laminates under preloading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107472.
- [63] Rathnasabapathy M, Mouritz A P, Orifici A C. Impact-under-load damage tolerance of a fibre metal laminate[J]. *Composite Structures*, 2022, 287: 115368.
- [64] Heimbs S, Heller S, Middendorf P, et al. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: test and modelling[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(10/11): 1182-1193.
- [65] Talreja R, Phan N. Assessment of damage tolerance approaches for composite aircraft with focus on barely visible impact damage[J]. *Composite Structures*, 2019, 219: 1-7.
- [66] Qin Zixing, Du Jinbo, Cui Jialin, et al. Experimental and numerical methods for impact response and accumulated damage evolution mechanism of laminated composite subjected to repeated impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2026, 218(Part C): 114123.

- [67] Wang Kangkang, Zhao Libin, Hong Haiming, et al. A strain-rate-dependent damage model for evaluating the low velocity impact induced damage of composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 995-1003.
- [68] Huang Jia, Zhang Chenxu, Wang Jizhen, et al. On the applicability of rate-dependent cohesive zone models in low-velocity impact simulation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 271: 108659.
- [69] Huang Linhai, Tao Yin, Sun Jin, et al. Assessment of numerical modeling approaches for thin composite laminates under low-velocity impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 191: 111053.
- [70] Jakubczak P, Podolak P, Biruk-Urban K, et al. Enhancement of numerical model of low-velocity impact response of fibre metal laminates by adaptation of non-homogenous cohesive zone model and microstructural anisotropy of metal layers[J]. *Composites Science and Technology*, 2025, 268: 112122.
- [71] Falzon B G, Tan Wei. Virtual testing of composite structures: progress and challenges in predicting damage, residual strength and crashworthiness[M]//Beaumont P W R, Soutis C, Hodzic A. *The structural integrity of carbon fiber composites*. Cham: Springer, 2017: 699-743.
- [72] Tsai S W, Wu E M. A general theory of strength for anisotropic materials[J]. *Journal of composite materials*, 1971, 5: 58-80.
- [73] Pinho S, Darvizeh R, Robinson P, et al. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(19/20): 2313-2341.
- [74] Hill R. Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials: III. self-consistent model[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, 13(4): 189-198.
- [75] Hashin Z, Rotem A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(4): 448-464.
- [76] 于飞, 陈向明, 张阿盈, 等. 一种改进的内聚力损伤模型在复合材料层合板低速冲击损伤模拟中的应用[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(6): 1745-1753.
Yu Fei, Chen Xiangming, Zhang Aying, et al. Application of modified cohesive zone damage model in damage simulation of composite laminates subject to low-velocity impact[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(6): 1745-1753.(in Chinese)
- [77] Yao Hang, Bai Tian, Han Zhangxue, et al. Experimental and numerical investigation on low-velocity impact of plain-woven bamboo fiber reinforced epoxy resin composites based on multiscale modeling[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 306: 112779.
- [78] 姚瀚, 何文涛, 马岩, 等. 基于多尺度损伤机制的CFRP铝合金粘接板冲击行为研究[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(4): 2167-2179.
Yao Lu, He Wentao, Ma Yan, et al. Research on impact behavior of CFRP aluminum alloy adhesive plate based on multiscale damage mechanism[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(4): 2167-2179.(in Chinese)
- [79] 马健, 燕瑛. 缝合泡沫夹芯复合材料低速冲击的多尺度数值方法[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(1): 230-235.
Ma Jian, Yan Ying. Multi-scale simulation of stitched foam-core sandwich composites subjected to low-velocity impact[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(1): 230-235.(in Chinese)
- [80] 秦卓, 魏小玲, 胡晗, 等. 机织 T 字型加筋板复合材料的抗低速冲击性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(6): 3673-3682.
Qin Zhuo, Wei Xiaoling, Hu Han, et al. Low velocity impact resistance of woven fabric reinforced T-shaped composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(6): 3673-3682.(in Chinese)
- [81] Shah S Z H, Megat-Yusoff P S M, Karuppanan S, et al. Multiscale damage modelling of 3D woven composites under static and impact loads[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 151: 106659.
- [82] Jing Kunkun, Zhou Hui, Wang Hao, et al. Multiscale damage and low-velocity impact study of three-dimensional woven composites[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 202: 112132.
- [83] Liao B B, Tan H C, Zhou J W, et al. Multi-scale modelling of dynamic progressive failure in composite laminates subjected to low velocity impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 131: 695-707.
- [84] Gu Fuwei, Yuan Xinyi, Zhu Xiaolei, et al. Numerical study of composite laminates subjected to low-velocity impact using a localized damage algorithm of Puck's 3D IFF criterion[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 228: 106901.
- [85] Hou Yuliang, Meng Liang, Li Guohong, et al. A novel multiscale modeling strategy of the low-velocity impact behavior of plain woven composites[J]. *Composite*

- Structures, 2021, 274: 114363.
- [86] Zhao Zhenqiang, Dang Haoyuan, Zhang Chao, et al. A multi-scale modeling framework for impact damage simulation of triaxially braided composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 110: 113-125.
- [87] Zhou Junjie, Wen Pihua, Wang Shengnan. Numerical investigation on the repeated low-velocity impact behavior of composite laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 185: 107771.
- [88] Yang Yingxue, Liang Qi, Dou Hongtong, et al. Low velocity impact failure mechanisms of carbon/UHMWPE 2.5D woven hybrid composites via experimental and numerical methods[J]. *Composite Structures*, 2023, 321: 117290.
- [89] Shivakumar K N, Elber W, Illg W. Prediction of impact force and duration due to low-velocity impact on circular composite laminates[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1985, 52(3): 674-680.
- [90] Xiao Shanshan, Chen Puhui, Ye Qiang. Prediction of damage area in laminated composite plates subjected to low velocity impact[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 98: 51-56.
- [91] Olsson R. Analytical prediction of large mass impact damage in composite laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(9): 1207-1215.
- [92] 方际澄, 于哲峰. 含分层损伤复合材料层压板低速冲击模型刚度计算方法[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2768-2776.
Fang Jicheng, Yu Zhefeng. Analytical model for stiffness of the low velocity impact for composite laminate with delaminations[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2768-2776.(in Chinese)
- [93] Othman R, Khashaba U. A new analytical model for progressive damage in CFRP composite beams under low-velocity impact[J]. *Polymer Composites*, 2026, 47(6): 5126-5144.
- [94] Salvetti M, Gilioli A, Sbarufatti C, et al. Analytical model of the dynamic behaviour of CFRP plates subjected to low-velocity impacts[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142: 47-55.
- [95] Rafiee R, Ghorbanhosseini A, Rezaee S. Theoretical and numerical analyses of composite cylinders subjected to the low velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111230.
- [96] Rafiee R, Rashedi H, Rezaee S. Theoretical study of failure in composite pressure vessels subjected to low-velocity impact and internal pressure[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2020, 14(6): 1349-1358.
- [97] Li Zelin, Li Hui, Ren Chaohui, et al. Low-velocity impact resistance of all composite cylindrical shell panels with a foam filled honeycomb core: theoretical and experimental investigation[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 182: 104765.
- [98] 李朋潮, 李晖, 肖正洋, 等. 基于解析法的低速冲击下复材薄壁圆柱壳动力学建模研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(1): 81-89.
Li Pengchao, Li Hui, Xiao Zhengyang, et al. Study on dynamic modeling of composite thin cylindrical shells subjected to low-velocity impact based on an analytical method[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2023, 53(1): 81-89.(in Chinese)
- [99] Malekzadeh Fard K, Khalili S M R, Forooghi S H, et al. Low velocity transverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 63: 111-122.
- [100] 王凡, 熊景毅, 王文群, 等. 低速冲击下碳纤维面板泡沫夹芯复合材料的损伤分析[J]. *力学季刊*, 2024, 45(3): 739-749.
Wang Fan, Xiong Jingyi, Wang Wenqun, et al. Damage analysis of carbon fiber panel and foam core sandwich composites under low speed impact[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2024, 45(3): 739-749.(in Chinese)
- [101] Gong S W, Lam K Y. Transient response of stiffened composite plates subjected to low velocity impact[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1999, 30(5): 473-484.
- [102] Sause M G R, Schmitt S, Kalafat S. Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 164: 24-33.
- [103] Patel D K, Parthasarathy T, Przybyla C. Predicting the effects of microstructure on matrix crack initiation in fiber reinforced ceramic matrix composites via machine learning[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111702.
- [104] Califano A, Chandarana N, Grassia L, et al. Damage detection in composites by artificial neural networks trained by using in situ distributed strains[J]. *Applied Composite Materials*, 2020, 27(5): 657-671.
- [105] Liu Wenhao, Liu Hu, Cheng Zhengqiang, et al.

- Prediction of low-velocity impact responses for bio-inspired helicoidal laminates based on machine learning[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2025, 195: 105144.
- [106] Huang Linhai, Sun Jin, Zhang Diantang, et al. Optimizing impact resistance of thin-walled composite pressure vessels based on an enhanced progressive damage model and a machine learning approach[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 217(Part A): 113812.
- [107] Kovac A, Tan K. Predicting low velocity impact damage of laminated composites using artificial neural network machine learning models[C]//2024 Regional Student Conferences, 2024: AIAA 2024-85984.
- [108] Mendikute J, Baskaran M, Llavori I, et al. Predicting the effect of voids generated during RTM on the low-velocity impact behaviour by machine learning-based surrogate models[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 260: 110790.
- [109] Hiremath V S, Patil S, Reddy D M, et al. An ANN approach to predicting the impact parameters of GFRP composites under low-velocity impact[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2024, 18(2): 709-720.
- [110] Hiremath S, Zhang Yu, Zhang Lu, et al. Machine learning approach to evaluating impact behavior in fabric-laminated composite materials[J]. *Results in Engineering*, 2024, 23: 102576.
- [111] Masud M, Mubashar A, Warsi S S, et al. Optimizing bio-hybrid composites for impact resistance using machine learning[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2025, 47(5): 217.
- [112] Zhang Zhuo, Zhang Kai, Zhang Gang, et al. Low-velocity impact simulation of carbon fiber reinforced composite laminate using IFF-criterion based on BP-ANN[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 148: 109095.
- [113] Su Yifan, Ge Xingmao, Zhang Xinchun, et al. Damage behavior of composite/metal hybrid tubes under low-velocity impact: a deep learning and mode decomposition-based acoustic emission approach[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 214: 113428.
- [114] Feng Yuan, Wang Qihan, Yu Yuguo, et al. Experimental-numerical-virtual (ENV) modelling technique for composite structure against low velocity impacts[J]. *Engineering Structures*, 2023, 278: 115488.
- [115] Jalali S S, Mahzoon M, Mohammadi H. Identification of damage properties of glass/epoxy laminates using machine learning models[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 177: 104510.
- [116] Dhanesh E, Nagarajan V A, Vinod Kumar K P, et al. Quantitative assessment of impact damage in stitched foam-filled Aluminium honeycomb Sandwich panels by experimental and machine learning methods[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(15): 13663-13675.
- [117] Wang Guowen, Zhang Laibin, Xuan Shanyong, et al. An efficient surrogate model for damage forecasting of composite laminates based on deep learning[J]. *Composite Structures*, 2024, 331: 117863.
- [118] Jayaram R S, Prasanth P V, Saravanamuthukumar P, et al. Impact performance enhancement of nano-clay-reinforced sandwich panels: a machine learning approach[J]. *Polymer Composites*, 2026, 47(2): 1218-1234.
- [119] Cuomo S, De Simone M E, Andreades C, et al. Machine learning for impact detection on composite structures[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 34(Part 1): 93-98.
- [120] Zhupanska O, Krokhmal P. Unsupervised machine learning for automatic image segmentation of impact damage in CFRP composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2024, 31(6): 1849-1867.
- [121] Wang Minghua, Yan Yuxuan, Zhang Weixuan, et al. An impact localization method for composite structures based on time series features and machine learning[J]. *Composite Structures*, 2025, 367: 119242.
- [122] Hochster H, Bernikov Y, Meshi I, et al. Refined nonlinear micromechanical models using artificial neural networks for multiscale analysis of laminated composites subject to low-velocity impact[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 264: 112123.
- [123] Hochster H, Ranatunga V, Shemesh N N, et al. Surrogate PHFGMC micromechanical models for multiscale analysis: AI-enhanced low-velocity impact analysis of hat-stiffened composite panels[J]. *Journal of Composite Materials*, 2025, 59(3): 305-320.
- [124] Zhang Miaomiao, Chen Qinglin, Zhuo Jiayong, et al. Machine learning-based optimization of impact-resistant layups for FRP hybrid laminates in yachts[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 324: 120600.
- [125] Chen Yongshun, Xiao Zhen, Yang Yapeng, et al. Multi-objective optimization for impact resistance of composite laminates with non-conventional ply

orientations: an integrated finite element and machine learning framework[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 216(Part B): 113687.

- [126] Hu Wenlong, Cheng Hui, Zhang Kaifu, et al. A novel concurrent multiscale damage analysis method enhanced by physics-informed neural network for composite joint[J]. *Composites Science and Technology*, 2026, 275: 111483.

