

纤维增强复合材料层合板弹道冲击研究进展

梅志远 朱 锡 刘燕红 张立军

海军工程大学船舶与海洋工程系, 武汉 430033

摘 要 近 20 多年来, 纤维增强复合材料层合板, 在结构防护领域大量使用, 由于层合板结构及材料特性的复杂, 其弹道吸能机理十分复杂, 影响因素包括靶板的几何尺寸、结构形式、材料力学特性及层间粘结、弹形及弹速等诸多方面. 本文主要针对近 10 年的研究工作, 侧重于实验技术、弹道冲击实验研究、经验公式及理论分析模型等几方面的发展, 进行了回顾和展望. 同时, 对于弹道侵彻历程、材料的动态力学特性以及数值分析技术在层合板弹道冲击问题上的运用及发展等方面, 也进行了简要的介绍.

关键词 纤维增强复合材料, 层合板, 弹道冲击, 防护工程, 实验研究, 数值技术

1 引 言

冲击现象是结构防护工程领域最为常见的现象之一. 20 世纪 70 年代以来, 复合材料开始在防护工程中大量使用, 纤维增强复合材料层合板 (以下简称层合板) 抗冲击问题, 一直受到关注. 然而冲击响应的分类, 至今没有得到共识. 一般而言, 层合板低速冲击是指速度低于 100 m/s 的冲击, 而超高速冲击, 冲击速度高于 1000 m/s; 或将靶板被弹丸完全穿透的情况视为高速冲击; 或将高速冲击定义为在弹丸侵彻靶板的整个过程中, 结构变形主要发生在冲击点附近很小的局部区域内^[1,2]; R. Olsson^[3] 提出了层合板波控冲击的质量准则, 认为响应类型取决于弹 / 靶的质量比率, 而与冲击速度无关; P. Robinson^[4] 则认为当初始冲击速度 V_i 与层合板板厚方向的声速 C 之比高于材料的失效应变 ϵ_c ($\epsilon_c < V_i/c$) 时, 定义为高速冲击, 即波控冲击.

在低速冲击时, 层合板主要表现为靶板整体弯曲变形; 而超高速冲击时, 冲击速度远高于靶板弹道极限; 弹道冲击大多属于高速冲击问题. 同时, 基于防护工程, 弹道冲击下层合板的损伤耗能是其弹道抵抗能力的体现^[1,5], 靶板被穿透前, 靶板损伤耗能愈大, 其抗弹性能愈好. 弹道冲击载荷作用下, 如何扩大损伤范围, 提高单位损伤容量是防护研究的关键.

由于该问题研究跨学科特点, 涉及领域较多, 单

一的研究方法难以达到全面理解. 本文主要针对近 10 年来的研究工作, 侧重于实验技术、实验研究、经验公式和理论分析模型等几个方面, 探讨了该问题的研究现状和发展趋势, 同时对弹道侵彻力、材料力学特性以及数值分析技术在层合板弹道冲击上的运用与发展等几方面也进行了简要论述.

2 实验技术

2.1 发射技术及实验用弹

高速冲击实验中, 常用的发射装置主要有各型气体炮、火药枪及军用制式枪械.

气体炮采用不同气体, 气压可调, 通过电热或机械装置控制发射, 推动枪管内弹体, 得到实验需要的弹速, 其综述性介绍文章可见文献 [6]. 而更为经济的加速装置是火药枪和军用制式枪械, 火药枪可以通过调节火药用量得到不同的弹速^[7], 而采用军用制式枪械弹速一般变化幅度不大^[8~10].

在实验用弹方面, 文献 [11] 列出了美国 (NIJ) 抗弹标准、德国警用抗弹 (DIN52290) 标准及欧洲 (CEN) 抗弹标准, 一般取标准弹口径 (5.56 mm\7.62 mm\9 mm) 作为轻型复合装甲的威胁来源, 弹体质量范围为 (2.6 ~ 15.6) g, 弹速为 (259 ~ 975) m/s. 在层合板弹道冲击试验中, 常用的弹形, 如: 锥柱、平头柱体、球形和立方体等, 弹径

受枪管内径限制, 弹体质量 ($1 \sim 60$ g) 和弹速范围 ($10^1 \sim 10^3$ m/s 量级) 较大. 为减少实验研究中弹体变形对防护结构吸能量的影响, 以研究为目的, 西方国家近年来在弹道冲击研究中大量的使用破片模拟弹 (fragment simulating projectiles, FSPs), 常用的有北约国家和美国针对破片的杀伤穿甲特点设计的 FSPs Stanag 2920 和 US-Mil.std 662e, 弹体为圆柱体, 弹头部近似为棱台^[12,13].

2.2 弹道侵彻观测技术

层合板弹道侵彻过程实验观测是建立分析模型和经验公式的基础, 分为弹体侵彻过程中弹体速度测量和层合板变形模式观察两部分. 研究者们利用已有的观测技术, 已作了很多工作, 但目前该领域依然存在着一定的技术缺陷, 值得继续关注和发展.

计时器法是最为常见的测速手段, 对于弹体入射速度的测量, 该法能得到较好的结果. 一般通过相应两组测速系统间距除以触发信号时间间隔, 即可得到弹体弹道速度. S.T. Jenq^[14] 采用激光计时器和高速摄像装置, 同时观测弹体初始冲击速度, 相差仅 1%. 但 S. Abrate^[15] 认为对于变形弹的弹道侵彻, 由于崩裂物质、剪切冲塞块和小碎块等的影响, 采用计时器法测量弹体的靶后剩余速度存在一定的误差和实施难度.

对于弹道侵彻过程的观测技术的发展, 高速摄

影法是较早且较为成熟的观测技术, 目前在层合板弹道侵彻实验研究中 (国外) 较多使用. 另外, R.H. Zee^[16] 曾采用在长杆弹上安装磁铁, 在弹体运动轨迹上布置金属线圈, 弹体通过时, 磁体运动将在金属线圈上产生电流信号, 通过采集和记录电流信号, 得到弹丸的位移 / 时间历程, 但其准确性受得了怀疑^[17].

以上方法和常用的摄影观测技术、计时器系统均属于离散观测系统, 仅能提供有限和离散时刻的弹道侵彻历程. 连续侵彻历程的观测系统, 建立在激光干涉测量法的基础上, 通过光电探测器侦测弹体通过时的光纹密度或光通量变化, 得到弹体的速度 (加速度或侵彻力) / 时间连续变化历程. E. Wu^[18~20] 采用激光多普勒装置 (laser doppler anemometer, LDA) 获得弹体速度时程曲线. P.K. Gupta^[21] 和 H.D. Espinosa^[22] 做了类似的工作, 然而, 该系统成本较高、数据处理非常费时, 而且处理过程较为复杂.

原理相似, 而更为经济、易于操作的观测技术是激光线速度传感器 (LLVS) 技术. K.T. Ramesh^[23] 使用 LLVS 技术, 得到了 100 m/s 速度量级的飞板冲击的靶前位移 / 时间变化历程. D. Starratt^[24] 使用增强激光测速系统 (ELVS), 得到了弹道冲击过程中弹体位移、速度、侵彻力和弹体能量时程曲线, 其操作原理, 如图 1 所示.

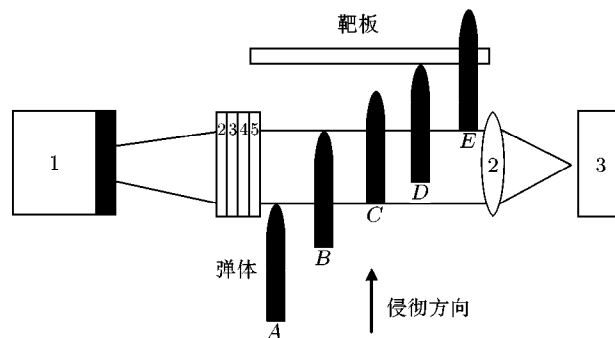


图 1 ELVS 测试系统操作原理图^[24]

1——线激光光源; 2——聚光凸镜; 3——光电转换器

宋力^[17] 验证了光通量测试的可行性, 并测量了弹丸贯穿复合材料靶板过程中的瞬时位移. 但笔者认为激光干涉测量系统观测弹道冲击历程, 较低速度冲击时, 更加适用于刚性层合板和长杆形弹体组合, 而柔性层合板在冲击过程中变形较大, 弹体侵彻全过程的观测, 存在一定困难. 较高速度冲击时, 飞溅物、弹体的侵彻姿态以及高速冲击弹体尾部激波对光栅信号的干扰等诸多因素都将增加信号的采集难度, 试验系统有待改进.

综上所述, 目前对于弹道侵彻过程的观测, 基本上可分为 3 类: (1) 触发信号为基础的计时器技术; (2) 摄影技术 (高速摄影及 X 光摄影); (3) 光学组件测试技术. 3 种测试手段均存在各自的优点及不足之处, 因此, 目前较多的观测工作中将 3 种方式联合使用, 如: 使用计时器法测量弹体初速, 采用摄影法和光学法观测侵彻中及侵彻后弹体及层合板的运动, 也取得了较好的结果. 同时, 应当注意到, 目前的研究工作, 大多集中于弹体运动轨迹的观测, 而对于侵

彻过程中,靶板(尤其是对于厚板)结构的内层运动模式研究甚少,这有待于超高速 X 光摄影机等更为先进的观测技术的发展和使用。

2.3 变形(破坏)模式观测技术

由于直接观测弹道侵彻过程中层合板内部运动难度很大,近年来,研究者们通过间接途径,对靶板整体运动、基体开裂、层间分层及纤维失效等变形(破坏)模式及其相互影响规律进行研究,推测变化机理。较为普遍的实验方法包括:染色渗透剂法、热揭层(thermally-depiled)技术、边界复制技术、扫描电镜(scanning electron microscopy, SEM)技术以及强光照射和高速摄影等。在层合板弹道冲击破坏模式的观测中,研究者们往往综合利用以上方法,对层合板冲击载荷作用下的各种损伤规律及破坏模式进行了细致的观测,得到了一些有意义的结论^[25~27]。

3 层合板材料动态力学特性

复合材料的率相关性研究,一直都得到了研究者们重视和关注^[19,26,28,29]。

J. Harding^[30]指出某些复合材料的性能与应变率是相关的。同时,(1)单向角度铺层层合板的应变率效应主要体现为纤维材料的率效应;(2)层合板材料的率效应与应变率范围相关;(3)对于织布层合板在拉伸或弯曲载荷作用下,纤维和基体之间存在较大的相互干涉现象,该现象可表现为拉伸模量的应变率敏感性。

在此基础上,G. Zhu^[7]认为聚酯基体和 Kevlar/聚脂层合板试件,在高应力状态下,均表现出明显的率相关性。国内如尚嘉兰^[31]、姜春兰^[32]、夏源明^[33]、许沐华^[34]和汪洋^[35]等利用平板高速碰撞实验和 Hopkinson 一维应力试验,分别研究过玻纤/酚醛、高强聚乙烯以及芳纶纤维束等的拉伸及压缩应变动态本构关系。研究结果显示以上纤维增强材料及其层合板结构均具有明显的率效应和相应的灵敏区间,本构关系呈明显的滞回特性,如图 2。

王礼立^[36]认为材料动态特性研究中已越来越多的采用宏观与细/微观研究相结合的方法。尤其对于复合材料、泡沫材料、相变材料等,当从其细/微结构的基础上来研究材料整体宏观行为时,宏观上的材料动力学问题又常常转化为细微观上的结构动力学问题了。

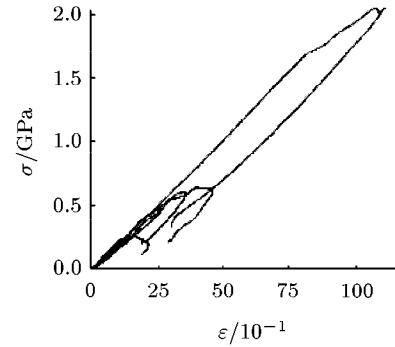


图 2 酚醛玻璃钢不同应变率载荷下的应力应变关系^[31]

4 层合板弹道冲击特性实验研究

多年来的研究表明^[37,38],层合板的损伤及变形模式,在不同载荷形式、不同层合板结构以及弹道因素变化等因素的影响下,具有较大差异。

4.1 不同载荷作用下层合板破坏模式的实验研究

冲击载荷,包括准静态冲压、低速冲击(大质量)以及不同速度(小质量)冲击等几种载荷形式。G. Zhu^[7]、S.T. Jenq^[26]及 R. Mines^[39]等考虑到层合板厚度、结构形式以及冲击体的形状等因素对破坏模式的影响,在准静态和弹道冲击载荷作用下的破坏模式进行了综合性比较实验研究工作。R.L. Sierakowski^[40]和 W.J. Cantwell^[41]以冲击能量为基础,对大质量低速冲击和小质量不同速度冲击下,碳纤维/环氧层合板的吸能特性,进行实验比较研究。E. Wu^[20]针对 2.9mm 厚的 E 玻璃纤维/环氧织布层合板,以相同的弹体,较大速度范围内(8.2 ~ 92.8m/s)的冲击现象进行试验研究。研究工作表明:不同形式的载荷作用下,层合板的变形模式机理和程度的巨大差异,主要表现为:(1)尺度效应的影响;(2)初始损伤模式产生机理的差异;(3)损伤分布、程度及与冲击速度的关系等。

对于层合板弹道冲击下的变形模式,金子明^[8]和张佐光^[9]等认为层合板采用不同种类的纤维及层间粘结形式(基体材料)将严重影响弹道冲击下层合板宏观破坏形貌,单向纤维角度铺层时破坏模式,包括:靶板局部变形、分层和纤维拉伸断裂及纤维的拔脱,而织物层合板的破坏模式可分为 3 种基本类型,脆性分层型、变形凸起型及冲塞侵彻型。

E. Wu^[20]在研究弹道冲击下,E 玻纤/环氧层合板分层面积与初始冲击能量的关系时,认为在极限穿透能以下的冲击下,分层损伤面积随冲击能量线性

增长, 分层区由圆形 (无明显的纤维断裂损伤现象出现) 逐渐转变为椭圆形。

G. Zhu^[7] 根据一维应力波层间传播特性推测弹道冲击下靶板的初始破坏, 认为弹靶接触初始由接触点传出的压缩波在背板反射为拉伸波, 使层合板背层层间出现 I 型断裂, 导致了靶板的初始分层破坏, 而分层现象的扩展, 则是由弹体的不断侵入完成。G. Czarnecki^[42,43] 实验验证了该破坏机理的可能性。

综上所述, 由于惯性效应、材料应变率效应及应力波传播等因素的影响, 不同载荷作用下, 相似的损伤及变形模式在产生机理、程度及相互作用关系等方面存在较大差异; 弹道冲击下不同纤维及基体材料种类的组合, 其破坏模式存在差异, 由此可将靶板分为刚性靶板 (如碳纤维、玻纤等) 和柔性靶板 (如芳纶纤维、高强聚乙烯等); 弹道冲击下, 刚性靶板一般出现较为明显的纤维剪切破坏形式, 背板呈花瓣状破坏, 而柔性靶板则表现出更佳的应力波扩散性能, 出现大变形的吸能模式, 一般表现出纤维柔性拉伸断裂, 背板呈发散园孔状。

4.2 基体性能对层合板抗弹性能的影响

聚合物基体材料一般可分为热固和热塑性两类^[44]。

关于基体含量对层合板结构力学性能的影响, D.G. Lee^[45] 认为玻纤 / 环氧层合板的纤维体积系数为 0.60 时, 具有最大的抗冲击吸能量和最大的剪切强度。J. Yuan^[29] 发现准静态载荷下, 纤维体积系数增加, 压缩强度线性增加; 动载荷下, 应力 / 应变曲线在失效点附近表现出较强的非线性。相同纤维体积系数下, 动态压缩强度约为准静态压缩强度的 (1.5~1.8) 倍。

关于基体含量对层合板抗弹性能的影响, G. Zhu^[7] 针对五层 Kevlar / 聚酯层合板弹道冲击下基体含量影响进行比较研究, 基体体积系数分别为 0.26、0.35 及 0.45, 在锥柱弹体的弹道冲击下, 弹道极限仅产生 1m/s 量级的变化。Du Pont 公司采用弹体直径 8.75 mm, 质量 4.15 g 的柱形弹, 弹道冲击 Kevlar / 聚酯层合板, 基体含量的差异, 使弹道极限产生 10% 变化^[7,8]。刘国权^[10] 认为树脂基体在纤维复合板抗弹过程中, 传递应力、均衡载荷, 并且通过自身碎裂、烧蚀降解来吸收能量, 抗弹实验表明玻纤层合板中树脂含量为 24.7 % 左右时, 其抵抗 7.62 mm 钢芯弹侵入时的效果最好, 因此, 认为基体含量是影响层合板抗弹性能的重要因素, 橡胶等柔性基体层合板, 随着基体含量增加, 层合板 V_{50} 存在极大值, 而热固性树脂基复合板, V_{50} 随基体含量增加而下降^[7,8]。

关于基体材料种类的影响, 张佐光^[9] 认为对于

柔性纤维增强材料层合板, 基体材料与纤维材料的变形匹配、良好的界面结合和纤维的大变形是层合板抗弹性能提高的关键。金子明^[8] 对比芳纶缝合织物、芳纶 / 热固性和芳纶 / 橡胶基层合板的抗弹性能, 发现后者 V_{50} 值远高于芳纶缝合织物, 而比芳纶 / 改性酚醛高 17.5%。然而, B.L. Lee^[25] 对比高强聚乙烯纤维 / 乙烯基脂和高强聚乙烯纤维 / 聚亚胺脂靶板, 弹道冲击下的破坏情况, 认为高强聚乙烯纤维 / 乙烯基脂具有更高的弹道冲击极限和更长的抗冲击疲劳寿命周期, 采用柔性聚亚胺脂基体, 限制了靶板分层破坏模式的增长而减少了靶板的有效吸能量。

综上所述, 基体种类、含量的差异, 将引起层合板力学性能的变化, 从而导致层合板冲击载荷下的破坏模式及抗冲击性能的变化, 其作用不可忽视; 不同的纤维增强材料, 存在不同的基体材料组合和最佳的基体含量值; 基体与纤维材料相互作用的动态分析模型的建立, 属于层合板细 / 微观力学研究的范畴, 目前该方面的研究工作还较为缺乏。

4.3 不同结构形式对抗弹性能的影响

层合板形式的多样性主要体现为纤维的混杂、铺层形式的变化以及横向增强等方面。

4.3.1 混杂结构的影响

P. Rohchoon^[47,48] 以分层面积为抗弹性能高低的衡量标准, 比较研究了 1~4 层玻纤、芳纶层合板, 混杂及表面处理后的吸能特性, 认为: (1) 玻纤与芳纶纤维层合板, 在冲击载荷下, 存在吸能模式的差异; (2) 全芳纶纤维层合板, 由于大变形吸能模式, 表现出最高的吸能量; (3) 芳纶层在层合板中的位置及体积比, 较大程度上影响玻纤 / 芳纶混杂层合板的抗冲击性能; (4) 芳纶层纤维表面处理, 限制了芳纶层的变形, 不会对总吸能量做出较大的贡献。以上工作建立在低速、薄板基础上, 存在一定的局限性。如: 文献^[47, 48] 对于 4 层层合板和 3 层以下层合板, 芳纶层为背面时的抗弹性能得出了相反的结论, 即属于层合板厚度效应的影响。

对于弹道冲击下混杂结构层合板的抗弹性能研究, T. Balakrishna^[49] 将芳纶 / 玻纤混杂, 以酚醛作基体树脂, 发现其抗弹性能优于全芳纶或全玻璃纤维层合板。朱锡^[50] 以舰用轻型复合装甲研究为背景, 实验研究了 7.62 mm 尖头弹弹道冲击下 Kevlar 纤维和 S 玻纤为增强材料的两组不同层合板及其混杂结构层合板的抗穿甲性能, 认为采用 Kevlar 纤维与 S 玻纤的混杂层合板其抗弹性能好于单一 Kevlar29、Kevlar49、S 玻纤层合板, 且较佳的纤维混杂比为 0.5。

混杂复合材料结构最早出现在 20 世纪 70 年代初,是复合材料领域重要的发展方向,目的在于充分利用纤维混杂正效应和层合板弹道冲击下的厚度效应^[51],在保持组分材料优点的同时,获得优良的综合性能,其研究目前尚处于初步阶段,有待进一步深入。

4.3.2 铺层方式及横向增强对层合板抗弹道冲击性能的分析

铺层方式包括角度铺层、织物铺层及织物编织方式的差异;横向增强,主要用于改变层合板的层间特性,具体措施一般为表面处理及横向缝合。采用不同层合板铺层方式和横向增强技术的运用,将导致纤维层与基体结合形式的差异,从而将引起层合板层间特性和应力波传播特性的变化,其宏观影响主要表现为分层模式及纤维断裂模式的差异。

一般认为,层间刚度差异越大,层间分层抵抗力将越弱,除了刚度的匹配因素以外,高的层间剪切应力也是产生分层现象的重要因素。J.K. Kim^[52]认为织物铺层相对纤维角度铺层具有更高的层间强度和更佳的冲击抵抗能力。然而,不同纤维类型的层合板存在差异。B.L. Lee^[25]对高强聚乙烯纤维的 2 种纤维结构(单向及织布铺层)在弹道冲击下的破坏情况的试验研究表明,2 种结构在弹道冲击下表现出相同的破坏模式;当靶板面密度较低时,两种结构具有相近的弹道极限,但当靶板面密度增加时,单向角度铺层结构表现出更高的弹道极限值。M. Jacobs^[12]对此进行解释,认为单向铺层减少了冲击波沿纤维传播时,在纤维交叉点的反射现象,增加了弹道冲击响应面积,有利于能量扩展,从而提高了抗弹吸能量。

关于层间特性对层合板抗弹性能的影响,一般认为^[39],采用三维增强和表面处理技术,有利于提高层合板的刚度,弹道冲击下结构变形表现为整体变形,分层范围缩小,载荷峰值下降,有利于提高结构冲击后的剩余强度,但层合板并没有表现出更好的能量吸收性能。

4.4 层合板弹道特性的实验分析

层合板弹道特性分析主要包括弹体参数的影响和弹道极限速度、初始冲击速度及剩余速度的关系以及弹道侵彻过程中的动量及能量转换关系。

4.4.1 弹体参数对吸能量的影响

G. Zhu^[7]实验观察到弹道冲击下锥柱弹弹头顶角 60°,弹径 12.7 mm,质量 38.1 g 的尖头弹,10 层 Kevlar/聚脂层合板弹道极限为 70 m/s,而同样弹径的柱形弹,在弹速 200 m/s 时不能穿透 10 层 Kevlar/聚脂层合板;相同的弹形,由于弹径及质量的差异,弹道冲击时,小弹径和质量弹体具有更高的弹道极

限。G. Zhu 认为弹道极限的差异是弹体质量变化的结果。梅志远等对试验数据进行比较,发现在相同靶板条件下,大质量弹体的弹道极限动能高出小质量弹体弹道极限动能约 30%,因此,应该认为弹径的变化对弹体的侵彻能力有较大影响。S.T. Jenq^[14]认为对于 [0°/90°/0°] 角度铺层玻纤/环氧层合板,当初始冲击速度高于弹道极限速度以后,层合板所吸收的弹体冲击动量接近常数,同时,平头弹的动量损耗约高出尖头弹动量损耗 3 倍。

4.4.2 弹道极限速度、初始冲击速度及剩余速度的关系及能量转换的实验研究

根据层合板弹道冲击破坏模式的分析,将弹道冲击特性的研究工作分为不同弹速冲击下的弹道特性分析和弹道极限速度与靶板面密度的关系(含胶量固定)。而不同弹速冲击下的弹道特性分析主要指速度、动量和能量的转换关系。

E. Wu^[19]对于弹道极限速度以下冲击下,E 玻纤/环氧层合板的动量及能量转换关系进行实验研究,弹体半球柱,直径 12.7 mm,质量 35.5 g,通过 LDA 实验数据多项式拟合,得到了弹体能量变化 ΔE 和弹体动量变化 ΔM_e 与初始速度 V_i (20 ~ 80 m/s) 的转换关系

$$\Delta M_e = 0.072V_i - 0.00056V_i^2 \quad (1)$$

靶板吸能量与初始速度之间的关系表达式为

$$\Delta E = -0.25V_i + 0.022V_i^2 \quad (2)$$

以上两式显示:弹体动量和能量的变化与初始速度的关系,呈二次函数关系,但非线性项系数远小于一次项系数。

一般认为,弹体穿透层合板后,弹体剩余速度与初始冲击速度基本满足线性关系,剩余动能与弹体的初始动能同样近似线性关系,层合板的穿透能为常值^[7,37,53];靶板面密度增加,靶板的弹道极限及吸能量线性增长^[7]。

S.T. Jenq^[14]对不同弹速冲击下的动量转换关系进行研究。试验结果如图 3,图中 A 为尖头弹冲击 [0°/90°/0°] 碳纤维层合板试验拟合曲线;C 为平头弹冲击 [0°/90°/0°] 碳纤维层合板试验拟合曲线;

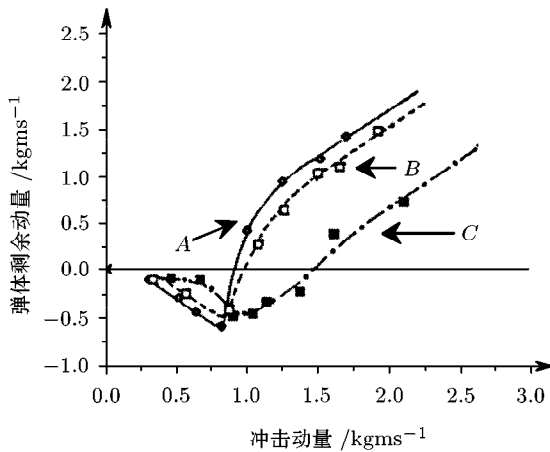


图3 不同弹体和层合板结构初始冲击动量 / 剩余冲击动量转换曲线^[14]

B 为尖头弹冲击 $[(0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ)_2]_s$ 碳纤维层合板试验拟合曲线. 试验拟合显示: 弹道极限动量附近, 动量转换关系存在较强的非线性, 而高于极限冲击动量后, 转换接近线性关系; 不同弹形弹体冲击下, 转换关系存在差异. V.P.W. Shim^[53] 实验研究了 Twaron 织物 (单层), 在柱形弹不同速度冲击下的能量转换规律, 如图 4, 得到经验表达式为

$$\Delta E = \frac{1}{2}m(V_i^2 - V_r^2) = \alpha E_0 + \beta \quad (3)$$

$$E_0 < 150\text{J 时: } \alpha = 0.38, \beta = 24\text{J};$$

$$E_0 > 150\text{J 时: } \alpha = -0.09, \beta = 50\text{J}$$

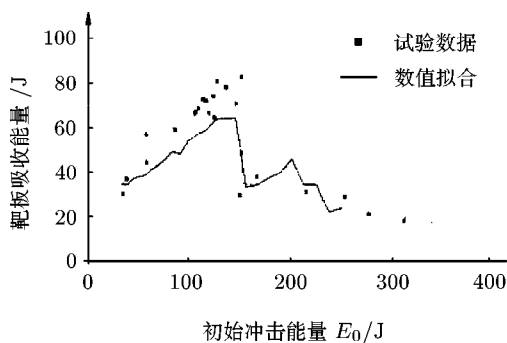


图4 Twaron 织物弹道侵入过程中的能量转换曲线^[53]

E. Wu^[20] 针对 2.9mm 厚的 E 玻璃纤维 / 环氧织布层合板, 以相同的弹体, 较大速度范围内的弹道特性进行试验研究. 试验结果见图 5. 随弹速的增加, 初始冲击动能与靶板吸能之间的关系呈双线性关系, 弹道极限后的初始动能与吸收能量线性的斜率接

近为零, 即靶板穿透后靶板的吸能量接近为常数. 从而近似认为弹道极限冲击下靶板的吸能量为靶板的最大吸能量.

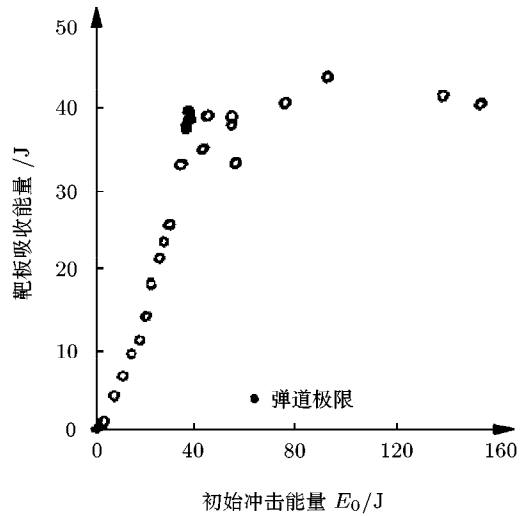


图5 E 玻纤 / 环氧层合板弹道冲击能量转换曲线^[20]

关于靶板面密度与弹道极限的关系, W.J. Goldsmith^[54] 认为碳纤维 / 环氧层合板弹道极限 (0 ~ 80)m/s 是板厚 (0 ~ 7)mm 的函数, 曲线初始阶段向上拱起, 然后, 随板厚线性增长, 如图 6, 剩余速度与初始速度的关系曲线具有类似的特征. 陈利民^[55] 和金子明^[8] 对于 Kevlar29 层合板厚度与 V_{50} 的关系讨论中得到了类似的结论. B.L. Lee^[25] 实验得到了不同铺层方式高强聚乙烯层合板弹道极限 (0 ~ 1000)m/s 与靶板面密度 (0 ~ 12) kg/m² 的关系, 如图 7, 弹道特性与图 6 近似.

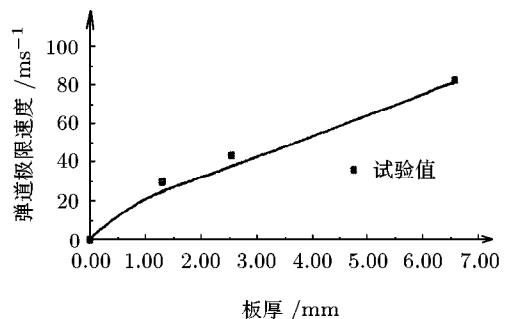


图6 碳纤维 / 环氧层合板靶板面密度 / 弹道极限曲线^[53]

分析结果显示: (1) 低于弹道极限速度的冲击作用下, 动量和能量的变化与初始冲击速度呈二次函

数关系, 随初始速度的增加, 由于弹体变形及材料动态效应等因素的影响, 非线性特性将趋于明显; (2) 靶板在弹道极限附近存在吸能阈值, 高于弹道极限速度的冲击作用下, 弹道穿透能接近常值 (图 5) 或呈下降趋势 (织物)(见图 4). 这是层合板破坏模式 (破坏阈值) 和动态效应的共同作用结果, 其机理还有待研究; (3) 薄板面密度增加将引起靶板厚度方向抗弹机理的变化, 导致弹道极限的非线性变化, 而对于厚板, 面密度增加, 弹道极限呈近似线性增加趋势.

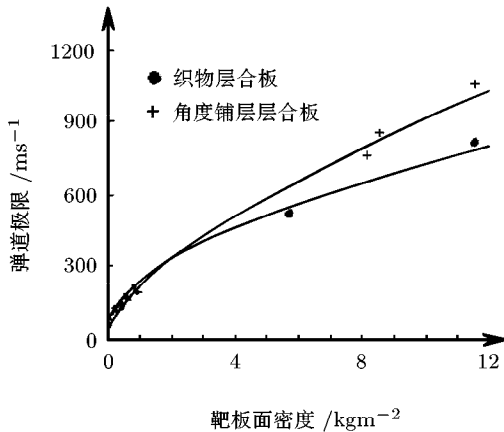


图 7 高强聚乙烯层合板靶板面密度 / 弹道极限曲线 [25]

5 侵彻力历程的实验研究

侵彻力历程 (时间或空间历程) 是复合材料层合板弹道侵彻过程力学分析的基础. 早期理论研究分析工作中, 较为常见的方法是在准静态和低速冲击侵彻力历程特征分析的基础上, 通过破坏模式的比较及分析, 将准静态和低速冲击侵彻力历程特性推演到弹道侵彻分析过程中 [7,56~59], 缺乏关于弹道侵彻力本质问题的深入理解. 后来的研究者们通过改进试验系统, 对弹道侵彻过程中侵彻力展开研究. 其中较为成功的研究工作, 如: E. Wu [18,19] 采用激光多普勒装置获得了弹体速度时程曲线, 认为当冲击速度较低 (弹道极限以下) 时, 侵彻力峰值随初始冲击速度比例增长, 出现对称的力时程曲线; 初始冲击速度增加, 侵彻力 / 时间曲线逐渐失去对称性, 侵彻力峰值在弹道极限速度冲击时, 达到最大值, 当冲击速度高于弹道极限速度后, 侵彻力略微下降. 弹体冲出阶段的动态摩擦力约为静态摩擦力的 1.5 倍.

另外, D. Starratt [24] 采用增强激光测速系统 (ELVS) 研究了玻纤增强复合材料层合板的弹道冲击下, 侵彻力 / 位移历程曲线, 并对不同载荷形式下的

侵彻力 / 位移历程进行比较, 结果如图 8、图 9 所示.

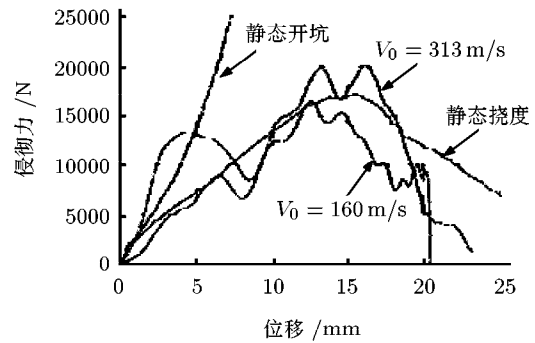


图 8 ELVS 法 S 玻纤 / 聚脂层合板尖头弹道侵彻侵彻力 / 位移拟合曲线 [24]

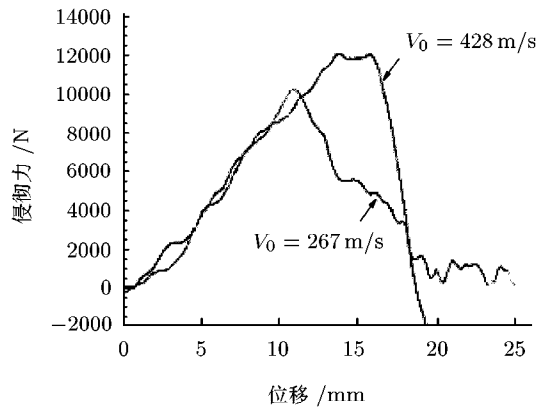


图 9 ELVS 法 Kevlar129 / 聚脂层合板平头弹道侵彻侵彻力 / 位移拟合曲线 [24]

关于弹道侵彻过程中侵彻力的理论研究, H. Wen [60] 针对不同弹头形状的弹体在较大速度范围内, 侵彻和穿透复合材料层合板问题, 认为弹体侵彻过程中的平均侵彻阻力 σ , 由两部分组成: 由于层合板的弹塑性变形, 而引起的准静态应力 σ_s 和由速度效应产生的动应力 σ_d . 则

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d = \left[1 + \beta \cdot \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} \cdot V_i \right] \cdot \sigma_e \quad (4)$$

式中 ρ_t 及 V_i 分别为复合板的密度及初始冲击速度; σ_e 为层合板材料厚度方向准静态线弹性压缩强度; β 为经验常数.

6 层合板弹道侵彻现象的深入研究

对于复合材料层合板弹道冲击响应的深入研究, 目前主要存在 3 个不同的发展方向:

(1) 在广泛实验研究的基础上, 推导特定侵彻条件下的经验公式;

(2) 考虑弹体弹道侵彻过程中所满足的相关运动守恒条件和材料静动态力学性能对弹道侵彻影响的基础上, 发展相对‘简化’的穿透模型, 能适应侵彻条件较广泛范围内的变化;

(3) 建立在离散系统分析基础上的数值分析技术.

6.1 经验公式

目前对于层合板弹道冲击试验研究而言, 其目的在于对几个物理量关系的理解, 即弹道极限速度的预测、剩余速度与初始速度的关系、靶板吸能量与初始速度的关系以及弹道侵彻过程中的动量及能量转换关系等.

6.1.1 弹道极限、剩余速度及初始侵彻速度的关系

在实验研究的基础上, 一般认为^[41,61~63]碳纤维增强层合板, 弹道穿透区呈园台型, 如图 10, 面板弹孔径等于弹径, 锥角与侵彻法向夹角 45° . 试验测试横向剪切断裂能为 37.5 kJ/m^2 . 则靶板抵抗弹体侵彻时变形能 U 为

$$U = 37.25[\sqrt{2\pi} h (h + 2r)] \quad (5)$$

而弹体动能为 $W = mV^2/2$, 由于 $W = U$, 可求出弹道极限 V_c . 当 $r \gg h$ 时 (r 为弹体半径, h 为板厚), 由于 $U \propto hr$, 且 $W \propto r^3V^2$, 因此, 弹道极限 $V_c \propto h^{0.5}/r$. 由于侵彻过程中的破坏模式变化, 该简化穿透模型适于解决厚度小于 4 mm 的层合板的弹道侵彻问题, 对于厚板, 该模型给出的结果与实验值相差较大. 同时, 对于柔性复合材料层合板 (如芳纶纤维、高强聚乙烯等增强层合板) 和高应变纤维 (如玻纤), 采用该模型进行预测, 均欠妥.

J.P. Lambert^[64] 曾给出过层合板弹道冲击过程中关于初始冲击速度 V_i 、剩余速度 V_r 与弹道极限速度 V_c 相互关系的普适经验公式: 认为, 当 $V_i > V_c$ 时, 存在

$$V_r = \alpha(V_i^p - V_c^p)^{1/p} \quad (6)$$

式中, α 和 p 均为试验数据拟合时的可调参数.

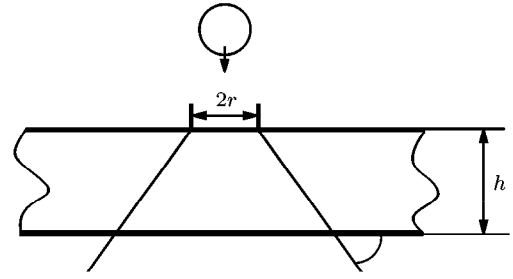


图 10 碳纤维 / 环氧层合板弹道侵彻下的吸能模式^[41]

令 $\beta = 1/\alpha$, 则

$$V_c = \beta(\alpha^p V_i^p - V_r^p)^{1/p} \quad (7)$$

在式 (7) 的基础上, S. Jenq^[26], 张佐光^[9] 不考虑靶板及弹体的破坏模式, 基于能量守恒原理, 提出

$$1/2mV_r^2 = 1/2mV_i^2 - 1/2mV_c^2 \quad (8)$$

得出

$$V_c = (V_i^2 - V_r^2)^{1/2} \quad (9)$$

B.L. Lee^[25] 认为, 当 $V_r > 0$ 时, 在不考虑弹体变形, 能量守恒的前提下, 式 (9) 是成立的, 采用该式得到的弹道极限值偏高, 但误差在一定的范围内.

以上公式, 忽略弹体的塑形成形能、材料的应变率效应及系统的惯性效应, 在一定的初始侵彻速度范围内基本满足, 但使用局限性较大.

6.1.2 弹道极限与靶板面密度的关系

J.W. Song 和 B.L. Lee^[25] 根据试验结果, 得到弹道极限与层合板面密度相关的经验公式

$$V_c = a(AD)^b \quad (10)$$

M.J. Iremonger^[13], 金子明^[8] 认为式中常数 a, b 与弹型、增强材料及基体树脂相关, 且可采用 V_{50} 代替 V_c . 表 1 给出了部分实验确定参数.

V.P.W. Shim^[53] 在实验研究基础上, 得出球形弹丸侵彻下, Twaron 平纹织物层合板 (单层) 的剩余速度与初始速度的关系式为: $V_r = 1.42V_i - 193$; V. Gorp^[25] 考虑弹体质量的影响, 试验得到

$$V_{50} = 232(AD)^{0.5} m^{-1/6} \quad (11)$$

关于靶板吸能量与初始速度、靶板面密度的变化规律, 不考虑弹体质量的损耗及材料的动态效应, 则 $W \propto V_c^2$.

表 1 经验公式 (10) 部分实验确定参数

增强纤维层合板结构	a	b	参考文献	备注
Kevlar29 织物	157.65	0.56	J.W. Song ^[25]	V_c
S-2 玻纤平纹织物	98.81	0.64	J.W. Song ^[25]	V_c
TwaronCT1680 无纬织物	161.35	0.64	金子明 ^[8]	V_{50}
Kevlar29 无纬织物	157.12	0.62	沈峰 ^[46]	V_{50}
Kevlar29 平纹织物	175.85	0.53	沈峰 ^[46]	V_{50}
高强聚乙烯 (Spectra 1000) 角度铺层	205.36	0.65	B.L. Lee ^[26]	V_{50}
高强聚乙烯 (Spectra 900) 平纹织物	226.36	0.51	B.L. Lee ^[26]	V_{50}
高强聚乙烯纤维 / 乙烯基酯树脂层合板	232	0.5	V. Gorp 引自 ^[25]	V_{50}
柔性层合板 (尼龙、芳纶及高强聚乙烯等)	—	0.5	M.J. Iremonger ^[14]	V_{50}

6.1.3 侵彻过程中弹体变形能的考虑

关于层合板弹道冲击过程中弹体变形能的考虑,一般认为弹体材料与复合材料的硬度、刚度等力学性能差异较大,变形量相对较小,因此,目前对该问题的讨论还不多见。

M.J.N. Jacobs^[12] 考虑到侵彻过程中弹体的变形,将层合板弹道冲击吸能分为 3 部分 (3 个侵彻阶段): 不考虑弹体变形的初始侵彻能 U_{abs1} 、弹体变形能 U_{absB} 和弹体变形后,弹体以变形后的弹径进一步侵彻吸收的侵彻能 U_{abs2} 。则层合板弹道冲击下靶板的总吸能量

$$U = U_{abs1} + U_{absB} + U_{abs2} = AD_1 \times C \times S_1 + E_{absB} + AD_2 \times C \times S_2 \quad (12)$$

式中 $AD_1 + AD_2 = AD$, AD_1, AD_2 分别为两阶段的靶板面密度; C 为材料相关常数, S_1, S_2 为弹靶接触面,其参数可通过 FSPs 试验获得量得到。分析模型中 1、2 吸能模式转换点的确立,需通过 V_{50} 试验值与分布图进行对比得到来确定,柔性层合板和刚性层合板转换点关系,存在较大差异,同时研究结果显示,制式弹侵彻高强聚乙烯层合板时,弹体变形一般将吸收弹体总动能约 25%。

6.2 理论分析模型的建立

复合材料层合板弹道侵彻理论分析模型的建立,是一件非常复杂的工作,近 20 多年来,有关的研究报道较多^[65~68],共同的特点是,预测模式均建立在准静(动)态破坏模式研究分析的基础上,对层合板的准静(动)态破坏模式理解的程度决定模型的合理性和准确性。

其中较为完善和相对典型的简化分析模型,可归纳为 G. Zhu^[58] 的基于线性理论的中心有限差分法求解模型、J.W. Taylor^[69] 和 S.S. Morye^[28] 的柔性层合板变形能量简化分析模型及 H. Wen^[70] 基于侵彻力分析的能量简化分析模型等。

G. Zhu^[58] 针对织物 Kevlar/ 聚脂层合板,在准静、动态试验比较研究的基础上,提出了较为完善的层合板弹道侵彻理论模型。(1) 在理论模型中,利用 Whitney-Pagano 层合板理论分析层合板弹道冲击下的整体响应;(2) 将层合板的整个弹道侵彻过程分为 3 个阶段: 开坑以及背板凸起、纤维拉伸失效断裂以及弹体的冲出,采用最大应变失效准则,弹体在三阶段侵彻中的运动方程,采用中心有限差分法求解;(3) 理论模型中,在计及靶板整体变形的基础上,重点考虑了冲击点附近的局部效应,主要包括纤维的应变能、层间断裂吸能以及弹体冲出过程中的摩擦力做功。该模型建立在线性理论基础上,忽略了波的传播作用,模型的建立和计算更多的依赖于静态冲压试验结果,对于应变率效应以及惯性效应没有加以考虑等,是该模型所存在的最大问题,从而导致速度和加速度预测结果的恶化。该分析模式对 Kevlar/ 聚脂层合板厚板弹道极限预测的试验吻合优于薄板弹道极限的预测。

J.W. Taylor^[69] 和 S. Morye^[28] 提出了相似的柔性层合板弹道冲击吸能的分析模型,认为柔性复合材料层合板弹道冲击下,将在冲击点附近,形成锥形区,如图 11,图 12 所示。层合板的弹道吸能主要由纤维的拉伸断裂应变能、纤维层的变形动能组成。对于该模型中的重要参数锥形变形区半径 R_2 ,采用剪切波理论和高速摄影试验观测确定。分析模型建立的前提条件:(1) 弹体刚性,侵彻过程中无形变;(2) 弹体与复合板之间的摩擦能可以忽略,将侵彻过程视为绝热过程;(3) 复合板在侵彻过程中厚度方向的失效机理是一致的;(4) 忽略分层吸能。J.W. Taylor^[69] 在理论预测与试验结果的比较中发现,弹体变形对层合板弹道冲击下,靶板的吸能量有重要影响。

S.S. Morye^[28] 将层合板分为第一区纤维拉伸断裂区(白色部分)和第二区弹性变形区(黑色部分)两部分,如图 12 所示。认为层合板的弹道吸能 E_{Total} 主要由 3 部分组成: 第一区纤维拉伸失效的应变能 E_{TF} 、第二区纤维弹性变形能 E_{ED} 和层合板变形动

能 E_{KE} . 则有: $E_{Total} = E_{TF} + E_{ED} + E_{KE}$. Morye 同时认为第三部分能量, 即层合板变形锥的运动动能 (与材料的惯性项相关) 是主要的吸能组成部分, 而复合材料层合板的后失效惯性变形是组成第三部分吸能量的主要部分.

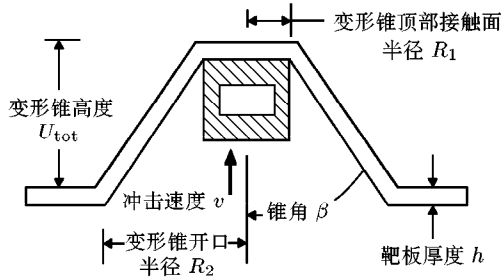


图 11 吸能分析模型^[69]

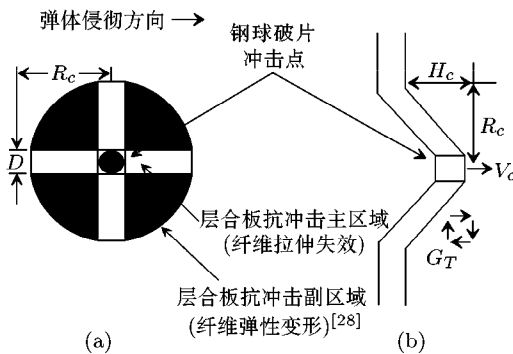


图 12 吸能分析模型

H. Wen^[70] 在侵彻力公式建立的基础上, 根据能量守恒原理, 针对不同弹形 (截断弹型、圆柱型、平头、半球等), 不考虑弹丸在侵彻过程中的变形, 假设靶板变形为局部效应, 则存在, 靶板吸能量 $E = \int_0^P F dP$, P 为弹体侵彻深度; F 为侵彻力. 该文详细讨论了不同弹形弹体, 在对层合板侵彻中可能出现的不同状态下, 侵彻力与靶板材料参数间的关系. 当靶板吸能量等于弹体初始冲击能量时, 得到不同弹丸侵彻时层合板的弹道极限.

6.3 数值分析技术在复合材料层合板弹道冲击上的运用与发展

由于层合板弹道冲击相对于金属材料板的侵彻问题是更为复杂的过程, 在解析方法求解非常困难的情况下, 数值分析具有重要意义.

目前已用于复合材料层合板结构高速冲击动力学分析的数值分析技术主要可以包括两类: 有限元、边界元和无网格法 (如 smoothed particles hydrodynamics, SPH). 有限元技术在层合板力学分析中的运用, 目前存在宏观有限元法和细观有限元法两个主要

的发展方向, 宏观有限元法又可分为铺层有限元法和层合板有限元法.

6.3.1 宏观有限元技术的运用

层合板弹道冲击响应宏观有限元技术的运用, 是金属材料弹道冲击 3D 有限元技术 (包括单元网格的划分、接触算法及高度非线性问题的处理等) 基础上的发展, 一般将复合材料层合板等效为 3D 正交各向异性材料进行处理, 是目前运用较多的方法之一. 如: S.W.R. Lee^[71] 借助于商用有限元程序 MARC, 研究了碳纤维 / 环氧层合板的弹道冲击问题. A. Blanas 使用 DYNA3D 程序评估了层合板弹道极限 (引自 J.K. Chen^[72]). 江大志^[73] 将材料增量形式的损伤本构代入 3D 宏观有限元程序, 对层合板结构冲击损伤响应进行数值分析, 得到了较好的结果. 梅志远^[74] 在 DYTRAN 程序的基础上, 针对混杂结构, 采用不同单元及材料本构形式, 提出了混合建模法, 求解弹道冲击问题, 与试验吻合较好.

V.P.W. Shim^[53] 针对单层纤维织布弹道冲击提出数值分析模型, 模型将织布离散为纤维单元网格, 重点考虑了材料的黏弹属性 (应变率效应), 采用黏弹性三单元模型体现聚酯基的黏弹性变形行为. H.D. Espinosa^[75] 提出了建立在 Lagrangian 坐标系基础上的各向异性黏塑性材料复合材料层合板, 弹道冲击载荷下的 3D 有限元分析模型.

J.A. Zukas^[76] 在单一和多层板冲击响应数值分析中, 比较了拉格朗日和欧拉两种不同的分析方法, H. Yildiz^[77] 对于厚层合板结构 (梁和板) 的有限元分析中, 多层材料单元材料常数的等效方案: 算术平均值和重量平均值进行讨论, 认为层合板结构面内承载时, 采用算术平均值法能取得较好的计算结果, 而厚度方向承载作用, 采用重量平均能取得更好的结果. 同时, H. Yildiz 认为等效方案, 将使层数较多的厚层合板结构的宏观有限元分析更为容易和经济.

6.3.2 细观有限元技术的发展

细观有限元模型的提出, 一般建立在 T. Ishikawa^[78] 马赛克模型 (Mosaic model) 的基础上. 20 世纪 90 年代末, 在复合材料结构分析方面得到了研究者们更多地关注. 但目前细观有限元技术用于层合板弹道冲击响应分析的研究工作, 还十分有限, 其细观单元的构建, 较多地集中于典型的平纹织物层合板结构^[79~82]. J. Jovicic^[83] 将细观有限元技术引入商用有限元程序 ALGOR 及 ABAQUS, 研究平纹织物层合板弹道冲击响应研究. 可以认为, 细观有限元单元的引入, 综合考虑了层合板材料的几何与材料特性, 具有极大的发展潜力.

6.3.3 无网格技术在复合材料层合板弹道冲击中的运用

由于有限元法和边界元法固有的缺点(如闭锁、在裂纹扩展、剪切带形成和大变形导致的单元畸变等问题中,费时的网格划分和重划分等缺点),无网格作为一种新的研究途径,得到了相当的关注.早期的无网格法起源于模拟天体物理现象的平稳粒子流体力学,即基于三维自由拉格朗日算法的SPH法^[84~87].无网格技术运用于复合材料层合板弹道冲击问题求解,目前尚处于起步阶段.无网格法的研究,由B.Nayroles^[88]提出扩散单元法后,该领域的研究才变得十分活跃^[89,90],将SPH技术运用于层合板弹道侵彻方面的相关文献可参考文献^[72,86].

7 结 论

关于层合板弹道冲击响应问题,S. Abrate^[15]曾对1994年以前的工作进行过简要回顾,因此,本文工作侧重于近10年来的研究工作,同时,由于该研究的工程背景,部分研究可能没有公开报道,从而不可避免地导致本文工作的局限.

综合全文,由于复合材料层合板强烈的结构特性,其弹道冲击响应的研究极为复杂,因此,多途径、综合分析的研究思路已经成为该方向研究发展的必然趋势,而高动态观测技术的发展、宏/细观结合的动态力学机理分析、复杂应力状态下材料动态特性研究、应力波传播特性研究^[91]等领域应得到足够的重视.

实验结果表明,弹道冲击下层合板的破坏及变形模式是层合板极为重要的弹道特征,不同的载荷作用、层合板结构将导致变形模式和抗弹性能的巨大差异.因此,目前实验方法依然是最为基本的研究手段;在实验研究和分析的基础上,抓住问题核心部分,针对冲击过程提出了简化的理论模型、经验公式,既满足工程设计的需要,同时也可加深对冲击现象的理解,是非常有意义的工作;同时,随着计算能力的高速发展,数值分析方法已经成为重要研究途径和发展方向.

参 考 文 献

- 1 Abrate S. Impact on Laminated Composite Materials. *Application of Mechanics Review*, 1991, 44(4): 155~190
- 2 Richardson M O W, Wisheart M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites: Part A*, 1996, 27(12): 1123~1131
- 3 Olsson R. Mass criterion for wave controlled impact response of composite plates. *Composites: Part A*, 2000, 31: 879~887
- 4 Robinson P, Davies G A O. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated com-

- posites. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12(2): 189~207
- 5 Cantwell W J, Morton J. The impact resistance of composite materials-a review. *Composites*, 1991, 22(5): 347~362
- 6 王金贵. 气体炮技术. *物理*. 1996, 25(9): 558~564
- 7 Zhu G, Smith G. Penetration of laminated Kevlar by projectiles-1. *International Journal of Solids Structure*, 1992, 29(4): 399~420
- 8 金子明, 沈峰, 曲志敏, 等. 纤维增强复合材料抗弹性能研究. *纤维复合材料*, 1999, 3: 5~9
- 9 张佐光, 李岩, 殷立新, 等. 防弹芳纶复合材料实验研究. *北京航空航天大学学报*, 1995, 21(3): 1~5
- 10 刘国权, 杨大峰, 梅树清. 防弹用纤维复合材料最佳树脂含量研究. *玻璃钢 / 复合材料*, 2001, 3: 13~15
- 11 梅志远, 朱锡, 张振中. 舰船装甲防护的研究与进展. *武汉造船*, 2000, 5: 5~12
- 12 Jacobs M J N, Van Dingenen J L J. Ballistic protection mechanisms in personal armour. *Journal of Material Science*, 2001, 36: 3137~3142
- 13 Iremonger M J, Went A C. Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles. *Composites: Part A*, 1996, 27A: 575~581
- 14 Jenq S T, Wang S B. A Model for Predicting the Residual Strength of GFRP Laminates Subject to ballistic Impact. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1992, 2: 1127~1141
- 15 Abrate S. Impact on Laminated Composites:Recent advances. *Application of Mechanics Review*, 1994, 47(11): 517~544
- 16 Zee R H, Jang B Z, Mount A, et al. Microvelocity sensor for instantaneous velocity determination. *Review of Science Instrument*, 1989, 60(12): 3692~3697
- 17 宋力, 胡时胜, 宋博. 贯穿过程中弹丸瞬时位移的测量. *弹道学报*, 1999, 11(1): 20~23
- 18 Wu E, Sheen HJ, Chen YC, et al. Penetration force measurements of thin plates by laser Doppler anemometry. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(2): 93~99
- 19 Wu E, Tsai C Z, Chen Y C. Penetration into glass/epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 1994, 28(18): 1783~1802
- 20 Wu E, Chang L C. Woven glass/Epoxy Laminates subject to projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(4): 607~619
- 21 Gupta P K, Chiang F P. Laser speckle interferometry applied to studying transient vibrations of a cantilever beam. *Journal of Sound Vibration*, 1989, 133(2): 251~259
- 22 Espinosa H D, Lu H C, Xu Y. A novel technique for penetrator velocity measurement and damage identification in ballistic penetration experiments. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32(8): 722~743
- 23 Ramesh K T, Kelkar N. Technique for the continuous measurements of projectile velocities in plate impact experiments. *Review of Science Instrument*, 1995, 66(4): 3034~3046

- 24 Starratt D, Sanders T, Cepus E, et al. An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24: 155~170
- 25 Lee B L, Song J W, Ward J E. Failure of spectra polyethylene fibre-reinforced composites under ballistic impact loading. *Journal of Composite Materials*, 1994, 28(13): 1202~1226
- 26 Jenq S T, Jing H S, Chung C. Predicting the ballistic limit for plain woven glass/epoxy composite laminate. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 451~464
- 27 Liu D. Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. *Journal of Composite Materials*, 1987, 21: 594~609
- 28 Morye S S, Hine P J, Duckett R A, et al. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composite Science and Technology*, 2000, 60: 2631~2642
- 29 Yuan J, Takeda N, Anthony M. Compressive failure mechanism and impact behavior of unidirectional carbon-fiber/vinyl ester composites. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(16): 1470~1507
- 30 Harding J, Li Y L, Saka K, et al. In: Proc 4th Oxford International Conference On Mechanic Property of Materials at High Rates of Strains. London and Bristol: Institute of Physics, 1988
- 31 尚嘉兰, 白以龙, 沈乐天, 等. 酚醛玻璃钢动态本构关系的实验研究. *爆炸与冲击*, 1990, 1: 1~13
- 32 姜春兰, 李明, 王在成, 等. 聚乙烯纤维增强复合材料的动态力学响应特性. *北京理工大学学报*, 2001, 21(2): 163~167
- 33 夏源明, 王兴, 杨报昌. 单向玻璃纤维增强环氧数值在冲击拉伸时的一维本构方程. *复合材料学报*, 1994, 11(4): 110~116
- 34 许沐华, 王肖钧, 张刚明, 等. Kevlar 纤维增强复合材料动态压缩力学性能实验研究. *实验力学*, 2001, 16(1): 26~33
- 35 汪洋, 夏源明. 单向 KFRP 的应变率相关的本构方程. *爆炸与冲击*, 2000, 20(3): 193~199
- 36 王礼立. 爆炸与冲击载荷下结构和材料动态响应研究的新进展. *爆炸与冲击*, 2001, 4: 81~86
- 37 Cantwell W J, Worton J. Comparison of the Low and high velocity impact response of CFRP. *Composites*, 1989, 20(6): 545~551
- 38 Abrate S. Localized impact on sandwich structures with laminated facings. *Application of Mechanics Review*, 1997, 50(2): 69~82
- 39 Mines R A W, Roach A M, Jones N. High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22: 561~588
- 40 Sierakowski R L, Malvern L E, Ross C A. Dynamic failure modes in impacted composite plates. Failure modes in composite. American Institute of Mining. Metallurgical and Petroleum Engineers Inc, NY, NY, 1976
- 41 Cantwell W J, Mortan J. Impact perforation of Carbon fiber reinforced plastic. *Composite Science and Technology*, 1990, 30: 38~49
- 42 Czarnecki G. A preliminary investigation of dual mode fracture sustained by graphite/epoxy laminates impacted by high-velocity spherical metallic projectiles. [dissertation]. Dayton: Univ of Dayton, 1992
- 43 Czarnecki G. Dual mode fracture of graphite/epoxy laminate penetrated by spherical projectiles. In: Proc Of 18th Congress of Int Council of the Aeronaut Sci. Beijing, China. 1992-09-20-25. 1992. 2, 1~7
- 44 沃丁柱, 等. 复合材料大全. 北京: 化学工业出版社, 2000. 26~55
- 45 Lee D C, Cheon S S. Impact characteristics of glass fiber composites with respect to fiber volume fraction. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(1): 27~30
- 46 沈峰. 芳纶防弹板的研制. *工程塑料应用*, 1998, 26(5): 1~3
- 47 Park R, Jang J. Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composite: Evaluation of four-layer hybrid composites. *Journal of Materials Science*, 2001, 36: 2359~2367
- 48 Park R, Jang J. Impact Behavior of Aramid Fiber/Glass Fiber Hybrid Composite: Evaluation of Impact Behavior Using Delamination Area. *Journal of Composite Materials*, 2000, 34(13): 1117~1135
- 49 Balakrishna T. Differential ballistic response of aramid-glass fiber laminates to soft and hard shots. *Defence Science Journal*, 1998, 148(1): 55~60
- 50 朱锡, 张振中, 刘润泉等. 混杂纤维增强复合材料抗弹丸穿甲的实验研究. *兵器材料科学与工程*, 2000, 23(1): p3~7
- 51 Raju B B, Liu D, Dang X L. Thickness effects on impact response of composite laminates. In: Proceedings of the 13th Annual Technical Conference on Composite Materials, Baltimore, Maryland, 1998-09-21-23. 1998. 21~23
- 52 Kim J K, Sham M L. Impact and delamination failure of woven-fabric composites. *Composite Science and Technology*, 2000, 60: 745~761
- 53 Shim V P W, Tan V B C, Tay T E. Modelling Deformation and damage characteristics of Woven fabric under Small Projectile Impact. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(4): 585~605
- 54 Goldsmith W J, Dharan C K J, Chang H. Quasi-static and ballistic perforation of carbon fiber laminates. *International Journal of Solids Structures*, 1995, 32(1): 89~103
- 55 陈利民. 织物特性对防弹复合材料弹道性能的影响. *纤维复合材料*, 1995(3): 6~10
- 56 Lee S W R, Sun C T. Modeling of penetration process for composite laminates subjected to a blunt-ended punch. In: Proceedings of the 23rd International SAMPE Technical Conference. Kiamesha Lake, New York, 1991. 624~638
- 57 Lee S W R, Sun C T. A quasi-static penetration model for composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 1993, 27 (3): 251~271
- 58 Zhu G, Smith W G. Penetration of laminated kevlar by projectiles——2. *International Journal of Solids Structures*, 1992, 29(4): 421~436
- 59 Lee S W R, Sun C T. Dynamic penetration of graphite/epoxy laminates impacted by a blunt-ended projectile. *Composites Science and Technology*, 1993, 49: 369~380

- 60 Wen H M. Penetration and perforation of thick FRP laminates. *Composites Science and Technology*, 2001, 61: 1163~1172
- 61 Cantwell W J, Morton J. The influence of varying projectile mass on the impact response of CFRP. *Composite Structure*, 1989, 13: 101~104
- 62 Bless S J, Hartman D R. Ballistic penetration of S-2 glass laminates. In: Wegman R, et al, ed. Proc 21st SAMPE Conf, 1989. 852~866
- 63 Bless S J, Benyami M, Hartman D. Penetration through glass-reinforced phenolic. In: Proc 22nd Int SAMPE Tech Conf, 1990. 293~303
- 64 Lin L C, Bhatnagar A, Chang H W. Ballistic energy absorption of composites. In: Proc 22nd Int SAMPE Tech Conf, 1990. 1~13
- 65 Wachtman J B. Elastic deformation of ceramics and other refractory materials. In: Wachtman J B, ed. Mechanical and Thermal Properties of Ceramics. NBS Special Publication, 1969. 139
- 66 Backman M E, Goldsmith W J. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*, 1978, 16: 1~99
- 67 Anderson J C E, Bodner S R. Ballistic impact: the status of analytical and numerical modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 1988, 7: 9~35
- 68 Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, 18(2): 141~230
- 69 Taylor J W, Vinson J R. Modeling ballistic impact into flexible materials. *AIAA Journal*, 1990, 28(12): 2098~2103
- 70 Wen H M. Penetration and perforation of thick FRP laminates. *Composites Science and Technology*, 2001, 61: 1163~1172
- 71 Lee S W R, Sun C T. Dynamic penetration of graphite/epoxy laminates impacted by a blunt-ended projectile. *Composites Science and Technology*, 1993, 49: 369~380
- 72 Chen J K, Medina D F. The effects of projectile shape on laminated composite perforation. *Composites Science and Technology*, 1998, 58: 1629~1639
- 73 江大志, 沈为, 彭立华等. 层合复合材料冲击损伤破坏过程研究 - 数值分析. *复合材料学报*, 1997, 14(4): 32~36
- 74 梅志远, 朱锡, 刘燕红. 混杂纤维增强复合材料板抗侵彻数值仿真及实验验证. *兵工学报*, 2003
- 75 Espinosa H D, Lu H C, Zavattieri P D, et al. A 3-D finite deformation anisotropic visco-plasticity model for fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(5): 0369~0410
- 76 Zukas J A, Scheffler D R. Impact effect in multilayered plates. *International Journal of Solids and Structure*, 2001, 38: 3321~3328
- 77 Yildiz H, Sarikanat M. Finite-element analysis of thick composite beams and plates. *Composite Science and Technology*, 2001, 61: 1723~1727
- 78 Ishikawa T, Chou T W. One-dimensional micromechanical analysis of woven fabric composites. *AIAA Journal*, 1983, 21(12): 1714~1721
- 79 Kollegal G M, Sridharan S. A simplified model for plain woven fabrics. *Journal of Composite Materials*, 2000, 34(20): 1726~1731
- 80 Guan H, Gibson R F. Micromechanical models for damping in woven fabric-reinforced polymer matrix composites. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(16): 1192~1205
- 81 Tabiei A, Jiang Y. Woven fabric composite material model with material non-linearity for non-linear finite element simulation. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36: 2757~2771
- 82 Bednarczyk B A. Discussion of "Woven fabric composite material model with material non-linearity for non-linear finite element simulation" by Tabiei and Jiang. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38: 8585~8588
- 83 Jovicic J, Zavaliangos A, Ko F. Modelling of the ballistic behavior of gradient design composite armors. *Composites: Part A*, 2000, 31: 773~784
- 84 Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronautic Journal*, 1977, 82: 1013~1020
- 85 Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and applications to nonspherical stars. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1977, 181: 375~389
- 86 Vniief R, Ave M. Numerical simulation of rod particles hypervelocity impact effectiveness at various attack angles. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 20: 79~88
- 87 Libersky L D, Petschek A G, Carney T C, et al. High strain lagrangian hydrodynamics. A three dimensional SPH code for dynamic material response. *Journal of Computational Physics*, 1993, 109: 67~75
- 88 Nayroles B, Touzot G, Villon P. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements. *Computer Mechanic*, 1992, 10: 307~318
- 89 Sukumar N, Moran B, Belytschko T. The natural element method in solid mechanics. *International Numerical Engineering*, 1998, 43: 839~887
- 90 Atluri S N, Kim H G, Cho J Y A. Critical assessment of the truly meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) and local boundary integral equation (LBIE) methods. *Computer Mechanic*, 1999, 24: 348~372
- 91 Hoschi C, Okrouhlik M, Cerv J, et al. Analytical, computational and experimental investigations on stress wave propagation. *Application Mechanic Review*, 1994, 47(2): 77~99

THE DEVELOPMENTS OF FIBRE-REINFORCED COMPOSITE LAMINATES UNDER BALLISTIC IMPACT

MEI Zhiyuan ZHU Xi LIU Yanhong ZHANG Lijun

Naval University of Engineering, Wu'han 430033, China

Abstract In recent twenty years, the fibre-reinforced composite laminates have been used for structural protection widely. However, the energy-absorbing and damaging mechanisms of laminates under ballistic penetration are intricate, due to the complexity of geometrical structures and material characteristics of fibre-reinforced laminates. The influencing factors include the target's dimension, the structure geometry the materials properties and the properties of interlaminates, the shape and velocity of the projectiles and so on. In this paper, the researches and developments in recent ten years are reviewed especially, the experimental technology, the static and dynamic mechanics of laminates, the impact force, the experical equations and the analysis models. At the same time, the applications and developments of numerical methods are also discussed briefly.

Keywords fibre-reinforced composite materials, laminates, ballistic impact, structural protection, experimental research, numerical method