

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.027

陶瓷-纤维增强树脂基复合材料复合装甲抗弹性能影响因素分析

张德须¹, 李晓燕², 李英建^{1,3}, 张文婷^{1,3}, 董彬¹, 付思伟¹, 刘文龙¹, 吴炳铭^{1,3}, 王小伟^{1,3}, 魏汝斌^{1,3}

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 山东城市建设职业学院, 济南 250103;

3. 山东三达科技发展有限公司, 济南 250031)

摘要: 陶瓷-纤维增强树脂基复合材料复合装甲凭借其优异的轻量化特性与卓越的弹道防护性能, 已成为现代单兵防护及武器装备装甲的核心材料体系。本文总结了陶瓷-纤维增强树脂基复合材料复合装甲抗侵略机理, 系统分析了影响其整体抗弹性能的关键因素, 重点探讨了陶瓷面板的硬度与强度、复合材料背板的波阻抗/刚度/厚度等参数的影响, 以及界面黏结层在应力波传播与层间协同中的作用。分析指出, 陶瓷与背板性能的合理匹配是实现高效能量耗散的关键, 优化各层材料性能与结构配置是实现装甲轻量化与高防护效能的重要途径。

关键词: 陶瓷复合装甲; 抗弹性能; 影响因素; 抗侵略机理; 协同优化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0231-06

Analysis of influencing factors on bullet-resisting performance of ceramic/fiber reinforced resin-based composite armor

ZHANG Dexu¹, Li Xiaoyan², LI Yingjian^{1,3}, ZHANG Wenting^{1,3}, DONG Bin¹, FU Siwei¹, LIU Wenlong¹,

WU Xinming^{1,3}, WANG Xiaowei^{1,3}, WEI Rubin^{1,3}

(1. Institute 53 of China North Industries Group, Jinan 250031, China; 2. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250103, China;

3. Shandong Sanda Scientific and Technological Development Co., Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract: Ceramic-fiber reinforced resin-based composites for armor have become the core material system for modern individual protection and weapon equipment armor due to their excellent lightweight characteristics and outstanding ballistic protection performance. the penetration resistance mechanism of ceramic-fiber reinforced resin-based composite materials for armor was summarized, the key factors affecting its overall ballistic protection performance were systematically analyzed, focusing on discussing the influence of the hardness and strength of the ceramic panels, the wave impedance/stiffness/thickness of the composite material backplate parameters, as well as the role of the interface bonding layer in stress wave propagation and interlayer synergy. The analysis indicates that the reasonable matching of ceramic and backplate properties is the key to achieve efficient energy dissipation, and optimizing the performance and structural configuration of each layer material is an important way to achieve lightweight armor and high protection efficiency.

Keywords: ceramic composite armor ; anti-elasticity property ; influencing factor ; anti-penetration mechanism ; collaborative optimization

现代战争形态的深刻演变,使单兵作战面临的威胁日益加剧、所处的作战环境日益复杂,战士的生命安全防线承受着全方位、多层次的冲击。单兵防护装备作为抵御致命威胁的最后屏障,其技术水平和防护效能直接关系到战士的生死存亡与作战任务的成败^[1]。早期的防弹装备,如两次世界大战期间的钢制胸甲,主要依赖金属材料的刚性来格挡子弹或破片,虽然具备一定防护能力,但过大的质量严重限制了士

兵的机动性^[2]。在材料技术发展的推动下,现代防弹体系已从单一材料结构演变为以复合装甲为核心的先进防护系统。其中,柔性的树脂基纤维复合材料(如芳纶或超高分子量聚乙烯增强复合材料)能有效防御手枪弹与破片,其能量吸收主要依赖于纤维的拉伸断裂与基体的剪切变形,但在应对高速步枪弹时则显不足^[3-5]。为此,需要采用防护等级更高的陶瓷复合装甲。这种装甲通常由高硬度陶瓷面板(如碳化

基金项目: 中国兵器工业集团有限公司自主科技创新项目(ZJ052025103)

通信作者: 魏汝斌,博士研究生,研究员,研究方向为人体防护材料和装备

收稿日期: 2026-01-16

引用格式: 张德须,李晓燕,李英建,等.陶瓷-纤维增强树脂基复合材料复合装甲抗弹性能影响因素分析[J].工程塑料应用,2026,54(4):231-236.

ZHANG Dexu, Li Xiaoyan, LI Yingjian, et al. Analysis of influencing factors on bullet-resisting performance of ceramic/fiber reinforced resin-based composite armor[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 231-236.

硼、碳化硅)与高韧性树脂基复合材料背板(或以金属为辅)构成。树脂基复合材料在此扮演着核心角色:其增强纤维[如芳纶、超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)]赋予背板极高的比强度与韧性,而树脂基体(如环氧、聚氨酯)则起到黏接、传递载荷、保护纤维并协同变形的作用。其核心优势在于“前硬后韧”的协同工作机制:陶瓷面板负责在接触瞬间钝化、碎裂弹头,消耗其大部分动能;背板则通过树脂基复合材料特有的多模式能量耗散机制(包括纤维拉伸断裂、分层、基体开裂及界面脱黏等)捕获剩余碎片与动能,并有效抑制背面变形,减轻对人体的钝挫伤。这种材料与结构上的功能分配,使陶瓷复合装甲在实现远超传统钢甲的防护效能的同时,成功实现了装备的轻量化^[6-10]。

尽管陶瓷复合装甲性能卓越,但仍面临多重挑战:陶瓷层固有的脆性使其抗多次打击能力不足;面板与树脂基复合材料背板间的界面若设计不当,易因应力波失配或黏接失效而发生早期剥离,导致协同失效;此外,高性能陶瓷的成本、树脂基复合材料的环境老化敏感性(如湿热、紫外)以及背板在冲击下的背面变形控制,也分别制约着其大规模应用与长期可靠防护。因此,必须深入理解各组成部分的性能与结构参数,特别是树脂基复合材料的纤维/树脂体系选择、铺层设计、界面性能等关键因素,如何协同影响整体的抗弹响应与能量耗散机制,从而为设计更高性能的陶瓷复合装甲提供理论指导与材料解决方案。

1 陶瓷-纤维增强树脂基复合材料复合装甲抗侵彻机理

陶瓷复合防弹装甲的抗弹过程始于弹丸撞击极高硬度和压缩强度的陶瓷面板表面,导致弹头瞬间钝化、碎裂并产生一道强烈的压缩应力波;该应力波向下传播至陶瓷与背板的界面时,因双方波阻抗不匹配而发生反射,转变为强大的

拉伸波并传回陶瓷内部;由于陶瓷拉伸强度低,其在反射拉伸波和径向应力的共同作用下产生环向与径向裂纹,这些裂纹相互交织界定出一个倒圆锥形的破碎区,最终形成一个被弹丸残余动能推动向前、压实的碎块集合体——即陶瓷锥^[11]。此陶瓷锥的核心作用在于将其后方弹丸的集中点载荷转化为一个作用在背板上大面积分布载荷,从而显著降低压强。随后,相对柔软的背板(金属或复合材料)全面承接此陶瓷锥及剩余破片:金属背板通过大范围的塑性凹陷、拉伸和撕裂来耗散能量,而纤维复合材料背板则通过纤维的拉伸、断裂、分层及界面摩擦等复杂机制吸收剩余动能;与此同时,背板的高刚度为整个过程提供整体支撑,确保陶瓷有效破碎并限制装甲整体弯曲^[11]。最终,弹丸的全部动能在陶瓷的破碎耗能、载荷扩散以及背板的塑性变形和结构破坏中被彻底耗尽,所有碎片被捕获,弹丸在背板形成明显凸起后停止,从而实现了高效的防护^[12-14]。

2 陶瓷-纤维增强树脂基复合材料复合装甲抗弹性能的影响因素

2.1 陶瓷面板对复合装甲抗弹性能的影响

近年来,陶瓷材料因其高硬度、低密度等特性,被广泛应用于复合装甲系统中。目前常用的防弹陶瓷主要包括氧化铝(Al_2O_3)、碳化硅(SiC)和碳化硼(B_4C)等^[15-17],其性能和价格对比见表1。 Al_2O_3 凭借原料丰富、成本低和工艺成熟而备受青睐,但其密度较高、硬度有限,制约了其抗弹效能; SiC 综合力学性能良好、断裂韧性高、耐高温和抗热震性能优异,但烧结过程中需要添加剂或高温环境,影响了材料纯度与可加工性; B_4C 具有最优的硬度-密度比,轻质且防弹性能突出,然而其制备温度高、工艺复杂、成本昂贵,且高温抗氧化能力较差^[9,18-19]。

表1 常见防弹陶瓷的主要力学性能及成本^[20]

Tab.1 Main mechanical properties and cost of common bulletproof ceramics^[20]

Ceramic	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Hardness, HV/ GPa	Elastic modulus/GPa	Bending strength/MPa	Compressive strength/GPa	Fracture toughness/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Price/(Yuan $\cdot\text{kg}^{-1}$)
Al_2O_3	3.9	16.9	200–380	200–290	1.9–2.7	3–5	70–100
SiC	3.1	22	570	400–600	1.2–2.1	2–4	200–400
B_4C	2.52	33	400	500–800	1.4–3.4	2.5–3.2	1 000–2 000
Si_3N_4	3.2	17	310	900–1 000	3.5–3.8	6.5	300–400
TiB_2	4.5	27	370	400–500	2–2.5	5–6	600–1 200

根据防护需求的不同,复合防弹装甲中的陶瓷层通常采用整体式陶瓷板或拼接式陶瓷层两种结构形式^[21]。整体式陶瓷板在单次冲击条件下表现出优异的抗弹性能,但在受到冲击后裂纹易扩展,损伤区域较大,导致其抗多次打击能力较差。相比之下,拼接式陶瓷层由于单元化结构可有效抑制裂纹跨单元扩展,因而具备更好的抗多次冲击性能;然而,其整体防弹效能受陶瓷单元的几何形状、厚度及尺寸等参数影响显著^[22]。常见的陶瓷单元形状有圆形、正方形以及正六边形,陈智勇等^[21]认为:就单陶瓷块的防弹性能排序:圆形>正六边形>正四边形>三角形和奇异形。随后,又通过模拟和

实验结合探究陶瓷形状和尺寸对复合装甲防弹性能影响,证实了在相同面积情况下,正六边形陶瓷的防弹性能要优于正方形陶瓷块。陶瓷复合防弹装甲的防护能力随陶瓷厚度的增加显著增加,但厚度的增加会影响质量,不利于轻量化的要求。同时,当陶瓷面板总厚度一定时,多层陶瓷复合面板的防护系数明显高于单层陶瓷面板。因此,在进行陶瓷复合装甲结构设计时,需要探究厚度与抗弹能力的关系,在符合抗弹性能的要求下,确定陶瓷面板的最佳厚度。陶瓷单元的尺寸直接影响陶瓷锥的底面直径和完整破碎锥的形成。卿尚波等^[23]研究发现陶瓷锥的底面直径随尺寸的增加表现出

递增的趋势,最后逐渐趋于一个稳定值。当能形成完整陶瓷锥时,挤压作用不会导致相邻陶瓷单元的破坏,进而实现损伤区域的缩小。

在复合装甲系统中,陶瓷材料对其性能的影响历来是研究的重点,传统上主要集中在陶瓷的种类及其物理特性(如尺寸、厚度和形状)等方面,但高强度、高韧性以及低密度一直是人们努力的方向。近年来,随着新型陶瓷体系的不断涌现,相关研究已不再局限于单一相陶瓷,而是日益向复相陶瓷及多相复合陶瓷材料拓展,致力于通过多相复合设计进一步优化其抗弹性能与结构效能。例如,Lai等^[24]开发的金刚石/B₄C复合陶瓷,其硬度随金刚石含量增加而提升。在40%的金刚石含量下,材料展现出最优综合力学性能:密度为2.86 g/cm³,硬度高达39.8 GPa,且断裂韧性达到了8.1 MPa·m^{1/2}。

2.2 树脂基复合材料背板性能对复合装甲抗弹性能的影响

在陶瓷复合装甲的“硬-韧”二元体系中,树脂基复合材料背板承担着吸收剩余动能、约束陶瓷碎片及维持结构完整性的核心功能^[25-26]。其性能的优劣直接取决于增强纤维与树脂基体的选择及二者复合的协同效应。目前,以芳纶、PE-UHMW及聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)为代表的高性能有机纤维与环氧等树脂基体构成的复合材料,构成了防弹背板的主体技术路线,每种体系均通过其独特的材料特性与复合机制,影响着背板的最终防护行为^[27-28]。

芳纶纤维增强环氧树脂复合材料是最早实现大规模工程化应用的经典体系。芳纶纤维高比强度、高比模量的特性,与环氧树脂优异的浸润性和黏接能力相结合,能形成层间结合牢固、刚度适中的复合材料背板^[29-30]。该体系在弹道冲击下,主要依靠芳纶纤维的高速拉伸断裂与环氧基体的剪切、开裂以及纤维/基体界面脱黏等多种机制协同耗能。其综合性能平衡、工艺成熟,且在耐热性方面优于大多数有机纤维复合材料,因此长期以来广泛应用于对综合可靠性与成本均有要求的单兵防弹插板及车辆装甲衬层。然而,该体系在极端湿热环境下可能存在的界面性能退化,以及环氧树脂固有的脆性,是其进一步提升抗多发打击能力的制约因素。

PE-UHMW纤维增强环氧或特种热塑性树脂复合材料,代表了当前轻量化防护的顶峰。PE-UHMW纤维极低的密度与极高的强度,使其复合材料的比吸能率在所有实用化材料中位居前列^[26,31]。当与经过增韧改性的环氧树脂或柔性更好的聚氨酯等热塑性树脂复合时,该体系背板能在弹击过程中通过纤维的大规模拉伸变形与塑性变形吸收大量动能。这一特性使其在需要极致减重的应用场景中成为首选。然而,其核心挑战在于PE-UHMW纤维表面惰性导致的界面黏结强度相对较弱,以及树脂基体与纤维模量匹配问题。目前主要通过纤维表面处理、树脂增韧改性以及采用更适配的热塑性基体来优化。

PBO纤维增强树脂复合材料虽在理论上拥有最卓越的比强度、比模量和耐热性,其实际应用却因环境稳定性这一

致命短板而严重受限。PBO纤维在光、热、湿气作用下会发生水解降解,导致力学性能急剧下降。因此,即使采用高性能树脂作为基体,也难以保证其在复杂环境下的长期防护可靠性。目前,PBO复合材料背板仅见于少数对质量有极端要求、且使用环境高度可控的特定场合。

相比之下,碳纤维或玻璃纤维增强复合材料,主要作为背板中的局部增强或支撑结构,或在对成本与重量要求不同的特定场景中应用^[32-33]。

在复合防弹装甲系统的抗弹过程中,背板作为关键的能量耗散与结构支撑组件,其波阻抗、刚度、屈服强度、弯曲强度及厚度等核心参数和综合性能对装甲的整体防护效能具有决定性作用。以上影响因素并非孤立存在,而是构成了一个相互关联、相互制约的复杂体系。波阻抗匹配程度影响应力波在陶瓷-背板界面的传递效率;刚度决定了背板对陶瓷面板的支撑效果及整体变形模式;屈服强度与弯曲强度共同调控背板的塑性变形能力与结构完整性;而厚度则直接关联能量耗散体积与面密度。尽管这些参数之间存在复杂的关系(如高刚度材料往往密度较大,不利于轻量化),在理论分析与工程实践中,将其中一种或两种关键性能参数进行单独分析,仍具有重要的研究价值。此类研究能够揭示特定性能参数对抗弹机制(如陶瓷锥形成效率、背板塑性变形模式)的影响规律,从而为建立更精确的装甲设计准则、优化材料体系与结构配置提供关键的理论依据与实证支持,最终指导高性能、轻量化复合装甲的定向设计与开发。

2.2.1 波阻抗

当陶瓷复合装甲受到冲击时,应力波通过陶瓷材料传播,在到达陶瓷板和背板之间的界面时,由于阻抗失配,产生反射波和透射波^[34]。背板自由面产生的反射波强度随其波阻抗增加而减弱,应力波的调控是影响陶瓷损伤行为的关键机制^[35]。Yu等^[36]研究了六种不同背板材料对陶瓷碎裂的影响,发现随着背板波阻抗的提高,陶瓷半锥角及径向裂纹数量均呈减小趋势。此结果与余毅磊等研究结果一致,余毅磊等^[35]研究发现当界面间波阻抗差值增大即背板材料波阻抗减小时,从界面反射的应力波增强,从而增大了对陶瓷的损伤,陶瓷断裂锥角大小也随之增大,此时裂纹的形成以拉剪应力为主。

理论分析与实验表明,在阻抗差异显著的材料界面间引入过渡层,是提升复合装甲抗弹性能的有效途径。该设计通过优化波阻抗匹配,有效抑制了应力波的不利反射,延缓了面板的损伤。同时,它更促使背板的吸能机制由单一的剪切主导,转变为层裂与剪切协同作用的复合模式。关键在于,由此形成的耦合应力波系能更充分地调动背板纤维材料的抗拉强度,从而系统性提升其能量吸收效率与整体防护性能。李树涛等^[37]通过计算得出两阻抗值差距大的介质间有另一阻抗值介于两值间的介质,对复合装甲的抗弹效应是有利的,然后通过实验验证了这一结论。为进一步提升装甲性能,武一丁等^[38]提出在陶瓷面板与PE-UHMW背板之间引入

一层 T300 碳纤维过渡层。由于 T300 材料的波阻抗与陶瓷更为接近,该设计可有效降低应力波在界面处的反射强度,并延缓反射拉伸波传回陶瓷内部的时间,从而在一定程度上抑制了陶瓷中裂纹的早期扩展与损伤。

Lin 等^[39]系统评估了由 PE-UHMW、芳纶及碳纤维增强复合材料(CFRP)构成的五种复合层板(包括 PE-UHMW/芳纶、芳纶/PE-UHMW、PE-UHMW/CFRP 和 CFRP/PE-UHMW 等组合)的动态力学性能,并通过计算应力波在各界面上的反射与透射系数,揭示了阻抗配置对损伤行为的影响机制。研究结果表明,当高阻抗材料作为冲击接触面时,应力波在界面处产生较强的反射波,导致拉伸波成分增大,从而加剧层间分层和界面损伤;相反,若将低阻抗材料置于受击面,则能够有效抑制反射波幅值,减轻应力波对界面的不利影响,进而显著减少混合层板中的分层现象^[39]。该结论为复合防弹装甲中背板材料的阻抗设计提供了重要的理论依据,强调在多层复合结构中合理配置阻抗梯度对改善抗冲击性能和延缓损伤扩展具有关键作用。

复合材料装甲在冲击载荷下的动态响应及抗弹性能显著依赖于其组成层间的波阻抗匹配关系与应力波传播特性。通过合理设计层间阻抗梯度,可有效调控应力波在界面处的透反射行为,从而优化能量耗散机制,并减少因阻抗失配导致的应力波反射和透射对脆弱截面的不利影响。具体而言,较高阻抗的背板能够减弱反射拉伸波强度,抑制陶瓷面板的裂纹扩展与破碎范围;同时,在层间引入阻抗过渡层可延缓应力波传播,促进背板由局部剪切主导的失效模式向分层、拉伸等复合吸能机制转变,从而显著提升整体结构的能量吸收效率与抗弹性能。

2.2.2 厚度

复合防弹装甲背板的厚度是决定其整体防弹性能与综合效能的核心设计参数,其影响机制复杂且多维。从防护机理上看,背板主要承担吸收剩余动能、捕获破片并抑制陶瓷裂纹扩展的作用。增加背板厚度能提升其能量吸收容量,使背板能更有效地阻滞经陶瓷层破碎和预耗能后的弹头破片,显著降低穿透风险,并更为充分地通过塑性变形(金属背板)或纤维拉伸断裂(复合材料背板)耗散能量,从而有效减轻装甲后钝挫伤的严重程度。然而,这种性能的提升并非无代价,其直接导致系统面密度的增加,进而加重单兵负荷,严重制约战术机动性与穿戴持久性^[40-41]。

复合装甲中各组分材料的厚度及其匹配关系,是决定其抗弹性能与能量耗散效率的关键设计参数。研究表明,对于给定的面密度,陶瓷与复合材料背板的厚度存在一个最优协同配比,能使弹道冲击下的能量耗散达到峰值。背板厚度对其吸能机制具有决定性影响:当背板过薄时,应力波传播历时短,材料无法通过充分的整体塑性变形吸收能量,其吸能潜力未被完全激发;随着背板厚度增加,其失效模式将从以冲塞、孔摩擦为主,显著转变为以层间分层、纤维大范围拉伸断裂和整体结构变形等更为高效的吸能机制为主。Zhang

等^[42]通过 9 组固定面密度的复合靶板模拟方案,系统研究了陶瓷(2~10 mm)与 CFRP(2.5~15 mm)的厚度配比。结果显示,陶瓷厚 5 mm、CFRP 厚 10 mm 时,弹丸剩余动能最低、能量耗散效果最优。研究进一步指出,CFRP 背板过薄时,应力波传播过快,导致能量未能通过充分塑性变形吸收,反而迅速传递;同时材料因载荷作用时间不足,未能充分发挥吸能潜力。Yang 等^[43]研究了 B₄C/PE-UHMW 双层复合装甲中 PE-UHMW 层厚度对抗弹性能的调控机制。研究确定了在保证抗弹性能前提下 PE-UHMW 层的最佳厚度,并发现其与弹丸撞击速度、质量及陶瓷层厚度之间存在关联规律。根据研究结果提出了陶瓷与 PE-UHMW 层最优厚度比的配置策略,并指出采用较薄陶瓷层有助于降低面密度,满足装甲轻量化设计需求。Zhang 等^[44]的研究揭示了单向 PE-UHMW 层压板的厚度差异对其弹道冲击失效机理具有决定性影响。研究结果表明,对于较薄的复合材料层合板,堵塞和孔摩擦是薄型复合材料层合板的主要破坏模式。而当层合板厚度增加时,失效模式发生显著转变,层间分层、纤维拉伸断裂以及整体结构的变形成为主要的能量吸收与破坏机制。

复合装甲优化研究主要聚焦于材料配置与厚度比的协同效应。研究表明,陶瓷与背板的最佳厚度比显著影响抗弹性能,存在明确最优区间;此外,复合结构厚度变化会引发失效机制转变,从局部穿孔向整体塑性变形与分层演化。优化策略强调在限定面密度下平衡层间厚度与材料属性,以实现高效能量耗散与结构轻量化的统一。

2.2.3 刚度

研究表明,背衬硬度对复合材料装甲的弹道性能具有显著影响,提高背衬硬度可显著增强整体防弹能力,延长弹丸在靶体内的停滞时间,并提升陶瓷面板的抗弯曲失效能力。Goh 等^[45]通过实验发现,当背衬硬度由 HRC 30 提高至 HRC 50 时,装甲的整体防弹能力明显增强。Strassburger 等^[46]进一步研究了不同背衬材料对弹丸在靶体内停留时间的影响,发现在三种陶瓷材料中,以钢为背衬时弹丸的停留时间均最长。这表明背板强度显著影响了弹丸在侵彻过程中的停滞阶段持续时间,其机制可能在于背板的支撑作用延缓了陶瓷面板的破碎过程,从而更有效地促进了对弹丸的侵蚀;该结论通过对剩余钢芯的回收分析得到了验证。Lin 等^[39]研究结果表明,混合板具有更高的整体弯曲刚度,对于在弹道极限内有效地最大限度地减少背凸变形深度至关重要。背板刚度通过有效支撑陶瓷层,延缓其破碎过程,从而促进弹体侵蚀并提高能量吸收效率。

此外,背衬弹性模量增大能够加剧陶瓷断裂程度,增强能量吸收,但增长趋势随模量提高逐渐趋于阈值。Yu 等^[36]研究了背板的弹性模量对抗弹性能的影响,研究发现当背板的弹性模量很低时,陶瓷层的能量吸收非常接近陶瓷的基本断裂能量吸收。随着背板杨氏模量的增大,陶瓷层的能量吸收急剧增加,随后呈现缓慢增长趋势,达到阈值。他们还比较了背板弹性模量 $E=1$ GPa 和 $E=1000$ GPa 条件下陶瓷的断

裂情况,通过实验得到弹性模量越大,背板在穿透过程中的变形越小,且背板对陶瓷的支撑更为明显,对陶瓷最直观的影响是陶瓷锥形裂纹数量明显增加,断裂程度加剧。

2.2.4 其他因素

纤维混杂组合形式,可以提高复合装甲的防弹性能^[47-49]。秦溶蔓等^[16]将两种纤维板(PE-UHMW和CFRP)结合在一起,研究发现当UCUC这种方式结合时,抗侵彻性能最好。这提醒我们可以将不同性能的背板组合来提高复合防弹装甲的性能。Zhang等^[50]通过有限元分析对比十种铺层结构发现,以碳纤维为上下层面、玻璃纤维为芯层的三明治构型,在整体力学响应,尤其是能量吸收方面表现最佳。张竹青等^[51]制备了四种不同层间混杂比例的CF/PE-UHMW纤维层合板,并分析了其低速冲击响应。结果表明,随着PE-UHMW纤维比例增加,层合板冲击性能呈现先升后降的趋势。当混杂比例为11%时,性能最优。破坏形貌分析表明,适量引入PE-UHMW纤维插层可有效延缓脆性断裂,抑制裂纹扩展,从而显著改善层合板的冲击性能与结构完整性。

2.3 黏结剂层对陶瓷复合装甲抗弹性能的影响

黏结剂层在复合防弹装甲的研究中常被人忽略,但黏结剂层在防弹性能中起着多方面的作用,是决定装甲的单次和多次撞击性能的关键因素^[52-55]。黏结剂层是载荷传递与应力分布的枢纽,当弹丸冲击陶瓷面板时,产生的巨大压缩应力波需要通过黏结剂层有效地传递至韧性良好的背板层。黏结剂层要确保应力波以更均匀、更广泛的方式分散到背板上,从而最大化地利用背板的塑性变形来吸收剩余能量,避免应力集中导致背板过早撕裂。常用的黏结剂为环氧树脂类、聚氨酯类,Shen等^[56]研究了胶黏剂类型对陶瓷/金属复合装甲多击抗弹性能的影响,研究发现,环氧树脂靶板的单发弹道性能略好于聚氨酯靶板,聚氨酯靶板的多发弹道性能优于环氧树脂靶板,但是,由于周围陶瓷的广泛损坏,第二次穿透中背板的剩余穿透深度变得更大。黏接剂层的厚度、黏接强度以及黏结特性等都对复合装甲的抗弹性能有较大影响^[55,57]。Prakash等^[58]研究黏结层厚度对陶瓷/铝复合靶高速冲击性能的影响,结果表明,在0.1~1.5 mm厚度范围内,弹体对铝靶板的侵彻深度随胶层厚度的变化呈现非单调变化,胶层厚度对弹体侵彻铝靶板的能量转换、侵彻深度和靶板挠度分布有不同程度的影响。黏接剂层可以为破碎的陶瓷区域提供侧向约束与支撑,陶瓷在冲击下会发生碎裂,形成锥形的破碎区,黏结剂层能够将破碎的陶瓷破片黏接在一起,形成一个仍然具有抗压能力的“碎裂锥”,继续抵抗弹体的侵彻。这种约束作用有效利用了陶瓷材料的高强度特性,防止破碎区过早坍塌,延长了阻抗时间。黏结剂层可以有效防止陶瓷破片脱落,其黏接作用能将冲击背面产生的陶瓷碎片牢牢束缚,避免破片在背面飞溅,这对保护人员或设备免受二次伤害至关重要,同时保持了结构完整性以应对可能的多次打击。

3 结语与展望

陶瓷复合防弹装甲的抗弹性能由陶瓷层、背板及黏结剂层协同作用决定,其综合防护效能的提升核心在于各组材料特性与结构参数的协同优化。

(1)陶瓷已广泛应用于复合装甲中,多维度协同调控的抗弹优化方法成为研究重点:陶瓷层通过结构参数优化(陶瓷种类、单元形状、尺寸、厚度)抑制裂纹扩展、促进完整破碎锥形成,强化抗多次打击能力与整体防护效能,同时依托复相陶瓷体系设计突破单一陶瓷性能瓶颈,达到硬度、韧性与轻量化的协同提升的目的,最终实现装甲综合防护性能的提升。

(2)树脂基复合材料背板主要采用芳纶、PE-UHMW及PBO纤维与树脂基体复合。芳纶/环氧体系综合性能均衡可靠;PE-UHMW/树脂体系轻量化优势突出,但界面黏结是其挑战;PBO体系理论性能最优,但环境稳定性制约其应用。

(3)背板的波阻抗、刚度、屈服强度、弯曲强度等核心参数构成相互关联的复杂体系,通过多参数耦合设计(波阻抗、刚度与强韧性调控)优化动态响应、应力波传播衰减与能量耗散机制,达成防护性能与轻量化的平衡;通过合理设计层间阻抗梯度,调控应力波传播与衰减,优化其耗散机制;背板材料的刚度、屈服强度及韧性,则对整体结构的背面支撑与塑性变形能吸收具有关键影响,系统研究背板多参数耦合作用机制,建立基于应力波调控、失效模式与能量耗散的协同设计准则,对发展高性能轻量化复合装甲具有重要意义。

(4)陶瓷面板-树脂基复合材料背板厚度比作为复合装甲关键结构参数,直接决定陶瓷碎化吸能、背板承力耗能的协同效率,进而影响整体抗弹性能,厚度比失衡会直接导致防护失效,陶瓷面板过薄则无法充分磨蚀弹芯、形成有效陶瓷锥,过厚则易产生无意义的质量冗余;树脂基背板厚度不足则难以对陶瓷形成有效支撑,还会因吸能不足发生穿孔。合理的厚度配比可实现陶瓷碎化磨蚀弹芯与背板拉伸、剪切变形耗能的高效协同,进而实现防护性能与轻量化要求之间的平衡。

(5)黏结剂层对装甲的单次及多次撞击性能有关键影响,该层作为载荷传递的枢纽,能将冲击应力波有效地分散至背板,从而优化整体能量吸收并避免应力集中。同时,黏结剂的厚度、强度等参数显著影响装甲的综合防护效能。

(6)陶瓷、黏结层和树脂基复合材料背板三者协同构成装甲抗弹性能的核心支撑体系。针对陶瓷脆性缺点,采用低维纳米材料(碳纳米管、石墨烯)微观调控改性陶瓷是未来发展的重要方向,通过精准界面调控与分散技术,从微观尺度根本性提升陶瓷断裂韧性与抗裂纹扩展能力,可为高可靠性、抗多次打击陶瓷面板的制备提供新方案;针对树脂基复合材料背板的性能升级,将超越传统对位芳纶和PE-UHMW纤维增强体系,转而采用具有更高比模量与比强度的新一代有机纤维及纤维/树脂体系混杂设计,并结合可回收热塑性树脂基体(如高性能聚氨酯、聚醚醚酮等),通过多尺度协同

设计优化背板刚度、界面韧性与能量吸收效率,实现结构支撑与能量耗散功能的动态平衡,为高性能轻量化复合装甲奠定关键材料基础。针对胶黏剂的发展,核心在于通过分子设计,开发与树脂基复合材料背板及陶瓷界面相容性更优、具有动力学响应特性的新型胶黏体系,在提升界面韧性与能量耗散能力的同时,兼顾多次冲击下的结构完整性保持,为下一代轻质复合装甲提供定制化的界面解决方案。

参考文献

- [1] 尹飞,等.兵器材料科学与工程,2024,47(1):106–111.
YIN Fei, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(1):106–111.
- [2] 王金梅,等.工程塑料应用,2024,52(10):165–172.
WANG Jinmei, et al. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10):165–172.
- [3] 孙金贵,等.合成纤维,2025,54(9):50–56,91.
SUN Jingui, et al. Synthetic Fiber in China, 2025, 54(9):50–56, 91.
- [4] STOJANOVIĆ D B, et al. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2024, 19. DOI:10.1177/15589250241309084.
- [5] LUZ F, et al. Polymers, 2020, 12(9): 1920. DOI: 10.3390/polym12091920.
- [6] 贾楠,等.复合材料学报,2023,40(6):3 571–3 582.
JIA Nan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3 571–3 582.
- [7] 谭小辉,等.弹道学报,2023,35(4):88–96.
TAN Xiaohui, et al. Journal of Ballistics, 2023, 35(4):88–96.
- [8] MEDVEDOVSKI E, et al. Ceramics International, 2010, 36(7): 2 117–2 127.
- [9] GUO G, et al. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2021.104000.
- [10] HE Y, et al. International Journal of Impact Engineering, 2025, 203. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2025.105367.
- [11] 李永鹏,等.兵工学报,2022,43(6):1 355–1 364.
LI Yongpeng, et al. Acta Armamentarii, 2022, 43(6): 1 355–1 364.
- [12] ZOU Y, et al. Thin-Walled Structures, 2025, 214. DOI:10.1016/j.tws.2024.112861.
- [13] 吕腾辉,等.兵器装备工程学报,2025,46(1):81–88.
LYU Tenghui, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(1):81–88.
- [14] ZHANG Y, et al. Ceramics International, 2021, 47(7): 10 035–10 049.
- [15] THAKUR N, et al. Physica scripta, 2023, 98(11). DOI:10.1088/1402-4896/ad00e2.
- [16] 秦溶蔓,等.材料导报,2020,34(18):18 183–18 187.
QIN Rongman, et al. Materials Reports, 2020, 34(18): 18 183–18 187.
- [17] PAWAR M J, et al. International Journal of Impact Engineering, 2016, 98:42–51.
- [18] YI X, et al. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2023.
- [19] 姚万凯,等.耐火材料,2023,57(6):531–537.
YAO Wankai, et al. Refractories, 2023, 57(6):531–537.
- [20] 代春泉,等.复合材料学报,2026,43(4):1 915–1 945.
DAI Chunquan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(4):1 915–1 945.
- [21] 陈智勇,等.中国材料进展,2019,38(5):497–504.
CHEN Zhiyong, et al. Materials China, 2019, 38(5):497–504.
- [22] 董彬,等.兵器材料科学与工程,2020,43(5):128–136.
DONG Bin, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2020, 43(5):128–136.
- [23] 卿尚波,等.弹箭与制导学报,2010(3). DOI:10.15892/j.cnki.djzdx.2010.03.019.
QING Shangbo, et al. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010(3). DOI:10.15892/j.cnki.djzdx.2010.03.019.
- [24] LAI S, ZANG J, et al. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(8):3 090–3 095.
- [25] KUMAR S, et al. Materials Today:Proceedings, 2022, 57:65–71.
- [26] SURESH K A, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2025. DOI:10.1177/07316844251358026.
- [27] ALZHRANI M M, et al. Results in Chemistry, 2025, 15. DOI:10.1016/j.rechem.2025.102199.
- [28] KAR S, et al. Materials Today:Proceedings, 2022, 62:5 965–5 970.
- [29] WANG H, et al. Polymer Testing, 2017, 61:17–26.
- [30] BANDARU A K, et al. Composites Part B: Engineering, 2026, 309. DOI:10.1016/j.compositesb.2025.113030.
- [31] SAPOZHNIKOV S B, et al. International Journal of Impact Engineering, 2015, 81:8–16.
- [32] VIEILLE B, et al. Composite Structures, 2013, 101:9–21.
- [33] XIAN G, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33:6 297–6 306.
- [34] HARRIS A J, et al. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(15-16):2 925–2 934.
- [35] 余毅磊,等.北京理工大学学报,2021,41(7):713–720.
YU Yilei, et al. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(7):713–720.
- [36] YU Y, et al. Ceramics International, 2024, 50(7):10 325–10 339.
- [37] 李树涛,等.兵器材料科学与工程,2008,31(6):20–23.
LI Shutao, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(6):20–23.
- [38] 武一丁,等.爆炸与冲击,2023,43(9):179–191.
WU Yiding, et al. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(9): 179–191.
- [39] LIN J, et al. Composites Science and Technology, 2025, 259. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110941.
- [40] 邹有纯,等.兵器装备工程学报,2024,45(10):69–74.
ZOU Youchun, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(10):69–74.