

透明装甲防护材料及其结构设计与应用评价

邵 岑^{1,2}, 张 乐^{1,2}, 王思晴¹, 王 彤², 邱 凡², 马庆飞¹, 陈 浩^{1,2}

(1. 江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏锡沂高新材料产业技术研究院, 江苏 徐州 221400)

摘 要: 透明装甲是应对未来战争的“光学盾牌”, 其具有高光学透明度、高硬度、高强度、可防弹道冲击与爆炸物碎片冲击等特性, 被广泛应用于装甲战车、武装直升机、舰船航母等装备平台。目前, 世界各军事强国竞相开发出抗弹性能优异的透明装甲, 但是, 透明装甲的防护性能提升与轻量化设计仍面临瓶颈。本文首先对现役透明防护材料的性质进行了详细介绍; 重点分析了透明防护装甲的结构设计方案及其损伤机制, 并指出了防护性能提升的重点方向; 再者介绍了国内外透明防护材料性能考核的评价方法, 特别是需要重点考核的项目; 最后, 对透明装甲的发展方向进行了展望, 为新一代透明装甲的结构设计与应用评价提供借鉴。

关键词: 透明装甲; 防护性能; 轻量化; 结构设计; 应用评价

中图分类号: Q433.3 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)03-1043-22

网络出版时间: 2024-02-20



装甲是现代高技术作战条件下用于提升武器装备战场作战能力和生存能力的关键防护材料, 其具有高强度、高硬度、高韧性以及低密度的应用要求, 被广泛应用于单兵防护、车辆防护、舰船防护、工程防护等各类军事平台。然而, 在高技术条件下爆发的俄乌冲突中, 集中亮相的第四代装甲装备, 如 KF-51 “黑豹”、T-14 “阿码塔”、“艾布拉姆斯” X 等装备, 其“不对称”战略优势来源于防护装甲在战场态势感知、封闭舱作战能力、结构轻量化以及光学观察视野等方面的技术突破。因此, 提升舷窗、观察窗、红外观瞄系统等光学观察部件的轻量化程度以及抗精准打击能力已经成为装甲装备最具性价比的作战能力提升方式^[1-4]。

透明装甲是充当光学观察部件的特种透明防护材料, 其作为一种多功能层集成的透明材料系统, 主要作用是在获得光学视野的前提下, 保护重要人或物免受爆炸物碎片或弹丸攻击^[5-11]。目前, 现

役透明装甲在材料设计上主要分为 2 个功能模块, 分别是硬质的防护材料与软质吸能材料。硬质防护材料是通过高硬度的材料结构抵御弹头对装甲的侵入, 或者是使弹头破碎减小装甲的损伤范围; 软质吸能材料则是通过材料的塑性变形和断裂吸收弹头多余的能量, 避免弹头碎片、硬质材料碎片对保护目标造成损伤^[9, 12-15]。因此, 透明装甲的防护能力由硬质防护材料和软质吸能材料共同决定。

然而, 在实战应用过程中, 透明装甲的防护性能又受到其结构的制约。以现役防弹玻璃型透明装甲为例, 其防护性能受玻璃层厚度与数量、复合胶厚度与类型、聚合物基板类型与厚度等方面的制约^[9, 12]。并且, 为了抵御大口径步枪子弹的冲击, 传统玻璃型透明装甲往往通过采用大幅度增加玻璃层厚度或数量的方式来提升其防护性能。美国陆军“风火轮”——“汉姆威”(HMMWV)高机动多用途轮式车采用增加玻璃层厚度的方式来提升光学观察窗口的防

收稿日期: 2023-09-15。 修订日期: 2023-10-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3501700); 国家自然科学基金(52202135、52302141); 江苏省高校优势学科建设项目(PAPD); 江苏省重点研发计划(BE2023050、BE2021040); 江苏省国际科技合作项目(BZ2023007); 徐州市技术创新专项(KC23380, KC22461, KC22497)。

第一作者: 邵 岑(1993—), 男, 硕士。

通信作者: 张 乐(1988—), 男, 博士, 教授;

陈 浩(1976—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2023-09-15. Revised date: 2023-10-23.

First author: SHAO Cen (1993—), male, Master.

E-mail: shcy-h@foxmail.com

Correspondent author: ZHANG Le (1988—), male, Ph.D., Professor;

CHEN Hao (1976—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: zhangle@jsnu.edu.cn;

chenhao@jsnu.edu.cn

护能力,致使仅覆盖车身外部面积 15%的透明装甲占到了车身总质量的 30%以上,直接大幅度降低了该车的机动作战能力^[9, 16]。

为了实现透明装甲强防护与轻量化的协同,美国空军研究实验室与美国国防制造科学和技术计划共同支持氮氧化铝(AlON)透明陶瓷的研发并将其用于制作透明装甲的迎弹面^[12, 15];美国国防企业 ArmorLine 大力推进镁铝尖晶石(MgAl₂O₄)透明陶瓷作为装甲的迎弹面材料,并通过与聚碳酸酯板复合制备了抗多发冲击的新型透明装甲^[11, 15, 17]。与现役的玻璃型透明装甲相比,在相同防护等级下,镁铝尖晶石型装甲在厚度与重量上至少减少了 50%^[18]。俄罗斯采用蓝宝石与聚碳酸酯的复合的方案,制备出了新型蓝宝石型透明装甲,实现了对大口径穿甲燃烧弹的抵御^[18–19]。

目前,世界各主要国聚焦强防护与轻量化兼备的新型装甲的开发,但是,对透明装甲的材料研究、结构设计与应用评价依旧借鉴均质装甲、复合装甲、陶瓷装甲等非透明防护材料的经验,无法对透明装甲的实战应用提供科学、有效的指导。

本文针对透明装甲的实战应用需求,首先从现役透明材料属性出发,对硬质防护材料和软质吸能材料进行了详细介绍;接着,重点介绍了透明装甲防护结构的设计方案及其损伤机制,然后,对国内外透明防护材料现役评价方法进行重点介绍,并对重点考核项目进行了补充;最后对透明装甲防护结构设计方法与评价方法进行了总结,为新一代透明装甲的结构设计与应用评价提供借鉴。

1 透明防护材料研究进展

1.1 硬质透明防护材料

硬质防护材料是实现透明装甲强防护性能的关键,其主要充当装甲迎弹面材料,实现对子弹或者破片冲击的直接抵御。目前,现役的硬质透明防护材料主要有传统的浮法玻璃材料与新型的蓝宝石单晶、多晶氮氧化铝陶瓷与镁铝尖晶石陶瓷等材料。在相同防护等级下,相较于玻璃作为迎弹面的传统玻璃型装甲,使用新型材料能够实现透明装甲减重减薄 30%以上^[11, 18]。

1.1.1 玻璃 白玻或者超白玻璃(又称:低铁玻璃,主要成分 SiO₂)是目前市场占有率最高的透明装甲迎弹面材料,其制备成本低、光学透过率能够达到 91%以上、本征强度可达 10⁴ MPa 以上,然而,在实际使用过程中,玻璃的强度比理论值低了 2~3 个

数量级^[20–21]。并且,由于玻璃属于硬脆材料,根据 Griffith 提出的微裂纹理论,玻璃表面的微裂纹在应力不断积累过程中会延裂纹方向扩展,裂纹尖端形成应力集中区,导致其在长期使用过程中极易出现开裂、断裂等情况^[22]。除此之外,在制备过程中,玻璃容易受温度、湿度、原料中的结核杂质、冷却过程中的应力等方面影响,造成其强度的大幅降低^[23–24]。

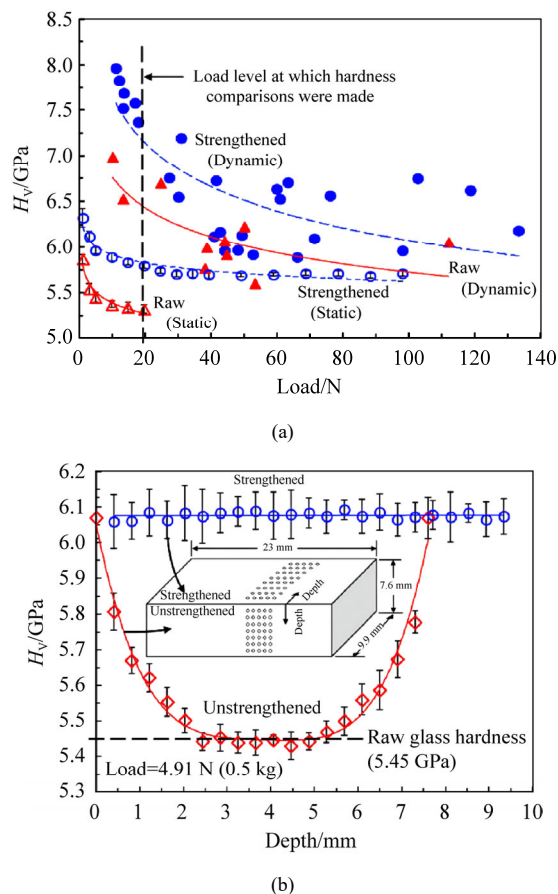


图1 (a)强化玻璃与原生玻璃表面不同荷载范围内静态和动态 Vickers 硬度数据,数据结果显示:在动态载荷作用下,材料硬度显著增加;(b)强化玻璃表面与原生表面的静态硬度随深度变化^[27]

Fig. 1 (a) Static and dynamic Vickers hardness data for various load ranges on the strengthened and raw glass surfaces. This data reveals ISE and significant increases in material hardness under dynamic loading for both surfaces. (b) Variation in static hardness with depth from edge-to-edge on the strengthened and the unstrengthened surfaces^[27]

为了提升玻璃作为装甲迎弹面材料的防护能力,通过物理或者化学方法对玻璃表面引入压应力是抑制其裂纹扩展的有效方式。目前,化学强化是使用最广的玻璃裂纹抑制方式^[20, 25–26]。文献^[27]观

察到: 强化玻璃表面硬度恒定, 而原生玻璃表面靠近边缘部分硬度较高, 中心部分硬度较低; 化学强化能够对玻璃的径向裂纹具有显著的抑制作用, 并将玻璃材料的应变率提升了 23%、表面静态和动态硬度提升了 11%, 使得玻璃表面硬度达到了 6.08 GPa, 显著提升了玻璃对弹头的破碎能力。Junho 等^[28]发现在离子化学强化前对玻璃进行高温预处理能够在保持表面应力深度不变的情况下, 增加约 10% 的玻璃表面应力, 这将有助于提升玻璃的抗弹性能。但是, 高温预处理有可能会使玻璃发生变形弯曲, 影响其在装甲领域中的实战应用。

目前, 现役透明装甲迎弹面材料多为钠铝硅酸盐的浮法玻璃($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$), 其经化学强化后的表面应力强度可达 700 MPa 以上(初始表面应力强度约为 400 MPa)^[29]。美国康宁公司采用化学强化方式改善了锂铝硅酸盐玻璃($\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$)的抗冲击性能, 使其表面压应力强度最高达到 900 MPa, 压缩应力深度超过 150 μm ^[20]。日本旭硝子、德国肖特和国内彩虹等公司也推出了强化后的锂铝硅玻璃, 但强度未达到康宁的技术水平。目前,

国内外对锂铝硅酸盐玻璃的研究工作大多集中在手机盖板、屏幕等超薄玻璃上(厚度不大于 1.1 mm), 对于透明装甲用大厚度锂铝硅酸盐玻璃的研究较少, 这阻碍了其在装甲领域中的应用进展。除此之外, 由于玻璃在大气环境中存在较为明显的风蚀、自爆、发霉等现象, 会对装甲装备的结构安全性产生一定影响^[30]。

1.1.2 蓝宝石单晶 蓝宝石(Al_2O_3)单晶具有高光学质量、高硬度、高强度、高模量等特性, 是透明装甲最理想的迎弹面材料, 其弹能相对耗散系数虽然只有 2.42, 但是, 蓝宝石单晶在制备、生产、加工等方面的技术成熟度远超镁铝尖晶石与氮氧化铝透明陶瓷^[31]。目前, 美国空军、海军已在阿帕奇、F-35、F-22 联合战机、C-130 大力神运输机等军用平台完成了蓝宝石型透明装甲的列装^[32-34]。然而, 由于蓝宝石是定向生长的单晶结构, 其生长过程中内应力大, 晶格内部缺少滑移系、位错滑移势垒高导致蓝宝石单晶塑形性差、脆性大, 易形成不规则的脆性开裂和解理裂纹, 影响其作为透明装甲迎弹面材料的实战应用^[35]。

表 1 典型透明装甲迎弹面材料的基本性能及其弹能相对耗散系数^[31]

Table 1 Basic properties and relative dissipation coefficient of projectile energy of typical transparent armored surface materials^[31]

Types	Density $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Elastic modulus $E/$ GPa	Micro-hardness H_V/GPa	Fracture toughness $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	Relative dissipation coefficient of projectile energy D_{rel}	Expectation formula
Float Glass	2.4~2.6	73.4	5.61	0.8	1.0	$D = \frac{H_V E}{K_{IC}^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
Al_2O_3 (Crystal)	3.97	344	21.16	3.0	2.42	
MgAl_2O_4 (Ceramic)	3.59	260	15.00	1.7	3.70	
AlON (Ceramic)	3.69	334	17.38	2.4	3.09	$D_{\text{rel}} = \frac{D}{D_{\text{float glass}}}$

表 2 温梯法生长的石墨掺杂蓝宝石单晶与泡生法生长的铁钛共掺杂蓝宝石单晶的力学性能参数表^[36-37]

Table 2 The mechanical property parameter table of graphite-doped sapphire single crystal grown by temperature ladder method and iron-titanium co-doped sapphire single crystal grown by bubble method^[36-37]

Type	C:Sapphire TGT NO.0	C:Sapphire TGT NO.1	C:Sapphire TGT NO.2	C:Sapphire TGT NO.3	Fe,Ti:Sapphire KY Unannealed	Fe,Ti:Sapphire KY Annealed	Sapphire KY
Fracture strength/MPa	488.25	597.75	752.00	447.50	720	600	480
Deviation/%	11.67	11.05	6.58	18.92	/	/	/
Fracture toughness/($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	1.99	2.41	2.81	1.86	2.16	2.87	2.01
Deviation/%	6.41	4.45	5.66	7.02	/	/	/

为了避免蓝宝石单晶中裂纹的形成与扩展, 胡克艳等^[36]采用石墨粉掺杂方式, 将二价碳离子(C^{2+})掺入至 Al_2O_3 晶格间隙, 借助 C^{2+} 间隙掺杂产生的钉扎作用, 提高了蓝宝石单晶的断裂表面能, 使其断裂强度提升了 54%、断裂韧性提升了 41%, 从而实现了蓝宝石单晶开裂的抑制。并且, 胡克艳等^[37]采用铁、钛共掺杂技术, 利用 Fe^{3+} 、 Ti^{3+} 对蓝宝石单晶中 Al^{3+} 的不等径取代, 实现了 Al_2O_3 晶格畸变度

的提升与新应力场的形成, 增加了蓝宝石单晶的断裂表面能和弹性模量, 但是, 这种增韧方式会造成蓝宝石单晶着色(见图 2)。Kirkpatrick 等^[38]采用离子注入方式对蓝宝石晶体进行后处理, 在 B^+ 、 Si^+ 注入的情况下, 将蓝宝石晶体强度提升了 1 倍, 提升了蓝宝石单晶的防护性能。除此之外, 表面微磨削、激光加工和 X 射线光刻技术(LIGA)等表面处理工艺也可被用于消除蓝宝石单晶表面微裂纹, 提升其断

裂韧性与表面质量^[35, 39–41]。截止目前, 多种制备、加工以及后处理技术虽然能够抑制蓝宝石单晶裂纹的产生与扩展, 但是这类技术无法从根本上解决蓝宝石单晶的解理断裂难题; 并且, 无法对蓝宝石单晶的解理裂纹延展方向进行诱导。因此, 实现对蓝宝石单晶解理断裂的控制难题是蓝宝石型透明装甲性能提升的重点方向。

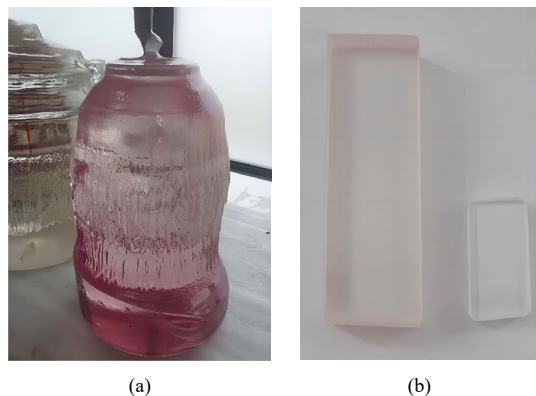


图2 铁钛共掺杂蓝宝石单晶的实物图与白宝石对比图^[36–37]
Fig. 2 Physical picture of iron-titanium co-doped sapphire single crystal and the comparison picture of sapphire^[36–37]

1.1.3 镁铝尖晶石透明陶瓷 镁铝尖晶石是 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系统中的唯一中间化合物, 具有优异的光学性能、显著的机械性能以及极端环境下的抗侵蚀性能, 被誉为是最具前景的透明装甲迎弹面材料^[42]。与蓝宝石单晶相比, 镁铝尖晶石密度更低, 其中红外波段具有更高的透过率和红外吸收边, 能够通过湿法成型技术实现异形结构、大尺寸陶瓷的制备。因此, 对于搭有红外探测装备的装甲载具, 使用镁铝尖晶石作为透明装甲更具优势^[42]。此外, 镁铝尖晶石是典型的多晶陶瓷材料, 其在制备过程中不存在脆性开裂或解理裂纹影响其作为装甲迎弹面材料的实战应用^[11, 17]。

然而, 由于镁铝尖晶石是完全致密的多晶陶瓷材料, 其光学质量和机械性能受晶内气孔、晶间气孔、二次相、杂质等方面影响。因此, 镁铝尖晶石透明陶瓷的制备过程必须使用高纯、高烧结活性的原料与复杂的烧结工艺, 才能获得完全致密的陶瓷产品^[43]。但是, 在实际的生产制备过程中, 往往需要引入烧结助剂实现液相烧结才能有效促进颗粒重排和传质过程, 从而获得完全致密的透明陶瓷产品。由于烧结助剂与基质原料的成分组成不同, 可能会在局部区域形成散射中心影响透明陶瓷的光学质量。如过量或者残余的 LiF 烧结助剂会在镁铝尖晶石陶瓷的晶界和三叉结处聚集(见图 3), 使得晶界扩

散和晶界迁移受到限制; 并且, 使用过量助剂的陶瓷产品还可能会出现晶界脆化和晶间断裂现象, 降低材料的高速抗冲击性能, 这意味着镁铝尖晶石陶瓷存在防护缺陷^[43]。

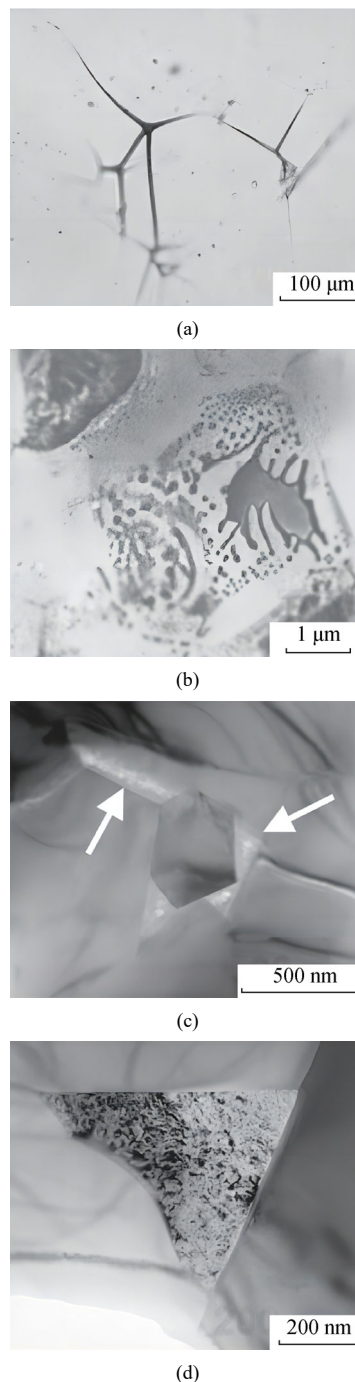


图3 助剂 LiF 引起的光学缺陷(TEM): (a)修饰后的镁铝尖晶石陶瓷的晶界, (b)晶界处的残余液相, (c)三结点处的无定形相, (d)三结点处典型的镁和富氟相对比^[43]

Fig. 3 Optical defects due to LiF (a) Decorated grain boundaries of MgAl_2O_4 ceramic; (b) Remnant liquid phase at grain boundaries; (c) Amorphous phase at triple-junctions (TEM); (d) Typical mottled-contrast magnesium and fluorine-rich phase at triple-junction (TEM)^[43]

为了提升镁铝尖晶石陶瓷的抗冲击性能与力学性能, 烁光特晶利用晶界对位错滑移的阻滞效应, 在保持中红外透过率不发生明显变化的前提下, 通过采用非化学计量配料方式, 将第二相在陶瓷中析出, 并将第二相钉扎在陶瓷晶界处, 引发裂纹偏转或穿晶断裂, 将镁铝尖晶石陶瓷的抗弯强度提升了 41% (由 152 MPa 提升至 215 MPa)^[44]。但是, 这种利用第二相钉扎晶界的方式极易导致透明陶瓷发生偏析, 造成其光学性能的损伤。上硅所同样采用晶界对位错滑移的阻滞效应, 制备出了小晶粒尺寸 (平均晶粒尺寸 1.5 μm) 的镁铝尖晶石透明陶瓷, 其通过提高晶界的面积, 实现了对晶界钉扎位错的更多容纳, 从而将陶瓷产品的抗弯强度提升至 $281 \pm 16 \text{ MPa}$ ^[45]。但是, 陶瓷的机械强度不随着晶粒尺寸的减小而无限增加, 其原因在于晶粒尺寸过小会破坏陶瓷体的长程有序或晶粒的稳定形态, 影响透明陶瓷的机械强度和光学质量^[42]。因此, 在保持高光

学质量的前提下, 开发稳定形态、细小晶粒尺寸的镁铝尖晶石陶瓷是提升其作为透明装甲迎弹面材料防护性能的重点方向。

1.1.4 氮氧化铝透明陶瓷 氮氧化铝是 $\text{AlN}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 二元体系中的单相稳定固溶体, 是一种缺陷立方尖晶石结构的多晶透明陶瓷材料, 其具有光学各向同性、理论透过率高、硬度大、耐高温、抗侵蚀等特点, 被美国军方评为“21 世纪最重要的国防材料之一”^[46]。自 20 个世纪 70 年代开始, 美国陆军实验室和 Raytheon 公司开展了氮氧化铝透明陶瓷制备技术的研究, 并于 20 世纪末实现了高质量陶瓷的制备^[47]。2002 年, 美国 Surmet 公司获得 Raytheon 公司的技术转让, 并开始推进大尺寸 (最大尺寸: 0.74 m^2) AlON 透明陶瓷的量产^[48]。2019 年, Surmet 公司实现了米级高性能 AlON 透明陶瓷窗口的制备, 但是, 由于技术保密, Surmet 公司未对一些关键技术的研究数据和结论进行报道。

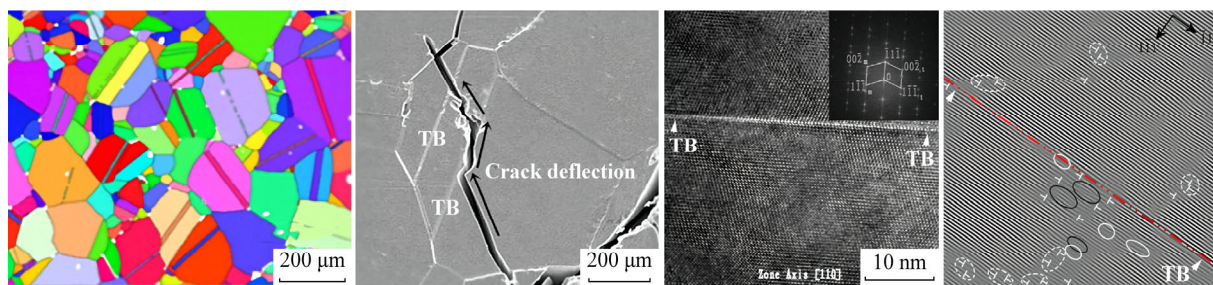


图 4 AlON 的孪晶界、裂纹扩展及位错迁移^[49]

Fig. 4 Twin boundary, crack propagation and dislocation migration of AlON^[49]



图 5 上海硅酸盐研究所在氮氧化铝陶瓷制备上的研究进展^[50]

Fig. 5 Research progress of Shanghai Institute of Ceramics in the preparation of AlON ceramics^[50]

与国外相比,中国在氮氧化铝透明陶瓷制备技术的研究工作起步较晚,但是发展较为迅速。上硅所王士维团队^[49]通过在 AION 晶粒内形成(111)孪晶界的插层结构,将孪晶和边界比例由 27.2%提升至 35.4%,实现了对位错迁移过程的抑制,进而改变了裂纹的扩展方向,实现了氮氧化铝透明陶瓷抗弯强度由 210 ± 10 MPa 提升至 280 ± 17 MPa、硬度由 13.16 ± 0.3 GPa 提升至 15.20 ± 0.54 GPa。武汉理工大学王皓等^[51]采用水基凝胶注模技术制备出了可见光区域直线透过率为 81%~83%、抗弯强度为 295 ± 2 MPa (四点弯曲)、Weibull 模量为 4.85 MPa 的氮氧化铝透明陶瓷。对于氮氧化铝陶瓷的工程化应用,王士维团队^[46, 52]开展了 AION 透明陶瓷窗口和头罩样机的研制工作,解决了大尺寸透明陶瓷成型、烧结等关键技术难题,并通过了有关抗弹性能和高温红外性能的初步验证。然而,对于大尺寸、高质量氮氧化铝透明陶瓷的制备,中国在高活性陶瓷原料粉体的批量化制备、大尺寸陶瓷烧结技术、陶瓷力学性能强化等方面还存在很多问题,有待于进一步研究。

1.2 软质吸能材料

软质吸能材料主要是指透明装甲中使用的高分子聚合物,其分为 2 类,分别是:起粘接作用的夹层材料与通过黏滞作用吸收弹丸残余能量的背板材料。目前,透明装甲常用的夹层粘接材料主要包括聚乙烯醇缩丁醛(PVB)、聚氨酯(PU)、有机硅(Silicone)以及丙烯酸酯(Acrylate)等;黏滞背板材料主要有聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)以及聚氨酯等有机聚合物材料^[14, 53]。

1.2.1 夹层粘接材料 1) 聚乙烯醇缩丁醛胶黏剂

PVB 是通过高分子聚乙烯醇与丁醛缩合反应形成的一种高分子聚合物,其可用于普通玻璃之间或者玻璃与聚碳酸酯板之间的粘接,具有高透明度、高黏接强度、耐老化、隔紫外线等特性,被广泛应用于透明装甲、汽车安全玻璃、夹层玻璃等领域^[54-57]。在透明装甲中,PVB 胶黏剂主要以高温处理 PVB 膜片的形式进行应用,其膜片制备多采用挤压法或者流延法将加入 20%~40%增塑剂等助剂的高黏度 PVB 树脂中压制厚度约为 0.38~1.52 mm 的透明膜片。

然而,使用 PVB 胶黏剂的透明装甲在子弹或破片的冲击作用下容易出现层裂现象。Zhang 等^[58]发现:PVB 胶粘剂在准静态拉伸载荷作用下的应变速率为 $0.008\sim 0.317$ s⁻¹,表现为超弹性材料,且弹性

大小受拉伸速率影响;而在动态载荷作用下,PVB 的应变速率为 $8.7\sim 1\ 360$ s⁻¹,表现出非弹性属性,且其延展性随应变速率的增大而减小。濮勇等^[59]通过中高速子弹冲击试验发现:开裂阶段,玻璃材料单位厚度的破坏能量正相关于其厚度,而 PVB 单位厚度的破坏能量负相关于其厚度;层裂临界阶段,单位厚度玻璃和 PVB 抗层裂破坏能量值都随着厚度的增加而减小。因此,在抑制透明装甲层裂方式中,增加硬质防护材料的厚度更为有效。

目前,面向透明防护领域的高质量 PVB 胶黏剂主要依赖进口,其代表单位为美国的杜邦、孟山都和日本的积水等公司;国内虽然有部分企业能够生产高质量的 PVB,但市场占有率不足 30%,且由于生产工艺、生产成本的限制,国内产品无法与国外同类产品形成竞争。因此,推进中国高性能 PVB 胶黏剂研发迫在眉睫。

2) 聚氨酯胶黏剂

聚氨酯胶是指基体中含有氨基基(NHCOO)和/或异氰酸酯基(NCO)类的胶黏剂,一般是由异氰酸酯(单体)与羟基化合物聚合而成,其能够实现高强度粘接的机理在于聚氨酯胶中含有大量极性氨基基、异氰酸酯基、脲基等极性基团,这些极性基团能够与含有活泼氢的材料形成共价键和氢键,从而具有粘接能力。并且,聚氨酯胶能够通过配方改性的方式,实现对金属、陶瓷、橡胶、塑料等不同材料的粘接^[60-63]。

目前,聚氨酯胶的改性主要有内交联改性、外交联改性、机械共混改性和化学改性等方式,然而,这些改性方式虽然能够实现良好的粘接,但是对于改性后胶体的低温性能、透光性、耐候性并未有明确的报道^[64-65]。德国拜耳公司宣称旗下生产的多款 TPU(热塑性聚氨酯胶)制品在保持高透光性能的前提下,能够在-35℃保持原有的弹性、柔顺性、粘接性等性能;其牌号为 2195 的 TPU 产品,能够在-45℃环境下,保持原有的延伸率 450%、撕裂强度 120 kN/m、拉伸强度 47 MPa、回弹率 48%等性能参数。中国盛鼎新材料宣称其生产的 TPU 产品在-45℃的环境下,保持原有的拉伸强度不小于 42 MPa、拉伸率不小于 500%、撕裂强度不小于 40 kN/m,但是,其光学性能(透光率、雾度)发生明显降低。由此可见,中国 TPU 生产企业与国外顶尖单位还存在一定差距,中国产 TPU 需要在制备技术、产品性能实现进一步的突破。

表 3 冲击试验结果、不同玻璃厚度夹层玻璃的开裂结果、不同 PVB 夹层厚度夹层玻璃的开裂结果、不同玻璃厚度层裂结果以及不同 PVB 夹层厚度开裂结果^[60]

Table 3 Impact test results, cracking results of laminated glass with different glass thickness, cracking results of laminated glass with different PVB thickness, lamination results of different glass thickness and cracking results of different PVB sandwich thickness^[60]

No.	Specification/ mm	Impact velocity/ (m·s ⁻¹)	Impact energy/ g	Fragment velocity/ (m·s ⁻¹)	Fragment mass/g	Destruction speed/ (m·s ⁻¹)	Destructive energy/J	Damage energy of glass/ (J·m ⁻¹)	Ratio of energy increase/%	Remarks column
0311401	3+1.14+3	17.4	1.87	-	0	17.4	1.87	0.31	-	Generate microcracks
0611401	6+1.14+6	26.3	4.27	-	0	26.3	4.27	0.36	16	Micro-cracks are generated on the back surface
1011401	10+1.14+10	63.1	24.61	-	0	63.1	24.61	1.23	241	Micro-cracks are generated on the back surface
No.	Specification/ mm	Impact velocity/ (m·s ⁻¹)	Impact energy/g	Fragment velocity/ (m·s ⁻¹)	Fragment mass/g	Destruction speed/ (m·s ⁻¹)	Destructive energy/J	Damage energy of PVB/(J·m ⁻¹)	Ratio of energy increase/ %	Remarks column
0611401	6+1.14+6	26.3	4.27	-	0	26.3	4.27	3.75	-	Micro-cracks are generated on the back surface
0622801	6+2.28+6	28.1	4.88	-	0	28.1	4.88	2.14	-42.9	The front glass is intact, and the back glass produces micro-cracks
0634201	6+3.42+6	30.4	5.71	-	0	30.4	5.71	1.66	-22.4	Generate microcracks
No.	Specification/ mm	Impact velocity/ (m·s ⁻¹)	Impact energy/ g	Fragment velocity/ (m·s ⁻¹)	Fragment mass/g	Spallation velocity/ (m·s ⁻¹)	Spallation energy/J	Damage energy of glass/ (J·m ⁻¹)	Ratio of energy increase/%	Remarks column
0311403	3+1.14+3	41.8	10.80	-	0.3	41.8	10.80	1.80	-	Cracks appeared on the front side, and a small amount of debris flew out from the back
0611403	6+1.14+6	56.3	19.59	-	0.2	56.3	19.59	1.63	-9.44	A small amount of debris flew out of the back
No.	Specification/ mm	Impact velocity/ (m·s ⁻¹)	Impact energy/ g	Fragment velocity/ (m·s ⁻¹)	Fragment mass/g	Spallation velocity/ (m·s ⁻¹)	Spallation energy/J	Damage energy of PVB/(J·m ⁻¹)	Ratio of energy increase/%	Remarks column
0611403	6+1.14+6	56.3	19.59	-	0.2	56.3	19.59	17.18	-	A small amount of debris flew out of the back
0622803	6+2.28+6	61.1	23.07	-	0.3	61.1	23.07	10.12	-41.09	Cracks appeared on the front, and a small amount of debris flew out
0634203	6+3.42+6	68.2	28.74	-	28.74	68.2	28.74	8.40	-16.70	A small amount of debris flew out of the back

3) 有机硅黏接剂

透明有机硅黏接剂是一种以硅-氧键为主链的线性高分子量橡胶态材料，其分子量通常由几万到

几十万不等，且作用阶段必须在固化剂及催化剂的共同作用下才能发生缩合反应，形成具有若干交联点的弹性粘接体^[66-68]。有机硅粘接剂具有优异的耐

紫外线降解性和耐候性能,可在 $-60\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内长期使用,常被应用于直升机风挡用装甲、加热型或密封型透明装甲等领域。有机硅粘接剂可在保持较高光学透明度和耐候性的前提下,通过调整其原料使用的二氧化硅微粒大小实现无折光指数和宽温度使用范围的弹性体黏接剂的制备^[69]。

目前,影响有机硅黏接剂在透明装甲中应用的主要因素有胶片的加工工艺与硫化条件,这与有机硅胶片的浊度和粘合力密切相关^[70]。加工工艺是实现胶片稳定制备的关键,能够有效避免粘接过程出现分层、开裂、浊化等现象的出现;硫化工艺则是用于提升粘接胶的粘结强度,其作用机理是将橡胶中的大分子交联成网状结构,限制了大分子链之间的相对运动以及变形,提升分子之间的交联密度,从而增加黏接胶粘结强度^[71]。中国空空导弹研究院金伟等^[72]通过室温硫化技术实现了有机硅胶粘剂能够在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下具备服役能力(剪切强度 2.66 MPa ,剪切强度保持率 68% ,膨胀应力 1.69 MPa),满足了导弹天线罩、航空武器观察窗口等超高速装备粘接和密封的使用需求。但是,由于有机硅胶粘剂粘接强度相对较低,有待于进一步突破。

1.2.2 粘滞背板材料 1) 聚甲基丙烯酸甲酯

聚甲基丙烯酸甲酯俗称亚克力,是一种典型的热塑性聚合物材料,其具有透明度高、质量轻、不易碎裂、耐老化、耐冲击、易加工等特性,被广泛应用于航空航天、透明防护材料、工业透明件、建筑等领域^[73–74]。然而,与其他透明聚合物材料相比,PMMA的耐划伤性差、耐热温度低、抗冲击强度低、聚合工艺差等特性限制了其在高防护要求透明装甲的应用潜力^[75]。并且,直接使用单一甲基丙烯酸甲酯(MMA)单体为原料的高纯度亚克力材料无法满足透明装甲粘滞背板材料的使用需求^[76]。

造成上述现象的原因在于,高纯度的PMMA材料机械性能较差。为了提升亚克力材料的机械能力,南昌航空大学采用共聚增韧的方式,通过改变MMA的侧基特性,使用主价交联与次价交联的方案,将PMMA材料的冲击强度提升至 28.42 J/cm^2 (相较于纯PMMA的冲击强度为 13.06 J/cm^2 ,提升了 117.61%),且光学透过率未发生明显下降(变化量约 1.4%),但是雾度增加了约 7.0% ^[77]。华南理工大学通过采用共混增韧方式,将第二相粒子引入PMMA的网络结构中,在拉伸强度保持率为 96.6% 的情况下,使PMMA的冲击强度提高了 38% ,从而提升

了PMMA的断裂韧性^[78]。部分学者通过采用互穿聚合物网络的方式,显著提升了PMMA聚合物网络的强度;但是,由于改性剂和PMMA基体的在折光指数上匹配难度大,容易对PMMA的光学透过率产生影响,致使该方法并未获得应用与推广^[79]。

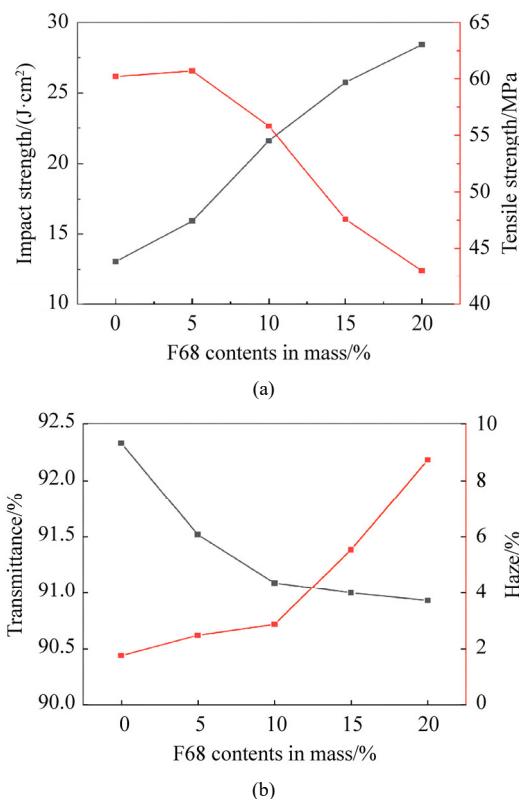


图6 改性后PMMA的(a)拉伸强度和冲击强度与(b)光学透过率和雾度^[77]

Fig. 6 (a) Tensile strength and impact strength and (b) Optical transmittance and fog haze of modified PMMA^[77]

2) 聚碳酸酯

双酚A(BPA)型聚碳酸酯(PC)是一种主链含有碳酸酯键的高分子量聚合物,其具有优异的光学性能、抗冲击性能、隔热性、耐蠕变性能等特点,被广泛应用于汽车和航空透明材料、电子电气、医疗器械等领域^[80–81]。相较于透明的PMMA材料,聚碳酸酯具有更高的玻璃化温度($150\text{ }^{\circ}\text{C}$)和更强的耐火性能(阻燃等级UL94–V2),其冲击强度(简支梁缺口冲击强度 $50\sim 70\text{ kJ/m}^2$)显著优于同类型的PMMA产品。因此,聚碳酸酯更容易满足轻量化、强防护透明装甲的制备需求。然而,聚碳酸酯材料缺陷显著,具体表现为:长期紫外线照射下,极易老化;其在制备过程中,熔流体黏度大、流动性差,难以加工成型,容易出现应力开裂现象^[82–83]。除此之外,聚碳酸酯容易吸湿,极易在表面起雾,影响

驾乘人员视野。

为了解决上述问题,大风化工使用不同类型增韧剂对聚碳酸酯进行改性,由表 4 研究结果表明:增韧剂本身含有橡胶结构,而橡胶能在聚碳酸酯中耗散能量并形成应力集中点,从而提高聚碳酸酯材料的韧性,添加橡胶型增韧剂能够显著提高聚碳酸酯的抗冲击强度(编号 1 为纯聚碳酸酯材料,最高提升了 478%),但并未对聚碳酸酯的黄变及吸湿老化特性实现有效改善^[84]。为了改善聚碳酸酯材料的黄变、吸湿老化特性,大风化工又采用复配抗氧化剂的方案,对聚碳酸酯进行改性,其在不降低聚碳酸酯力学性能的前提下,实现了聚碳酸酯在 280 °C 应用环境的不黄变;但是,对于聚碳酸酯吸湿老化的改性,并未取得实质性的进展^[85]。南京信息工程大学在保持一定透过率的前提下,采用添加 BaSO₄ 纳米粒子和引入紫外吸收剂的方案,将聚碳酸酯在紫外光黄变老化时间延长至 200 h,提升了聚碳酸酯的耐老化性能,抑制了聚碳酸酯材料变色现象^[86]。但

是,聚碳酸酯材料的黄化现象并未从根本上得到控制。并且,对于聚碳酸酯吸湿特性的控制,国内外暂无有效的解决方案,需要进一步的研究。

3) 聚氨酯弹性体

聚氨酯弹性体是指由二异氰酸酯、低聚物多元醇、小分子多元醇或多元胺为扩链剂组成的一种嵌段共聚物,其具有软段与硬段之分。硬段是由异氰酸酯与小分子多元醇或多元胺构成,其具有极性、相互吸引力大等特点;软段是由低聚物的多元醇组成,其具有柔顺性,并与硬段部分在热力学领域不相容,由此导致聚氨酯出现微相分离的结构特性,赋予了聚氨酯弹性体拉伸强度高、断裂伸长率大、耐磨、耐撕裂等特性^[60, 87]。由于聚氨酯弹性体容易在紫外线照射下发生黄变,造成弹性体丧失透明度,因此,提高弹性体透明度成为聚氨酯领域的重要研究方向^[87]。然而,国内对聚氨酯研究大多聚焦在中低硬度弹性体和聚氨酯黏接剂,而对装甲用的透明粘滞背板的研究较少。

表 4 添加 5% 的 5 种不同增韧剂后 PC 的常规物理性能测试结果^[84]
Table 4 Test results of physical properties of PC after adding 5% of 5 different toughening agents^[84]

	Melting flow rate/ (g·(10 min) ⁻¹)	Tensile strength/ MPa	Elongation at break/%	Flexural strength/ MPa	Flexural modulus/ MPa	Notched impact strength (23 °C)/ (kJ·m ⁻²)	Notched impact strength (-30 °C)/ (kJ·m ⁻²)	Heat distortion temperature (0.45 MPa)/°C
1	11.6	62.4±1.5	81±5	91.2±0.8	2146±15	10.0±0.4	9.8±0.2	141.7
2	9.6	58.5±2.2	98±9	86.5±0.5	2070±23	52.3±2.7	28.7±1.5	139.1
3	9.3	58.4±3.1	101±11	85.9±1.5	2039±8	54.2±1.1	32.8±3.2	139.5
4	10.8	56.4±1.4	105±9	87.4±1.0	2082±32	57.0±3.6	15.5±1.8	140.6
5	10.1	56.4±0.5	89±3	83.3±2.4	2013±17	57.8±2.4	33.7±2.8	139.7
6	10.3	57.1±1.5	97±3	83.6±1.2	2017±20	53.4±1.4	40.4±4.4	138.8



(a)



(b)



(c)

图 7 使用 7.62 mm 铅芯弹在弹速(400±20) m/s 下进行枪击测试(试样厚度: 26 mm) (a) 聚氨酯弹性体, (b)防弹玻璃, (c)聚碳酸酯^[88]

Fig. 7 Shooting test (sample thickness: 26 mm) with 7.62mm lead core at (400±20) m/s (a) Polyurethane elastomer, (b) Bullet-proof glass, (c) Polycarbonate^[88]

Piotr^[89]对聚氨酯进行性能总结时发现:聚氨酯弹性体的弹性性能随着硬段含量的增加而下降,当硬段含量超过 65%,聚氨酯弹性体将表现出明显的塑性行为。中国兵器工业集团 53 研究所甄建军等^[88]以小分子二元胺作为扩链交联剂合成了高硬度透明聚氨酯弹性体,其 169 J 动能冲击试验结果表明:

2 mm 厚的聚氨酯弹性体能够对弹速为 400±20 m/s 的 7.62 mm 铅芯弹产生防护效果,且着弹后聚氨酯弹性体不碎裂,对观察无明显影响。张慧莉等^[90]聚焦弹性体结构对耗能性能的影响,结果表明:聚氨酯弹性体在 1 400 kN 的静态荷载或 126 kN 的冲击荷载作用下仍可反复使用并发挥其耗能能力;在冲击

作用下,当弹性体横截面积减小约 8%时,耗能增加约 20%,所能承受的冲击力峰值减少约 18%,这表明聚氨酯弹性体具有较强的缓冲能力。截至目前,虽然聚氨酯弹性体在透明装甲领域取得良好的进展,但是,对于聚氨酯弹性体软硬段的组合方式及其性能控制还需要进一步研究。

2 透明装甲结构设计研究进展

目前,透明装甲的结构设计多依赖均质装甲、复合装甲、反应装甲等不透明装甲的设计经验,虽然仿真软件能够为装甲的结构设计提供指导,但仍然需要大量反复的应用试验才能满足实战需求,从而导致透明装甲研发周期长、研发成本高。本部分将从经典防护结构开始,介绍国内外现役透明装甲的结构设计方案与应用案例。

2.1 经典防护结构

2.1.1 类夹层玻璃复合结构 类夹层玻璃复合结构是 Stephan Bless 与 Tiffany Chen 提出一种针对高速弹丸冲击的防护结构模型,其目的是为了替换轻型装甲车用的透明装甲(结构设计方案:7层总厚度

7.6 cm 的玻璃作为迎弹面材料与 2 层总厚度 12.7 mm 的聚碳酸酯作为背衬材料)^[9]。在类夹层玻璃结构的装甲设计方案中,首先使用粘接胶片将多层玻璃进行粘接,最后复合上聚碳酸酯背板用来吸收玻璃碎片或弹丸碎片的冲击能量^[9]。Bless 与 Chen^[9, 91]在实战应用测试时,设计了 1 块总厚度约 8.96 cm 的玻璃靶板,其采用 1(0.64 cm 玻璃)+5 (1.27 cm 玻璃)+1(0.64 cm 玻璃)+1(1.33 cm 聚碳酸酯)的结构设计方案;利用 12.7 mm 步枪与 18 mm 长 HRC30 钢芯圆柱作为模拟弹丸进行防护性能测试。本次测试结果显示:在弹丸侵彻装甲速率为(1 118±5)m/s 的情况下,弹丸未透穿装甲,且装甲背衬材料未受到损伤,表明该防护结构具有较高的防护能力。但是,此结构装甲使用的 7 层玻璃板全部受到损伤,首层和次首层玻璃损伤范围大,受损面呈径向针状碎片与细小颗粒,同步发生分层开裂现象,透明装甲失去观察能力和作战能力。因此,在弹丸停止侵彻后,吸收弹丸全部能量且不发生分层开裂现象是实现透明装甲持续作战能力的关键。

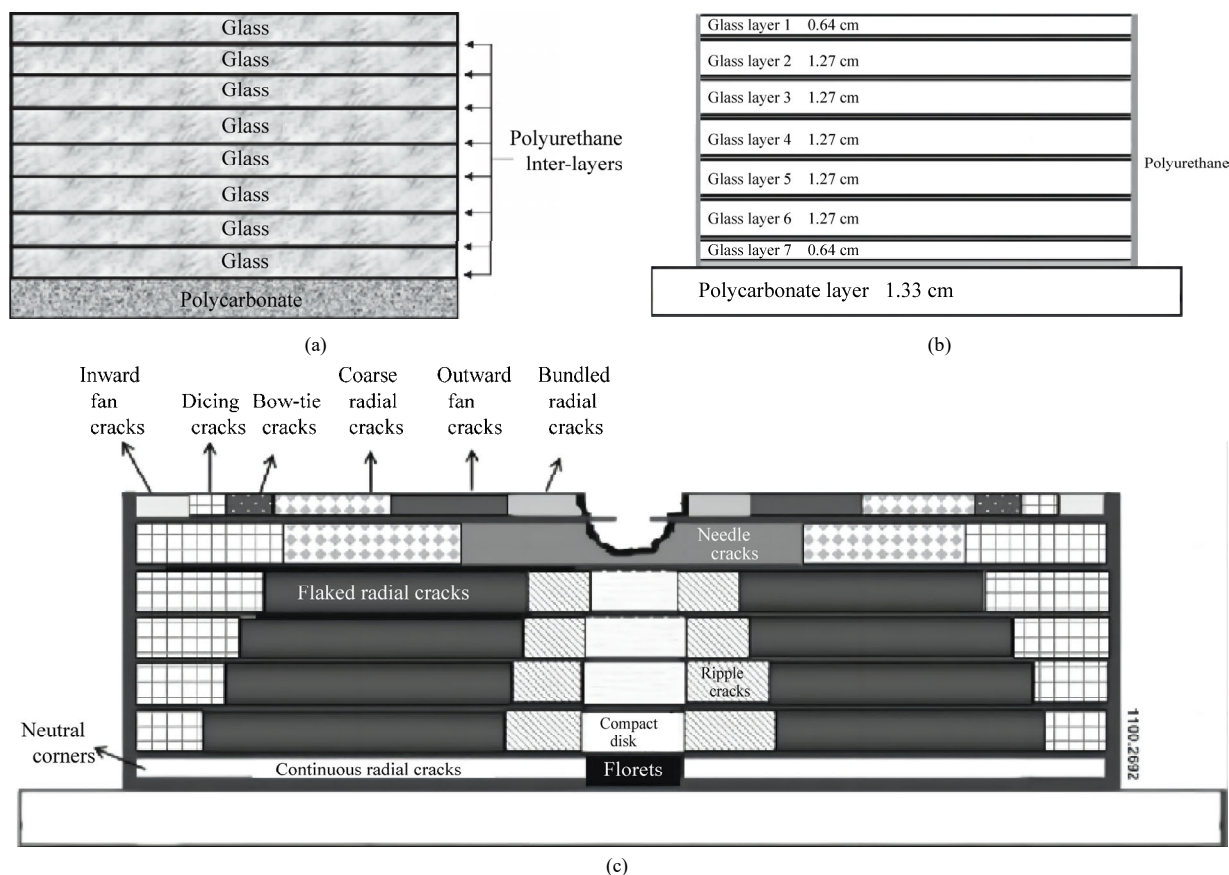
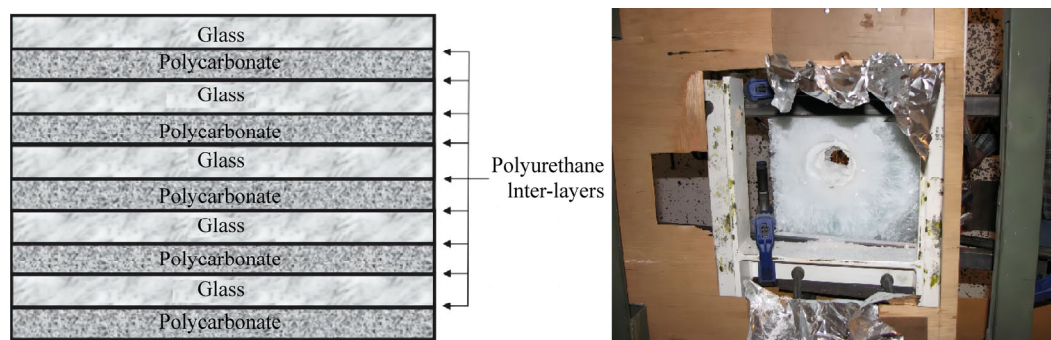


图 8 (a) Bless 与 Chen 装甲结构示意图^[9]、(b)实际试验装甲结构图与(c)冲击试验后损伤区域示意图^[91]

Fig. 8 (a) Bless and Chen armor structure diagram^[9], (b) Actual test armor structure diagram and (c) Damage area diagram after impact test^[91]

图 9 Dolan 装甲结构示意图与枪击实验结果^[9, 92]Fig. 9 Schematic diagram of Dolan's armor structure and the results of the shooting experiment^[9, 92]

2.1.2 类夹层玻璃改进结构 为了避免类夹层玻璃结构中存在的玻璃层全部损伤情况, Dolan 等^[9, 92]提出在玻璃板之间引入聚碳酸酯板夹层(图 12)用于改进类夹层玻璃结构, 其通过利用聚碳酸酯板吸收弹丸侵彻及停止侵彻阶段的残余能量以及阻碍应力波传播, 来提升装甲的防护的能力。根据 ATPD2352 《Rock Strike Testing of Transparent Armor》测试标准, 在采用 20 mm 破片作为模拟弹丸以及步枪进行

防护性能测试的条件下, 测试结果表明: 在标称厚度 73 mm、尺寸为 40 cm×40 cm 的情况下, 这类结构的透明装甲能够完全实现对速率为 $2\,200 \pm 50$ ft/s (670.56 ± 15.24 m/s)模拟弹丸的有效防护; 但是, 受弹冲击后, 该类结构失去观察能力, 并且, 该类结构在 400~700 nm 区域内可见光光学透过率较差(最低光学透过率 59.5%), 这可能会对人眼观察产生影响。

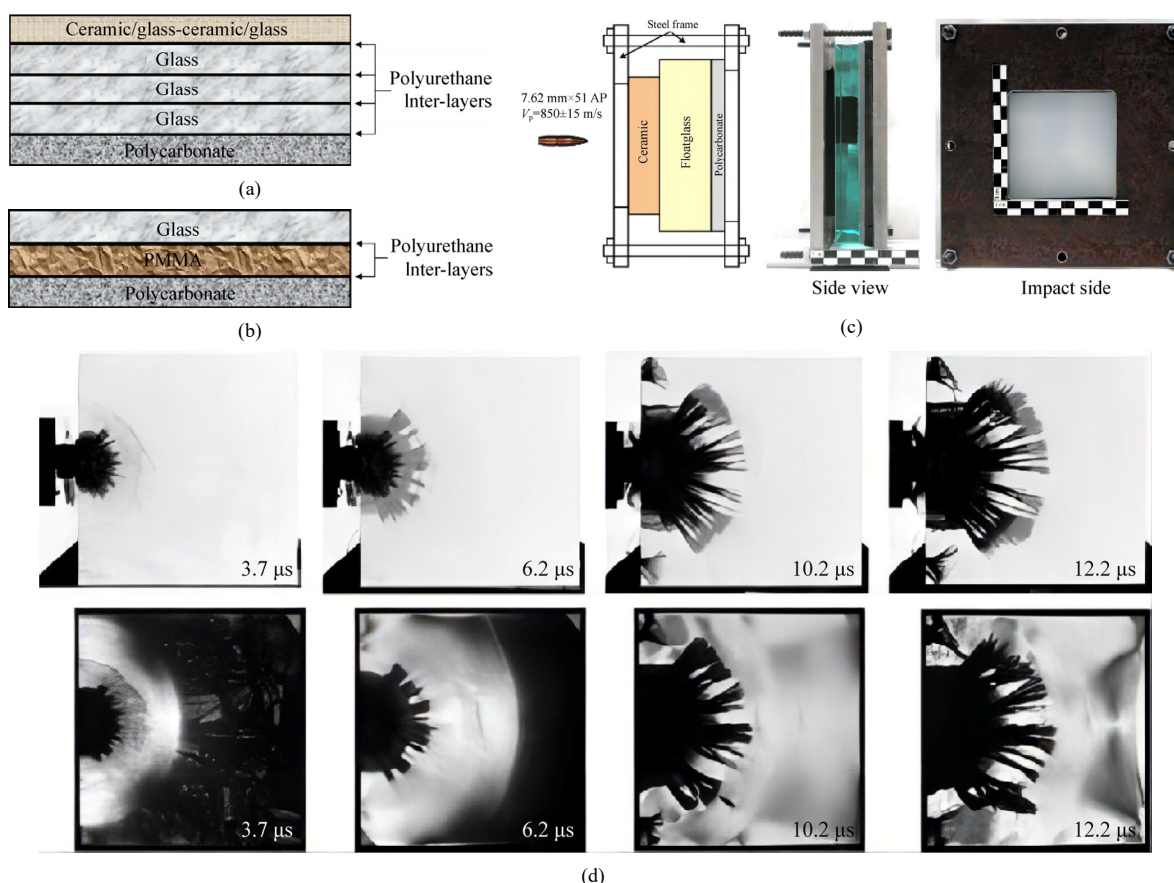


图 10 三功能层透明装甲结构示意图 (a) Strassburger 等的结构与(b) Patel 等的结构^[9], (c)新型结构透明装甲靶板的实物图、(d) 429 m/s 球形钢冲击以 AION 陶瓷为迎弹面的新型装甲^[93]

Fig. 10 Schematic diagram of transparent armor structure with three functional layers (a) Strassburger et al.'s structure and (b) Patel et al.'s structure^[9], (c) Physical diagram of transparent armor target plate of new structure, (d) 429 m/s spherical steel impacting new armor with AlON ceramics as the attack surface^[93]

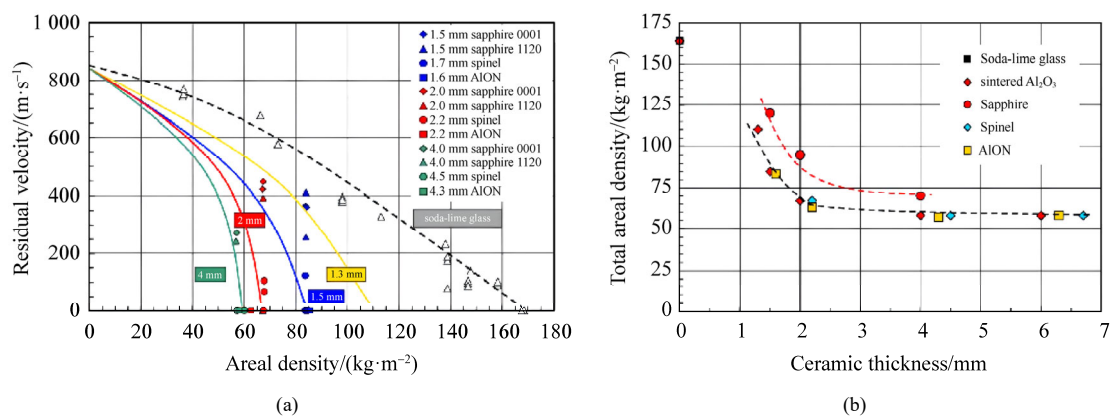


图 11 (a)陶瓷(单晶)/玻璃/聚碳酸酯靶的残余速度与面密度的关系与(b)相同防护等级下,不同迎弹面厚度与新型结构透明装甲面密度关系图^[11]

Fig. 11 (a) Relationship between residual velocity and surface density of ceramic (single crystal)/glass/polycarbonate target and (b) Relationship between thickness of different attack surfaces and surface density of new structural transparent armor under the same protection grade^[11]

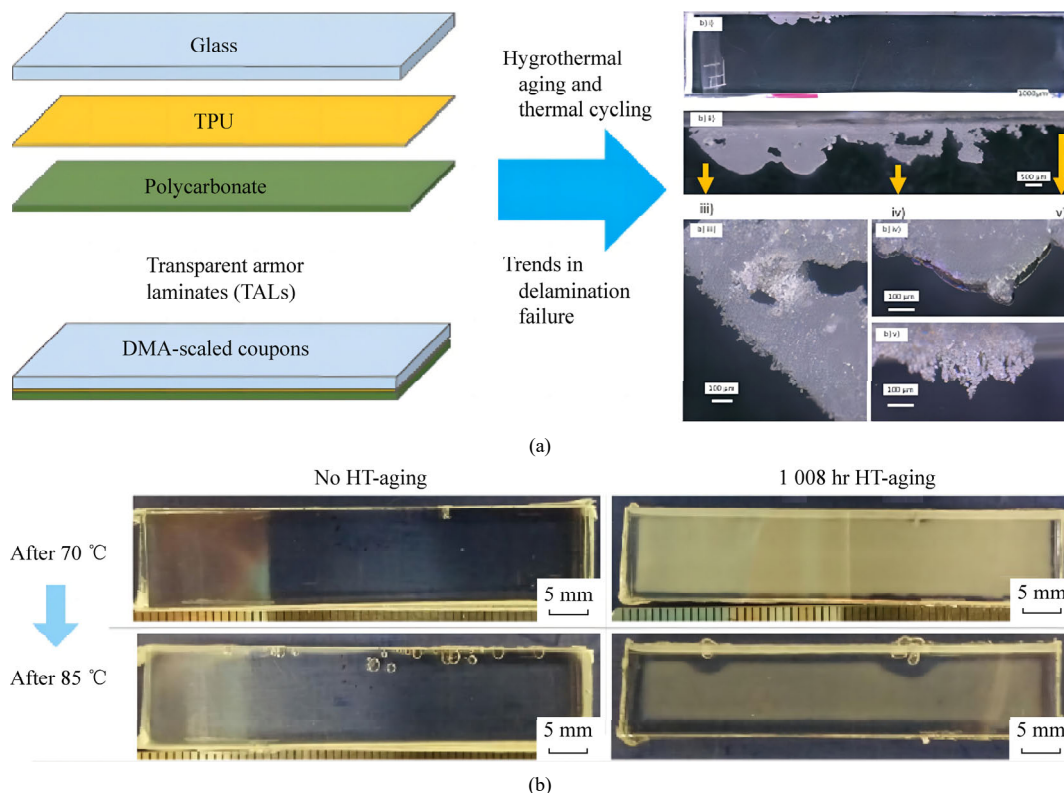


图 12 (a)新型结构玻璃型透明装甲的示意图与样品经湿热老化与热循环试验后的开裂趋势, (b) 在 70 °C 热循环后样品没有湿热老化、1008 h 湿热老化以及 85 °C 水中浸泡 3.5 h 之后的实物图^[99]

Fig. 12 (a) Schematic diagram of the new structural glass type transparent armor and the cracking trend of the sample after wet heat aging and thermal cycling test; (b) Physical diagram of the sample after 70 °C thermal cycling without wet heat aging, 1 008 h wet heat aging, and 3.5 h immersion in 85 °C water^[99]

2.2 新型三功能层防护结构

为了满足现代战争对装甲装备强防护与轻量化的实战应用需求,新型透明装甲采用三功能层的结构设计方案,分别是:迎弹层、中间层和背弹层^[9]。迎弹层的核心作用是将弹丸进行钝化和破碎,降低弹头的侵彻能力;中间层作用则是吸收弹丸残余能

量,阻止迎弹面裂纹的扩展以及提高迎弹层和背板层的热膨胀匹配度;背弹层作用是阻碍中间层裂纹扩展、弹丸侵彻以及避免硬质防护材料碎片对车内人员造成伤害。

美国陆军坦克汽车研发与工程中心开展了对三功能层结构透明装甲的成本评估,提出将蓝宝石、

镁铝尖晶石、氮氧化铝陶瓷用于制作透明装甲的迎弹面材料。由于保密及其他方面的限制, 新型三功能层装甲的详细设计方案、防护性能、光学透过等方面的性能并未有公开报道。Strassburger 等^[11, 93]通过边缘冲击实验观察到速度为 429 m/s 实心球形钢冲击氮氧化铝透明陶瓷为迎弹面的三功能层结构透明装甲的能量吸收过程; 并以弹速为 (850 ± 15) m/s 的 7.62 mm×51 mm 的钢芯穿甲弹对新型结构透明装甲进行实战打靶测试。数据结果显示: 相同防护等级下, 使用厚度超 1.5 mm 的陶瓷(单晶), 即可实现透明装甲减轻质量 30%以上。由此可见, 新型结构透明装甲能够有效促进装甲装备的轻量化与强防护。

3 透明装甲损伤特性研究进展

装甲在弹丸冲击下的损伤演化是其抗侵彻机理的核心, 同时也是其实现轻量化、强防护的关键。目前, 对于装甲损伤演化已经形成较为完备的理论体系, 涵盖了弹体和靶体的几何特征、应力波的传播过程、材料的动静态响应特性、失效准则、冲击能量吸收等众多影响因素^[94-97]。但是, 大部分装甲损伤理论都是基于非透明装甲材料的研究成果, 对光学应用场景下的透明装甲研究较少。本部分内容重点是介绍面向光学应用场景的透明装甲损伤失效。

3.1 界面分层损伤

透明装甲是由无机材料与有机材料在聚合物胶水粘接作用下形成的统一整体, 由于材料本身膨胀系数的不同以及不同应用场景中温度、湿度、酸碱度等因素可能会引起材料的物理化学性能发生变化, 导致透明装甲出现界面分层损伤, 影响其实战应用。Walley 等^[98]系统研究了低温环境对玻璃/聚碳酸酯型复合装甲的界面裂纹形成机制, 结果表明: 温度足够低时, PC 弯曲引起的表面缺陷会形成裂纹, 这些裂纹在冲击点周围形成环状分层, 对装甲造成损伤。Cronin 等^[99]通过对新型三功能层结构玻璃型透明装甲开展 0~70 °C 的湿热老化与热循环冲击试验中发现: 在干燥或最小湿度的应用环境下, 装甲在 1 008 h 的 0~70 °C 的热循环冲击过程中无失效现象出现; 但是, 在具有一定湿度的环境中, 当装甲所处环境温度为 85 °C 情况下, 几个小时内就会出现界面分层现象; 随着装甲老化时间延长, 其分层失效的条件由较为极端的 85 °C (高温) 转变为 0~70 °C 热循环冲击失效, 并且高湿度环境会加速

装甲界面裂纹的扩展, 造成透明装甲光学透过率的大幅损伤。因此, 对透明装甲边缘进行封胶处理是延长装甲服役时长的关键。

3.2 弹丸侵彻损伤

由于高速弹丸带来的瞬时强冲击, 使得装甲材料本身的应力应变状态发生了突变, 同步出现了拉、压、弯等多种应力形式, 并且应力大小由准静态作用下的数百倍到数千倍的激增^[15]。由于材料本身显微结构的不均匀, 导致应力在局部区域发生集中从而导致装甲开裂缺陷的出现。目前, 弹丸冲击装甲后一般形成 3 类应力波, 分别为平面应力波 (Rayleigh 波)、纵波 (压缩波) 以及剪切波。根据 Hopkins 的理论, 材料在 0°法线角方向受到弹丸有效冲击的情况下, 冲击产生能量按照瑞利波 67%、剪切波 26% 以及压缩波 7% 的分布形式进行传播^[100]。因此, 减小弹丸侵彻阶段的装甲损伤范围可通过调整不同形式能量在装甲中的释放方式进行实现。

3.2.1 玻璃型透明装甲损伤特性 当高速弹丸冲击玻璃表面时, 以着弹点为起点在玻璃表面形成瑞利波、压缩波以及剪切波; 其中, 瑞利波具有较高能量, 超过材料本身的化学键能, 导致首层玻璃极易出现粉碎现象, 但是, 由于玻璃本身无明显的缺陷集中区, 致使瑞利波以着弹点为圆点对外进行扩展, 见图 13^[91, 93]。因此, 首层玻璃一般呈现圆形粉碎损伤区, 部分裂纹是在剪切力作用下扩展至玻璃边缘。由于首层玻璃无法对应力波完全吸收, 后续粘接材料将继续吸收应力波, 造成其损伤区域呈粉碎状与离散状的并存状态。此外, 根据玻璃型透明装甲的边缘冲击试验结果进行分析 (图 14), 玻璃为多层结构, 压缩波会由玻璃板后边缘传递至粘接材料中, 且压缩波在粘接材料与第 2 层玻璃表面发生反射, 使得玻璃受到拉应力, 导致第 2 层玻璃呈现离散断裂, 同样的损伤机理发生在后续玻璃板中^[93]。

3.2.2 蓝宝石型透明装甲损伤特性 与玻璃材料类似, 蓝宝石单晶受弹冲击后形成的瑞利波、压缩波以及剪切波将以同样形式进行传播。然而, 由于蓝宝石单晶存在解理面, 致使蓝宝石单晶作为迎弹面材料可能存在防护缺陷。根据 Schultz 等^[18]的报道, 蓝宝石单晶主要解理面有 c 面 (0001) 基面、 r 面 ($10\bar{1}2$) 菱形面以及 m 面 ($10\bar{1}0$) 柱状面, 其 3 个面的断裂韧性和解理面能分别为: c 面 $4.54 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 21.54 J/m^2 ; r 面 $2.38 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 6.45 J/m^2 ; m 面

$3.14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 11.43 J/m^2 。因此, 当蓝宝石单晶受弹冲击后, 迎弹面的晶面形式将决定了裂纹的扩展形式, 即 r 面损伤最严重, c 面损伤较轻。由此可见, 为了避免蓝宝石型透明装甲防护缺陷的形成, 需要对蓝宝石迎弹表面的晶面形式进行有效控制。Strassburger 等^[18]利用钢球从 5 个方向对蓝宝石进行

冲击试验(见图 15), 研究表明: 当冲击能量不足以在蓝宝石单晶中完全传播时, 其未受损伤区域的晶面形态在控制裂纹扩展方向和开裂形式方面发挥着主导作用。因此, 在某些情况(取向)下, 蓝宝石损伤形态由解理面控制; 但是, 高冲击能量下, 蓝宝石单晶损伤形态与解理断裂无主导关系。

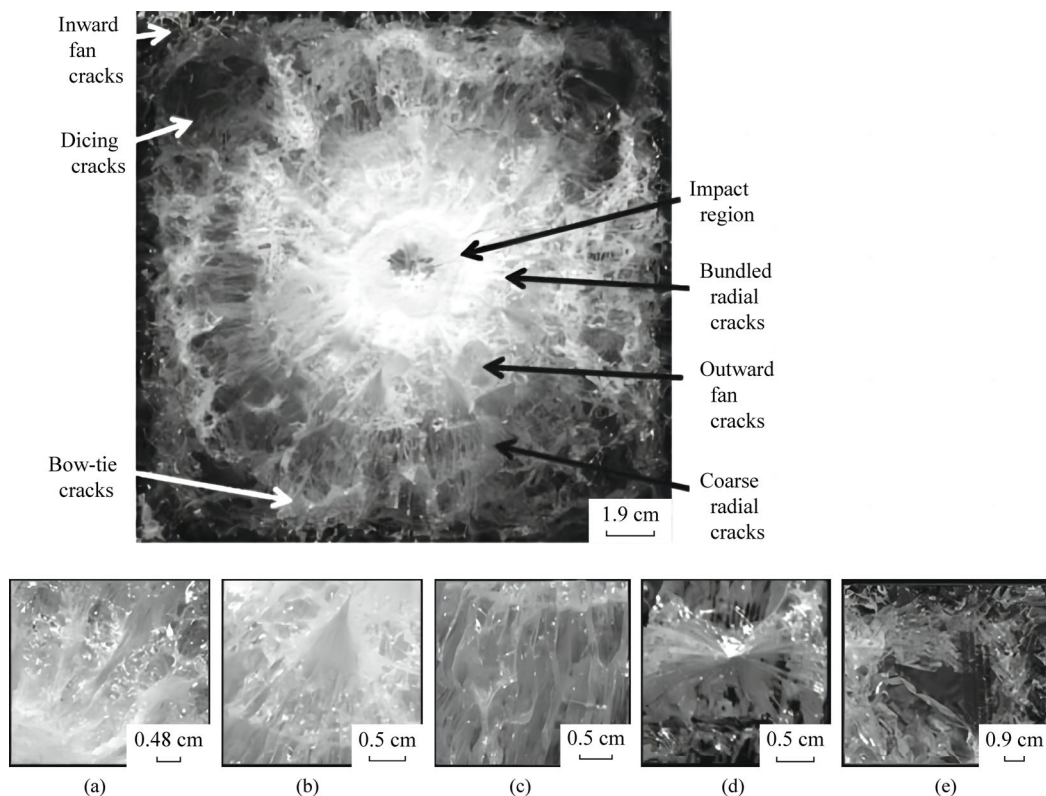


图 13 玻璃装甲受弹冲击后的裂纹扩展情况^[91]

Fig. 13 Crack growth of glass armor after being subjected to a bomb impact^[91]

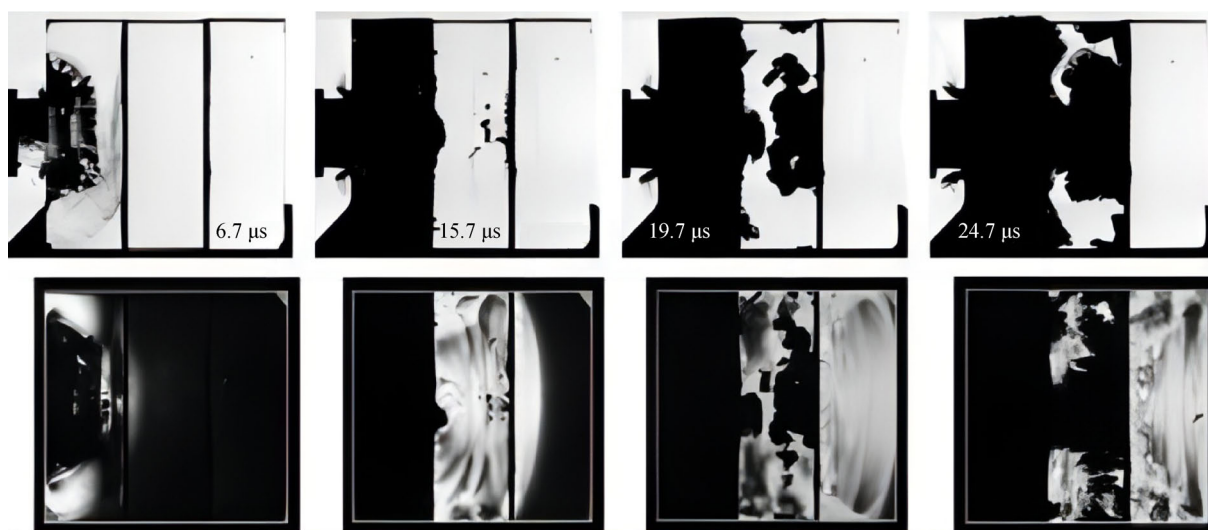


图 14 玻璃型透明装甲边缘冲击试验的损伤情况, 粘接材料: 聚氨酯粘接胶 $2 \times 2.54 \text{ mm}$ (上图非偏振光, 下图偏振光)^[93]

Fig. 14 Damage condition of glass type transparent armor edge impact test. Adhesive material: polyurethane adhesive $2 \times 2.54 \text{ mm}$ (non-polarized light above, polarized light below)^[93]

表 5 蓝宝石单晶实验与理论解理能
Table 5 Experimental and theoretical cleavage energy of sapphire single crystal

Plane structural indices	Shappel cleavability ^a	E/GPa	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	Cleavage ^b $/(J\cdot\text{m}^{-2})$	$\gamma_s/(J\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{T}^{-1})$	$\gamma_s/(J\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{M}^{-1})$	$\gamma_s/(J\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{H}^{-2})$
C (0001)	9.5	465	4.54	21.54	6.5	5.9	4.8
R (10T2)	12.4	440	2.38	6.45	6.4	5.6	4.8
M (10T0)	10.2	430	3.14	11.43	6.9	6.5	—

^a Higher values represent easier cleavage^[18]

^b experimental values from Bradt^[18], Iwasa and Bradt^[102], T=Tasker^[103], M= Mackrodt^[104], H=Hartman^[105]; authors initials; theoretical values from (T), (M), (H)

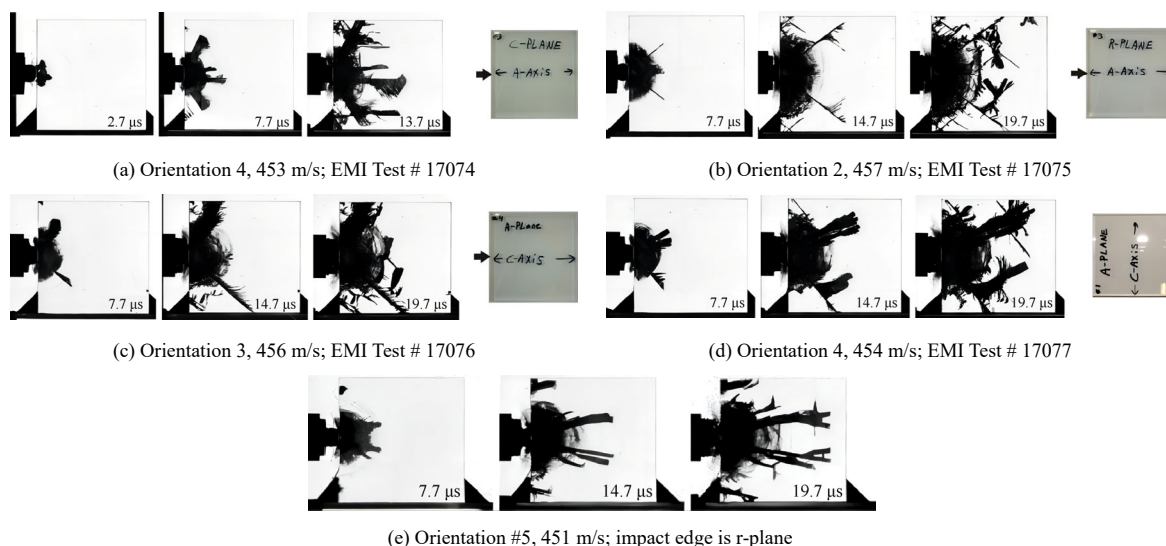


图 15 采用阴影图分析的蓝宝石单晶球形边缘冲击损伤和裂纹形态^[18]

Fig. 15 Impact damage and crack morphology of sapphire single crystal spherical edge by shadow diagram analysis^[18]

3.2.3 陶瓷型透明装甲损伤特性 陶瓷是典型的多晶材料, 具有各向同性的材料属性, 其受弹冲击后遵循应力波非弹性耗散的损伤机制, 即形成由连贯大裂纹构成的半球形主裂损伤区; 且陶瓷的显微结构断裂模式表现为穿晶到沿晶转变^[106]。然而, 在实战应用中, 陶瓷型装甲的迎弹面损伤区域并非呈现半圆形, 其原因在于: 多晶透明陶瓷在制备过程中需要使用烧结助剂, 由于部分助剂离子进入陶瓷晶格发生晶格扭曲或在陶瓷晶界处富集无法进入陶瓷晶格, 从而在陶瓷内部形成应力的集中区, 导致其受弹冲击后成为裂纹形成或扩展的应力集中源, 致使陶瓷型迎弹面可能存在局部区域出现开裂情况(即非扩展裂纹所在位置)^[93]。

美国陆军研究实验室与德国弗劳恩霍夫协会—瞬时动态研究所联合采用弹速为 850 m/s 的钢芯穿甲弹对 4 种不同类型尖晶石材料开展抗弹性能研究, 结果表明: 陶瓷晶粒尺寸越小, 裂纹扩展数量越多, 裂纹扩展速率越慢, 形成颗粒状损伤区越小; 以包括 AION 在内的尖晶石陶瓷材料为例, 受弹冲击后的损伤区域呈圆形, 并在圆形区域内形成陶瓷

颗粒, 该颗粒大小与陶瓷晶粒尺寸相关; 在径向裂纹扩展中, 小晶粒尺寸陶瓷具有更高的径向裂纹数量和更小的裂纹扩展速度(平均晶粒尺寸: 17087 号(0.6 μm)<17730 号(5~20 μm), 径向裂纹扩展速度: 17087 号(2 865 m/s)<3 701 m/s^[7]。美国陆军研究实验室在与瞬时动态研究所开展陶瓷材料边缘冲击实验发现: 陶瓷材料的非弹性或塑性变形机制能够有效抵御裂纹或者损伤区域的扩展, 在单轴约束的测试条件下, AION 陶瓷的可塑性机制启动后, 其承受的最大应力从 3.5 GPa 增加到 4.5 GPa^[18]; 内布拉斯加大学林肯分校与美国陆军研究实验室通过计算机仿真模拟与实验对比方式, 建立了陶瓷材料显微结构与陶瓷冲击损伤行为的定性联系, 证明了各向异性的陶瓷晶粒表面对造成陶瓷损伤的应力波具有分散作用; 并通过仿真数据证明陶瓷材料中存在孪晶、塑性、摩擦等缺陷是弹丸冲击损伤作用下衍生的能量耗散机制^[107]。因此, 在满足光学性能的前提下, 将陶瓷材料细晶化、塑性化、孪晶化是减小陶瓷型装甲损伤区域的有效方式。

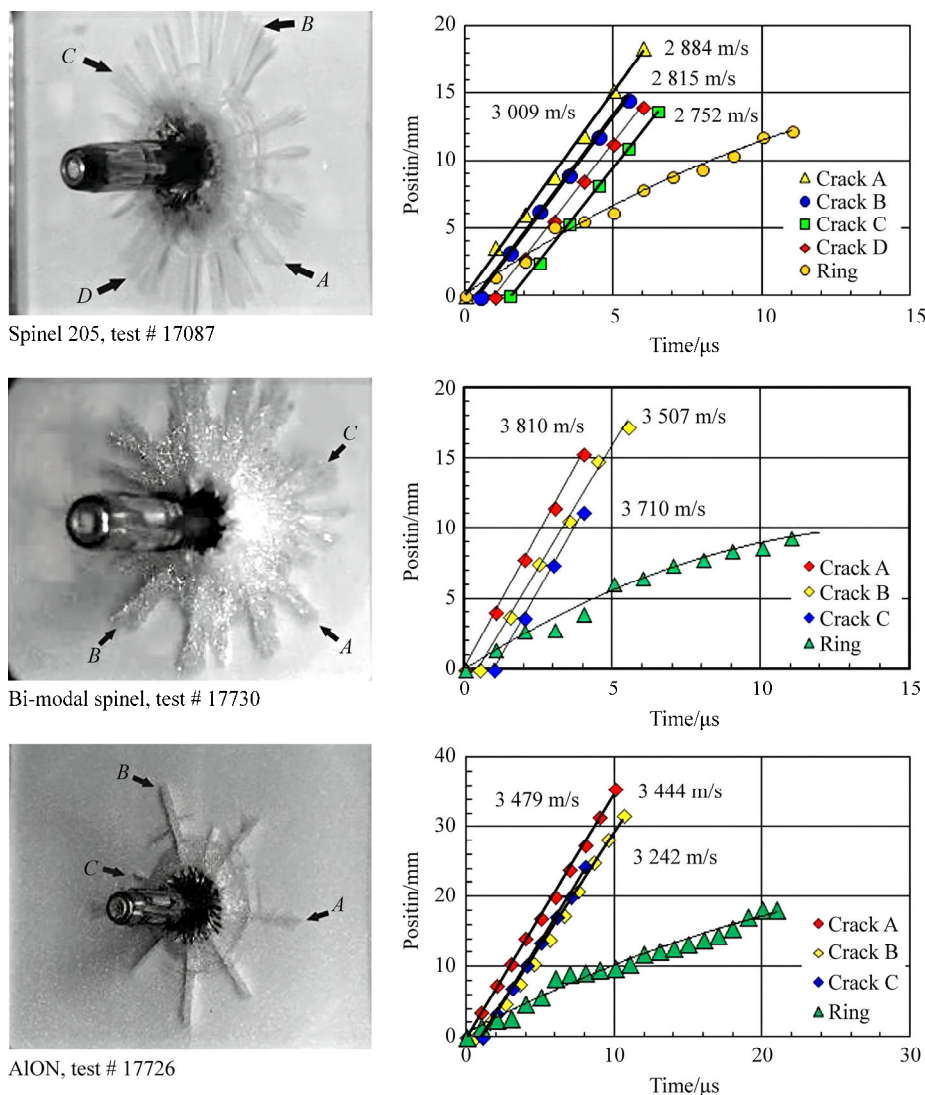


图 16 弹丸速度 850 m/s 冲击透明陶瓷装甲时的高速照片(左)与冲击后裂纹扩展时间^[7]

Fig. 16 High-speed photo (left) of the projectile impacting the transparent ceramic armor with a velocity of 850 m/s and the crack propagation time after the impact^[7]

4 透明装甲现役应用评价方法

目前,对于透明装甲的评价方法,美国在 ARMY MIL-PRF-46108 C—1999《装甲:透明》和 ATPD 2352《透明装甲》的产品标准中,概述了透明装甲中允许存在的缺陷、测试和性能要求^[108];而中国 GA165—2016《防弹透明材料》测试标准中虽然也制定了类似的评价方法^[109]。但是,对于透明装甲的测试评价项目、评价方法存在一定的局限性,本文重点介绍现役标准中透明装甲产品常用评价的性能指标,并指出装甲产品性能评估可能需要关注的检测项目。

4.1 光学性能

观察窗、红外观瞄系统等领域的核心部件,必

须具备一定的光学透过率才能满足其实战应用。

4.1.1 光学透过率 光学透过率是透过透明或半透明物体光通量与其入射光通量的百分率,其反映了光线透过介质的能力。根据美军 ATPD 2352《透明装甲测试标准》,安装于舷窗、观察窗等位置的透明装甲必须在 400~930 nm 范围内具备一定的光学透过率,具体包括 400~700 nm 的可见光与 770~850 nm 的红外夜视透过需求^[108]。中国 GA165—2016《防弹透明材料》测试标准中,6 级光学透过率指标必须大于 55%,但是,该测试标准的检测方式是以白炽灯为光源(色温 2856±50 K),参照国际照明委员会(CIE)规定的白昼视光度作为光源进行限定,并未考虑装甲装备在夜视、红外传输等方面使用需求^[109]。因此,中国在光学透过率评价方面存

在一定的局限性。

4.1.2 雾度 雾度是偏离入射光 2.5° 角以上的透射光强占总透射光强的百分数, 是透明或半透明材料的内部或表面由于光漫射造成云雾状或混浊外观的现象, 其反映了透明材料的成像能力。雾度与光学透过率虽在测试方法、测试原理方面存在相似之处, 但是其反映的物理学意义完全不同。目前, 美军在 ATPD 2352 的装甲采购标准中引入了雾度概念, 但并未限定具体的雾度区间。而中国在 GA165—2016 标准中, 并未将雾度作为考核指标项。中国在 GA293—2012《警用防弹头盔及面罩》标准中, 限定了透明面罩在雾度 $<2.5\%$ 的情况下, 可实现良好的成像效果。因此, 该检测标准可进行借鉴。

4.1.3 光畸变 光畸变是光学系统对物体缩成的像相对于物体本身的光学失真程度, 是光学理论上计算得到的变形度。在透明装甲中, 光学畸变反映了通过装甲观测物体时造成所观察到物体影像失真的光学缺陷; 其在装甲中产生的主要原因为透明材料本身的面型精度与复合阶段的光学匹配程度。美军在 ATPD 2352 装甲采购标准中引入了光畸变测试, 但并未有明确的技术指标。中国在 GA293—2012《警用防弹头盔及面罩》标准、GB9656—2021《机动车玻璃安全技术规范》, 限定了视场区域内光畸变 $<6'$; 而中国 GA165—2016《防弹透明材料》标准中并未进行限定。

4.2 防护性能

防护性能是衡量透明装甲对驾乘人员保护能力的关键, 是对透明装甲应用评价的关键指标, 其主要包括低温和高温两个应用环境。目前, 对于透明装甲防护能力测试方法及等级划分, 国际上主要参考美军 NIJ、英国 HOSDB 2007、俄罗斯 GOST R 50744、北约 STANG4569、欧洲 EN1063 等防弹标准, 中国主要参考 GJB59.18—1988《装甲车辆试验规程装甲板抗枪弹性能试验》、GJB3030—1997《装甲车辆用防弹玻璃规范》、GJB6647《轻型陶瓷复合装甲规范》等测试标准。在 GA165—2016 中, 防弹性能分为 5 个等级, 其中, 最高级 5 级, 防护要求为弹速为 920 ± 10 m/s 的 $5.8\text{ mm} \times 42.2\text{ mm}$ 的 DBP87 式钢芯弹, 并未涵盖较为常见的 7.62 mm 穿甲燃烧弹。

4.3 环境适应性

环境适应性是指透明装甲在服役过程中的综合环境因素作用下能实现所有预定性能和功能且不被破坏的能力, 是装甲产品对环境适应能力的重要体现。目前, 在极端作战环境下如科威特(气温最高

75°C)、丹麦(气温最低 -53°C), 透明装甲的稳定服役已经成为装甲装备作战能力的关键。

目前, 透明装甲的环境适应性主要表现为两个方面, 分别是温度适应性与湿度适应性。GA165—2016 标准限定了极端气温环境: $-55 \sim 85^\circ\text{C}$, 但是, 对于湿度环境或者湿热环境下装甲的老化黄变、吸湿脱胶、分层开裂、盐雾腐蚀等服役失效情况, 并未进行明确的界定。除此之外, 低温高湿环境下, 透明装甲黏滞背板侧(装甲车内部)还可能会出现吸湿起雾情况, 影响驾乘人员的视野范围, 可能会影响透明装甲的实战能力。

4.4 耐磨性能

耐磨性能主要指砂石环境对透明装甲的冲蚀损伤, 其影响透明装甲的透光性能、光畸变以及服役寿命。目前, 国内外并未对耐磨性能进行限定, 究其原因在于: 装甲迎弹面是硬质材料, 具有高硬度、高模量等特性, 能够抵御砂石环境的冲击, 并且, 可通过镀膜、抛光等方式对其表面损伤进行修复。但是, 对于一些特殊战场场景如器件安装、弹药搬运的刮擦、磨损、划痕等方面造成的装甲粘滞背板材料损伤是不可进行修复的, 这可能会影响装甲的服役寿命。

5 结论与展望

透明装甲是现代武器装备实现超强作战能力的关键, 世界各主要国在透明装甲的制备技术与应用评价方面已经进入了加速发展阶段, 本文从现役装甲的材料属性、结构设计方案、冲击破坏行为以及应用评价等方面介绍了透明装甲的发展现状; 系统概述了现役防护材料的物理化学属性、新型结构透明装甲损伤失效以及防护性能提升的发展方向, 总结了透明装甲的考核评价方法, 最后从实战应用角度出发指出了新型透明科学试验方法的构建方向。

蓝宝石单晶是目前较佳的迎弹面材料, 其超高的机械性能、成熟的产业、完善的上下游配套是其他新型硬脆材料所不具备的; 但是, 蓝宝石单晶存在防护缺陷, 其解理断裂行为制约了蓝宝石在装甲迎弹面的应用潜力。因此, 构建适用于装甲迎弹面的蓝宝石单晶解理断裂控制方法是中国快速推进新型透明装甲强防护、轻量化的有效手段。

聚氨酯粘接胶是实现无机材料与有机材料高强度复合的关键。目前, 聚氨酯的低温脆性与吸水特性是其失效的主要原因, 因此, 对使用聚氨酯黏接剂的透明装甲进行封胶处理可有效延长装甲服役寿

命和避免装甲界面分层损伤。

聚碳酸酯是理想的背板粘滞材料，但是其表面吸湿起雾会影响透明装甲的观察视野。虽然市售防雾剂能够减少或避免聚碳酸酯表面起雾现象的出现，但是其容易失效、需要反复喷涂才能满足装甲装备的使用。因此，开发出高性能不起雾的聚碳酸酯板会是透明装甲领域的重大技术突破。

在透明装甲结构设计方面，强防护、轻量化是装甲结构设计的永恒主题。采用现役新型三功能层式的装甲结构设计方案，必须将装甲的设计核心为无机与有机材料在光学性能、防护性能的协同匹配。仿真软件如 ANSYS、Auto-Dyn 可用于辅助装甲的结构设计，缩短装甲的研发周期。

对于透明装甲的考核评价方法，中国暂未形成科学、有效的规范性文件，其测试、表征方法多借鉴非透明装甲的测试评价方法。在透明装甲采购方面，中国并未对装甲的光学性能与防护性能进行均衡评价。除此之外，透明装甲的服役环境与服役寿命也未被限定，无法形成面向实战应用的透明装甲有效评价。因此，建立健全科学、规范透明装甲考核评价方法对中国装甲产业发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吴点宇, 李鑫, 张小刚, 等. 观察探测装置用透明装甲材料的设计研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2022, 45(4): 75–79.
WU Dianyu, LI Xin, ZHANG Xiaogang, et al. Ordnance Mater Sci Eng, 2022, 45(4): 75–79.
- [2] 范华春, 张雅琼, 纪超, 等. 车载综合观瞄系统的设计与实现[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 383–391.
FAN Huachun, ZHANG Yaqiong, JI Chao, et al. J Appl Opt, 2021, 42(3): 383–391.
- [3] 刘川. 装甲车辆观瞄系统的市场新秀 装甲上观瞄系统[J]. 坦克装甲车辆, 2017(9): 28–33.
LIU Chuan. Tank Armoured Veh, 2017(9): 28–33.
- [4] 李随意. 国外透明装甲发展新动态[J]. 国外坦克, 2015(7): 53–56.
LI Suiyi. Foreign Tank, 2015(7): 53–56.
- [5] FRANKS L P, RDECOM, HOLM D, et al. Transparent armor cost benefit study [R]. State of Michigan: US ARMY TARDEC, 2007.
- [6] FRANKS L P, HOLM D, KLEINBERG R. Transparent materials for armor – A cost study[R], State of Michigan: US Army RDECOM-TARDEC, 2010.
- [7] STRASSBURGER E, HUNZINGER M, PATEL P, et al. Analysis of the fragmentation of AION and spinel under ballistic impact[J]. J Appl Mech, 2013, 80(3): 031807.
- [8] GRUJICIC M, PANDURANGAN B, COUTRIS N. A computational investigation of the multi-hit ballistic-protection performance of laminated transparent-armor systems[J]. J Mater Eng Perform, 2012, 21(6): 837–848.
- [9] GRUJICIC M, BELL W C, PANDURANGAN B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems[J]. Mater Des, 2012, 34: 808–819.
- [10] CROUCH I G. Body armour — New materials, new systems[J]. Def Technol, 2019, 15(3): 241–253.
- [11] STRASSBURGER E. Ballistic testing of transparent armour ceramics[J]. J Eur Ceram Soc, 2009, 29(2): 267–273.
- [12] DRESCH A B, VENTURINI J, ARCARO S, et al. Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review[J]. Ceram Int, 2021, 47(7): 8743–8761.
- [13] WANG Q, CHEN Z H, CHEN Z F. Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact[J]. Mater Des 1980 2015, 2013, 46: 634–639.
- [14] 魏化震, 钟蔚华, 于广. 高分子复合材料在装甲防护领域的研究与应用进展[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 25–32.
WEI Huazhen, ZHONG Weihua, YU Guang. J Mater Eng, 2020, 48(8): 25–32.
- [15] 刘家希, 石晓东, 姜良宝, 等. 陶瓷基透明防弹装甲研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 30–40.
LIU Jiaxi, SHI Xiaodong, JIANG Liangbao, et al. J Mater Eng, 2021, 49(11): 30–40.
- [16] 张云, 党满正. 美军“汉姆威”车的改造历程[J]. 国外坦克, 2009(4): 34–36.
ZHANG Yun, DANG Xiaozheng. Foreign Tank, 2009(4): 34–36.
- [17] GAJDOWSKI C, D'ELIA R, FADERL N, et al. Mechanical and optical properties of MgAl₂O₄ ceramics and ballistic efficiency of spinel based armour[J]. Ceram Int, 2022, 48(13): 18199–18211.
- [18] MCCAULEY J W, STRASSBURGER E, PATEL P, et al. Experimental observations on dynamic response of selected transparent armor materials[J]. Exp Mech, 2013, 53(1): 3–29.
- [19] SUBHASH G. Transparent armor materials[J]. Exp Mech, 2013, 53(1): 1–2.
- [20] 田昊东, 徐驰, 许少坤, 等. 玻璃化学强化技术研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(7): 2502–2510.
TIAN Haodong, XU Chi, XU Shaokun, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2022, 41(7): 2502–2510.
- [21] 胡伟, 谈宝权, 覃文城, 等. 化学强化玻璃的发展现状及研究展望[J]. 玻璃与搪瓷, 2018, 46(3): 44–50.
HU Wei, TAN Baoquan, QIN Wencheng, et al. Glass Enamel, 2018, 46(3): 44–50.
- [22] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Phil Trans R Soc Lond A, 1921, 221(582–593): 163–198.
- [23] 马军. 防弹玻璃的生产与应用[J]. 建材工业信息, 2003(4): 7–9.
MA Jun. Brick Tile World, 2003(4): 7–9.
- [24] 赵劲松. 低温低压制造层压安全玻璃[J]. 工程塑料应用, 1999, 27(11): 18–19.
ZHAO Jinsong. Eng Plast Appl, 1999, 27(11): 18–19.
- [25] WANG M B, JIANG L B, LI X Y, et al. Structure and mechanical response of chemically strengthened aluminosilicate glass under different post-annealing conditions[J]. J Non Cryst Solids, 2021, 554: 120620.
- [26] MACRELLI G, VARSHNEYA A K, MAURO J C. Simulation of glass network evolution during chemical strengthening: Resolution of

- the subsurface compression maximum anomaly[J]. *J Non Cryst Solids*, 2019, 522: 119457.
- [27] JANNOTTI P, SUBHASH G, IFJU P, et al. Influence of ultra-high residual compressive stress on the static and dynamic indentation response of a chemically strengthened glass[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2012, 32(8): 1551–1559.
- [28] LEE J, NAM J, KO J, et al. Influence of pre-heat treatment on glass structure and chemical strengthening of aluminosilicate glass[J]. *J Non Cryst Solids*, 2023, 609: 122266.
- [29] 纪飞燕, 徐锦伟. 以化学钢化玻璃为主要结构优化防弹性能的实践[J]. *玻璃*, 2019, 46(11): 41–44.
JI Feiyan, XU Jinwei. *Glass*, 2019, 46(11): 41–44.
- [30] JOSEPH UDI U, YUSSOF M M, MUSA AYAGI K, et al. Environmental degradation of structural glass systems: A review of experimental research and main influencing parameters[J]. *Ain Shams Eng J*, 2023, 14(5): 101970.
- [31] 赵勇, 张一智, 李坤. 透明装甲材料在自行高炮顶部防护上的论述[J]. *火炮发射与控制学报*, 2018, 39(2): 86–90.
ZHAO Yong, ZHANG Yizhi, LI Kun. *J Gun Launch Contr*, 2018, 39(2): 86–90.
- [32] 杨英惠. 蓝宝石透明装甲可减重减厚[J]. *现代材料动态*, 2007(1): 10.
YANG Yinghui. *Inf Adv Mater*, 2007(1): 10.
- [33] 蚁国红, 陈宇. 透明装甲 看得清, 打不透! [J]. *科学大观园*, 2009(23): 38–39.
YI Guohong, CHEN Yu. *Grand Gard Sci*, 2009(23): 38–39.
- [34] 刘向平. 透明装甲: 新的挑战[J]. *国外坦克*, 2010(7): 24.
LIU Xiangping. *Foreign Tank*, 2010(7): 24.
- [35] 唐文奇, 颜丽红, 郑晓彬, 等. 蓝宝石的应用及单晶强韧化研究进展[J]. *功能材料*, 2022, 53(5): 5001–5008.
TANG Wenqi, YAN Lihong, ZHENG Xiaobin, et al. *J Funct Mater*, 2022, 53(5): 5001–5008.
- [36] 胡克艳, 徐军, 唐慧丽, 等. 温梯法生长掺碳强韧化蓝宝石单晶的研究[J]. *无机材料学报*, 2013, 28(3): 307–311.
HU Keyan, XU Jun, TANG Huili, et al. *J Inorg Mater*, 2013, 28(3): 307–311.
- [37] 胡克艳, 徐军, 唐慧丽, 等. 铁钛共掺强韧化蓝宝石晶体的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 371–376.
HU Keyan, XU Jun, TANG Huili, et al. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(6): 371–376.
- [38] KIRKPATRICK A, HARRIS D C, JOHNSON L F. Effect of ion implantation on the strength of sapphire at 300–600°C[J]. *J Mater Sci*, 2001, 36(9): 2195–2201.
- [39] LIU C, WANG Z H, LIU F, et al. Route to high contrast and focusable intensity in PW-class femtosecond Ti: sapphire laser facility[J]. *Rev Laser Eng*, 2010, 38(9): 685–688.
- [40] CHENG J, WU J, ZHOU Y G, et al. Characterization of fracture toughness and micro-grinding properties of monocrystal sapphire with a multi-layer toughening micro-structure (MTM)[J]. *J Mater Process Technol*, 2017, 239: 258–272.
- [41] YANG S, HOMA D, HEYL H, et al. Application of sapphire-fiber-bragg-grating-based multi-point temperature sensor in boilers at a commercial power plant[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3211.
- [42] 王康, 田洪翼, 杨威, 等. 镁铝尖晶石透明陶瓷的研究进展[J]. *现代技术陶瓷*, 2023, 44(2): 77–116.
WANG Kang, TIAN Hongyi, YANG Wei, et al. *Adv Ceram*, 2023, 44(2): 77–116.
- [43] RUBAT DU MERAC M, KLEEBE H J, MÜLLER M M, et al. Fifty years of research and development coming to fruition; unraveling the complex interactions during processing of transparent magnesium aluminate (MgAl_2O_4) spinel[J]. *J Am Ceram Soc*, 2013, 96(11): 3341–3365.
- [44] 李祯, 雷牧云, 娄载亮, 等. 非化学计量比镁铝尖晶石透明陶瓷的制备及性能[J]. *硅酸盐通报*, 2011, 30(4): 891–894.
LI Zhen, LEI Muyun, LOU Zailiang, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2011, 30(4): 891–894.
- [45] LIU Q, JING Y Q, SU S, et al. Microstructure and properties of MgAl_2O_4 transparent ceramics fabricated by hot isostatic pressing[J]. *Opt Mater*, 2020, 104: 109938.
- [46] 陈小明, 伏利, 苏建灏, 等. AION陶瓷的研究现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2020, 34(增刊2): 1117–1122.
CHEN Xiaoming, FU Li, SU Jianhao, et al. *Mater Rep*, 2020, 34(Suppl 2): 1117–1122.
- [47] SULLIVAN R M. A historical view of ALON[C]//Defense and Security. *Proc SPIE 5786, Window and Dome Technologies and Materials IX*, Orlando, Florida, USA. 2005, 5786: 23–32.
- [48] GOLDMAN L M, BALASUBRAMANIAN S, KASHALIKAR U, et al. Scale up of large ALON windows[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. *Proc SPIE 8708, Window and Dome Technologies and Materials XIII*, Baltimore, Maryland, USA. 2013, 8708: 870804.
- [49] GUO H L, ZHANG J, MAO X J, et al. Strengthening mechanism of twin lamellas in transparent AION ceramics[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2018, 38(9): 3235–3239.
- [50] 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海硅酸盐所在氮氧化铝(AION)透明陶瓷领域取得系列进展[EB/OL]. 2022-6-28. https://www.sic.ac.cn/xwzx/kydt/202204/t20220405_6418990.html.
- [51] ZHENG K P, WANG H, XU P Y, et al. The hydrolysis process of γ -AION powder and preparation of highly transparent ceramics with aqueous gel-casting[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2023, 43(2): 555–564.
- [52] JIA X T, ZHANG Z H, LI X Y, et al. Investigation on mechanical properties of AION ceramics synthesized by spark plasma sintering[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2023, 43(3): 889–899.
- [53] 田雪涛, 王雪, 文梦娟, 等. 梯度高分子材料研究进展[J]. *功能材料*, 2015, 46(增刊2): 49–55.
TIAN Xuetao, WANG Xue, WEN Mengjuan, et al. *J Funct Mater*, 2015, 46(Suppl 2): 49–55.
- [54] 刘冲, 刘世军. PVB夹层玻璃合片过程影响因素研究[J]. *信息记录材料*, 2019, 20(10): 1–3.
LIU Chong, LIU Shijun. *Inf Rec Mater*, 2019, 20(10): 1–3.
- [55] 刘荣, 李红梅. 安全玻璃专用聚乙烯醇缩丁醛膜片加工助剂研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2014, 30(9): 177–182.
LIU Rong, LI Hongmei. *Polym Mater Sci Eng*, 2014, 30(9): 177–182.
- [56] 陈星, 陈素文, 李国强. 爆炸作用下框支式聚乙烯醇缩丁醛夹层玻璃的破坏模式[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(11): 1565–1574.
CHEN Xing, CHEN Suwen, LI Guoqiang. *J Tongji Univ:Nat Sci*,

- 2021, 49(11): 1565–1574.
- [57] 冯海刚, 李艮. 聚乙烯醇缩丁醛(PVB)膜片的历史与发展前景[J]. 国外塑料, 2005, 23(10): 42–43.
- FENG Haigang, LI Lin. World Plast, 2005, 23(10): 42–43.
- [58] ZHANG X H, HAO H, SHI Y C, et al. The mechanical properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at high strain rates[J]. Constr Build Mater, 2015, 93: 404–415.
- [59] 濮勇, 张红, 谢于真, 等. 中高速冲击下PVB夹层玻璃开裂及碎片特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3565–3572.
- PU Yong, ZHANG Hong, XIE Yuzhen, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2019, 38(11): 3565–3572.
- [60] 郭安儒, 张赛, 宋体杰, 等. 国内聚氨酯胶黏剂的应用与研究展望[J]. 化学与黏合, 2019, 41(2): 129–132.
- GUO Anru, ZHANG Sai, SONG Tijie, et al. Chem Adhes, 2019, 41(2): 129–132.
- [61] 张军瑞. 高性能透明聚氨酯涂层的制备、结构与性能关系研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- ZHANG Junrui. Preparation of high performance transparent polyurethane coatings and the relationship between structure and properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [62] 沈慧芳, 陈焕钦. 汽车用聚氨酯胶黏剂的研究进展[J]. 粘接, 2005, 26(1): 35–37.
- SHEN Huifang, CHEN Huanqin. Adhes China, 2005, 26(1): 35–37.
- [63] 沈慧芳, 陈焕钦. 聚氨酯胶黏剂在汽车上的应用及研究进展[J]. 化学与黏合, 2005, 27(4): 225–229.
- SHEN Huifang, CHEN Huanqin. Chem Adhes, 2005, 27(4): 225–229.
- [64] 徐海翔. 聚氨酯胶黏剂综述[J]. 橡塑资源利用, 2018(3): 25–33.
- XU Haixiang. Rubber Plast Resour Util, 2018(3): 25–33.
- [65] 李丽娟. 国内聚氨酯密封胶研究进展[J]. 中国胶粘剂, 2004, 13(1): 45–49.
- LI Lijuan. China Adhes, 2004, 13(1): 45–49.
- [66] 杜欣蔚. 新型有机硅胶黏剂的制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- DU (Xin)(Wei)(Yu). Synthesis and performances study of A novel silicone adhesive[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [67] MadhuBaile, 于占昌. 透明有机硅胶黏剂[J]. 橡胶译丛, 1989, 16(6): 27–31.
- MADHUBAILE, YU Zhanchang. World Rubber Ind, 1989, 16(6): 27–31.
- [68] 胡承曦. 光学透明的有机硅胶黏剂[J]. 化工新型材料, 1989, 17(8): 6–9.
- HU Chengxi. N Chem Mater, 1989, 17(8): 6–9.
- [69] 靳源, 王惠祖. 高透光高强度有机硅密封胶的研制[J]. 中国建筑防水, 2011(2): 39–41.
- JIN Yuan, WANG Huizu. China Build Waterproofing, 2011(2): 39–41.
- [70] 李晓光, 张秀荣, 阎杰. 有机硅胶工艺技术现状[J]. 广东化工, 2006, 33(8): 9–11.
- LI Xiaoguang, ZHANG Xiurong, YAN Jie. Guangdong Chem Ind, 2006, 33(8): 9–11.
- [71] 姚慧琴. 有机硅胶黏剂的发展与应用[J]. 江西科学, 2005, 23(3): 294–298.
- YAO Huiqin. Jiangxi Sci, 2005, 23(3): 294–298.
- [72] 金伟, 田共有. 室温硫化有机硅胶黏剂耐高温性能研究[J]. 有机硅材料, 2017, 31(6): 439–442.
- JIN Wei, TIAN Gongyou. Silicone Mater, 2017, 31(6): 439–442.
- [73] 马丽婷, 陈新文, 苏彬. 航空有机玻璃老化研究进展[J]. 材料工程, 2004, 32(8): 57–59.
- MA Liting, CHEN Xinwen, SU Bin. J Mater Eng, 2004, 32(8): 57–59.
- [74] 姜慧. 航空非金属材料: 有机玻璃[J]. 现代交际, 2013(9): 105.
- JIANG Hui. Mod Commun, 2013(9): 105.
- [75] 邓小秋, 李志强, 赵隆茂, 等. 有机玻璃力学性能的研究现状[J]. 力学与实践, 2014, 36(5): 540–550.
- DENG Xiaoqiu, LI Zhiqiang, ZHAO Longmao, et al. Mech Eng, 2014, 36(5): 540–550.
- [76] 钱小辉, 冯益, 陈海霞, 等. 大型有机玻璃碗结构多工况有限元分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(8): 42–47.
- QIAN Xiaohui, FENG Yi, CHEN Haixia, et al. Build Struct, 2022, 52(8): 42–47.
- [77] 黎永生. 高透明韧性有机玻璃的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.
- LI Yongsheng. Study of toughened organic glass with high transmittance[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2011.
- [78] 黄承亚, 李赞, 龚克成, 等. 有机玻璃的增韧研究[J]. 塑料工业, 2003, 31(3): 22–25.
- HUANG Chengya, LI Yun, GONG Kecheng, et al. China Plast Ind, 2003, 31(3): 22–25.
- [79] 薛炳福, 张雷. 有机玻璃增韧改性的研究进展[J]. 内蒙古石油化工, 2009, 35(1): 19–20.
- XUE Bingfu, ZHANG Lei. Inn Mong Petrochem Ind, 2009, 35(1): 19–20.
- [80] 闫海涛. 聚碳酸酯工艺研究进展[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(5): 101–102.
- YAN Haitao. Chem Eng Des Commun, 2021, 47(5): 101–102.
- [81] 曾伟华, 刘俊逸, 谢海生, 等. 聚碳酸酯合成技术研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(7): 183–190.
- ZENG Weihua, LIU Junyi, XIE Haisheng, et al. Polym Mater Sci Eng, 2021, 37(7): 183–190.
- [82] 朱爱华. 聚碳酸酯的改性与应用研究[J]. 产业创新研究, 2020(14): 114–115.
- ZHU Aihua. Ind Innov, 2020(14): 114–115.
- [83] 张文琴. 聚碳酸酯的研究进展及市场分析[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2022, 20(3): 14–19.
- ZHANG Wenqin. Chem Propellants Polym Mater, 2022, 20(3): 14–19.
- [84] 应杰, 邱琪浩, 张豪杰, 等. 不同类型增韧剂对聚碳酸酯性能的影响[J]. 中国塑料, 2020, 34(7): 30–35.
- YING Jie, QIU Qihao, ZHANG Haojie, et al. China Plast, 2020, 34(7): 30–35.
- [85] 应杰, 邱琪浩, 顾玄楠, 等. 不同复配抗氧剂体系对聚碳酸酯性能的影响[J]. 塑料工业, 2019, 47(11): 26–29.
- YING Jie, QIU Qihao, GU Hainan, et al. China Plast Ind, 2019,

- 47(11): 26–29.
- [86] 张跃文. 透明PC复合材料的制备及其紫外光老化性能研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- ZHANG Yuewen. Preparation and ultraviolet resistance aging properties of transparent PC composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.
- [87] 张晓华. 透明聚氨酯弹性体结构与性能的研究[D]. 成都: 四川大学, 2002.
- ZHANG Xiaohua. Studies on structure and properties of transparent polyurethane elastomer (in Chinese, dissertation). Chengdu: Sichuan University, 2002.
- [88] 甄建军, 李英建, 翟文, 等. 高硬度透明聚氨酯弹性体的合成与性能研究[J]. 弹性体, 2017, 27(3): 29–32.
- ZHEN Jianjun, LI Yingjian, ZHAI Wen, et al. China Elastomerics, 2017, 27(3): 29–32.
- [89] KRÓL P. Synthesis methods, chemical structures and phase structures of linear polyurethanes. Properties and applications of linear polyurethanes in polyurethane elastomers, copolymers and ionomers[J]. Prog Mater Sci, 2007, 52(6): 915–1015.
- [90] 徐进, 孙宝龙, 张瑞杰, 等. 聚氨酯弹性体耗能性能的实验研究[J]. 塑料工业, 2022, 50(8): 126–131.
- XU Jin, SUN Baolong, ZHANG Ruijie, et al. China Plast Ind, 2022, 50(8): 126–131.
- [91] BLESS S, CHEN T. Impact damage in layered glass[J]. Int J Fract, 2010, 162(1–2): 151–158.
- [92] DOLAN A M. Ballistic transparent armor testing using A multi-hit rifle pattern[R]. State of Michigan: U.S. army tank-automotive command, 2007.
- [93] STRASSBURGER E, PATEL P, MCCAULEY J W, et al. High-speed transmission shadowgraphic and dynamic photoelasticity study of stress wave and impact damage propagation in transparent materials and laminates using the Edge-On Impact (EOI) method[C]// A reprint from the 25th Army Science Conference, Orlando, The United States of America, 2008, ARL-RP-203.
- [94] 杨卓越, 赵家萍. 硅锰装甲钢破甲弹坑损伤与微观结构关系的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 1995, 18(3): 29–32.
- YANG Zhuoyue, ZHAO Jiaping. Ordnance Mater Sci Eng, 1995, 18(3): 29–32.
- [95] CHUN Z Y, CHAO X, HUI Y J, et al. Anti-penetration Performance and Micro-damage Mechanism of Ti-6Al-4V Alloy Composite Armor [J]. Rare Met Mater Eng, 2022, 51(7): 2329–2335.
- [96] 余毅磊, 王晓东, 任文科, 等. 三层组合陶瓷复合装甲的抗侵彻性能及其损伤机制[J]. 兵工学报. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2176.TJ.20230605.1552.004.html>
- YU Yilei, WANG Xiaodong, REN Wenke, et al. Acta Armamentarii. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2176.TJ.20230605.1552.004.htm>
- [97] 张伟, 韩旭, 胡德安, 等. 三维SPH方法在装甲陶瓷损伤演化中的应用[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊2): 177–181.
- ZHANG Wei, HAN Xu, HU Dean, et al. Acta Armamentarii, 2009, 30(Suppl 2): 177–181.
- [98] WALLEY S M, FIELD J E, BLAIR P W, et al. The effect of temperature on the impact behaviour of glass/polycarbonate laminates[J]. Int J Impact Eng, 2004, 30(1): 31–53.
- [99] RIVERS G, CRONIN D. Influence of moisture and thermal cycling on delamination flaws in transparent armor materials: Thermoplastic polyurethane bonded glass-polycarbonate laminates[J]. Mater Des, 2019, 182: 108026.
- [100] HOPKINS H G. Wave motion in elastic solids[J]. Phys Bull, 1976, 27(1): 30.
- [101] SCHULTZ R A, BRADT R C. Fracture Mechanics of Ceramics: Fracture Fundamentals, High-Temperature Deformation, Damage, and Design[M]. Boston, MA: Springer US, 1992.
- [102] IWASA M, BRADT R C. Fracture toughness of single crystal alumina[J]. Adv in Ceram, 1984, 10:767–779
- [103] TASKER P W. Surface of magnesia and alumina[J]. Adv in Ceramics, 1984, 10: 176–189
- [104] MACKRODT W C. Atomistic simulation of the surfaces of oxides[J]. J Chem Soc, Faraday Trans 2, 1989, 85(5): 541.
- [105] HARTMAN P. The effect of surface relaxation on crystal habit: cases of corundum (α - Al_2O_3) and Hematite (α - Fe_2O_3)[J]. J Cryst Growth, 1989, 96(3): 667–672.
- [106] HANEY E J, SUBHASH G. Edge-on-impact response of a coarse-grained magnesium aluminate spinel rod[J]. Int J Impact Eng, 2012, 40–41: 26–34.
- [107] ZHANG G F, GAZONAS G A, BOBARU F. Supershear damage propagation and sub-Rayleigh crack growth from edge-on impact: a peridynamic analysis[J]. Int J Impact Eng, 2018, 113: 73–87.
- [108] LEIGHTON K, CARBERRY J, SERAFIN W, et al. Transparent armor for the new standard in battlefield performance[J]. Ceram Eng Sci Proc, 2011, 32(5): 29–41.
- [109] 邱日祥, 杨杰. GA165-2016《防弹透明材料》标准解析[J]. 中国安全防范认证, 2017(3): 52–55.
- QIU Rixiang, YANG Jie. China Secur Prot Certif, 2017(3): 52–55.

Transparent Armor Protective Materials : Structural Design and Application Performance Evaluation

SHAO Cen^{1,2}, ZHANG Le^{1,2}, WANG Siqing¹, WANG Tong², QIU Fan², MA qingfei¹, CHEN Hao^{1,2}

(1. School of Physics Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Xiyi Advanced Materials Research Institute of Industrial Technology, Xuzhou 221400, Jiangsu, China)

Extended Abstract

As the “optical shield” for the future warfare, transparent armors exhibit high optical transparency, high hardness, high strength, and resistance to ballistic and explosive debris impacts. They are widely used on the equipment platforms such as armored vehicles, armed helicopters, and ship carriers. At present, the transparent armor with a superior elastic resistance is developed. However, the improvement of armor protection performance and lightweight armor design becomes a challenge, and it is manifested in the difficulty of balancing its protection performance and optical properties. Based on the research status and existing problems of transparent armor in the field of protective materials, this review represented the following aspects:

1) The current development status of transparent protective materials are reviewed. It is important to introduce the physical and chemical properties, mechanism of action, and industrial status of hard protective materials and soft energy absorbing materials for in-service armor. The research status indicates that sapphire single crystal is the most suitable material for mass production of new armored projectile surface, and its mechanical properties and industrial advantages do not possess, compared to other hard and transparent protective materials such as float glass, AlON and MgAl₂O₄ ceramics. However, the cleavage fracture of sapphire single crystals restricts its application potential in transparent protection. Polyurethane adhesive can achieve the high-strength bonding of inorganic and organic materials in the armor fields, but its poor environmental weather resistance affects the service life of transparent armor. Polycarbonate board is an ideal soft energy absorbing material with superior optical properties, impact resistance, and creep resistance. However, it is prone to moisture absorption and fogging, affecting the observation field of transparent armor.

2) The structural design strategy and the analysis of failure behavior are explored in transparent armor. A comparison is made between the design principles, performance differences, and failure mechanisms of conventional laminated glass structure (or similar-laminated glass structure) armors and the new structural armors with three functional layers. At present, the core of structure design is the synergistic matching of hard protective materials and soft energy-absorbing materials in optical properties and protective performance in the new structural transparent armor. The comparison results of different structural armors indicate that the weight of new structural armor is reduced by more than 30%, compared with that of conventional glass transparent armor under the same protection level. The conventional armor has a large damage surface with the first layer and the second layer being crushed and cracked, after being impacted by the projectile, resulting in the loss of its observation and combat capabilities. The damage surface of new structural armor shows granular crushing around the impact point, leading to the local area of the armor losing its observation and combat capabilities. The main causes of failure are the interface delamination cracking and projectile penetration damage in the optical application field of transparent armor.

3) The evaluation methods of transparent armor are summarized. The comparison results of key evaluation items of transparent armor procurement indicate that European and American countries focus on the optical properties of armor, while China pays more attention to the protective performance of armor. The United States establishes a relatively complete transparent armor procurement specification, and incorporates the optical properties of armor such as transmittance, haze, and light distortion into the procurement standards. For special night vision application scenarios, the U.S. military focuses on the optical properties of transparent armor rather than protective performance. However, there is no scientific and effective normative document for armor evaluation methods in China, and their test and characterization are often based on the evaluation methods of non-transparent protective materials. In addition, the existing test standards for transparent bulletproof materials do not pay attention to the balanced evaluation between the optical properties and protective performance of the armor, as well as the adaptability of transparent armor to the environment.

Summary and prospects A key to improve the protective performance and lightweight degree of transparent armor is to achieve the breakthroughs in the performance of transparent protective materials. It is important to establish and improve the scientific testing methods and assessment evaluation system of transparent armor for achieving practical application of transparent armor. This review provides a reference for the structural design and application evaluation methods of the new generation of transparent armor, and assists the high-quality development of armor industry.

Keywords transparent armor; protective performance; lightweight; structural design; application evaluation