

装备防护

军用装甲防护技术发展及应用

曹凌宇¹, 罗兴柏¹, 刘国庆¹, 甄建伟¹, 史进伟²

(1.陆军工程大学, 石家庄 050003; 2.63961 部队, 北京 100012)

摘要: 目的 为提高军用装甲防护技术, 研究军用装甲防护材料的种类、加工工艺及性能特点, 梳理其发展历程。方法 按照分类, 分析装甲防护材料特点, 并对特殊结构功能设计防护板进行介绍。介绍应用较为广泛的金属材料(装甲钢、铝合金及钛合金)的性能特点、加工工艺及存在问题, 研究陶瓷材料与复合材料的特点及现状。对2种特殊功能结构设计的复合板进行阐述。结论 随着武器系统毁伤能力的不断提高, 使得装甲防护材料改良及结构设计优化显得尤为重要, 装甲防护材料必将向轻量化、复合化、系列化及综合化方向发展。

关键词: 装甲防护; 防护材料; 防护结构

中图分类号: TB484; TJ811 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)03-0223-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.042

Development and Application of Military Armor Protection Technology

CAO Ling-yu¹, LUO Xing-bai¹, LIU Guo-qing¹, ZHEN Jian-wei¹, SHI Jin-wei²

(1.Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2.63961 Troops, Beijing 100012, China)

ABSTRACT: The work aims to improve military armor protection technology, study the types, processing technology and performance characteristics of military armor protection materials, and comb the development course of military armor. According to the classification, the characteristics of armor protection material and the design of special structural function protection board were introduced. The performance characteristics, processing technology and existing problems of widely used metal materials (armored steel, aluminum alloy and titanium alloy) were introduced. The characteristics and current situation of ceramic materials and composites were studied. Finally, the composite panels with two special functional structures were described. The increasingly improved damage ability about weapon system makes the improvement of armor protection material and the optimization of structural design particularly important. Armor protection material will be lightweight, compound, serialized and integrated.

KEY WORDS: armor protection; protective material; protective structure

战斗部毁伤能力与装甲防护技术是矛与盾的关系, 现代武器系统不断向着“远程压制、精确打击、高效毁伤”的方向发展, 军用装甲防护技术也随之不断提高, 军用新材料是发展高新装甲防护材料的物质基础, 新型结构设计是提高装甲防护能力的重要手段, 二者有效结合成为提高装甲防护性能的重要方法。

目前, 世界各国对于装甲防护技术研究可以分为材料改进与结构设计2个方向。在军用装甲上应用较

为广泛的防护材料主要有金属材料、陶瓷材料、复合材料等, 功能结构设计上有蜂窝结构、金属封装结构等特殊结构。每种材料及结构都拥有各自的优点及不足, 针对各种材料的优缺点进行分析, 对装甲防护材料进行改进设计, 对于防护材料的发展起着重要作用。新材料技术是提高装甲战场生存能力的重要抓手, 在军事应用上有着广泛的前景, 只有在不断总结分析的基础上进行改型升级才能获得长远发展。

收稿日期: 2017-09-07

作者简介: 曹凌宇(1993—), 男, 陆军工程大学硕士生, 主攻弹药系统设计与试验评估。

通信作者: 罗兴柏(1962—), 男, 硕士, 陆军工程大学教授, 主要研究方向为弹药系统设计与试验评估。

1 金属防护材料

20 世纪中期的装甲防护材料大多采用均质金属材料,主要是钢和少量的非热处理型合金。随着金属材料的研究与发展,新型高性能钢、铝合金、钛合金、镁合金以及金属基复合材料在装甲车上获得越来越多的应用。装甲钢早期由英国 Messis Vickers 公司研制生产出来,厚度约 5~10 mm,后期最大均质装甲厚度达到 100 mm 以上,迄今仍然是最基本的装甲材料。装甲钢按生产工艺分为轧制和铸造装甲钢 2 种,前者应用比较广泛,后者的使用正逐渐减少。美国通过将微合金钢和控制轧制-控制冷却技术引用到低碳装甲钢生产中,在满足抗弹性能前提下,极大改善了焊接性能。中碳装甲钢与高强度装甲钢也通过微合金技术与热加工工艺不断进行改良^[1]。虽然现在许多地面车辆采用轻型装甲材料,如铝、镁钛合金等,但高硬度装甲钢在抗弹方面仍很具有竞争力。目前,美国装甲界完善了装甲钢军用规范,如修订了 MIL-DTL-46100E 高硬度装甲钢军用规范,来提高淬火和回火装甲钢的性能,但装甲车机动性较差的问题仍有待解决^[2]。铝合金是装甲金属材料中常用材料之一,它的用量仅次于装甲钢,主要用于防小口径弹丸和弹片,多用在轻型装甲车辆和二栖装甲装备。铝合金的优势是密度低、韧性好,尤其低温性能好,弱点是刚度和强度远低于装甲钢。目前,装甲用铝合金包括变形铝合金(18 种号牌)、铸造铝合金(8 种号牌)及特殊铝合金(1 种号牌)。变形铝合金通过添加元素与铝形成金属间化合物,并通过淬火-时效热处理控制合金力学性能,但其耐腐蚀性仍较差。铸造铝合金通过提高 Al-Si 的量使得其耐腐蚀性好、强度高、机械加工性能好,但塑性较低。LC52 是我国目前最新研制铝合金材料,性能优良,是唯一列入国军标的中强可焊铝合金,但未见该合金加工运用方面的报道^[3-4]。美军装甲车辆目前应用的铝装甲材料有 6061, 5059, 5083, 7039, 2139, 2519, 2219, 其中最新研制的 2139T8 和 2195T8P4 具有更加优越的力学和抗弹性能^[5-6],美国装甲铝合金力学性能见表 1。

表 1 美国装甲铝合金的力学性能
Tab.1 Mechanical properties of American armored aluminum alloy

合金水平	合金	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$
第1代	5083 HT31	291	396	12.7
第2代	7039 T64	357	420	9.0
第3代	2219 T851	322	462	7.0
	2519 T87	434	476	12.0
第4代	2139 T8	—	511	10
	2195 T8P4	—	600	10

注: $R_{p0.2}$ 为在 20% 塑性变形情况下的屈服强度值; R_m 为抗拉强度; A 为伸长率

钛合金具有密度低(大约 4.5 g/cm^3 , 相当于普通

结构钢的 56% 左右)、比强度高、低温韧性好、高温耐性好(可在 550°C 以上及 -250°C 以下长时间工作)、耐腐蚀、无磁等优点,是一种性能优良的装甲材料。钛合金按照生产工艺可分为变形、铸造和粉末冶金三大类,常常被誉为“太空”和“海洋”金属^[7-8]。随着坦克装甲车辆轻量化和高生存力的要求越来越高,钛合金作为装甲材料应用将大有潜力。世界各国非常重视钛合金装甲的研究,美国、俄罗斯、法国和澳大利亚等国开展了大量研究,特别是在一次熔炼工艺、低成本制造工艺及焊接技术等方面。美国曾用钛合金制造装甲车辆的指挥塔,其质量较装甲钢制的减小 37%。美国已制定了国军标 MIL-T-9646 和 MIL-DTL-46077F (最新版本已升到 G)。常用的装甲钛合金包括 Ti-6Al-4V, Ti-5Al-3V-2Cr-2Fe 和 Ti-8Al-1Mo-1V, 主要用于基体装甲和复合装甲^[9-10]。由于钛合金制造成本昂贵且加工工艺复杂,因此其较多地应用在航空航天、潜艇舰船上,在装甲防护领域内尚未得到广泛应用,但其在未来新型军事装备发展的前景不可估量。国外先进战机机体防护材料比例见图 1^[11]。

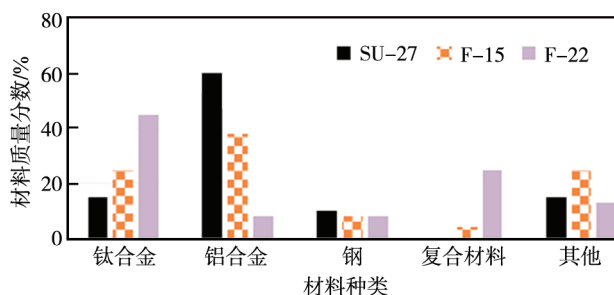


图 1 国外先进战机机体防护材料比例

Fig.1 Foreign advanced fighter body protective material ratio

2 陶瓷防护材料

20 世纪 60 年代, 韦尔金斯对陶瓷材料的弹道防护性能进行了研究, “高硬度、高强度、高韧性、低密度”这三高一低的优良抗弹侵彻性能使得陶瓷材料成为主要装甲防护材料之一^[12]。随后, 美国又研制出以 B_4C 为材质的陶瓷装甲, 但其制造成本制约了其进一步发展, 于是, 美国针对制造工艺进行了改进, 2002 年研制的 Si/SiC 装甲价格大幅降低, 虽然仍比传统陶瓷价格高, 但质量减轻了约 55%^[13]。

目前, 国内外装甲陶瓷材料主要有氧化铝、碳化硅、碳化硼、硼化钛等, Al_2O_3 是使用最早、应用最广泛的材料。虽然装甲陶瓷材料的抗弹性能略低, 但其具有烧结性能好、制作工艺成熟、性价比高等特点, 被广泛应用于各类装甲车及飞机要害部位的防护^[14]。 B_4C 的密度较低, 硬度较高(仅比金刚石低一些), 对于质量要求严格的装备来说是较为理想的装甲陶瓷材料。约翰斯霍普金斯大学和美陆军研究实验室的

研究人员发现, B_4C 在高冲击压力下会出现非晶化现象, 削弱了其抗弹性能, 使得其只能用于抵抗低速弹丸而无法防护高速弹丸的冲击, 限制了其推广应用, 研究人员希望通过改变晶体结构、化学成分等方法来解决非晶化问题。 SiC 比 Al_2O_3 轻大概 20%, 硬度较高, 其密度介于 B_4C 和 Al_2O_3 之间, 相比于 B_4C 不存在非晶化问题。 B_4C 与 SiC 制作成本较 Al_2O_3 依然较高。从费效比来讲, Al_2O_3 仍然是应用较广泛的陶瓷材料^[15]。对于 Al_2O_3 的改善技术国内外也进行了相应的研究, 主要从材料增韧入手, 改善其韧性差、易断裂等问题, 主要技术有纳米颗粒增韧、纤维或晶须增韧、自增韧、 ZrO_2 相变增韧及复合增韧技术。Fahrenholtz^[16]等利用原位反应和热压法 (HP) 制备的 Ni/Al_2O_3 的断裂韧性达到 $12.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 抗弯强度约为 610 MPa。经过研究发现, 纳米增韧可以增强材料的韧性, 但不能同时增强其强度。其余增韧方法机理不同, 获得的效果也不尽相同。众多研究结果表明, 只有将单一的增韧方式协同使用才能达到较理想的增韧效果。近些年发展较新的是 BeO 陶瓷和纳米复合相陶瓷技术^[17-18]。

3 复合防护材料

随着防护技术的发展, 复合防护材料防护综合能力明显高于单一防护材料, 以质量轻、厚度小、可设计性及灵活性强的特点逐步取代均质装甲。按层合材料分类: 金属与金属层合板, 如钢-钢层合、铝-铝层合、钢-钛层合等; 金属与非金属层合板, 如钢-纤维增强复合材料层合、钢-陶瓷层合等; 非金属之间的复合, 如纤维复合材料-陶瓷层合等。金属与非金属材料的种类较多, 其中每种材料物理化学性质各不相同, 针对不同材料板的优缺点进行层合起到了一定的优化效果, 文中对前 2 种进行介绍。

3.1 金属板与金属板层合

钢复合装甲根据层数可分为双复合和三复合 2 种, 实践证明, 将硬度高低不同的装甲钢轧合在一起制成的双硬度装甲 (DHA) 的抗弹道性能 (要求的装甲厚度和面密度) 均优于高硬度装甲钢和均质装甲钢, 最佳厚度配比在 60/40 到 40/60 的范围内。早期德国的“虎王”坦克便是装配此种装甲, 但其缺点在于制造工艺复杂、成本高, 目前此类结构已很少使用^[19-20]。铝复合装甲同样分为双复合和三复合这 2 种, 较钢装甲而言, 其焊接性更好, 质量更轻。美国曾研制出由 5038Al 和 7039Al 合金结合而成的复合装甲, 其缺点在于有应力腐蚀开裂的现象, 在生产加工过程任何环节产生的残余应力都会导致铝合金开裂, 并且其熔点较低, 对其防护性能产生较大的影响^[21]。曾毅等^[9]

针对 4 种不同厚度钛合金与装甲钢靶板的组合板 (质量仅仅为原装甲质量的 78.3%) 的抗弹性能进行了数值模拟, 得出层合数分别为 2, 3, 4 时, 能得到层合顺序的最优方案。

金属板层合结构在抗弹性能上较均质装甲有了一定的改进, 但由于工艺限制及抗弹能力不如其他复合装甲, 目前较少使用单纯金属复合装甲。

3.2 金属与非金属层合

金属与非金属复合装甲凭借其良好的抗穿甲与破甲性能而较为普遍地应用于军事装备中, 其中较为经典的是“三明治”结构和陶瓷-金属复合结构。“三明治”结构的中间层材料为橡胶、复合材料、水或高分子材料等, 金属板材料为低碳钢、铁合金及铝合金等。CAVALLARO PAUL V 等^[22]为了在设计阶段达到舱体综合力学性能的最大化, 避免日后昂贵的物理测试费用, 使用实验分析等方法对硬质表面的“三明治”板结构舱体暴露于常规空气爆炸的生存性能进行了研究。Manu Kuruvila John^[23]研制了一种自修复复合泡沫塑料基体的网格硬化“三明治”结构, 该结构在泡沫受损害时, 可以多次 (7 次)、自动 (只需要加热)、有效 (恢复后的强度甚至超过之前的 100%) 地修复。三明治结构的进一步发展出现了管状交叉三明治结构、方孔蜂窝三明治结构及波纹三明治结构。程子恒^[24]等用数值模拟的方法分别对 3 种结构在冲击载荷作用下的动态性能进行了分析, 发现理想模型条件下, 方孔三明治结构的抗冲击性能最好, 但工程应用中, 管状交叉三明治结构对缺陷不敏感从而抗冲击性能更优。百中浩^[25]等开发了一种兼具电磁波与冲击波吸收能力的新型三明治结构。近些年对“三明治”结构的研究主要针对材料成分的不断改进及夹层结构的优化改造, 其“三明治”结构的设计思路广泛应用到工业生产中, 功能也愈加综合。

武器装备发展过程中, 装甲防护性与机动性一直是需要兼顾的 2 个重要方面, 在国内外学者的努力下, 陶瓷-金属装甲能较好地满足上述要求, 取得了丰硕成果。陶瓷-金属装甲是将高硬度的陶瓷和韧性较好的金属通过压力加工或粘结剂粘结等工艺加工而成的复合结构装甲, 它具有良好的防破片效果。研究结果显示, 由于陶瓷的抗压强度高, 在一定的面密度范围内, 随着陶瓷厚度的增加, 靶板的防破片性能显著增加, 使用陶瓷板作为防破片面板具有较好的防护效果^[26]。早期, 最先由 Wilkins 提出陶瓷-金属层合装甲的概念, 并进行了一系列弹道试验研究^[27-28]。此后, 英国研制的“乔巴姆”层合装甲应用这一概念, 成为此种装甲代表作。研究人员又逐渐发现弹丸侵彻陶瓷-金属层合装甲中陶瓷层会出现陶瓷锥这一独特现象, 并对其形成过程、现象及机理进行了深入分析^[29-30]。侯海量^[31-33]

等对陶瓷抗冲击响应特性及陶瓷复合装甲结构抗弹特性研究进展进行了总结,并采用弹道冲击试验研究了高速破片冲击下陶瓷-金属复合板的破坏模式、吸能机理及抗弹性能,提出了抗侵彻问题研究的关键在于材料与结构的配置,并找出抗弹性能最好的设计方案,为研究侵彻问题提供了正确思路。目前,仍有许多学者针对陶瓷面板性能缺陷,从陶瓷组分入手不断改进陶瓷性能,新型陶瓷材料在军用新材料领域将继续扮演重要角色。

4 结构功能设计

装甲防护材料由均质装甲发展到复合装甲,综合抗弹性能取得了较大进步,在此基础上,研究人员针对复合装甲夹层结构进一步改进,研究出蜂窝夹层板、金属封装陶瓷等特殊夹层结构。

4.1 蜂窝夹层板

蜂窝夹芯结构是由上下面板与蜂窝夹芯(金属型、非金属型和混杂型)组合而成的特殊三明治结构,其设计灵感来自仿生学,凭借质量轻、比强度高、比刚度、隔热性好的特点成为一种非常具有研究价值的新型防护结构^[34]。研究材料的防护性能需进行大量弹道试验,LIAGHAT G H^[35-38]等针对蜂窝夹芯板进行了一系列弹道试验,得出蜂窝材料性能与结构尺寸改变对弹道极限的影响规律,为蜂窝夹芯结构设计提供了理论和试验支撑。徐胜今^[39]在 Kaneko^[40]提出的等刚度法基础上提出的正交各向异性蜂窝夹层板等效分析方法,建立了一种更加适宜的等效模型,解决了国际上公认蜂窝夹层板动、静力学不能直接计算的难题。朱易^[41]以橡胶填充的蜂窝夹层复合板为研究对象,分析了其抗爆特性,并调整蜂窝的放置方式(横向、纵向),结果表明,纵向蜂窝夹层复合靶综合抗爆性能较好。国外许多国家已将此结构投入使用,美国 S-280 电子设备方舱在其大板内外铝面板上粘接了铝蜂窝材料和 Kevlar 层压复合材料以提高抗弹性能。

蜂窝结构发展相对较晚,近些年针对其力学性能、冲击性能的研究依然很多,不少学者从蜂窝填充材料及可修复性着手,丰富蜂窝结构的发展。

4.2 金属封装结构

金属封装陶瓷结构是通过金属结构对陶瓷柱(块)进行封装约束,其典型结构的基本组成包括金属面板、背板、金属框及陶瓷单元,见图 2。常用的金属材料有钛合金、铝合金及铁合金等,陶瓷的形状有块状、柱状及球状等^[42]。

金属封装陶瓷结构的出现是由层合结构演变而来,早期的陶瓷-金属层合结构中,陶瓷板脆性较大,使得当陶瓷板受到冲击,整块板会破碎而失去抗弹性

能,因而抗破片多次打击的能力较差。于是,研究人员将陶瓷板用陶瓷块拼装成陶瓷板,当局部陶瓷块受到冲击,其他区域的陶瓷块仍能保持较好的抗弹性能,还有的将陶瓷做成柱状进行密阵式排列,并将陶瓷装头部做成圆弧形来改变弹的运动轨迹,降低侵彻能力^[43]。此类结构也存在着接缝处抗弹性能差的问题,并且拼装结构的陶瓷柱在高速冲击下还会被挤压分散,影响抗弹性能。金属封装陶瓷柱结构较好的解决了上述问题,利用金属材料对陶瓷柱进行约束,当陶瓷柱受到冲击,陶瓷会被击碎,形成陶瓷碎化区(即 Mescall 区)。由于金属框限制,陶瓷无法向四周破碎,弹丸需要消耗更大的能量继续粉碎陶瓷,在弹丸挤进过程中,陶瓷颗粒反方向运动,还会使弹丸摩擦侵蚀,降低质量,侵彻能力下降。李聪^[44]对铝合金封装刚玉球这种金属封装复合材料的制备以及抗弹性能进行了研究,并对铝合金与陶瓷柱之间润湿性进行了改善,试验证明,此种结构抗弹性能得到较大提升,且研究内容经国防科工委科技与质量司鉴定达到国内领先、国际先进水平。针对金属封装陶瓷结构研究的内容一方面是材料改进及加工工艺优化,另一方面是封装金属与陶瓷间润湿性改善的问题。目前,常用的加工工艺主要有 5 类^[45]:组件热压集成法、陶瓷粉末烧结法、金属热喷涂沉积法、金属粉末冶金法、金属浇铸法。

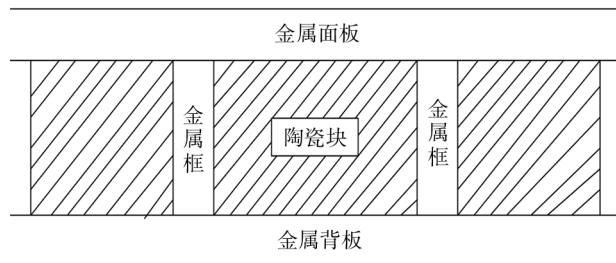


图 2 金属封装结构

Fig.2 Metal packaging structure

5 结语

军用装甲防护材料经过数十年的发展,新型装甲材料不断出现,传统装甲材料持续改进,装甲结构继续优化升级。文中从材料与结构两大部分出发,分别介绍了部分材料性能与结构特点。现代科学技术水平迅猛发展,随着战斗部高效毁伤能力的不断提高,新型材料技术也不断融入到装甲防护技术的发展应用中,不断提高装甲车辆的战场生存能力成为各国研究的热点,未来装甲防护材料必将向轻型化、系列化、综合化方向发展。

参考文献:

- [1] 曹贺全,赵宝荣,徐龙堂. 装甲防护技术[M]. 北京:

- 兵器工业出版社, 2012.
- CAO You-quan, ZHAO Bao-rong, XU Long-tang. Armor Protection Technology[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2012.
- [2] 吕伟康. 德军装甲车辆防护最新进展[J]. 国外坦克, 2011(9): 38—44.
- LYU Wei-kang. The Latest Progress of German Armored Vehicle Protection[J]. Foreign Tanks, 2011(9): 38—44.
- [3] 谢凤宽. 装甲防护基础与数值仿真[M]. 石家庄: 装甲兵工程学院, 2015.
- XIE Feng-kuan. Armored Protection Foundation and Numerical Simulation[M]. Shijiazhuang: Academy of Armored Force Engineering, 2015.
- [4] 刘向平, 吕金明. 结构装甲系统——挑战、能力和趋势[J]. 国外坦克, 2011(7): 41—42.
- LIU Xiang-ping, LYU Jin-ming. Structural Armor System-challenges, Competencies and Trends[J]. Foreign Tanks, 2011(7): 41—42.
- [5] 张卫东. 装甲材料的发展历程[J]. 国外坦克, 2006(10): 22—26.
- ZHANG Wei-dong. The Development of Armor Material[J]. Foreign Tanks, 2006(10): 22—26.
- [6] 博望, 月仪. 装甲车辆被动防护方案[J]. 国外坦克, 2010(9): 48—51.
- BO Wang, YUE Yi. Armored Vehicles Passive Protection Scheme[J]. Foreign Tanks, 2010(9): 48—51.
- [7] 黄晓艳, 刘波. 钛合金在军事上的应用[J]. 轻金属, 2005(5): 51—53.
- HUANG Xiao-yan, LIU Bo. Application of Titanium Alloy in Military[J]. Light Metal, 2005(5): 51—53.
- [8] 赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. 中国材料进展, 2010(5): 1—9.
- ZHAO Yong-qing. Progress and Trend of Titanium Alloy Research at Home and Abroad[J]. Advances in Materials Science, 2010(5): 1—9.
- [9] 曾毅, 赵宝荣. 装甲防护材料技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- ZENG Yi, ZHAO Bao-rong. Armored Protective Material Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [10] RONDOT F, NUSSBAUM J. Experimental and Computational Study on High Velocity Fragment Impacts[J]. 26th International Symposium on Ballistics Miami, 2011, 510: 1258—1264.
- [11] 张新. 钛合金靶板抗弹性能的数值模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- ZHANG Xin. Numerical Simulation of Ballistic Performance of Titanium Alloy Target[D]. Taiyuan: North China University, 2015.
- [12] 赵旭东, 高兴勇, 刘国庆. 装甲防护材料抗侵彻性能研究现状[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 117—122.
- ZHAO Xu-dong, GAO Xing-yong, LIU Guo-qing. Study on Anti-Penetration Performance of Armor Protective Material [J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 117—122.
- [13] 刘薇, 杨军. 装甲防护材料的研究现状及发展趋势[J]. 材料热处理, 2011, 40(2): 108—111.
- LIU Wei, YANG Jun. Studies and Development Trend of Armor Protective Materials[J]. Heat Treatment of Materials, 2011, 40(2): 108—111.
- [14] 曹贺全, 张广明, 孙素杰, 等. 装甲车辆防护技术研究现状与发展[J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1550—1554.
- CAO He-quan, ZHANG Guang-ming, SUN Su-jie, et al. Progress and Development of Armored Vehicle Protection Technology[J]. Journal of Ordnance, 2012, 33(12): 1550—1554.
- [15] 张卫东. 装甲材料的发展历程[J]. 国外坦克, 2006(10): 22—31.
- ZHANG Wei-dong. The Development of Armored Materials[J]. Foreign Tanks, 2006(10): 22—31.
- [16] FAHRENHOLTZ W G, ELLERBYD T, LOEHMAN R E. Al₂O₃-Ni Composites with High Strength and Fracture Toughness[J]. J Am Ceram Soc, 2000, 83(5): 1279—1280.
- [17] 陈维平. Al₂O₃ 陶瓷复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2011, 7(3): 91—96.
- CHEN Wei-ping. Study on Al₂O₃ Ceramic Composites[J]. Materials Engineering, 2011, 7(3): 91—96.
- [18] CHHEDA M, NORMANDIA M J, SHIH J. Improving Ceramic Armor Performance[J]. Ceramic Industry, 2006, 1: 124—126.
- [19] ELLIOTT S. Silicon Carbide Ceramic Armor[J]. Advanced Materials & Processes, 2007, 10: 29—33.
- [20] 李补莲, 韩梅. 战场威胁的变革与装甲防护的演变[J]. 国外坦克, 2012(3): 39—45.
- LI Bu-lian, HAN Mei. Evolution of the Battlefield Threats and Change of Armor Protection[J]. Foreign Tanks, 2012(3): 39—45.
- [21] 秦翔宇. 铝合金/高聚物层状复合靶板抗冲击性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- QIN Xiang-yu. Study on Impact Resistance of Aluminum Alloy/Polymer Layered Composite Target[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [22] CAVALLARO PAUL V, JEE M. A Combined Experimental Analytical Approach To Support the Design of a Lightweight, Rigid-Wall, Mobile Shelter[J]. Naval Undersea Warfare Center Newport, Rhode Island, USA, 2007: 29—36.
- [23] MANU K J. A Self Healing Smart Syntactic Foam Based Grid Stiffened Sandwich Structure[D]. Graduate Faculty of Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2009.
- [24] 程子恒, 于渤, 倪长也, 等. 多种三明治结构抗冲击作用下动态性能的比较研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(5): 746—751.
- CHENG Zi-heng, YU Bo, NI Chang-ye, et al. Comparison of Dynamic Performance of Multi-sandwich Structure Under Impact Resistance[J]. Journal of Ap-

- plied Mechanics, 2014, 31(5): 746—751.
- [25] 百中浩, 何成, 朱峰. 复合材料三明治结构板的电磁和冲击性能分析[J]. 华南理工大学学报, 2016, 44(9): 137—142.
BAI Zhong-hao, HE Cheng, ZHU Feng. Analysis of Electromagnetic and Impact Properties of Sandwich Panel[J]. Journal of South China University of Technology, 2016, 44(9): 137—142.
- [26] 尹志新, 李言语, 梁兴华, 等. 陶瓷/金属复合装甲抗侵略研究进展[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 116—133.
YIN Zhi-xin, LI Yan-yu, LIANG Xing-hua. Research Progress of Penetration of Ceramic / Metal Composite Armor[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2013, 34(5): 116—133.
- [27] WILKINS M L, CLINE C F, HONODEL C A. Fourth Progress Report of Light Armour Program[R]. UCRL-50694: Lawrence Radiation Laboratory, 1969.
- [28] WILKINS M L, HONODEL C A, LANDINGHAM R L. Fifth Progress Report of Light Armour Program[R]. UCRL-50980: Lawrence Radiation Laboratory, 1971.
- [29] WOODWARD R L. A Simple One-dimensional Approach to Modeling Ceramic Composite Armour Defeat[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 9(4): 455—474.
- [30] 张晓晴. 陶瓷/金属复合靶板受变形弹体撞击问题的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2003.
ZHANG Xiao-qing. Study on Impact of Ceramic / Metal Composite Target by Deformation of Missile[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003.
- [31] 侯海量, 朱锡, 阚于龙. 陶瓷材料抗冲击响应特性研究进展[J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 94—99.
HOU Hai-liang, ZHU Xi, KAN Yu-long. Study on Impact Resistance of Ceramic Materials[J]. Journal of Ordnance, 2008, 29(1): 94—99.
- [32] 侯海量, 朱锡, 阚于龙. 轻型陶瓷复合装甲结构抗弹性能研究进展[J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 208—216.
HOU Hai-liang, ZHU Xi, KAN Yu-long. Research Progress on Resilience of Lightweight Ceramic Composite Armor Structure[J]. Journal of Ordnance, 2008, 29(2): 208—216.
- [33] 侯海量, 朱锡, 李伟. 轻型陶瓷/金属复合装甲抗弹机理研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 105—114.
HOU Hai-liang, ZHU Xi, LI Wei. Study on the Anti-ball Mechanism of Light Ceramic/metal Composite Armor[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2013, 34(1): 105—114.
- [34] 刘国繁. 层合结构复合材料抗弹机理研究及模拟仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
LIU Guo-fan. Study on Anti-ballistic Mechanism of Composite Structures with Laminated Structures and Simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [35] LIAGHAT G H, DAGHYANI H R, SADIGHI M, et al. Dynamic Crushing of Honeycomb Panels Under Impact of Cylindrical Projectiles[J]. Tehran University Journal, 2003, 14(53): 68—79.
- [36] LIAGHAT G H, ALAVI N A, DAGHYANI H R, et al. Ballistic Limit Evaluation for Impact of Cylindrical Projectiles on Honeycomb Panels[J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48: 56—61.
- [37] ALAVI N A, RAZAVI S B, MAJZOBI G H. Ballistic Limit Determination of Aluminum Honeycombs Experimental Study[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 488: 273—80.
- [38] 张明华, 赵恒义, 湛河水. 泡沫铝夹芯板动态抗侵蚀性能的实验研究[J]. 力学季刊, 2008, 29(2): 241—247.
ZHANG Ming-hua, ZHAO Heng-yi, CHEN He-shui. Experimental Study on Dynamic Anti-Erosion Performance of Aluminum Foam Sandwich Plate[J]. Journal of Mechanics, 2008, 29(2): 241—247.
- [39] 徐胜今, 孔宪仁, 王本利, 等. 正交异性蜂窝夹层板的动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 92—95.
XU Sheng-jin, KONG Xian-ren, WANG Ben-lei, et al. Equivalent Analysis Method for Dynamic and Static Problems of Orthotropic Honeycomb Sandwich Plates [J]. Journal of Materials Science, 2000, 17(3): 92—95.
- [40] KANEKO Y, TAKEUCHI K. Design and Construction of a Seawater Survey Ship Built using Aluminum Honeycomb Panels[J]. Proceedings of the Second International Conference on Fast Sea Transportation, 1993, 1: 449—460.
- [41] 朱易. 橡胶填充蜂窝夹层复合结构抗爆性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
ZHU Yi. Study on Anti-blast Performance of Rubber-filled Honeycomb Sandwich Composite Structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [42] 王曙光, 朱建生. 金属封装陶瓷复合装甲抗弹性能研究[J]. 弹道学报, 2009, 21(4): 68—71.
WANG Shu-guang, ZHU Jian-sheng. Study on Ballistic Resistance of Metal-encapsulated Ceramic Composite Armor[J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(4): 68—71.
- [43] HERMAN D. Impact Failure Mechanisms in Alumina Tiles on Finite Thickness Support and the Effect of Confinement[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(3): 313—328.
- [44] 李聪. 刚玉球/铝合金复合材料的制备及其抗弹性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
LI Cong. Study on Preparation and Resilience of Corundum Ball/Aluminum Alloy Composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [45] 韩辉, 李楠. 金属封装陶瓷复合装甲研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(4): 79—82.
HAN Hui, LI Nan. Progress in Research on Metal-encapsulated Ceramic Composite Armor[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2008, 31(4): 79—82.