

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.05.029

复合材料在地面机动武器装备上的应用^{*}

齐文^{1,2}, 赵俊利¹, 刘国志³, 颜春², 王贵民², 祝颖丹²

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201; 3. 247厂, 太原 030051)

摘要: 介绍了先进树脂基复合材料的基本特性, 讨论了其在地面武器机动装备上的应用情况与发展现状, 剖析了其在低成本制造技术、结构一体化集成技术等方面亟待解决的问题。同时, 提出了树脂基复合材料在地面武器机动装备上研究应用的发展趋势。

关键词: 树脂基复合材料; 地面机动武器; 轻量化; 结构设计一体化; 低成本制造

中图分类号: TJ304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)05-0126-04

Application of Composites to Ground Mobile Weapon and Equipment

Qi Wen^{1,2}, Zhao Junli¹, Liu Guozhi³, Yan Chun², Wang Guimin², Zhu Yingdan²

(1. The North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, CAS, Ningbo 315201, China; 3. 247 Armory, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Basic properties of advanced resin matrix composites were introduced. Its application and development in a variety of ground mobile weapons were elaborated. The problems demanding prompt solution in the low cost manufacturing and integrated production technology were analysed. Furthermore, the future development trends of resin-matrix composites application in ground mobile weapons were pointed out.

Keywords: resin matrix composite; ground mobile weapon; lightweight; structure designing integration; low cost manufacturing

随着高新技术的发展, 现代战争不断向信息化战争演变, 地面武器装备的技术密集度越来越高, 且武器装备的精确要求越来越高, 同时, 地面打击力量在现代战争中仍具有相当的主导作用。传统材料的规格、性能, 以及冶炼技术等已远远不能适应高新武器的研发需求, 有时甚至成为制约其发展的“瓶颈”。因此, 对地面机动武器装备军用材料提出了更新、更高的要求。

目前, 地面机动武器装备主要包括坦克、火炮、装甲车、雷达、通信装备等多种类型, 服务于地面突击、战略打击、信息支援、防空反导、海上攻击和后勤保障等, 以构建地面攻防一体化作战平台。对大部分地面机动武器装备, 有威力、机动、防护三大性能指标。传统的采用炮钢、装甲钢等材料制造的地面武器装备的三大性能指标相互制约, 难以同时提高, 而三者的权重与平衡一直是地面机动武器设计的难点问题。在这种情况下, 纤维增强树脂基复合材料凭借其优良特性被逐渐应用到各种常规武器装备, 在地面机动武器装备的防护、轻量化、高性能化等方面发挥着重要的作用, 并促进了地面武器装备的结构一体化和低成本制造, 成为了重要的军用材料。

1 树脂基复合材料的特性及应用

目前, 纤维增强树脂基复合材料的制造与装备技术已经比较成熟, 是应用最为广泛的一类复合材料。这种材料以热固性或热塑性塑料为基体, 以短切或连续纤维织物为增强材料, 经过一定的工艺处理复合而成, 具有比强度高、比刚度高、耐腐蚀、耐磨损、疲劳寿命高、可一体化成型等优点^[1], 还可以加入一定的阻燃剂等填料以提高阻燃性。随着研究应用的发展, 以碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 为代表的纤维增强树脂基复合材料自问世以来就凭借其优良的力、声、磁、电学性能 (透波、透声性好, 无磁性, 介电性能优良), 良好的耐腐蚀性能 (耐酸腐蚀、碱腐蚀、海水侵蚀), 良好的设计、加工、维护性能, 轻质性能, 在国内外的军事领域特别是航空航天领域中发挥着越来越重要的作用。

1.1 高强耐磨性及应用

纤维增强树脂基复合材料具有较高的振动阻尼和自振

^{*} 浙江省自然科学基金项目 (LQ16E030001), 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-EW-ST5-080), 宁波市重大专项 (2014S10004, 2015S10004), 宁波市国际合作项目 (2015D10012);

联系人: 祝颖丹, 研究员, 主要从事复合材料制造相关研究

收稿日期: 2016-02-11

频率,因此有很强的吸振能力,可以帮助地面武器装备在行进过程中保持更好的平稳状态。此外,纤维增强树脂基复合材料的疲劳极限是其拉伸强度的 70%~80%,远高于金属材料的 30%~50%。另外,不同的纤维增强材料可以通过不同的内部铺层方式满足所需载荷要求,应用无损检测等技术对关键部件及时检测、维护、补修,以延长使用寿命^[2],具有高强度耐磨性和良好的可靠性。

对于坦克等地面机动武器装备,应用树脂基复合材料高强度耐磨性的同时,还能充分发挥其良好的耐腐蚀性、耐高温蠕变性、导电性。在炮塔等结构内部安装具有耐腐蚀性的树脂基复合材料的结构部件,可以更好地防止酸雨和盐分等外部环境的侵害,对设备的维修保养十分有利。

1.2 高防护性及应用

对于水陆两栖战车等地面机动武器装备,将树脂基复合材料应用在武器外罩、翼子板、甲板防护板上,或将其作为导弹冲击遮护板,可以减免榴霰弹和高速射弹的冲击。日本专家对于以 CFRP 为代表的纤维增强树脂基复合材料应用到武器装备结构上后在耐爆炸以及耐燃烧性能方面的研究已达到了军用武器装备的使用标准,为树脂基复合材料提升地面武器装备的生存能力提供了一定的研究理论基础。

以前,为了达到更高的安全性,装甲钢板设计得非常厚,但这会使机动武器车辆装备整车质量增加,影响机动性能。目前,美国、德国、俄罗斯等国已经对用复合材料替代金属部件进行了大量研究。美国、英国等在研究中都将新型树脂基复合材料作为车体的首选材料,使得主战坦克等地面武器装备的车体在轻量化进程中,可同步提高抗弹性^[3]、隐身性,减小雷达反射截面积,这已成为各国的热点军备项目之一。美国于 20 世纪 90 年代开始复合材料装甲战车车体的研究,开展了复合材料装甲车辆——先进技术验证计划,设计制造的复合材料验证车在减重达 30% 以上时,还具有良好的隐身效果,另外,美国陆军采用 S2 玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料取代早期的芳纶纤维复合材料制造的 M113A3 装甲人员输送车车体,不但提高了防火、防烟雾特性,还降低了成本^[4]。美国在“未来战斗系统(FCS)”研究计划中,也将发展复合材料原型车样车。目前,已完成了 FCS 履带式和轮式两种车型的底盘设计制造,采用玻璃纤维增强树脂基复合材料制造了样车的上车身、下车身及乘员舱。

同时,纤维增强树脂基复合材料在优化外形、改善振动及噪声阻尼、降低腐蚀及凹陷、在高速撞击下保护乘员安全等方面有着很大的优势。纤维增强树脂基复合材料应用于装甲板、舱门等方面,由于其具有更低的磁特性、热传导性,良好的阻声性等,在坦克、装甲车等地面武器装备受到外来袭击带来的热量及噪声影响时,可比传统的炮钢等材料制成

的装甲板等构件更好地起到隔热、降噪、阻燃、防碎片的作用^[5],从而更好地保护炮手和成员^[6-7]。表 1 列出一些美国已经成功制备的部分地面武器装备复合材料部件。

表 1 美国地面武器装备复合材料部件

型号	应用部件	材料	工艺	效果
M113 装甲车	负重轮	S-2 玻纤、环氧树脂	缠绕	减重 30%/ 轮, 减少地雷爆炸损害
M60 坦克	负重轮	ES-2 玻纤、环氧树脂	缠绕	减重 26%/ 轮, 减少爆炸损害
M60 坦克	纽带轮	玻纤、环氧树脂	模压	减重 29%/ 轮, 提高机动性
Bracley 战车	负重轮	玻纤、环氧树脂	缠绕	减重 4.54 kg/ 轮, 提高机动性



a—M113 坦克; b—M60 坦克

图 1 美国坦克图

1.3 电磁隐蔽性及应用

纤维增强树脂基复合材料可具有特殊的电磁性能。一方面,在其内部加入具有透波、吸波功能的聚对苯撑苯并二恶唑纤维等纤维材料或铁氧体、BaTiO₃ 等纳米颗粒,或在其表面喷涂隐身涂料,可以减少武器装备的雷达、光电、红外等观测特征^[8],提高地面机动武器装备的生存能力和作战效能;另一方面,通过对地面机动武器装备的外形结构进行优化设计,在结构表面引入异型透波、吸波结构,或将机构表面及各连接处进行光滑处理,可以降低雷达散射截面值,同时提高地面机动武器装备的电磁隐蔽性。

另外,复合材料排气装置在具有质轻、成本低等优点的同时,具备优良的热绝缘性能,能够削弱雷达信号进而有助于提高地面武器装备的隐身性,并且已经在部分武器装备上成功应用。

1.4 高轻量化及应用

现代高科技战争既要求装甲装备具有高抗弹性,又追求其轻量化、高机动灵活性,以及良好的防护性等,为了满足这些要求,各国都在不断积极探索并深入研究,广泛采用树脂基复合材料以期减轻装甲装备质量^[9],而复合材料在装甲车辆上的应用已从简单的非承力件向结构件、动力系统乃至大型整体部件发展^[10]。俄罗斯将纤维增强树脂基复合材料成功地应用于主战坦克的装甲防护,以均质钢作为面板和背板,以酚醛复合材料和抗弹陶瓷作为中间层,制得 T-80 坦克复合装甲;以覆盖了芳纶纤维复合材料的均质钢作为面板和

背板,以酚醛树脂复合材料作为中间层,制得了 T-72 主战坦克的轻型复合装甲,大幅度提高了顶部防护能力^[11]。



(a) T-80 复合装甲坦克; (b) T-72 主战坦克
图2 俄罗斯研制的复合装甲

纤维增强树脂基复合材料与常规金属和非金属材料相比,具有优异的轻质高强度,CFRP 的密度为铝的 3/5、钢的 1/5,比强度却是铝的 4 倍、钢的 5 倍,同时,拉伸强度一般都在 3 500 MPa 以上,是钢的 7~9 倍,拉伸弹性模量为 230~430 GPa,也高于钢^[12-13]。因此,CFRP 的比强度(强度与密度之比)可达到 2 000 MPa/(g·cm⁻³)以上,而 A3 钢的比强度仅为 59 MPa/(g·cm⁻³)左右,可见其比模量也比钢高。另外,树脂基复合材料还凭借其复杂部件的可设计性,良好的减震性、吸能性、抗疲劳性、耐腐蚀性等,被应用到地面机动武器装备上以有效地减轻整体的质量,减少燃油消耗,提高机动性能、运载能力和可持续作战时间^[14],进而在地面武器装备上得到越来越广泛的应用。

英国材料系统实验室对碳纤维复合材料的减轻质量的效果研究表明,CFRP 车身质量为 172 kg,而钢制车身质量为 368 kg,减轻质量约 50%。可见,复合材料可为机动武器的轻量化做出的贡献毋庸置疑。在地面机动武器装备的底座设计中,一个复合材料的底座比同尺寸的钢底座轻 58%,且可以提供足够的保护,使机械和设备免受或抵抗冲击损坏。与此同时,由于它的阻尼性和无磁性,复合材料底座能够降低武器装备的声音和磁特性。纤维增强树脂基复合材料在轻质的同时,还能同时保证一定的强度要求。树脂基复合材料具有高于钢几倍的拉伸强度,可以满足对机动武器车辆安全性能的需求。

在地面武器装备推进系统的动力传输等部件的装备轻量化过程中,当要求传动装置的部件最少、质量最轻时,采用由 CFRP 等树脂基复合材料制备的驱动轴可以轻而易举地满足要求,并且轴越长,减重效果越明显。临界速度提高,可减免长轴系上布置的轴承,轴承数量减少,还可以降低成本。另外,复合材料驱动轴还具有低噪声、无磁性、不导电、无摩擦、耐腐蚀等优良性能。

1.5 整体成型及应用

纤维增强树脂基复合材料通过不同的纤维编织工艺、预成型体成型工艺等,可以加工成格栅式、蜂窝式等多种形式的层压板结构,还可以进行不同层次的尺寸和形状优化,

具有良好的可设计性和加工成型性^[15],有利于将部分相关零件集中生产加工到一个部件上,对于加工复杂地面武器装备上的结构件大有益处。

美国使用 CFRP 一次成型制造了最大的船体“短剑”,在整体制造成型过程中不使用传统的焊接、铆接技术,使得构件外表面十分光滑,船体的质量也大大减少。虽然目前的成本相对于普通的钢和铝合金偏高,但应用这一技术进行综合构件的整体设计,使得进行批量生产的成本有较大的下降空间。同样的技术,目前已被初步应用到地面武器装备的设计制造中。这样的整体成型,在节约时间和成本、减轻了构件的整体质量的同时,也节省了燃料,提高了可持续战斗的时间。

目前,还有科研人员采用由聚氯乙烯和碳纤维乙烯基酯层压板构成的夹心结构,与传统材料相比,它不但强度高、耐用性好、而冲击性强、整体成型性好,还无磁性,有利于降低武器装备产生的磁场,并有良好的抗震性能。

2 军用复合材料应用的关键技术

军用材料经过多年发展,已取得长足进步,但在系列化、通用化、维修性等方面还存在一定的问题,影响着军用材料科研体系的整体效益和武器装备研制生产的保障能力,因此,亟需建立合适的军用材料体系标准。另外,地面武器在战场上需要执行各种复杂的战略任务,对复合材料在武器装备上的应用提出了更加严苛的要求,亟需突破以下几方面关键技术。

(1) 低成本制造技术。

虽然纤维增强树脂基复合材料优点众多,但目前依旧存在制造和安装成本比钢制件高 20%~90% 的缺点。一方面,纤维增强材料的制备、铺层,树脂基体的制备,以及纤维和树脂两者的复合等都需要降低成本;另一方面,就目前来看,地面机动武器装备的主体依旧是炮钢等材料,纤维增强树脂基复合材料制件与周围钢结构的连接处需要足够的抗内部冲击损坏能力,由此使得成本大幅提高。

发展低成本设计与制造,将会显著提高纤维增强树脂基复合材料在地面武器装备上的应用范围。目前,国内外的一些军工企业已将军用复合材料的发展重点逐步从材料的性能转到低成本制造技术,由此带动了自动纤维缠绕技术、自动带料铺层技术、预浸料技术、树脂传递模塑成型技术、电子束固化技术等低成本制造技术的发展^[16]。

(2) 结构功能设计一体化集成技术。

在地面机动武器装备的设计、制造中需要综合考虑威力、机动、防护等多方面要求。因此,需要在多个层次上开展武器装备的设计、制造、测试、使用和维护等方面的一体化集成设计。纤维增强树脂基复合材料在地面机动武器装备上

的应用,一方面,可以通过 CAD 和 CAM 仿真为武器结构设计一体化的实现提供更广的操作空间;另一方面,可以为阻尼 / 结构、防热 / 结构、隐身 / 结构等功能 / 结构一体化武器构件的制备提供有效的途径,进而提高地面武器装备的自适应、自诊断和自修复能力。

(3) 损伤容限失效评估与维修技术。

军用复合材料的可靠性和维修性同样是其得到良好应用的必须保障。纤维增强树脂基复合材料为主体或增强结构的地面武器装备,构件若出现微观损伤,容易演变成宏观失效,在一定程度上加大了对武器装备质量控制的难度。因此,通过建立相关计算标准和设计规范数据库,进而建立军用树脂基复合材料损伤容限失效评估模式、设备故障评估模式、维修性设计与分析模式,进而预估地面武器装备的使用寿命与维修方案,将对纤维增强树脂基复合材料在地面武器装备上的应用具有一定的指导作用。

3 结语

世界范围内的军用新材料每年以 5% 的速度增长,目前已有上千万种。地面武器装备用复合材料正向高功能化、低成本化和轻量化等方向发展。纤维增强树脂基复合材料在军用材料领域表现出巨大的潜在应用价值,随着其成型工艺及制造技术的提高,其必将以多功能集于一体的形式更多地应用到现代武器装备领域中,为武器装备性能的提高起到积极的推动作用。

参考文献

- [1] 陆甲明. 防护复合材料用树脂基体的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
Lu Jiaming. Study on resins in protective fiber composites[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [2] 丁红杰. 光电系统, 2004(1):62-64.
Ding Hongjie. Electronic and Electro-optical Systems, 2004(1):62-64.
- [3] 柴晓明, 等. 东华大学学报: 自然科学版, 2015(2):148-154.
Chai Xiaoming, et al. Journal of Donghua University: Natural Science Edition, 2015(2):148-154.
- [4] 黄英, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 1999(3):43-45.
Huang Ying, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites,

1999(3):43-45.

- [5] 高超. 特种车辆高性能轻质复合构件的加工技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
Gao Chao. Processing technology of high performance lightweight composite components used in special vehicle[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [6] John K B. Reinforced Plastics, 2004, 48(4):28-31.
- [7] 吴其俊. 复合材料枪管的理论及应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
Wu Qijun. Researches on the theory and application of composite barrel[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [8] 陈绍杰. 高科技纤维与应用, 2003, 28(2):11-14.
Chen Shaojie. Hi-Tech Fiber & Application, 2003, 28(2):11-14.
- [9] 凌建寿, 等. 警察技术, 2015(2):9-12.
Ling Jianshou, et al. Police Technology, 2015(2):9-12.
- [10] 段建军, 等. 纤维复合材料, 2012(3):12-16.
Duan Jianjun, et al. Fiber Composites, 2012(3):12-16.
- [11] 田志刚, 等. 科海故事博览 (科技探索), 2014(1):262.
Tian Zhigang, et al. Kehai Story Expo (Exploring Technology), 2014(1):262.
- [12] 倪福, 等. 高科技纤维与应用, 2007(1):8-13.
He Fu, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2007(1):8-13.
- [13] 许玉强. 碳纤维增强热塑性树脂复合材料的制备与研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Xu Yuqiang. Preparaton and research of carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites[D].Dalian:Dalian University of Technology, 2013.
- [14] 张勇. 地面防护工程抗爆复合材料与结构研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
Zhang Yong. Research on the antiknock composite material and structure of ground defense engineering[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2014.
- [15] 郑锡涛, 等. 航空工程进展, 2011, 2(2):181-187.
Zheng Xitao, et al. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(2):181-187.
- [16] 薛忠民. 玻璃钢 / 复合材料, 2009(5):84-88.
Xue Zhongmin. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2009(5):84-88.

碳纤维增强塑料市场价值将超 230 亿美元

据美国商业咨询公司 Grand View Research 一项最新的报告称,在未来六年内,全球碳纤维增强塑料市场有望达到 235.5 亿美元。

该项研究指出,由于在美国和欧洲地区出台的新规定要求汽车制造商提高燃油效率,因此汽车制造商们纷纷采用轻量级材料来减少车辆整体的质量,从而增加了碳纤维增强塑料的使用量。

碳纤维增强塑料在航空航天和国防业占领了主要市场, 2014 年占总量的 30%。2016 ~ 2020 年,汽车业将以最快的速度增长,平均增长率将达 14.8%。热固性碳纤维增强塑料为主导产品,在 2015 年的需求中所占的比例超过 7%,然而热塑性碳纤维增强塑料由于其高黏度,在加工时,需要的加工时间短以及具有循环利用的性能,需求量将快速增长。

在预测期间内,今后欧洲的市场有望增长 13.2%。

(中塑在线)