

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.11.030

抗弹复合材料在舰船防护上的应用研究

王晓强¹, 魏忠仁², 宫平², 金子明²

(1. 海军驻武汉 701 所军代室, 武汉 430064; 2. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要: 反舰导弹战斗部的高速爆炸破片被认为是大中型水面舰船的主要威胁。针对该威胁的防护需求, 介绍了具有优异防破片性能的纤维抗弹复合材料的特点, 并对在舰船防护领域具有较大应用前景的玻璃纤维抗弹复合材料、芳纶纤维抗弹复合材料和超高分子量聚乙烯纤维抗弹复合材料进行了应用研究概述。最后针对这三种纤维抗弹复合材料的各自特点提出了在舰船防护应用方面的一些建议。

关键词: 舰船防护; 反舰导弹; 破片; 轻型装甲; 纤维复合材料; 应用

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)11-0143-04

Application Research of Bulletproof Composites in Warship Protection

Wang Xiaoqiang¹, Guo Zhongren², Gong Ping², Jin Ziming²

(1. Military Representative Office of Navy at CSIC No.701 Institute in Wuhan, Wuhan 430064, China; 2. CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

Abstract : The high velocity fragment of anti-ship missile warheads is considered as the most important threat to the large-scale and medium-sided warship. According to the threaten analysis, the characteristics of ballistic composite which have a big advantage in fragment protection were introduced. The application researches about the glass fiber reinforced ballistic composite, the aramid fiber reinforced ballistic composite and the ultra high molecular weight polyethylene reinforced ballistic composite which have a bright future in warship protection were presented. In the end, some suggestions about warship protection were summarized based on their respective characteristics.

Keywords : warship protection ; anti-ship missile ; fragment ; light armor ; fiber reinforced composite ; application

第二次世界大战以后, 各国新建造的军用舰船多为装甲相对较薄的驱逐舰、护卫舰和导弹快艇等。舰船极易受到舰炮、航空炸弹、鱼雷、导弹等武器的威胁。其中, 反舰导弹被视为水面大中型舰船的克星, 并且其一直向着远射程、亚超音速、超音速、高精度、大威力、智能化方向发展^[1-4]。反舰导弹大多采用半穿甲爆破型战斗部, 其弹头借助导弹本身的动能, 侵入舰船内部爆炸, 并形成大量高速爆炸破片和冲击波, 从而造成对船体及内部设备、人员的伤害。大中型舰船往往设有隔舱, 可以减轻冲击波的破坏, 但是大量的高动能的破片往往在贯穿破坏的同时加剧冲击波的破坏, 因此高速爆炸破片是舰船的最重要威胁。传统的防弹和抗破片装甲材料采用钢制装甲, 但是大量使用钢制装甲将导致船体质量增大, 使搭载的武器弹药减少或航速降低, 从而削弱了舰船的战斗力和机动性。而抗弹复合材料与钢制装甲相比, 具有防破片性能优异、密度小、制造工艺简单、产品尺寸灵活等特点。已在坦克、装甲车辆的防护领域得到大量应用, 并且逐步在舰船防护领域展现出良好的应用前景。目前有试验研究及应用报道的抗弹复合材料包括尼龙纤维抗弹复合材料、玻璃纤维 (GF) 抗弹复合材料、芳纶纤维抗弹复合材料、超高

分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 纤维抗弹复合材料, 玄武岩纤维抗弹复合材料及最新的聚对苯撑苯并双恶唑 (PBO) 纤维抗弹复合材料等。其中, 尼龙纤维抗弹复合材料应用较早, 其性能相对于芳纶纤维抗弹复合材料较低, 防弹板应用基本被 GF 抗弹复合材料、芳纶纤维抗弹复合材料和 PE-UHMW 纤维抗弹复合材料所替代, 目前仅在人体防护领域有一定应用。玄武岩纤维抗弹复合材料为新兴的抗弹复合材料, 针对其抗弹性能研究及应用相对较少, 目前仅有作为复合材料的船体结构材料的研究报道。PBO 纤维抗弹复合材料在以上几种纤维抗弹复合材料中性能最高, 但是价格昂贵, 在超轻人体防护及航空航天领域有一定应用。GF 抗弹复合材料、芳纶纤维抗弹复合材料和 PE-UHMW 纤维抗弹复合材料目前在人体防护、坦克装甲车辆中的应用较广泛, 并且在舰船防护领域有较好的应用前景。笔者主要针对这三种纤维抗弹复合材料在舰船领域的研究及应用进行概述。

联系人: 魏忠仁, 工程师, 主要从事芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维及 PBO 纤维等纤维抗弹复合材料的性能研究及应用工作

收稿日期: 2014-08-11

1 GF抗弹复合材料在舰船防护上的应用

早在二次世界大战期间,美国就已开始进行GF复合装甲的研究并成功研制了聚酯/GF装甲复合材料,随着S-2高强GF的出现,高性能GF抗弹复合材料成为第一代复合装甲材料。GF的拉伸强度可达到4 GPa以上。对于同种类、同口径的弹丸,GF抗弹复合材料的抗弹能力可达到钢的3倍以上,并对破甲弹具有使射流弯曲、不规则断裂失稳的能力,使射流临界侵彻速度明显提高,与传统钢制装甲相比,其外形尺寸可设计性强、减重效果明显,与后来的其它高性能抗弹复合材料相比,其突出特点是价格低廉、来源广泛、阻燃性能好,主要缺点是密度大。因此GF抗弹复合材料在抗弹领域具有独特的地位。

国外众多学者一直没有停止过针对GF抗弹复合材料的研究。最近,Y. B. Sudhir Sastry等^[5]结合数值分析模型,研究了不同取向的E型GF增强环氧树脂复合材料层压板的性能,认为 $[+45^\circ/-45^\circ]$ 的铺层方式更有利于能量的吸收和球形模拟弹丸产生的应力分散。E. Sevkate等^[6]采用实验和3维动力学非线性有限元分析相结合的方法进行了S-2环氧树脂/GF复合梁的抗冲击性能研究。结果表明,通过LS-DYNA软件的理论计算得出的复合材料的弹道极限速度 V_{50} 与实验结果吻合较好。在实际应用方面,GF抗弹复合材料在坦克、装甲车辆防护领域得到大量推广应用。前苏联的T-64, T-72, T-80和T-95的复合装甲中均使用GF抗弹复合材料,以提高防护性能,美国的“布雷德利”复合装甲型步兵战车和复合装甲型装甲车“CAV”,均采用S-2型高强GF复合材料,兼有抗弹及结构功能;英国NP航天公司CAVCAT装甲车防护核心使用S-2 GF抗弹复合材料,相比钢制装甲减重达到一半^[7]。在舰船防护领域,由于舰船的防护面积巨大,因而GF抗弹复合材料的低成本优势更加明显。美国3TEX公司采用GF3WEAVE织物与酚醛树脂制成船舶防弹板,能够抵挡高速和大口径弹药的威胁。近年来,美国的近海作战舰(LCS)、直升机登陆舰(LHD)均采用酚醛树脂/GF复合材料作为装甲防护材料,可抵御当今高端武器的威胁。另据有关资料显示,从2003年起,美国海军第二大战舰黄蜂级两栖攻击舰的LHD-3~LHD-8均采用高强GF复合装甲系统。据美国BGF公司报道,现代的航空母舰已经采用S-2纤维织物装甲进行装备,俄罗斯“库兹涅佐夫号”航母的干舷也采用了GF复合材料作为抗弹防护结构。

国内开展GF抗弹复合材料研究和应用的单位主要为兵器工业集团第五三研究所和部分高校,其中以兵器工业集团第五三研究所开展抗弹应用研究较多。其以GF、热固性树脂制备的各种防弹舱门、舱盖、装甲车辆披甲等防弹制品和以GF织物、热固性树脂和夹层芯材(泡沫材

料、蜂窝材料等)制备兼有结构及防护性能的轻量化构件已在陆军多种型号的坦克装甲车辆上得到大量应用,取得了良好的防护效果及减重效果。另外,以GF抗弹复合材料作为抗弹陶瓷止裂层的轻型复合装甲已经列装于多种型号的坦克装甲车辆。同时由于其刚性和整体防护性能好、轻便灵活、产品外观及尺寸可设计性好、易于安装等特点,可用于舰船上层建筑防护构件、隔舱、隔板等部位的防护。

2 芳纶纤维抗弹复合材料在舰船防护上的应用

芳纶纤维抗弹复合材料是由芳纶纤维增强树脂基体制备而成的复合材料,其具有低密度、高强度、高弹性模量、较宽的使用温度以及能自熄、不熔化、耐多种溶剂腐蚀、阻燃性能优良等特性,并在很大程度上解决了芳纶纤维易水解、在紫外线照射下易老化的问题,因而得到广泛应用,并被称为第二代复合装甲材料。大量研究表明,应用芳纶纤维增强的热固性树脂复合材料比采用GF增强热固性树脂复合材料的性能好,其抗冲击性能比后者大25%~70%,密度小30%左右,其缺点是价格相对较高,使应用受到一定限制。目前芳纶纤维价格较高的情况得到了明显改善。在国际市场上,美国杜邦公司、日本帝人公司(包括荷兰AKZO公司)生产的芳纶销量占绝对优势。随着我国科研人员多年的技术攻关,目前已有多个厂家生产的芳纶纤维性能和产能已经接近世界先进水平,在一定程度上降低了芳纶纤维的价格。如苏州兆达特纤科技有限公司以东华大学技术为依托,进行产学研结合,拥有年产1000 t的生产线,技术成熟度高,该公司目前在国内对位芳纶纤维行业处于领先地位,其对位芳纶纤维的种类较多。中蓝晨光化工研究院自主研发了对位芳纶纤维1414,拥有年产1000 t的生产线。广东彩艳股份有限公司生产一定批量的芳纶III纤维,其纤维的断裂强度比芳纶II纤维高20%左右。另外,烟台氨纶股份有限公司、河北硅谷化工有限公司、江苏仪征化纤纺织有限公司、四川金路集团、辽源得亨股份有限公司等也有芳纶纤维生产的报道。

由于芳纶纤维抗弹复合材料的诸多优点,美国等工业发达国家对芳纶纤维复合材料的抗弹性能的影响因素及抗弹机理和方法等进行了深入的研究。G. Nilakantan^[8]采用模拟有限元分析的方法,在微米级范围内研究了杜邦公司的新型KM2芳纶纤维受弹道冲击时的纤维纱线的变形及能量的分散过程,得到了芳纶纤维抗弹复合材料的弹道冲击性能与芳纶纤维纱线之间的摩擦力、材料的性能及分散和重组之间的关系。A. R. Abu Talib等^[9]以Kevlar-29芳纶纤维织物作为增强材料,并在环氧树脂中添加 Al_2O_3 粉末,制备了混杂芳纶纤维抗弹复合材料,采用圆柱形模拟弹丸进行性能表征,得到该类芳纶纤维抗弹复合材料的弹道极限与产品厚度的对应关系,并且实验结果与理论计算结果十分吻合。S.

Laurenzi 等^[10]采用多壁碳纳米管增强环氧树脂/Kevlar-29 芳纶纤维复合材料,弹道测试结果表明,添加碳纳米管的芳纶纤维抗弹复合材料的冲击性能明显优于未添加碳纳米管的芳纶纤维抗弹复合材料。A. A. Ramadhan 等^[11]采用圆柱形模拟弹丸,研究了在 180~400 m/s 速度范围内, Kevlar-29 芳纶纤维抗弹复合材料板与 6061 T6 铝合金板的三明治组合靶板的弹道性能,实验结果表明,6061 T6 铝合金板放置在最后层时具有优异的能量吸收性能,为最优结构。该芳纶纤维抗弹复合材料的三明治结构十分适合于装甲防护领域。在具体应用方面,美国最初将芳纶纤维复合材料制成防弹头盔,之后又将芳纶纤维层压板与陶瓷或钢板复合,用于坦克装甲,如 M1 主战坦克“钢+Kevlar+钢”型的复合装甲。日本 8×8 式机械化步兵战车的炮塔也采用了由碳纤维和芳纶纤维制成的复合装甲结构。俄 BTR-90 装甲车、瑞士“锯脂鲤”III 装甲车和“锯脂鲤”IV 基型装甲车以及瑞典 CV90 履带式装甲战车族,均采用芳纶纤维复合材料作为防崩落衬层^[7]。在舰船应用方面,美国装备的“宙斯盾”防御体系的 DDG“伯克”级驱逐舰使用了近 70 t 芳纶纤维复合材料用于装甲防护。法国航母“戴高乐”号的关键部位、丹麦的 SF300 多功能舰艇也敷设了芳纶纤维复合装甲材料。

国内也有部分科研机构开展了芳纶纤维抗弹复合材料相关研究及应用探索。主要包括抗弹理论研究、抗弹性能表征方法、抗弹性能影响因素、制品的加工及应用前景等^[12-13]。最近,刘克杰等^[14]对比了最新芳纶 III 纤维单向布复合材料与芳纶 II 纤维单向布复合材料的抗弹性能,并探讨了抗弹性能与力学性能的关系,测试参照美国 NIJ III A 标准。吴中伟等^[15]通过改进树脂基体的配方,研制出新型芳纶无维布并制备了防弹复合材料板,当芳纶复合材料板的面密度为 6.0 kg/m² 时,能够有效防护 51 式 7.62 mm 手枪弹,而传统机织布芳纶复合材料板达到此防弹级别则面密度至少为 8.0 kg/m²。在应用研究方面,中国兵器工业集团第五三研究所在国内开展最早,并且应用研究最为深入^[12,16]。以芳纶纤维抗弹复合材料为主体的多种防碎片内衬产品及多功能内衬产品目前已基本覆盖现役和在研的坦克、装甲车辆等。其中,早期的 FC-017 芳纶纤维复合材料夹层板和 FC-018 芳纶纤维复合材料装甲皆采用模压工艺制备而成,均可作为重型复合装甲夹层材料,提高了抗穿甲弹、破甲弹的能力。新型的芳纶纤维复合材料多功能内衬产品具有防碎片及二次效应优良、密度小、阻燃性能高等特点,非常适合舰船乘员舱、弹药舱、燃烧室等重点部位的防护。

3 PE-UHMW 抗弹复合材料在舰船防护上的应用

PE-UHMW 纤维是继碳纤维、芳纶纤维之后的第三代高性能纤维,它不仅是目前高性能纤维中比模量、比强度最

高的纤维,而且具有优良的耐磨性、耐冲击性、耐化学药品腐蚀性、耐低温性、较好的耐候性和耐紫外线性能,同时,不吸水、电绝缘性能好,缺点是纤维的阻燃性较差、熔点较低。另外,由于 PE-UHMW 纤维的高度结晶性、高度取向性使其表面浸润性都较差,很难与通用树脂粘接复合,并且存在着一定的蠕变与应力松弛效应。近年来,大量研究报道可以通过改性或表面处理的方法进行 PE-UHMW 纤维性能改善。另外,PE-UHMW 纤维的价格略高于芳纶纤维的价格,这些因素在一定程度上影响了 PE-UHMW 纤维的应用。以往世界上生产高强 PE-UHMW 纤维的企业主要有荷兰 DSM 公司(纤维商品名 Dyneema)、美国 Honeywell 公司(纤维商品名 Spectra)和日本三井公司(纤维商品名 Tekmilon),PE-UHMW 纤维价格昂贵,但是从 20 世纪 80 年代以来,我国一些科研单位、厂家开始进行 PE-UHMW 纤维的探索研究,并取得了一系列重大理论突破,生产工艺水平、生产能力和产品的性能都逐步提高,甚至有部分厂家的产能及性能均超过国外厂家,这些因素大幅度降低了 PE-UHMW 纤维的价格。

采用 PE-UHMW 纤维制备的抗弹复合材料的突出特点是密度小、防护性能高,在同等面密度时,防弹能力比芳纶纤维抗弹复合材料高约 25%,在相同防护水平条件下,比陶瓷/芳纶纤维复合材料防弹板质量减轻约 30%~40%^[7]。PE-UHMW 纤维抗弹复合材料在人体防护领域有较大市场,作为防弹头盔、防弹衣、防刺服及防弹插板等的研究报道较多,而作为防弹板在坦克装甲车辆防护领域的研究报道相对于芳纶纤维抗弹复合材料明显较少^[17]。Zhang Diantang 等^[18]研究了 PE-UHMW 单向布、二维平纹布及三维编织布复合材料的抗冲击性能,研究表明,单向布具有最佳的防护性能,并研究了单向布的抗弹机理,认为薄板以冲塞吸能为主,厚板以拉伸和冲塞吸能为主。芬兰的轻型轮式装甲车均大量采用了 Dyneema 纤维防弹板,德国豹 2 坦克的最新车型和荷兰陆军的 XA-1886×6 装甲运输车也采用 PE-UHMW 纤维抗弹复合材料提高防护性能。赵刚等^[19]综合分析了国内外的 PE-UHMW 纤维及其复合材料的市场供需趋势,认为 PE-UHMW 纤维复合材料可以作为轻便船体结构件使用。在舰船防护领域,德国的海岸巡逻舰采用 PE-UHMW 纤维抗弹复合材料制备新型防护衬层。PE-UHMW 纤维抗弹复合材料防弹板的高防护性能及低密度(密度为 0.97 g/cm³,小于海水的密度,可以浮于海水面,增加舰船的有效载荷),使其可以作为舰船上层建筑防护板使用,而像乘员舱、弹药舱、燃烧室等对产品的阻燃性能要求较高的重点防护领域,不宜大量使用。

4 结语

(1) 反舰导弹是大中型舰船的主要克星,其采用的半穿

甲型战斗部爆炸产生的各种高速爆炸破片是舰船的主要威胁,与传统钢制装甲相比,纤维抗弹复合材料的质量轻、防破片性能优异,其中,GF抗弹复合材料、芳纶纤维抗弹复合材料和PE-UHMW抗弹复合材料在舰船防护领域具有较好的前景。

(2) GF抗弹复合材料价格低廉、阻燃性能好、结构性能优良,但是其面密度在这三种纤维抗弹复合材料中最大,抗弹性能也最低。因此在舰船防护这种需求量巨大的场合有独特的地位。

(3) 芳纶纤维抗弹复合材料的防弹性能明显优于GF抗弹复合材料。考虑其较低的密度、较高的阻燃性及成本因素,在舰船乘员舱、弹药舱、燃烧室、舰载雷达等重点防护领域具有明显优势。

(4) PE-UHMW纤维抗弹复合材料的突出特点是密度小,比防护性能优异,但其价格及阻燃性在一定程度上限制了在舰船某些对阻燃性要求较高场合的应用。

参考文献

- [1] 王金云,等.现代防御技术,2012,40(3):14-17.
Wang Jinyun, et al. Modern Defence Technology, 2012, 40(3):14-17.
- [2] 魏继锋,等.振动与冲击,2012,31(20):162-165.
Wei Jifeng, et al. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20):162-165.
- [3] 潘哲,等.海军航空工程学院学报,2013,28(2):209-213.
Pan Zhe, et al. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical, 2013, 28(2):209-213.
- [4] 刘杨,等.舰船电子工程,2014(2):6-9.
Liu Yang, et al. Ship Electronic Engineering, 2014(2):6-9.
- [5] Sudhir Sastry Y B, et al. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, 72:2-12.
- [6] Sevkati E, et al. Composites Science and Technology, 2009, 69(7-8):965-982.
- [7] 邵磊,等.高科技纤维与应用,2007,32(2):31-34.
Shao Lei, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2007, 32(2):31-34.
- [8] Nilakantan G. Composite Structure, 2013, 104:1-13.
- [9] Abu Talib A R, et al. Materials & Design, 2012, 35:12-19.
- [10] Laurenzi S, et al. Composite Structures, 2013, 99:62-68.
- [11] Ramadhan A A, et al. Materials & Design, 2013, 43:307-321.
- [12] 魏忠仁,等.兵工学报,2010,31(4):458-463.
Guo Zhongren, et al. Acta Armamentarii, 2010, 31(4):458-463.
- [13] 曹付军,等.化工时刊,2014,28(1):35-37.
Cao Fujun, et al. Chemical Industry Times, 2014, 28(1):35-37.
- [14] 刘克杰,等.高科技纤维与应用,2014,39(1):40-44.
Liu Kejie, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2014, 39(1):40-44.
- [15] 吴中伟,等.中国个体防护装备,2013(5):10-14.
Wu Zhongwei, et al. China Personal Protective Equipment, 2013(5):10-14.
- [16] 徐豫新,等.复合材料学报,2012,29(3):72-78.
Xu Yuxin, et al. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2012, 29(3):72-78.
- [17] 赵莉,等.纤维复合材料,2010(3):32-35.
Zhao Li, et al. Fiber Composites, 2010(3):32-35.
- [18] Zhang Diantang, et al. Materials & Design, 2014, 54:215-322.
- [19] 赵刚,等.复合材料,2011(1):50-56.
Zhao Gang, et al. Fiber Composites, 2011(1):50-56.

聚氨酯助防弹衣智能化

英国《每日邮报》10月10日报道,中国香港纺织品和服装协会的研究人员研制出一种由多条预拉伸弹性纱与聚氨酯涂层纤维共同制成的纤维电路板,可以用于制造智能防弹衣。当被子弹击中后,这种防弹衣可发出求助信息,报告中弹者的位置。

研究人员称,这种电路板可被拉伸100万次而不会损坏,清洗30次而不会产生变形。当被子弹击中时,纤维电路板可以作出回应。这意味着,如果在战场上,智能防弹衣可以向医疗兵发送士兵受伤的信号。

研究人员发现,子弹的力量无法损伤纤维电路板。其中一位研究人员说,在弹道影响测试时,纤维电路板显示出良好的韧性。所有传感器网络也表现良好,没有出现器械或电子故障,可收到可靠电子信号。

除了防弹衣,这种技术还可被用于制造仿生机器人的电子纤维皮肤等。

(中国化工信息网)

今年1~9月俄罗斯挤出级PC市场消耗量增长5%

根据MRC Scan Plast最新报告,2014年前9个月,俄罗斯市场上挤出级聚碳酸酯(PC)总消耗量为62 kt,较2013

年同期增长5%。市场分析师称,挤出级PC是各级别PC中消耗量最大、需求最为旺盛的塑料,该种树脂占据俄罗斯PC市场上85%的份额。

Kazanorgsintez是俄罗斯国内唯一一家大型挤出级PC生产商。1~9月,Kazanorgsintez向市场提供的PC供给量占俄罗斯总需求的66.4%。这一比例较去年同期的62.5%有所增长。在此期间,Kazanorgsintez的PC片材产出为42.2 kt,较去年同期增长10%。多年来,该公司一直采取优先满足国内市场需求,其次考虑出口的发展方针。

2014年前三季度,Kazanorgsintez的整体PC产量与去年同期相同,然而,生产结构却有所变化。2013年1~9月,挤出级PC占总产量的78%,为38.4 kt;注塑级PC占总产量的22%,为10.7 kt;而今年前9个月,挤出级PC占总产量的86%,为42.2 kt;注塑级PC占总产量的14%,为6.8 kt。因此,尽管Kazanorgsintez今年前三季度注塑级PC产量下降了36%,但挤出级PC产量却增长了10%。

数据显示,今年前9个月俄罗斯挤出级PC出口量为20.8 kt,同比下降6%。而该国主要海外挤出级PC供应商为拜耳和Sabic。

(中国聚合物网)