

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.10.028

PE-UHMW 抗弹复合材料及其在防护领域中的应用

张颖异¹, 李冰川², 刘发杰¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 装甲兵驻济南地区军事代表室, 济南 250031)

摘要: 根据超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 抗弹复合材料中 PE-UHMW 增强体宏观结构形式的不同, 概述了以纤维织物、纤维 UD 材料、高度取向薄膜材料为主体结构的 3 种 PE-UHMW 抗弹复合材料研究与应用现状, 展望了其国内外发展趋势。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 抗弹复合材料; 纤维织物; UD 材料; 高度取向薄膜

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)10-0137-04

Research and Applications of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Ballistic Composites in Anti-Bullet Protection

Zhang Yingyi¹, Li Bingchuan², Liu Fajie¹

(1. CNGC Institute53, Jinan 250031, China; 2. Military Representatives Office of Armored Corps Stationed in Jinan District, Jinan 250031, China)

Abstract: The research and application status of three different types of ultra high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) ballistic composites, which were differentiated according to different macrostructures of PE-UHMW reinforced materials, including fibrous woven fabrics, fibrous uni-direction fabrics and non-fibrous highly oriented films. Then the development trend of the PE-UHMW ballistic composite was prospected.

Keywords: ultra high molecular weight polyethylene; ballistic composite; fibrous woven fabric; fibrous uni-direction fabric; highly oriented film

随着防护技术的发展, 以轻质、高强、高比吸能性为特征的新型抗弹复合材料在装甲防护、人体防护、工程防护等领域的应用越来越广泛^[1]。与芳纶抗弹复合材料相比, 由于超高分子量聚乙烯 (PE-UHMW) 抗弹复合材料具有密度低、耐光性好、比模量和比强度高、冲击韧性好等优异性能^[2], 已广泛应用于人体防护 (防弹衣和防弹头盔)、坦克装甲车辆等防护领域, 成为近年研究热点^[3-7]。

PE-UHMW 抗弹复合材料是以 PE-UHMW 为增强体的新型抗弹材料, 通常采用层压方法制备。各层材料层叠角度随性能要求可呈多种分布, 固化时须加一定的压力, 并将温度控制在 PE-UHMW 分子的熔点以下。笔者根据增强体宏观结构形式的不同, 概述了以纤维织物、UD 材料、高度取向薄膜材料为主体结构的 3 种 PE-UHMW 抗弹复合材料研究与应用现状, 最后对其发展趋势进行了展望。

1 纤维织物抗弹复合材料

PE-UHMW 纤维织物抗弹复合材料通常是指以热塑性或热固性树脂为基体, 以 PE-UHMW 纤维织物 (机织布、针织布、编织布等纤维织物) 为增强体的抗弹复合材料。一般是先将 PE-UHMW 纤维织物与树脂基体初步复合制备成为预浸材料, 然后将预浸材料经层叠后, 通过热压方法制备。

国内外最早开始对 PE-UHMW 纤维抗弹复合材料的研究与应用都是以此类材料为主。

对于 PE-UHMW 纤维织物抗弹复合材料, 可根据使用性能不同选择不同的树脂基体, 如既可以选用热固性树脂, 也可以选用热塑性树脂或弹性体, 目前使用较多的主要有环氧树脂、聚酯树脂、改性酚醛树脂等。为了得到最佳的防护性能, 也可以将几种树脂基体混合使用^[8]。

对 PE-UHMW 纤维织物抗弹复合材料抗弹性能的研究主要集中在抗弹材料的冲击响应和破坏机理方面。材料的冲击响应和破坏机理非常复杂, 它既与纤维种类、织物结构和树脂基体有关, 也与子弹形状、冲击角度和冲击速度有关。W. J. Cantwell 等^[9]早在 1985 年就提出了一个简单模型, 用于预测复合材料在高速子弹冲击后的能量吸收过程, 对于硬质、较厚的防弹材料 (如头盔), 其破坏过程可分为纤维被剪切、纤维经拉伸后断裂、纤维与基体间脱层 3 个连续的阶段。受高速子弹冲击时, PE-UHMW 纤维织物抗弹复合材料一般都会出现这 3 个阶段^[10]。韩辉等^[11]研究表明, 在同等面密度时, PE-UHMW 纤维织物抗弹复合材料防弹能力比芳

联系人: 张颖异, 硕士, 工程师

收稿日期: 2015-07-10

纶复合材料高约25%,同等防护能力条件下,采用纤维织物抗弹复合材料的防弹板比陶瓷/芳纶复合材料防弹板质量减轻约30%~40%。

PE-UHMW纤维织物抗弹复合材料也有其固有缺点^[12]:一是熔点低,其最高应用温度不超过120℃;二是纤维与基体的界面粘接强度较低,易导致该类复合材料受横向作用力时易出现分层现象。当前,可采取的解决方法主要有提高PE-UHMW纤维本身的性能、采用物理或化学改性的方法对纤维的表面进行处理、优选树脂基体的种类及含量等^[13-16]。

此外,国内部分科研人员对比了进口纤维和国产纤维对复合材料抗弹性能的影响。李楠等^[17]分别选用了国内与国外生产的PE-UHMW纤维进行了多次试验。研究结果表明,采用国内PE-UHMW纤维制备的防弹板出现了分层现象,防护性能一般,采用国外PE-UHMW纤维制备的防弹板防护性能明显优于采用国内PE-UHMW纤维制备的防弹板。王梅等^[18]研究了PE-UHMW防弹材料在热、湿热和光老化试验中的抗弹极限V50性能,比较了进口和国产两种PE-UHMW防弹材料样品在不同环境条件下的抗弹性能变化。研究结果表明,在热老化、湿热老化试验中,国产PE-UHMW防弹材料性能下降较快,外观变化较为明显,有起皱变硬现象,进口PE-UHMW防弹材料的变化不明显,抗弹性能未发生明显的变化。

目前,PE-UHMW纤维在国外已广泛应用于人体防护、警用装备和军用装甲防护等领域,如防弹衣、防弹头盔、防弹运钞车、军用装甲战车、武装直升飞机等。

20世纪90年代,联合国维和部队的防弹衣和防弹头盔已全部由PE-UHMW增强复合材料制成;在波斯尼亚,由PE-UHMW制成的一整套全防式防弹衣的质量不到5 kg,能抵御北约5.56 mm、俄制7.62 mm突击步枪普通弹的侵略^[19-20]。

目前荷兰DSM公司开发的Dyneema新型材料^[21],既能保持柔软性又能兼具耐切创性和耐扎刺性,整套Dyneema纤维内插板的质量不足5 kg,可一次成型,不需要与陶瓷或钢板复合,即可实现对83 m/s速度的5.56 mm和7.62 mm NATO弹的有效防护。

韩国防弹装备制造厂商Dae-Sung Tech Co. Ltd.采用霍尼韦尔公司的PE-UHMW纤维作为主体材料制造头盔^[22]。据悉,PE-UHMW纤维在应用于头盔等曲线状部件时,可表现出优异的防弹性能,以保护士兵头部免受倾斜角度子弹和多发子弹攻击。

荷兰陆军的XA-188 6×6装甲输送车和德国“豹II”A5主战坦克均采用PE-UHMW纤维复合材料制备炮塔内的防碎片、防爆震内衬,PE-UHMW纤维复合材料的厚度为

20 mm,防碎片V50可达1200 m/s,爆炸冲击波衰减率大于50%,导热系数小于500 mW/(m·K),中子衰减率大于7.0,可大大减少装甲被击穿后的弹片数量,并具有隔热、降噪效应^[23]。此外,芬兰的轻型轮式装甲车均大量采用了Dyneema防弹板^[24]。

2 纤维UD抗弹复合材料

PE-UHMW纤维UD抗弹复合材料是在PE-UHMW纤维织物抗弹复合材料基础上发展起来的一种用于高级防弹领域的新型高性能复合材料,也称防弹无纬布、UD防弹布,一般是由多层单向排列的无纬布经交叉铺层、热压复合制备。由于其成型过程中PE-UHMW纤维的强度损失很小,与PE-UHMW纤维织物抗弹复合材料相比,具有密度更小、抗冲击性更高、抗弹性能更好等许多突出的优点,该产品相对于传统的PE-UHMW纤维织物抗弹复合材料的优势非常明显,国内外市场上总体还处于供不应求的状态,全球供应缺口极大,市场前景非常广阔^[25]。

梁子青等^[15]以低密度聚乙烯为基体,以PE-UHMW单层纤维正交铺层结构、平纹织物、斜纹织物和纬编双轴向织物为增强体,制备了热塑性防弹复合材料,并进行了弹道冲击实验。研究结果表明,通过对比以上提到的不同结构的PE-UHMW纤维复合材料的防弹性能,证明了正交铺层结构为最佳结构。

根据NIJ标准010.04《人体装甲防护性能》中的III级要求,张东^[19]通过模压成型法制备了厚度为7 mm的PE-UHMW无纬布防弹板,以配备了NATO弹丸的M14 7.62 mm自动步枪为试验枪,其V50可达653 m/s。

B. L. Lee等^[26]制备了单向铺层和织物铺层两种不同结构的PE-UHMW纤维复合材料靶板,并对其弹道冲击性能进行了测试。结果表明,在相同的靶板面密度条件下,靶板密度较低时,这两种结构的弹道极限速度接近;然而,当面密度增大时,单向铺层复合材料明显比纤维织物复合材料具有更高的弹道极限值。这是因为,单向铺层复合材料中PE-UHMW纤维容易保持伸直状态,成型加工过程中强度和模量损失较小,更有利于受冲击时应力波的传递。

高恒等^[27]以PE-UHMW纤维单向无纬布(UD布)及二维织物为增强体,制备了复合靶板,并进行了防护性能测试。结果表明,与单独以UD布或二维织物为增强体相比,UD布/二维织物复合结构可有效抵御7.62 mm手枪弹侵略,可有效抗多发弹打击。

顾冰芳等^[28]以聚乙烯薄膜为基体、北京宇航通泰应用技术研究所提供的PE-UHMW纤维为主体组分,制备了PE-UHMW无纬布抗弹复合材料,将此复合材料制成靶板,研究了靶板面密度、立方体弹片冲击靶板速度及冲击角度等

对靶板防护性能的影响。结果表明,弹道性能随复合材料层数和靶板面密度增加而提高;在受到具有一定角度的冲击时,UD材料的抗冲击性提高,这说明弹片的着靶姿态对UD复合材料的防护性能有着一定的影响。

此外,不同的生产厂家由于采用的胶粘剂种类及用量、复合工艺等方面有所不同,其成品在热性能、抗弹性能等方面存在较大的差异,进而对其在防弹领域中的应用产生了不同的影响。

美国联合信号(Allied Signal)公司生产的“Spectra”防护材料就是由PE-UHMW纤维UD材料制备而成,强度远高于钢,可达钢的11倍^[29]。如Spectra1000,其强度可高达35 g/丝。采用这种新型UD材料做成的防弹衣,因其具备质轻、穿着舒适、防弹性能优异等性能特点,受到执法部门的普遍欢迎。

美国Honeywell公司、荷兰DSM公司等先后成功研制了PE-UHMW纤维UD抗弹复合材料,充分发挥了其轻质特点^[30]。

宁波大成以PE-UHMW纤维单向无纬布为原料,制作了2 mm厚的防弹插板,可有效防御以AK-47为代表的突击步枪普通弹的攻击^[31]。

荷兰DSM公司用UD75无纬布模压成型复合装甲板^[32],密度为0.96~0.98 g/cm³,面密度为16 kg/m²,可抵抗7.62 mm×51 mm,850 m/s NATO弹丸,而相同防护水平的装甲钢需85 kg/m²,减重率达75%。

2014年6月,美国《复合材料世界》报道,美国Leading Technology Composites(LTC)公司研发出了装甲界强度最高、质量最轻的装甲防护系统,这些装甲防护系统初步集成于车辆平台后,与传统装甲防护系统相比,可实现减重25%~40%,LTC公司还开发出了两栖车辆的轻量装甲系统。据“国防在线网”报道,LTC公司将其先进加工系统XPS2应用于DSM Dyneema公司的PE-UHMW材料,在加工过程中需经过固化工艺,固化之后还进行了二次冷热加工。推测该公司材料的主体原料为UD材料,与以前产品相比,其可能在树脂体系的选择上实现的新的技术突破。

3 高度取向薄膜抗弹复合材料

最近几年,国外介绍了一种以PE-UHMW取向薄膜材料为主体结构的新型抗弹复合材料^[33-37]。这种新型抗弹复合材料以高度取向的PE-UHMW薄膜为基础材料,经正交铺层热压成型制备得到。

作为主体材料的高度取向PE-UHMW薄膜也称为取向条带,一般厚度为20 μm~1 mm、宽度大于1.27 cm。美国专利US 8075979B2^[33],US 8236119B2^[34],US 8206810B1^[35],US 8188207B2^[36]介绍了此类薄膜材料的制备及使用方法,

其采用的原料均为直接合成的“无缠结”的PE-UHMW粉料,粉料经热压成型、超倍拉伸制得薄膜材料,薄膜材料可直接正交铺层、热压成型不同厚度的防弹板。美国专利US 8287987B1^[37]介绍了另外一种高度取向薄膜材料的制备方法,这种方法制备的薄膜材料不能直接热压复合,使用前需要先将胶粘剂复合到薄膜材料表面,才能用于铺层、热压成型。

根据以上专利反馈信息,这种新型抗弹复合材料可能具有以下性能优势:一方面,作为增强结构的薄膜材料本身具有高度取向结构,可以满足复合材料的高强度、高模量、高冲击韧性使用要求;另一方面,薄膜材料通过薄层片材超倍拉伸工艺制备,与纤维织物和UD材料相比,避免了复杂的纤维间界面问题,既消除了界面改性可能带来的环境污染问题,又简化了复合材料成型工艺、降低了成本、提高了复合材料的质量一致性与性能稳定性。因此可以预测,这种新型PE-UHMW取向薄膜抗弹复合材料可能会成为国内外未来几年研究与应用的焦点。

近年来,美国帝斯曼迪尼玛公司陆续报道了一款轻质、且极具成本效益的商业化硬质防弹材料产品——“Dyneema®BT10”^[38-39]。这种产品的材料为纯PE-UHMW,面密度约168 g/m²,是以薄片状带材(以PE-UHMW粉末为原材料,经“某固相工艺过程”制得)为主体材料,经过编织、铺层等工艺制备成型,成型过程不须使用任何胶粘剂类材料。据此可以推测,该产品可能采用了与上述美国专利^[35-37]相类似的设计思路和成型工艺。

此外,据报道^[40],”Dyneema®BT10”防弹性能与聚对位酰胺纤维制品相当,但质量更轻、成本更具竞争力,可满足全球多种弹道防护标准,适合轻型及中型战术车辆和多用途运载车辆,可帮助车辆抵御路边的简易爆炸装置(IED)和爆炸成形弹头(EFP)的袭击。2013年5月,采用“Dyneema®BT10”研制的防二次碎片飞溅衬层已成功应用于土耳其装甲车领先生产商FNSS Savunma Sistemleri A.S.生产的8×8“PARS®”两栖装甲运兵车。

目前,国内未见公开文献资料报道PE-UHMW取向薄膜抗弹复合材料相关研究与应用情况。

4 结语

鉴于PE-UHMW抗弹复合材料在国内外人体防护和坦克装甲车辆等防护领域应用越来越广泛,针对各防护领域潜在威胁和满足差别化防护能力的需求,不断优化并提高PE-UHMW抗弹复合材料防护效能、促进其应用与批产迫在眉睫,具有很强的现实意义。

参考文献

- [1] Tabiei A, et al. Applied Mechanics Reviews, 2008, 61(1):010801.

- [2] Cunniff P M. Textile Research Journal, 1992, 62(9):495-509.
- [3] 赵刚,等. 纤维复合材料, 2011(1):50-56.
Zhao Gang, et al. Fiber Composites, 2011(1):50-56.
- [4] 黄玉松,等. 工程塑料应用, 2005, 33(11): 69-73.
Huang Yusong, et al. Engineering Plastic Application, 2005, 33(11): 69-73.
- [5] Lin S P, et al. European Polymer Journal, 2007, 43:996-1 008.
- [6] Yves T. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(9):15-20.
- [7] 陈成泗. 国外塑料, 2008, 26(2):56-60.
Chen Chengsi. World Plastics, 2008, 26(2):56-60.
- [8] Walsh T H, et al. Key Engineering Material, 1998, 141-143: 367-382.
- [9] Cantwell W J, et al. The ballistic perforation of CFRP[C]//Proc Conf Impact Polym Mater Guildford Surrey. [S.l.]:[s.n.], 1985:17.
- [10] 郑震,等. 合成纤维, 2000, 31(4):21-26.
Zheng Zhen, et al. Synthetic Fiber in China, 2000, 31(4):21-26.
- [11] 韩辉,等. 高科技纤维与应用, 2005, 30(1):40-43.
Han Hui, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(1):40-43.
- [12] 宋俊,等. 高科技纤维与应用, 2006, 31(5):11-14.
Song Jun, et al. Hi-tech Fiber & Application, 2006, 31(5):11-14.
- [13] 曾黎明,等. 纤维复合材料, 2005(2):25-27.
Zeng Liming, et al. Fiber Composites, 2005(2):25-27.
- [14] Hearle J W S. High-performance fibres[M]. Amsterdam:Elsevier, 2001.
- [15] 梁子青,等. 纤维复合材料, 2002(4):4-9.
Liang Ziqing, et al. Fiber Composites, 2002(4):4-9.
- [16] Andreia L D S A, et al. Material Performance, 2005, 24(1):104-113.
- [17] 李楠,等. 超高分子量聚乙烯纤维复合材料在防弹领域的应用[C]//第十四届全国复合材料学术会议论文集(下). 北京:中国宇航出版社, 2006:1 311-1 313.
Li Nan, et al. Analysis of the using of UHMWPE in fiber-reinforced composite as anti-bullet material and prediction of this trend[C]//The 14th national conference on composite materials academic (PartII). Beijing:China Astronautic Publishing House, 2006:1 311-1 313.
- [18] 王梅,等. 警察技术, 2011(3):8-11.
Wang Mei, et al. Police Technology, 2011(3):8-11.
- [19] 张东. 多相层状功能梯度防弹复合材料的结构及抗弹性能研究[D]. 天津:天津工业大学, 2013.
Zhang Dong. Study on structure and bullet-proof performance of the layered and functionally gradient ballistic composites[D]. Tianjin:Tianjin Polytechnic University, 2013.
- [20] 张小康. 超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料的性能分析[D]. 上海:华东理工大学, 2011.
Zhang Xiaokang. Properties of UHMWPE fiber reinforced composites[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2011.
- [21] 朱武,等. 材料导报, 2005, 19(3):67-69.
Zhu Wu, et al. Materials Review, 2005, 19(3):67-69.
- [22] 王晓岚,等. 高科技纤维与应用, 2012, 36(5):56.
Wang Xiaolan, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2012, 36(5): 56.
- [23] 曹贺全,等. 装甲防护技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 2013.
Cao Hequan, et al. Armor protection technology[M]. Beijing:Weapon Industry Press, 2013.
- [24] 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.
- [25] 赵莉,等. 纤维复合材料, 2010(3):32-35.
Zhao Li, et al. Fiber Composites, 2010(3):32-35.
- [26] Lee B L, et al. Journal of Composite Materials, 1994, 28(13):1 202-1 226.
- [27] 高恒,等. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(5):91-93.
Gao Heng, et al. Journal Academy of Armoral Force Engineering, 2014, 28(5):91-93.
- [28] 顾冰芳,等. 纤维复合材料, 2006(1):20-23.
Gu Binfang, et al. Fiber Composites, 2006(1):20-23.
- [29] Kenneth C, et al. US, 8206810[P]. 2012-06-26.
- [30] 吴枫. 高科技纤维与应用, 2006, 31(6):37-41.
Wu Feng. Hi-Tech Fiber & Application, 2006, 31(6):37-41.
- [31] 达魏峰. 新材料产业, 2011(9):17-20.
Da Weifeng. Advanced Materials Industry, 2011(9):17-20.
- [32] 孙志杰,等. 复合材料学报, 2001, 18(2):46-49.
Sun Zhijie, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2):46-49.
- [33] BAE System Tensylon H. P. M., Inc. US, 8075979B2[P]. 2013-12-11.
- [34] Honeywell International Inc. US, 8236119B2[P]. 2012-08-07.
- [35] BAE System Tensylon H. P. M., Inc. US, 8206810B1[P]. 2012-06-26.
- [36] Novameer B V, et al. US, 8188207B2[P]. 2012-05-29.
- [37] BAE System Tensylon H. P. M., Inc. US, 8287987B1[P]. 2012-10-16.
- [38] DSM engineering plastics technical data sheets-DSM Dyneema® BT10[EB/OL]. (2014-06-06)[2015-06-05]. <http://www.matweb.com/search/GetMatlsByManufacturer.aspx?manID=50>.
- [39] Dyneema® tape technology[EB/OL]. (2014-05-25)[2015-06-05]. http://www.dsm.com/products/dyneema/en_AU/product-technologies/tape.html.
- [40] Anouk L, et al. FNSS wins important contract for armored vehicles using Dyneema® ballistic tape from DSM Dyneema[EB/OL]. (2013-08-05)[2014-05-25]. <http://www.dsm.com/corporate/media/informationcenter-news/2013/05/2013-05-08-fnss-wins-important-contract-for-armored-vehicles-using-dyneema-ballistic-tape-from-dsm-dyneema.html>.