高性能纤维及其复合材料在防护装备上的应用

陈 愚
(西南技术工程研究所，重庆 400039)

摘要： 介绍了高性能纤维及其复合材料在防护装备上的应用及发展历程，包括芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、杂环类纤维及其复合材料在防护装备上目前的应用状况和各自优缺点，以及防护装备上用的高性能纤维及其复合材料的发展方向，也介绍了高性能纤维及其复合材料应用技术的发展趋势。

关键词： 高性能纤维；复合材料；防护装备
中图分类号： TB484；E92　**文献标识码：** A　**文章编号：** 1001-3563(2011)23-0063-03

Application of High-performance Fiber and Composite Materials in Protective Equipment

CHEN Yu
(No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

Abstract: The application and development process of high-performance fiber and composite materials in protective equipment were introduced. The application status, advantages, and disadvantage of aramid fibers, ultra-high molecular weight polyethylene fiber, heterocyclic fiber, and their composite materials were introduced. The trend and direction of the development and application of high-performance fiber and composite materials in protective equipment were put forward.

Key words: high-performance fiber; composite; protective equipment

防护装备是随着火力武器发展而发展起来的产物，它一般包括防弹衣及防弹头盔等，组成材料一般是防弹金属(高锰钢、合金铝、钛合金等)、防弹陶瓷、高性能纤维及其复合材料或剪切增稠液[1]。高性能纤维主要包括防弹尼龙、芳纶纤维、超高分子质量聚乙烯纤维、杂环类纤维等。高性能纤维及其复合材料防护装备是20世纪中期高科技发展的结晶，其防弹机理主要是投射物对纤维进行拉伸和剪切，同时高性能纤维将冲击能沿纤维往冲击点以外的区域进行传播，这样将投射物的能量吸收掉从而达到防护效果[2]。

1　高性能纤维及其复合材料的研究和进展

当前，高性能纤维发展最发达的国家是美国、俄罗斯和日本、荷兰、德国、英国等国家。高性能纤维的发展方向以液晶高聚物、杂环类高聚物和线形高分子的超拉伸为主。液晶高聚物主要是以美国为主开发的，包括溶致性和熔致性液晶，主要包括芳纶系列纤维、杂环类纤维、聚芳酯纤维等；杂环类高聚物有非液晶型芳杂环类共聚酰胺纤维、芳杂环共聚纤维等；线形高分子的超拉伸技术主要有荷兰DSM公司发明的凝胶纺丝技术生产超高分子量聚乙烯纤维，比较典型的产品有荷兰DSM公司和日本东洋公司联合开发的Dyneema、美国Alliedsignal公司的Spectra及日本三井石化公司的Teckmilon等，还有日本可乐丽公司等公司研制的超高分子量聚乙烯醇(PVA)和超高分子量聚丙烯腈(PAN)等。

1.1　玻璃纤维和碳纤维

第1代防弹纤维以玻璃纤维和碳纤维为代表，它们曾经在防护装备中发挥了巨大的作用。虽然在后来已被其它具有更先进防弹性能的纤维及其复合材

收稿日期： 2011-07-08
作者简介： 陈愚(1972－)，男，重庆人，西南技术工程研究所高级工程师，主要从事兵器防护包装研究。

料所取代,但它们在防弹材料史上的功绩是不可磨没的。而且目前还有 S 玻璃纤维的出现并应用,它的性能有了明显的提高,如美国 S-994 玻璃纤维拉伸强度高达 4 650 MPa。这种高强度高模量价格低廉的材料仍属目前防弹材料中不可缺少的优质材料之一。

1.2 芳纶系列纤维

第 2 代防弹纤维及其复合材料以芳纶系列纤维及其复合材料为代表,主要生产厂家有美国杜邦公司、日本帝人公司和德国 Acordis 公司。该类纤维的研究时间较长,产品也多,比如杜邦公司的 Kevlar 就有十多个牌号,每个牌号又有数十种规格的产品,这类防弹纤维在防弹衣、防弹头盔、防护装甲和防护盾牌中应用广泛,已成为各国装备和待装备的主要防弹纤维及其复合材料制品之一[3]。美国 1982 年就将 PASGT 人体装甲系统装备部队服役,在历次执行作战任务中军发挥了良好的作用,目前仍然是防弹材料应用研究中的热门话题。这类抗弹纤维自身也在不断地发展和提高,经过这些年的发展,芳纶纤维材料性能都有很大的提高,而且在朝着轻质化的方向发展, Kevlar 防弹衣质量见表 1。

表 1 防 9 mm 子弹(速度(410±10) m/s)的防弹衣的质量

Tab. 1 Weight of anti-9 mm bullet (velocity 410±10 m/s) body armor kg

Kevlar 29	Kevlar "Ht"	Kevlar "Comfort"
2.57	1.99	1.63

这类防弹衣在朝质量轻的方向发展的同时,材料的防水性能、防钝伤的性能、防刺性能、舒适性能也大为改观。

1.3 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维

超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料是第 3 代防弹纤维及其复合材料的代表,主要生产厂家有荷兰帝斯曼公司和美国霍尼韦尔公司、日本的东洋纺织公司。这是目前质量最轻、防弹性能相当好、最有应用价值的防弹纤维材料之一[4],但因其熔点很低,应用受到了一定限制。现已从材料研究阶段进入应用研究和实际应用阶段。在防护装甲、防弹衣和防弹头盔中已得到比较广泛的应用,其防护效果也很好,是目前各国装备防护领域应用研究较活跃的防弹材料,这 2 种材料的性能比较见表 2。

值得一提的是在这 2 家公司发展了弹道性能比机织布优异的无纺布技术。这种无纺布是将单向的超高分子量聚乙烯纤维先进行预浸树脂处理,然后再按垂直方向交织,再用热塑料薄膜加以隔离、保护而成。由于在制造过程中无纺布纤维机械磨损比机织过程的磨损要小,于是无纺布也就基本能保持原丝的机械性能;同时由于机织布的纱线之间存在相互交织点,这些交织点在传递能量时会成为传递节点,它们在受到弹的冲击时应变波会严重反射,影响传递能量;同时在能量的传递过程中,无纺布可以利用树脂的塑性流动将应力传递给纤维,而起着同时传递应力的作用;另外,材料的防钝伤效果比机织布好。该技术的出现,丰富了防护装备的市场。

表 2 不同超高分子量聚乙烯纤维性能比较

Tab. 2 Performance comparison of different UHMWPE

纤维型号	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比强度/ ($m \times 10^{-5}$)	比模量/ ($m \times 10^{-5}$)	伸长率 /%	熔点 /℃
Spectra 1000	0.97	3.24	171	3.4	147
Spectra 2000	0.97	3.43	196	3.4	147
Dyneema SK60	0.97	2.78	92	3.8	147
Dyneema SK66	0.97	3.30	102	3.8	147
Dyneema SK77	0.97	4.0	141	3.8	147

1.4 杂环类 PBO 纤维

第 4 代防弹纤维及其复合材料以 PBO(聚对苯撑苯并二噁唑)等杂环类纤维及其复合材料为代表,这是一类耐热性高和力学性能优异的抗弹材料,在超级纤维之列。所谓超级纤维一般是指纤维纱强度大于 20 g/d,模量大于 500 g/d,耐热性在 500 ℃以上的纤维。超高分子量聚乙烯纤维力学性能较高,但热变形温度不到 100 ℃,芳纶纤维耐热性比较高,但其力学性能不足,而 PBO 在力学性能和耐热性方面性能都比较优异,接近于理想的超级纤维,因而是目前防护材料研究的热点。在具有一系列优越性能的同时,PBO 纤维性能还存在不足之处[5-7]:首先,PBO 纤维是一种光敏感的高分子聚合物材料,在使用过程中会因受到紫外光辐照的作用而发生光氧化老化,引起大分子的降解,使 PBO 纤维的力学性能发生变化,影响材料的耐久使用;其次,PBO 纤维其表面光滑、表面活性低且呈极强的化学惰性,与树脂基体的界面粘接很差;再次,目前 PBO 纤维的价格较高。这些都严重地制约了它在高性能复合材料中的应用,但它仍将是目前以致未来最富有竞争力的抗弹纤维及其复合材料,当前对其的改性研究相当活跃。

2　高性能纤维及其复合材料的应用发展

复合材料的防弹性能除高性能纤维外，其他的一些相关技术如纺织技术、复合材料中树脂的选择以及复合材料的加工工艺，也有非常重要的影响。首先，纤维纺织时机织布纱的纤度的选择和整个纺织结构的设计、纺织过程中怎样减少对纤维的性能的影响以及纺织过程中静电的去除、防水处理等后加工技术也同样比较重要；其次，机织布用来作为防弹层时，缝制形状的选择也是有影响的，目前，大多数的选择是缝制成长方形、正方形或菱形，但是这些形状的选择及其相应的尺寸规格均对防弹性能和穿着的舒适性有不同的影响；再次，在材料的应用上，材料混杂是今后防护材料的发展一个方向。混杂是一高层次的增强方式，不同材料之间相互取长补短、匹配协调，使之发挥优异的综合性能，若采用不同的混杂比、不同的混杂结构进一步拓宽适应性，增大设计使用自由度，设计得当的混杂复合材料还具有优异的功能性[8]。不同的材料混杂组合不仅使材料的性能得到了很大的提高，而且材料的价格等方面也有很大的优势，见表3。

表3　不同混杂组合方式材料性能与价格比较

Tab.3 Properties and price comparison of different material hybrid combinations

材料	Kevlar 29 (K29)	Kevlar 129 (K129)	K129/K29	Dyneema UD66 SB1	K129/SB1	Dyneema UD75 SB2	K129/SB2
归一化面密度	3.9	2.8	3.1	2.7	2.8	2.3	2.7
归一化面密度价格	1	1.04	0.99	1.74	1.36	1.41	1.15

3　结语

高性能纤维及其复合材料是今后防护装备的发展方向。从其发展历程可以看出，每一次随着新一代纤维及其复合材料的应用，相应的防护装备水平就有了一个提高。

另外，复合材料中所用的树脂也相当重要，所用树脂首先应该与纤维有良好的相容性；同时树脂必须满足强度、模量、防化学性能、气候适应性、耐久性等要求及其他特殊要求。高性能纤维及其复合材料的应用技术也很重要。

总之，随着科学技术的发展，防护装备的材料也会随之发展。近年来我国在高性能防护装备材料技术方面有了一些进步，但是与国外还有一定的差距，有些材料还处于空白。因此，除了应加强对防护装备产品研究的外，还应该加强对相关材料的研究，使我国的复合材料在防护装备上的应用能处于世界领先地位。

参考文献：

[1]　汤胜博，孙建科，常鹏北，等. 纳米材料在防弹衣上的应用[J]. 材料开发与应用，2009，24(2)：60－61.

[2]　咸兴平，刘禄胜，于静. 防弹衣的防护机理及防护性能分析[J]. 中国个体防护装备，2007(2)：22－24.

[3]　袁承军. 高性能纤维和材料在防弹衣上的应用[J]. 中国个体防护装备，2005(5)：28－29.

[4]　周庆，梁子青，王涛. 超越“凯夫拉”的神奇纤维-超高分子量聚乙烯纤维[J]. 现代军事，2002(10)：30－32.

[5]　苏武，黄英，吴道伟. PBO纤维表面改性新进展[J]. 玻璃钢/复合材料，2008(4)：19－21.

[6]　林兰天，周静. PBO-AS纤维的力学性能探讨[J]. 上海纺织科技，2004，32(1)：5－7.

[7]　邱峻. 纳米 TiO_2 溶胶制备及其对PBO纤维抗紫外光老化的影响[J]. 盐城工学院学报，2009，22(1)：35－39.

[8]　王亮亮，孙志杰. 混杂纤维丝束冲击拉伸性能实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料，2004(3)：19－21.