

开发与应用

超高分子量聚乙烯纤维复合材料的应用
及其抗侵彻性能研究

苏罗川 宜晨虹* 刘文杰

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621999)

摘 要 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维因在比强度上的巨大优势引起科研技术人员的广泛关注(其密度约为 $0.97\text{g}/\text{cm}^3$, 而抗拉强度可达 GPa 量级)。研究表明, 以 UHMWPE 纤维作为主要组分的复合板在侵彻防护领域具有极大的应用潜能, 其防护效率明显优于现有陶瓷、轻金属等抗侵彻材料。介绍了 UHMWPE 纤维的基本性质、发展现状及其抗侵彻机理, 概述了以 UHMWPE 纤维为主要组分的复合材料在抗侵彻领域中的应用, 指出了 UHMWPE 纤维复合材料发展中有待解决的问题。

关键词 超高分子量聚乙烯, 复合材料, 抗侵彻

Ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced
composite and its ballistic performance

Su Luochuan Yi Chenhong Liu Wenjie

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999)

Abstract Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber has attracted researchers' attentions in recent years due to its high specific strength. It has a density of $\rho \approx 0.97\text{g}/\text{cm}^3$ and tensile strength is in excess of GPa. As a result, UHMWPE fiber reinforced composite laminates are used extensively in ballistic protection and possess very high ballistic penetration resistances. Its ballistic performance is much better than that of ceramics or light metal. The properties of UHMWPE fiber reinforced composite and its mechanism on ballistic resistances were introduced. In addition, the ballistic application and the future development of UHMWPE composite were summarized and analyzed.

Key words ultra-high molecular weight polyethylene, composite, ballistic performance

作为目前世界上比强度最高的工程材料之一, 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维及其复合材料因独特的抗冲击、抗侵彻优势在冲击防护领域, 如防弹衣、防弹头盔、武器装甲以及航天器结构件等领域^[1-2]得到广泛应用。相比于铝、陶瓷等其他轻质抗侵彻材料, UHMWPE 纤维复合材料在密度上的巨大优势(密度约为 $0.97\text{g}/\text{cm}^3$)使其在抗侵彻过程中的比能量吸收效率极高, 这对于防护结构的轻质减重具有十分重要的意义^[3-4]。因此, 近年来 UHMWPE 纤维及其复合材料引起国内外学者的普遍关注^[5-10]。

1 UHMWPE 纤维的性质

UHMWPE 纤维相对分子质量通常在 $100 \times 10^4 \sim 600 \times 10^4$ 之间, 20 世纪 70 年代 UHMWPE 纤维被荷兰帝斯曼集团注册专利并商业化之后, 从 90 年代开始获得大量的工程应用, 其中帝斯曼集团 Dyneema® 系列和美国 Honeywell 集团 Spectra® 系列在众多 UHMWPE 纤维中抗侵彻性能最为优良^[11-12]。表 1 列出了目前常用工程纤维的主要物理性质。

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC:11602246)

作者简介: 苏罗川(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事新型轻质防护材料力学性能研究。

联系人: 宜晨虹(1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事先进防护材料设计。

表 1 常用工程纤维主要物理性质^[2]

纤维类型		密度/(g·cm ⁻³)	模量/GPa	断裂强度/GPa	断裂应变/%	Cunniff 参量 C [*] /(m·s ⁻¹)
Kevlar	29 系列	1.44	70~91	2.9~3.0	3.0~4.2	621~671
	129 系列	1.44	96~99	2.9~3.4	3.3~3.5	648~695
	149 系列	1.47	185	3.4	2.0	638
Vectran	HS 系列	1.40	80	2.5	2.7	570
	HT 系列	1.40	75	3.2	4.3	686
	UM 系列	1.40	103	3.0	2.9	604
PBO	Zylon	1.54	180	5.8	3.5	893
PIPD	M5	1.70	300~330	3.5~8.5	2.5~4.5	864~940
Polyamide	Nylon	1.14	10	0.9	9.5~28	480~690
Polypropylene	Tegris	0.78	14	0.5	6	431
UHMWPE(Dyneema)	SK 65	0.97	95	3.0	3.6	820
	SK 75	0.97	107	3.4	3.8	888
	SK 76	0.97	116	3.6	3.8	917
UHMWPE(Spectra)	1000 系列	0.97	97~120	2.6~3.3	2.8~3.5	749~807
	2000 系列	0.97	116~124	3.2~3.3	2.9~3.0	810~836
	3000 系列	0.97	115~122	3.2~3.4	3.3	844~867

注:C^{*}表示抗侵彻能力。

从最有利于能量吸收的角度出发,应用于抗侵彻领域的纤维材料应具有以下特点^[2]:(1)高拉伸断裂强度;(2)高断裂应变;(3)高弹性模量。Cunniff^[3]的研究进一步证明纤维自身的密度也是影响其抗侵彻能力的关键指标,纤维侵彻能力可以用如下参数进行评价:

$$C^* = (\frac{\sigma_f \epsilon_f}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}})^{1/3} \tag{1}$$

式中,C^{*}表示抗侵彻能力,m/s; $\sigma_f \epsilon_f / (2\rho)$ 代表纤维的比能量吸收率,J/g; $\sqrt{E/\rho}$ 代表纤维的弹性波速,km/s。

从表 1 列出的常用工程纤维的 Cunniff 参量 C^{*}可以发现,PBO 的 Zylon 系列、PIPD 的 M5 系列以及 UHMWPE 的 SK76 系列的 C^{*}值明显高于其他纤维材料。由于 M5 纤维尚处于商业开发阶段,而 Zylon 纤维又不利于环境降解,因此 UHMWPE 纤维备受关注^[2]。相关实验研究也表明,利用 UHMWPE 纤维制备的复合材料其抗侵彻效率明显高于其他材料^[5,13-14]。此外,UHMWPE 纤维较低的密度也使得其高度契合防护结构具备了轻量化发展趋势。因此,在众多的纤维材料中,UHMWPE 纤维在侵彻

防护领域获得了较多的应用和研究。

2 UHMWPE 纤维增强复合材料

2.1 复合材料细观结构

在实际应用中,单纯的纤维并不能用于侵彻防护。研究表明,以环氧树脂等热塑性聚合物为基质材料,将直径 10~20μm 的 UHMWPE 纤维按照 [0°/90°]_n 方向交替排列铺设,通过热压工艺形成的叠层复合材料(纤维体积约为 85%)具有极佳的抗侵彻性能^[7,11,15]。

通过分析 UHMWPE 复合材料的细观结构可知,除了纤维的性质外,纤维与基质之间界面的粘合也将在很大程度上影响复合材料的整体性质,而实验结果也证实了界面粘接强度对复合材料抗侵彻性能影响较大^[16-17]。为了获得较好的界面粘接性能,通常要对 UHMWPE 纤维表面进行改性处理,常用处理方法包括物理方法、化学方法等。此外,基质材料环氧树脂在湿热条件下力学性能会下降,不利于复合材料的长期使用,因此,UHMWPE 复合材料中使用的环氧树脂往往也要经过改性处理。

2.2 抗侵彻机理

纤维以[0°/90°]_n 特殊形式排布的 UHMWPE

复合材料,其抗侵彻机理不同于一般的复合材料。根据复合材料板的厚度差异,其抗侵彻机理主要分为两类。

对于较薄的复合材料板,其主要以弯曲拉伸失效模式抵御侵彻体^[5,13]。复合面板在外界侵彻体的冲击作用下向面外发生较大的弯曲变形,纤维内会随之产生相应的拉伸应力从而抵抗该面外弯曲。当拉应力不超过纤维断裂强度时,侵彻体即被阻止。相关实验结果表明^[17],在拉伸失效模式下,当侵彻体入射速度低于弹道极限速度(V_0)之前,不会出现任何纤维断裂;而一旦入射速度高于 V_0 ,复合板被整体穿透,即不存在部分纤维断裂但复合板未被穿透的现象。

对于较厚的复合材料板,其主要以间接拉伸形式失效^[18-20]。侵彻体的冲击作用使得接触点下方的纤维层处于压缩状态,而 UHMWPE 复合材料内各纤维层的泊松膨胀系数在平行和垂直纤维方向存在较大的差异,这使得被压缩纤维层的侧向膨胀会引发与其垂直的相邻纤维层产生拉伸应力^[12]。当拉伸应力达到纤维断裂强度时,纤维开始出现断裂,进而侵彻体继续冲击下方的纤维层;而一旦冲击带来的压缩应力不足以引发使纤维断裂的拉应力时,侵彻体被阻止,该种失效模式广泛存在于因拉伸失效的复合材料中^[21]。

在对 UHMWPE 复合材料的直接观察中并未发现侵彻作用下常见的剪切失效机理^[19]。在上述 2 种常见失效模式中,由于 UHMWPE 复合材料在实际应用中受边界条件和支撑条件的约束而不能发生较大的面外变形,间接拉伸失效模式更为常见^[16-17,22]。因此,在 UHMWPE 复合材料的抗侵彻应用中,除了提高纤维自身的拉伸断裂强度之外,如何在侵彻体速度一定的情况下减小其冲击时对接触纤维层的压缩应力被认为是提高材料抗侵彻效能的重要途径。

3 常见应用形式

无论是弯曲拉伸失效模式还是间接拉伸失效模式,纤维的拉伸强度都是影响其抗侵彻能力的关键因素,而相比于其他材料,UHMWPE 纤维的高拉伸强度正是其独特优势。因此,在实际的抗侵彻应用中,UHMWPE 纤维及其复合材料表现出优异的抗侵彻性能。对于中低速侵彻,单独的 UHMWPE 复合材料板即可很好地实现防护功能;而对于高速

侵彻(一般速度在 2km/s 以上)的防护,通常需要将 UHMWPE 纤维复合材料与陶瓷、轻金属等组成复合结构,充分发挥各组分材料的侵彻防护优势,提高防护效率^[4]。

目前以 UHMWPE 纤维复合材料为组分的典型抗侵彻结构主要包括两类:(1)UHMWPE 复合材料包裹陶瓷或者金属铝的叠层复合体^[2];(2)外层为 UHMWPE 复合材料,而内部结构是在波纹夹芯铝板内填充陶瓷块^[23],复合材料内部的夹芯部分也可以为点阵金属结构。UHMWPE 通过环氧树脂粘合剂并在一定的热压工艺下实现与芯部结构复合。

在利用金属铝韧性以及陶瓷硬度优势的基础上,上述两类典型抗侵彻结构还能进一步发挥 UHMWPE 纤维的防护优势^[23]。以外层为 UHMWPE 纤维复合材料,而内部结构是在波纹夹芯铝板内填充陶瓷块的抗侵彻结构为例,侵彻体首先穿透表层的复合材料层,再作用于内部的夹芯填充结构,硬质的陶瓷一方面可以使侵彻体钝化或碎裂,另一方面其自身的大范围碎裂可以吸收部分侵彻能量,从而降低侵彻体的持续穿透能力。进而,碎裂的陶瓷和减速的侵彻体共同作用于夹芯结构的铝背板,铝材料良好的韧性将扩大侵彻体作用于背面 UHMWPE 纤维复合材料的区域,从而降低接触压力。另外,在侵彻体穿透中间夹芯的过程中,背面的复合材料会获得向面外的预加速,从而降低侵彻体与其直接作用时的相对速度,这也能很大程度降低二者间的接触压力。接触压力的减小将直接导致纤维内承受的拉应力下降,而最终使得侵彻体难以穿透背部复合材料。相关测试表明^[24],UHMWPE 纤维复合材料与点阵金属夹芯板(孔隙内同样填充陶瓷)组成的复合结构也具有出色的抗侵彻效率。

4 结语与展望

基于对 UHMWPE 纤维及其复合材料力学性能和抗侵彻机理的认识,UHMWPE 纤维复合材料目前在各类抗侵彻结构中获得了越来越多的应用,特别是对防护结构的轻质减重起到了关键作用。为进一步发挥 UHMWPE 纤维复合材料在防护领域的应用潜力,以下问题还有待研究和探讨:

(1)强空气冲击波和高速破片群联合作用时,UHMWPE 复合材料的失效机理和防护效率。在一些实际防护应用中,常常涉及到空气冲击波和高

速破片群的联合毁伤,而目前有关这方面的研究相对缺乏。

(2)UHMWPE 纤维复合材料中纤维与基质材料间的粘接强度以及基材的物理性质对复合材料抗侵彻性能影响的定量或半定量描述。现有的研究已证明基材的物理性质及其与纤维间的粘接强度对复合材料的侵彻防护具有重要影响,而如果能够获得该影响的定量或半定量描述将对复合材料自身结构的优化和防护结构的精确设计提供参考。

参考文献

- [1] 朱武,黄苏萍,周科朝,等.超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的研究现状[J].材料导报,2005,19(3):67-70.
- [2] O'Masta M R, Deshpande V S, Wadley H N G. Mechanisms of projectile penetration in Dyneema encapsulated aluminum structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 74(1):16-35.
- [3] Cunniff P M. Dimensionless parameters for optimization of textile based body armor systems[C]. 1999:1303-1310.
- [4] Ong C W, Boey C W, Hixson R S, et al. Sinibaldi, advanced layered personnel armor[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(1):369-383.
- [5] Nguyen L H, Stephen S R, Cimpoeru S J, et al. The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75(1):174-183.
- [6] Attwood J P, Fleck N A, Wadley H N G, et al. The compressive response of ultra-high molecular weight polyethylene fibres and composites[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 71(1):141-155.
- [7] Karthikeyan K, Russell B P, Fleck N A, et al. The soft impact response of composite laminate beams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 60(1):24-32.
- [8] 高恒,杜建华,刘艺.超高分子量聚乙烯纤维二维织物抗弹性能研究[J].化工新型材料,2014,42(1):229-232.
- [9] 李翠玉,杨雪,冯亚男,等.不同层数的超高分子量聚乙烯纬平针织复合材料冲击损伤[J].复合材料学报,2015,32(2):557-564.
- [10] 张颖异,李冰川,刘发杰. PE-UHMW 抗弹复合材料及其在防护领域中的应用[J].工程塑料应用,2015,43(10):137-140.
- [11] Zhang T G, Satapathy S S, Vargas-Gonzalez L R, et al. Ballistic impact response of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) [J]. Composite Structures, 2015, 133(1):191-201.
- [12] Attwood J P, Khaderi S N, Karthikeyan K, et al. The out-of-plane compressive response of Dyneema® composites [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 70(1):200-226.
- [13] Phoenix S L, Porwal P K. A new membrane model for the ballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(1):6723-6765.
- [14] Russell B P, Karthikeyan K, Deshpande V S, et al. The high strain rate response of ultra high molecular-weight polyethylene: from fibre to laminate[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 60(1):1-9.
- [15] Chocron S, King N, Bigger R, et al. Impacts and waves in Dyneema® HB80 strips and laminates[J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 80(3):031806010-031806011.
- [16] Karthikeyan K, Russell B P, Fleck N A, et al. The effect of shear strength on the ballistic response of laminated composite plates[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2013, 42(1):35-53.
- [17] Karthikeyan K, Russell B P. Polyethylene ballistic laminates: failure mechanics and interface effect[J]. Materials and Design, 2014, 63(1):115-125.
- [18] O'Masta M R, Crayton D H, Deshpande V S, et al. Mechanisms of penetration in polyethylene reinforced cross-ply laminates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 86(1):249-264.
- [19] Attwood J P, Russell B P, Wadley H N G, et al. Mechanisms of the penetration of ultra-high molecular weight polyethylene composite beams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 93(1):153-165.
- [20] Liu G, Thouless M D, Deshpande V S, et al. Collapse of a composite beam made from ultra high molecular-weight polyethylene fibres[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 63(1):320-335.
- [21] O'Masta M R, Deshpande V S, Wadley H N G. Defect controlled transverse compressive strength of polyethylene fiber laminates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 52(1):130-149.
- [22] Greenhalgh E S, Bloodworth V M, Iannucci L, et al. Fractographic observations on Dyneema® composites under ballistic impact[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 44(1):51-62.
- [23] O'Masta M R, Compton B G, Gamble E A, et al. Ballistic impact response of an UHMWPE fiber reinforced laminate encasing of an aluminum-alumina hybrid panel[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 86(1):131-144.
- [24] Yungwirth C J, O'Connor J, Zakraysek A, et al. Explorations of hybrid sandwich panel concepts for projectile impact mitigation[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(1):S62-S75.

收稿日期:2017-09-10

修稿日期:2018-10-10