

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.07.012

牵伸倍数对PE-UHMW膜材料性能的影响

钱佳伟, 李伟萍, 龙知洲, 马天

(军事科学院系统工程研究院, 北京 100010)

摘要: 高性能纤维增强树脂基复合材料的发展促进了防弹装备的发展, 在面对高能杀伤武器威胁加剧和单兵携行负荷增加的情况下, 防护装备高防护、轻量化的需求日益迫切, 超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)膜材料的出现, 有助于满足轻质高防的需求。PE-UHMW条带作为PE-UHMW膜材料的最小组成, 对膜材料性能的影响决定防弹装备的性能。为探究不同牵伸倍数对膜材料性能的影响, 选取由不同牵伸倍数条带制备的膜材料开展理化特性、力学性能和防弹性能研究。测试分析发现, PE-UHMW膜材料在分子量、结晶度、取向度等理化特性的不同使层压得到的复合材料力学性能有所差异, 进而在不同弹击条件下防弹性能呈现出差异化特点。由高倍牵伸条带制备的膜材料分子量达到5 658 000 g/mol, 由其制备的复合材料具有更加优异的力学性能, 弯曲强度为102.12 MPa, 弯曲弹性模量为23.30 GPa, 剪切强度为8.60 MPa, 经过层压制备的8 kg/m²面密度靶板在常温条件下防1.1 g标准模拟破片V50值达到了804.50 m/s, 51式7.62 mm手枪弹弹着点弹痕高度为13.20 mm。在树脂体系与加工工艺一致的情况下, 由高牵伸倍数PE-UHMW条带制备的PE-UHMW膜材料在力学和防弹性能方面具有明显优势, 具备在个体防护领域的应用潜力。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 牵伸倍数; 膜材料; 性能; 防弹

中图分类号: TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)07-0078-09

Effect of drafting ratio on the properties of PE-UHMW film material

QIAN Jiawei, LI Weiping, LONG Zhizhou, MA Tian

(Systems Engineering Institute, Academy of Military Science of PLA, Beijing 100010, China)

Abstract : The development of high-performance fiber-reinforced resin-based composites promotes the development of bullet-proof equipment. Facing with the increasing threat of high-energy killing weapons and the increasing load of individual soldiers, the demand for high protection and light weight of protective equipment is increasingly urgent. The appearance of ultra-high molecular weight polyethylene (PE-UHMW) film material is helpful to realize the demand of light weight and high protection. As the smallest component of PE-UHMW film material, the influence of PE-UHMW tape on the performance of film material is related to the performance of bulletproof equipment. Membrane materials prepared from strips with different draft ratios were selected to study their physical and chemical properties, mechanical properties and bulletproof properties. The test and analysis show that the mechanical properties of the laminated composites are different due to the different physical and chemical properties of the film materials, such as molecular weight, crystallinity and orientation, and then the bulletproof properties show different characteristics under different impact conditions. The molecular weight of the membrane material prepared by high-magnification drafting strip reaches 5 658 000 g/mol, and the composite material prepared from it has more excellent mechanical properties, with the bending strength of 102.12 MPa, the bending modulus of 23.30 GPa and the shear strength of 8.60 MPa. The V50 value of the 8 kg/m² area density target plate against 1.1 g standard simulated fragments reaches 804.50 m/s at room temperature, and the bullet impact point height of the 51-type 7.62 mm pistol bullet is 13.20 mm. Under the condition that the resin system is consistent with the processing technology, The mechanical properties and bulletproof properties of the PE-UHMW film material prepared by PE-UHMW tape with high draft ratio has obvious advantages, and has potential application in the field of individual protection.

Keywords : ultra-high molecular weight polyethylene ; drafting ratio ; film material ; property ; bullet-proof

通信作者: 马天, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向防护材料与装备

收稿日期: 2024-06-01

引用格式: 钱佳伟, 李伟萍, 龙知洲, 等. 牵伸倍数对PE-UHMW膜材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 78-86.

QIAN Jiawei, LI Weiping, LONG Zhizhou, et al. Effect of drafting ratio on the properties of PE-UHMW film material[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(7): 78-86.

高能杀伤武器的快速发展和单兵携行负荷的增加,使得对于防护装备高防护、轻量化的需求日益迫切。相比于最初的青铜、装甲钢等金属材料,高性能纤维增强树脂基复合材料受到弹道冲击时,能将弹丸动能转化为靶板的势能^[1-2],材料的发展促使防弹装备实现了大幅减轻质量和防护性能的跃升。以芳纶材料为代表的高性能非金属材料的运用,标志着以防弹头盔为代表的个体防护装备进入了新的发展阶段。对位芳纶防弹材料具有弹击凹陷小的特点^[3],但其弹道极限V50值(完全穿透概率为50%时的平均弹道速度)提升存在瓶颈,在对位芳纶结构中加入第三单体后获得的芳纶Ⅲ纤维,虽能提升防护装备性能^[4-5],如何在批量稳定制备的前提下进一步降低成本仍是其目前推广运用需要克服的难题。超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维的出现为防护领域提供了新的材料解决方案^[6],其轻质高强的特点使研制质量更轻、佩戴更舒适的防弹头盔成为可能^[7-8],在同等盔体质量下,其较芳纶头盔具有更高的V50值,但存在弹击凹陷大的问题^[9],若要控制弹击凹陷,势必需要增加盔体质量,盔体质量越大,同等弹道冲击下对颈颈部损伤越大^[10-12],可能并不利于士兵战场生存。

PE-UHMW膜材料由经过固态挤出、超倍牵伸制得的PE-UHMW条带作为最小单元,经面内平行接缝排列、层间正交铺层制备。其层间结构与PE-UHMW无纬(UD)布相似,但是铺层单元的差异使PE-UHMW膜材料避免了纤维间的间隙对材料性能的影响,同时高度取向的结构,有望兼具芳纶材料与PE-UHMW纤维的优点^[13]。条带的性能是PE-UHMW膜复合材料性能优劣的主要影响因素之一。牵伸是PE-UHMW制备中的重要工艺环节,采用不同牵伸倍数制得的条带是否会对PE-UHMW膜材料的理化特性、力学性能产生影响,进而对其制造的防护装备存在影响,事关PE-UHMW膜材料在个体防护领域的具体运用。

因此,分别采用经低倍牵伸和高倍牵伸制得的条带铺层制备得到PE-UHMW膜材料,表征分析不同膜材料的理化特性和力学性能,进而通过对不同膜材料制备的靶板进行弹击测试,分析牵伸倍数对防弹性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PE-UHMW膜A:由低倍拉伸(100:1~180:1)条

带A制备,聚烯烃树脂体系,0°/90°正交铺叠的4UD结构,面密度(100±5) g/m²,郑州中远防护材料有限公司;

PE-UHMW膜B:由高倍拉伸(250:1~400:1)条带B制备,聚烯烃树脂体系,0°/90°正交铺叠的4UD结构,面密度(100±5) g/m²,郑州中远防护材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

高温黏度测定仪:GN 020,上海实验仪器厂有限公司;

X射线衍射光谱(XRD)仪:D8 Advance,德国布鲁克公司;

小角X射线散射仪:Xeuss 2.0,法国赛诺普公司;

差示扫描量热分析(DSC)仪:DSC Q2000,美国TA公司;

万能材料实验机:INSTRON 5567,美国英斯特朗公司;

光学显微镜:BX53M,日本奥林巴斯株式会社;

扫描电子显微镜(SEM):SU8100,日本日立株式会社。

1.3 测试与表征

(1)理化特性测试。

分子量:参照ISO 1628-3:2010,ASTM D4020-2018,取5 mg样品溶于22.5 mL十氢萘溶剂中,在135 °C恒温水浴中利用内径为0.46 mm的粘度计进行测定,其中分子量 $M=53\,700\cdot\eta^{1.49}$ 。

结晶度:参照JY/T 0587-2020,采用Cu靶K α 射线,电压40 kV,电流40 mA,扫描范围10°~90°,扫描速度6°/min,分析A膜、B膜两种材料的结晶结构。

取向度:采用Cu靶,功率为30 W,波长为1.541 89,探测器为Pilatu 3R 300K,单个像素大小为172 μ m,通过测量聚合物的衍射图案,分析A膜、B膜两种材料的取向度。

热性能:将两种膜材料剪碎,称取5~10 mg的样品,测试温度范围为50~250 °C,升温速率10 °C/min,氮气保护,流量50 mL/min,对膜材料进行热性能分析。

(2)力学性能测试。

拉伸性能:参照GB/T 1447-2005,拉伸样条尺寸为250 mm×25 mm,夹具间距150 mm,预加张力

2 N,拉伸速度为25 mm/min。

剥离强度:根据低树脂含量防弹复合材料在弹道侵彻过程中发生分层的形式特点,参照 GB/T 2791-1995,剥离样条尺寸为200 mm×25 mm,预剥离长度为50 mm,夹持器隔距为50 mm,加载速度为100 mm/min,剥离长度为150 mm,测试过程中将试样拉伸至完全剥离。

弯曲强度:参照 GB/T 1449-2005,弯曲样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,采用三点弯曲模式,跨距 $L=64$ mm,加载速度为2 mm/min。

剪切强度:参照 GB/T 30969-2014, GB/T 28889-2012,剪切样条尺寸为25 mm×9 mm×4 mm,采用短梁法三点弯曲模式,跨距为16 mm,加载速度为1 mm/min。

动态力学性能:样品尺寸为12 mm×12 mm×4 mm,采用霍普金森杆,测试其在20,40,70 °C等3个温度条件下及1 500,2 500,3 500 s⁻¹等3个应变率条件下的动态力学响应。

(3)防弹性能测试。

利用弹道极限V50值测试系统,对层压形成的面密度为7.0,8.0 kg/m²的400 mm×400 mm正方形靶板,分别采用1.1 g标准模拟破片和弹速为(445±10) m/s的51式7.62 mm手枪弹(铅芯),测定常温、高温条件下靶板的弹道极限V50值和弹着点弹痕高度,计算比能量吸收(SEA)值。以AC-7,BG-8为例,分别代表在常温条件下测试的A膜面密度为7.0 kg/m²的靶板、在高温条件下测试的B膜面密度为8.0 kg/m²的靶板。

2 结果与讨论

2.1 理化特性

2.1.1 分子量

PE-UHMW膜材料的分子量见表1,两种膜材料均具有很高的分子量 M ,分别达到了5 488 000 g/mol和5 658 000 g/mol,对比同种树脂体系、同种结构的聚乙烯无纬(PE-UD)布分子量可见,膜材料的分子量在加工过程中降低较少,这是由条带工艺流程短、加工强度相对较低所决定的。PE-UHMW材料作为柔性主链大分子,分子量的提高会使分子链

变长,链间缠结点增多,拉伸破坏所需要的能量越高,材料会表现出更大的拉伸强度。同时,柔性链高分子材料的分子链越长,则分子链的旋转、移动更容易,因此材料表现出更大的拉伸变形。

2.1.2 结晶度

XRD谱图如图1所示,两种膜材料的结晶结构相似,衍射峰位置基本一致,均在21.4°和23.9°时分别具有(110)晶面和(200)晶面,是结晶聚乙烯的典型特征。根据经验公式计算两种膜材料的结晶度可知:A膜为85.2%,B膜为81.6%。高结晶度会使得材料拥有更高的拉伸强度,但同样可能会降低其抵抗拉伸变形的能力,这是因为结晶限制了分子链的变形,在抵抗弹丸侵彻时,可能更易断裂。

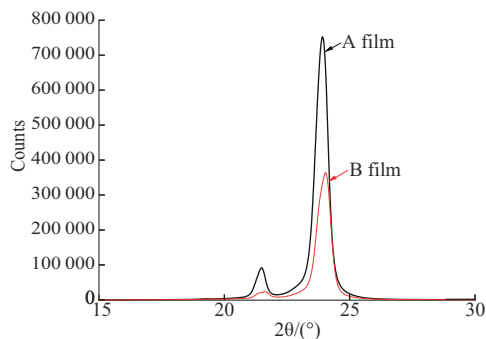


图1 PE-UHMW膜材料XRD谱图

Fig. 1 XRD spectra of PE-UHMW film materials

2.1.3 取向度

取向度是反映材料内部分子结构规整性的重要参数,当样品存在取向时,取向度面扫图中的衍射环会变成弧形,衍射弧越窄,取向度越高。取向程度的提高,会显著提高结晶聚合物的拉伸性能。两种膜材料的取向度面扫图如图2所示,均形成了系列对称弧段、斑点,表明两种膜中分子均结晶取向。结合图1可知,B膜两峰的峰半宽比小于A膜,即B膜具有相对更高的取向度。

2.1.4 热性能

两种膜材料的DSC曲线如图3所示。两种膜材料均有明显的结晶熔融峰,第一个熔融峰为两种膜材料表面涂敷的树脂熔融峰,第二个熔融峰为两种膜材料自身的熔融峰,两个熔融峰温 T_m 均在123 °C和149 °C附近,表明两种膜材料成分组成一致的,采用相同的树脂体系胶膜。就两种材料自身的熔融峰来看,A膜的起始温度 T_i 小于B膜,由于PE-UHMW的熔融特性,初始温度越高,越有利于在较高温度下对膜材进行加工,避免因加工温度导致的

表1 PE-UHMW膜材料分子量

Tab. 1 Molecular weight of the PE-UHMW film materials

10 ⁴ g/mol			
Type	A film	B film	PE-UD
M	548.8	565.8	407.6

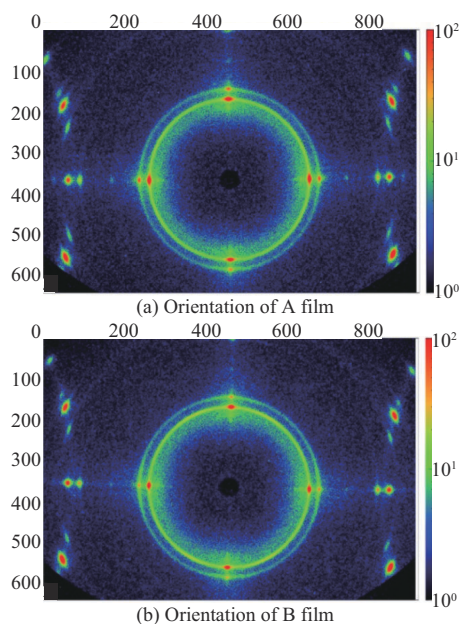


图2 PE-UHMW膜材料取向度面扫图

Fig. 2 Orientation of PE-UHMW film materials

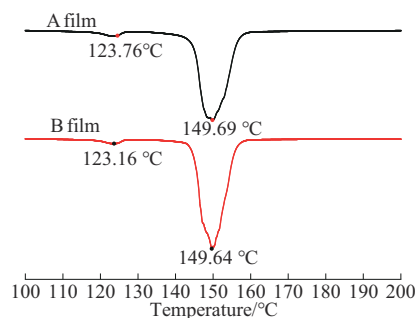


图3 PE-UHMW膜材料DSC曲线

Fig. 3 DSC spectra of PE-UHMW film materials

自身熔融变化。B膜的终点温度 T_f 小于A膜,具有较短的熔程,考虑到两者结晶度之间的差异,表明B膜中分子量分布更加集中,结晶规整性更好,需要更多能量才能发生熔融,使得B膜可能具有更好的力学性能和防弹潜力。

由理化特性分析可知,两种膜材料虽由不同牵伸倍数的条带组成,但具有相同的物质构成,均为PE-UHMW材料,在分子量组成、分子量分布、取向度、结晶度、热性能等存在差异。A膜具有较高的分子量和结晶度,但其分子量分布的不均一性,使其取向度和热性能稍逊于B膜,该差异是否会对材料的性能造成影响,有必要通过力学性能分析,进一步对比条带差异带来的性能变化。

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸性能

膜材料的拉伸应力-应变曲线如图4所示。计

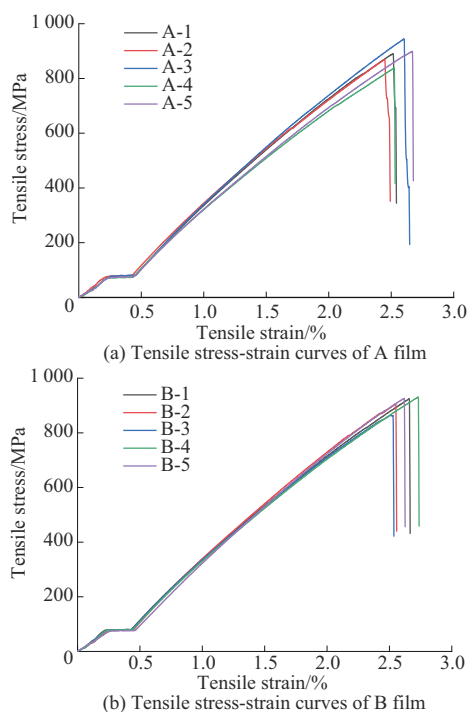


图4 PE-UHMW膜材料拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curves of PE-UHMW film materials

算得到A膜拉伸强度均值为888.51 MPa,拉伸弹性模量均值为45 018.43 MPa,断裂伸长率为2.55%;B膜拉伸强度均值为910.56 MPa,拉伸弹性模量均值为43 544.33 MPa,断裂伸长率为2.61%。由于膜材料为柔性材料,在初始阶段充分伸展,曲线呈现非线性变化;随着拉伸应力的增加,拉伸应变呈线性增加,到达断裂极限时瞬间失效,应力急剧下降。分子链中的局部缚结在拉伸过程中伸长断裂形成微孔;应力的增加使分子链发生滑移,微孔扩展形成裂缝,并不断增长扩大,达到临界尺寸,沿着条带中的薄弱途径迅速扩展而造成条带断裂,最终使膜材料整体发生断裂。

A膜曲线较为分散,不同膜带间的应力-应变存在差异;B膜曲线较为集中,不同膜带间的应力-应变曲线大致一致,表明B膜的拉伸性能较为均一。不同样品间的性能差异较小,B膜选用条带的均一性较A膜选用条带好,与分子量分布特点具有较高的一致性。

拉伸断口形貌低倍图如图5所示。由图5可知,膜材料由条带层间正交铺叠而成,拉伸过程中拉伸方向的条带受到拉伸作用,由于拉扯受力的不均一性,条带被撕裂形成宽窄不一的细条,在达到拉伸断裂阈值时发生断裂,断口形貌明显。与拉伸方向正交的横向条带,在拉伸的作用下,也出现了



图5 PE-UHMW膜材料拉伸后断口形貌(低倍)

Fig. 5 Fracture surface of PE-UHMW film after stretching (low multiples)

条带的撕裂,撕扯形成宽度较大的细带。

拉伸断口形貌高倍图如图6所示,由图6a可见,拉伸破坏使得条带在撕裂的边缘出现了大小不一、弯曲错杂的丝状结构。图6b则显示,除拉伸方向条带受到拉伸作用发生断裂之外,膜材表面的树脂层也由于条带的断裂和外力的拉扯,出现撕裂、边缘蜷曲等现象。在拉伸作用下,膜材料整个断口由于发生条带断裂、丝状结构等,断口形貌较为杂乱、不规整,不同方向的条带在拉伸作用下的破坏形式存在差异,并非所有条带在拉伸方向发生断裂,与拉伸方向正交的条带以横向撕裂为主。条带间、层与层之间都存在树脂层以提供黏结力,起到了缓解整体断裂速度的作用,拉伸断裂的不同时性,导致PE-UHMW膜材料拉伸强度无法达到理论最大值。

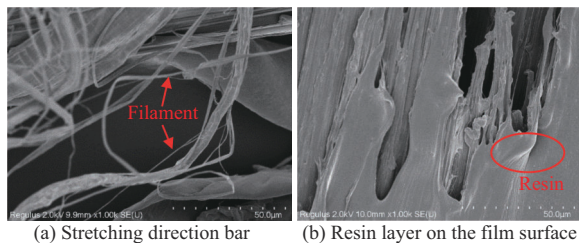


图6 PE-UHMW膜材料拉伸后断口形貌(高倍)

Fig. 6 SEM surface of PE-UHMW film after stretching (high multiples)

2.2.2 剥离强度

A膜、B膜的剥离强度见表2,A膜的剥离强度均值为0.27 N/mm,B膜的剥离强度均值为0.23 N/mm。两种膜材料选用相同的树脂体系和加工工

表2 PE-UHMW膜材料层间剥离强度

Tab. 2 Interfacial peel strength of PE-UHMW film materials

Type	N/mm					Average value
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	
A film	0.23	0.30	0.24	0.30	0.30	0.27
B film	0.17	0.28	0.22	0.19	0.28	0.23

艺,表面化学结构相同,应该具有相近的界面剥离强度。测试中出现的界面剥离强度的差异主要是由于压制过程中难以避免局部应力集中,导致剥离强度发生变化。剥离后形貌如图7所示,由图7a可见,膜材料出现了明显的剥离痕迹,出现了条带的撕裂与分离,形成了较多细小且杂乱的丝束。由图7b可见,由于剥离的不同时性,存在树脂被剥离分层。表明膜材料在受到外力发生剥离时,基体与增强相均会通过自身的分层、撕裂耗散能量。适当的剥离强度能够发挥材料的分层耗能机制,吸收弹丸侵彻能量,但过高的剥离强度意味着界面间结合得更加紧密,并不利于发挥材料的抗侵彻能力,因此需要综合考虑层压复合材料的界面结合强度,合理选择适当剥离强度的膜材。

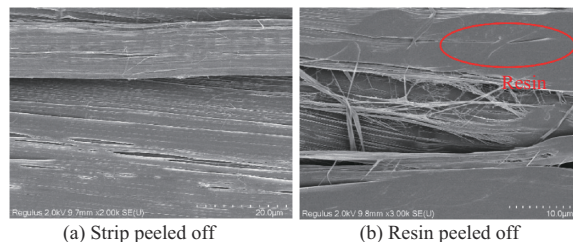


图7 PE-UHMW膜材料剥离后形貌

Fig. 7 Surface of PE-UHMW film after peeling

2.2.3 弯曲性能

A膜、B膜样品的弯曲强度如图8所示。由图8可见,A膜弯曲强度均值为88.10 MPa,弯曲强度方差为16.80,弯曲弹性模量均值为21.60 GPa。B膜弯曲强度均值为102.12 MPa,弯曲强度方差为4.97,弯曲弹性模量均值为23.30 GPa。B膜的弯曲强度方差显著小于A膜的方差,表明B膜不仅在弯曲强度上具有优势,还在强度分布均匀性上明显优于A膜,说明B膜材料刚性较大,抵抗变形的能力较强,在同样大小的力作用下,产生的弯曲形变越小。

2.2.4 剪切强度

A膜、B膜样品的层间剪切强度见表3。由表3可知,A膜剪切强度均值为6.45 MPa,方差为1.00;B膜剪切强度均值为8.60 MPa,方差为0.16。B膜剪切强度均值是A膜的133.33%,B膜的方差显著小于A膜的方差,表明B膜不仅在剪切强度上具有优势,还在强度分布均匀性上明显优于A膜。综合来看,B膜材料在抵抗侵彻时的剪切失效能力可能更强,而A膜材料稍差的抗剪切失效能力可能不利于其抵抗弹丸的剪切破坏。

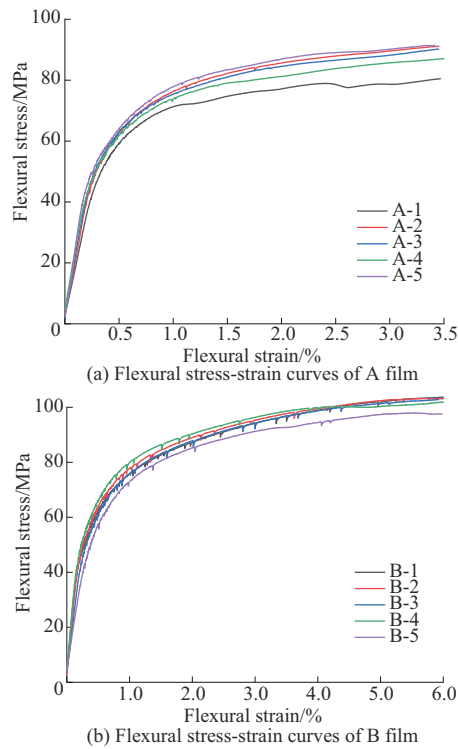


图8 PE-UHMW膜材料弯曲应力-应变曲线

Fig. 8 Flexural stress-strain curves of PE-UHMW film materials

表3 PE-UHMW膜材料剪切强度

Tab. 3 Shear strength of PE-UHMW film materials

Type						MPa	
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Average value	Variance
A film	5.10	7.47	7.74	6.12	5.83	6.45	1.00
B film	9.24	8.38	8.87	8.31	8.18	8.60	0.16

2.2.5 动态力学性能

PE-UHMW膜材料在20, 40, 70 °C等三个温度及3 500 s⁻¹应变率条件下的应力-应变曲线分别如图9和图10所示。PE-UHMW膜材料在压缩实验中响应迅速,初期阶段应力随应变快速增加,随后上升速度稍有下降,直至最大强度发生失效。两种膜材料在不同温度下的压缩应力-应变特征表明,高温条件下,材料易于压缩,在温度不是很高的时候,这种压缩有利于材料的致密化,导致压缩强度在屈服后再次上升;由于PE-UHMW膜材在70 °C以上,材料黏性部分增加^[14],当温度太高时,材料已在其软化点附近,致密度的增加无法显著提升其模量,屈服平台持续直至被完全压溃破坏。

2.3 防弹性能

2.3.1 V50值和SEA值

不同靶板在经受1.1 g标准模拟破片弹击后结果见表4,由表4可知,B膜制备的靶板在不同测试

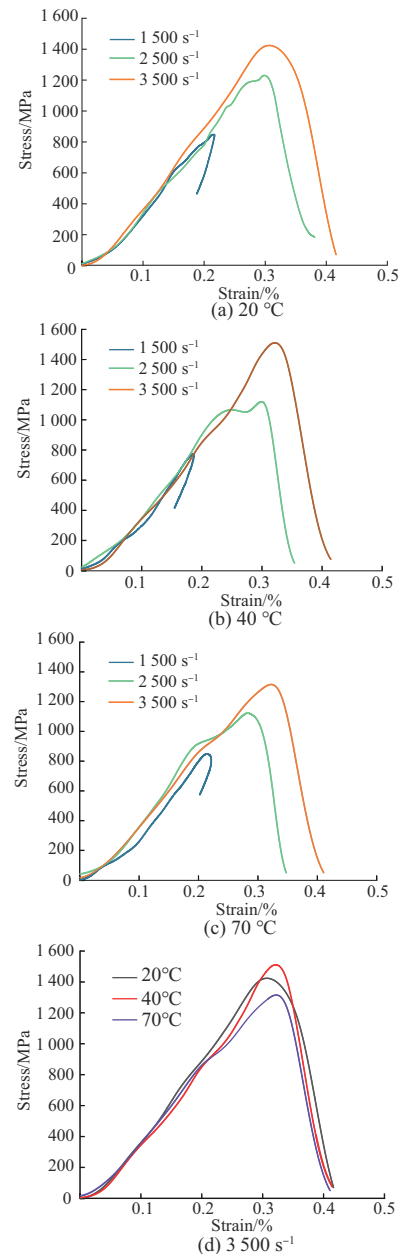


图9 A膜材料不同温度及应变率下的压缩应力-应变曲线

Fig. 9 Compressive stress-strain curves of A film at different temperatures and strain rates

条件和不同面密度下的V50值和SEA值均高于A膜靶板,SEA值为A膜的110.24%~125.56%,B膜靶板较A膜靶板能更好地吸收弹丸动能,防弹性能更好。

在本实验中,随着面密度的增大,靶板V50值变化明显,A膜靶板常温下提升8.10%,高温下提升7.33%;B膜靶板常温下提升10.63%,高温下提升8.75%。A膜靶板SEA值常温下和高温下仅提升2.25%和0.81%,远小于B膜常温下的7.10%和高温下的3.50%。可见,B膜靶板V50值和SEA值提升

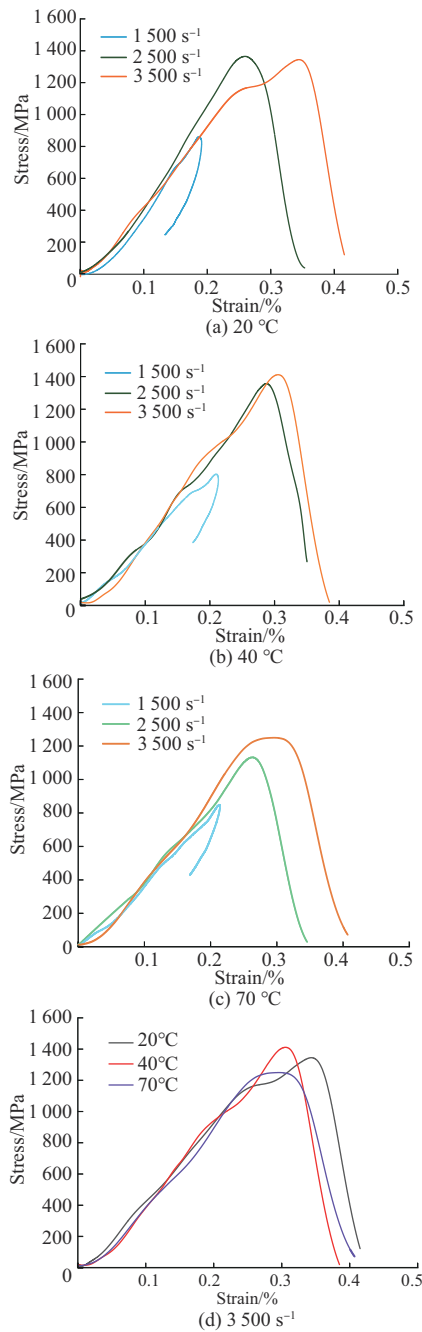


图10 B膜在不同温度及应变率下的压缩应力-应变曲线

Fig. 10 Compressive stress-strain curves of B film at different temperatures and strain rates

率明显大于A膜靶板,特别是常温条件下,B膜靶板防破片性能随面密度增加提升显著,通过提高B膜

靶板面密度可以获得更好的防破片效果。在同种面密度条件下,测试条件的变化虽然使B膜靶板V50值分别降低1.94%和3.60%,SEA值分别降低3.85%和7.08%,但其依旧具有比A膜靶板更好的抵抗破片侵彻贯穿的能力。面密度增大后,高温下A膜靶板和B膜靶板的V50值提升率相近,但A膜的SEA值提升率仅为B膜的23.14%,表明膜材在高温下的防弹性能有所提升,但在相同的树脂条件下,PE-UHMW条带自身性能对防弹性能的影响可能更大,A膜靶板在高温条件下通过提升面密度可能无法获得防破片性能上的显著改善,间接表明了基于低倍拉伸条带A制备的A膜材料在防弹运用上的局限性。

在弹道冲击条件下,复合材料层压板材的抗冲击是复杂多样的^[15-17]。1.1 g标准模拟破片弹击后形貌如图11所示,破片从靶板正面穿入,弹靶开始接触,由于应力波的作用,接触区附近的条带产生应变,破片直接侵彻引起压入变形,压入变形的发展导致该区域部分基体的压溃和条带的剪切断裂,伴随着侵彻过程中弹靶的摩擦作用,动能向热能转化,产生熔融物,并使分裂的细小条带发生蜷曲。随着破片继续向下运动和应力波的传播,出现层间分层损伤并向四周扩展导致局部弯曲变形,形成弯曲破坏区,表现为靶板背部逐渐形成鼓包。破片动能随着侵彻的深入逐渐减小,最终停留在靶板内部。对于膜材料层压板材而言,弹道冲击作用过程中的主要耗能机制包括:层合板正面弹着点附近条带的剪切破坏和基体压溃,并伴有动热能转化和拉伸作用;层合板中、后部区域相对较大范围的拉伸形变、弯曲吸能和层间分层耗能减小了弹丸的动能以致完成冲击过程。



图11 PE-UHMW膜靶板1.1 g FSP弹击后形貌

Fig. 11 Surface of PE-UHMW targets after 1.1 g FSP hit

表4 PE-UHMW膜靶板1.1 g FSP弹击后V50值和SEA值

Tab. 4 V50 value and SEA value of PE-UHMW targets after 1.1 g FSP hit

Type	AC-7	BC-7	AG-7	BG-7	AC-8	BC-8	AG-8	BG-8
V50/(m·s ⁻¹)	671.60	727.20	675.70	713.10	726.00	804.50	725.20	775.50
SEA/[(J·m ²)·kg ⁻¹]	35.44	41.55	35.87	39.95	36.24	44.50	36.16	41.35
Areal density	7 kg/m ²				8 kg/m ²			
Test condition	Room temperature		High temperature		Room temperature		High temperature	

2.3.2 弹着点弹痕高度

手枪弹弹击产生的弹着点弹痕高度BFS如图12所示,由图12可以发现,面密度为 7 kg/m^2 和 8 kg/m^2 的B膜靶板在高温条件下的弹痕高度仅差 0.10 mm ,几乎一致,但后者手枪弹动能比前者高出 39.49% ,面密度的提升有助于B膜靶板在高温条件下,实现对更高能量子弹的防护。在常温条件下,B膜靶板面密度的增大,并未提升其抵抗弹击的能力,这可能与靶板局部特点有关,但依旧具有比A膜靶板更小的弹痕高度。

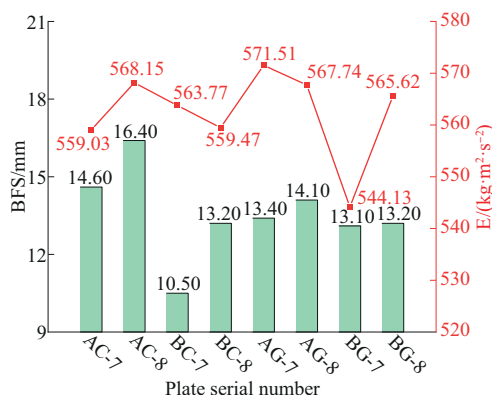


图12 PE-UHMW靶板手枪弹击后凹陷值

Fig. 12 Depth of bouncing depression of PE-UHMW target after pistol bullet hit

面密度为 7 kg/m^2 的A膜靶板在高温条件下受到弹速和动能更大的手枪弹冲击,但高温条件下的凹陷值却比常温条件下减小了 1.20 mm 。面密度为 8 kg/m^2 的A膜靶板在高温、常温条件下经受的冲击动能 E 接近,高温条件下的凹陷值却比常温条件下减少了 2.30 mm 。面密度为 8 kg/m^2 的B膜靶板在高温、常温条件下的弹痕高度一致,前者经受冲击的手枪弹具有更高的动能。对于两种面密度的A膜靶板和面密度为 8 kg/m^2 的B膜靶板,高温处理有助于提升靶板对高能手枪弹的防护能力。

通过对由不同牵伸倍数条带制备的膜材料进行防弹性能测试可知,牵伸倍数的差异会使由膜材料制备的靶板在不同弹击条件下呈现出差异化的防弹性能。在同等面密度条件下,由高倍牵伸膜材料构成的靶板防弹性能整体优于低倍牵伸条带构成的靶板,具有更大的防弹V50值和更小的弹击凹陷值。在同种膜材料下,面密度的增加对提升高倍牵伸膜材料构成的靶板在高温条件下的防弹性能更为显著。

3 结论

通过对条带牵伸倍数存在差异的同种树脂体系PE-UHMW膜材料,进行理化特性、力学性能、防弹性能等分析得出以下结论。

(1)牵伸倍数存在差异的条带具有不同的分子量、结晶度、取向度等理化特性,微观特性的差异使膜材料的力学特性呈现不同的特点,由高倍牵伸条带制备的膜材料呈现出高拉伸、高弯曲、高剪切的特点,相较由低倍牵伸条带制备的膜材料具有更好的抵抗冲击变形的能力。

(2)由高倍牵伸条带制备的膜材料层压靶板能更好的吸收弹丸动能。 1.1 g 标准模拟破片弹击下,靶板的SEA值为由低倍牵伸条带制备的膜材料层压靶板的 $110.24\%\sim 125.56\%$ 。 $51\text{式 } 7.62\text{ mm}$ 手枪弹弹击凹陷情况表明,在试验的同等面密度条件下,B膜靶板的防弹性能整体优于A膜靶板。

(3)条带牵伸倍数的差异改变了PE-UHMW膜的理化特性、力学性能,使得不同膜材料防弹性能存在优劣,可根据需求选用不同牵伸倍数的PE-UHMW膜材料制备防弹装备。

参考文献

- [1] 杨莹雪,张秀芹,杨丹,等.纤维增强复合材料防弹头盔壳体的研究进展[J].北京服装学院学报(自然科学版),2019,39(3):93-100.
YANG Yingxue, ZHANG Xiuqin, YANG Dan, et al. Review on the development of fiber reinforced composites for military helmet shells[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology (Natural Science Edition), 2019, 39(3):93-100.
- [2] 董彬,魏汝斌,王小伟,等.纤维增强树脂基复合材料防弹头盔研究进展[J].兵器材料科学与工程,2022,45(4):125-132.
DONG Bin, WEI Rubin, WANG Xiaowei, et al. Progress of bullet-proof helmet made by fibre reinforced polymer composites[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(4):125-132.
- [3] STEPHEN C, SHIVAMURTHY B, SELVAM R, et al. Design and finite element study of Kevlar based combat helmet for protection against high-velocity impacts[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 56(6):3 636-3 641.
- [4] 刘克杰,高虹,黄献聪,等.芳纶III防弹性能分析[J].合成纤维工业,2014,37(5):75-77.
LIU Kejie, GAO Hong, HUANG Xiancong, et al. Anti-ballistic properties of aramid fiber III[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2014, 37(5):75-77.
- [5] 刘克杰,高虹,黄继庆,等.芳纶III与芳纶II防弹性能研究[J].高科技纤维与应用,2014,39(1):40-44.
LIU Kejie, GAO Hong, HUANG Jiqing, et al. Study on bulletproof performances of Aramid III and Aramid II[J]. Hi-Tech Fiber &

- Application, 2014, 39(1):40–44.
- [6] 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.
- ZHANG Yingyi, LI Bingchuan, LIU Fajie. Research and applications of ultra high molecular weight polyethylene ballistic composites in anti-bullet protection[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(10):137–140.
- [7] 王新威, 张玉梅, 孙勇飞, 等. 超高分子量聚乙烯材料的研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(9):3 403–3 420.
- WANG Xinwei, ZHANG Yumei, SUN Yongfei, et al. Research progress of ultra high molecular weight polyethylene[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9):3 403–3 420.
- [8] 叶卓然, 罗靓, 潘海燕, 等. 超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的研究现状与分析[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9):4 286–4 309.
- YE Zhuoran, LUO Liang, PAN Haiyan, et al. Research status and analysis of ultra-high molecular weight polyethylene fiber and its composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 286–4 309.
- [9] 莫根林, 刘静, 金永喜, 等. 超高分子量聚乙烯纤维防护机理研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(10):23–28.
- MO Genlin, LIU Jing, JIN Yongxi, et al. Review on protective mechanism of uhmwpe fiber[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(10):23–28.
- [10] LI X G, GAO X L, KLEIVEN S. Behind helmet blunt trauma induced by ballistic impact: A computational model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 91:56–67.
- [11] 沈周宇, 温焱珂, 闫文敏, 等. 手枪弹撞击戴防弹头盔人体头颈部靶标的钝击效应[J]. 兵工学报, 2022, 43(9):2 101–2 112.
- SHEN Zhouyu, WEN Yaoke, YAN Wenmin, et al. Behind-helmet blunt trauma of a pistol bullet striking ballistic helmet-covered human head and neck target[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(9): 2 101–2 112.
- [12] 王威, 毛征宇, 李桂兵, 等. 枪弹冲击下新型防弹头盔质量对颈椎损伤影响[J]. 医用生物力学, 2019, 34(4):339–345.
- WANG Wei, MAO Zhengyu, LI Guibing, et al. The effect of novel ballistic helmet weight on cervical spine injury under bullet impacts[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2019, 34(4): 339–345.
- [13] 付杰, 李伟萍, 黄献聪, 等. 新型超高分子量聚乙烯膜材料防弹性能及机理[J]. 兵工学报, 2021, 42(11):2 453–2 464.
- FU Jie, LI Weiping, HUANG Xiancong, et al. Bullet-proof performance and mechanism of new ultra-high molecular weight polyethylene film[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(11):2 453–2 464.
- [14] 付杰. 多层 UHMWPE 复合材料的结构与抗冲击性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2021.
- FU Jie. The study of the structure and impact resistance of multi-layer UHMWPE composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [15] 高恒, 杨宏伟, 杜建华. UHMWPE 纤维织物复合靶板抗弹性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(5):91–93.
- GAO Heng, YANG Hongwei, DU Jianhua. Research on the ballistic performance of UHMWPE fiber fabric composite targets[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(5): 91–93.
- [16] 刘珊珊. UHMWPE 纤维复合材料的制备及在防弹领域的应用研究[D]. 北京:北京化工大学, 2018.
- LIU Shanshan. Preparation of UHMWPE fiber composites and application research in ballistic field[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [17] 袁子舜, 陆振乾, 许玥, 等. 超高分子量聚乙烯纤维平纹织物-单向布混合堆叠板的防弹机制[J]. 复合材料学报, 2021, 39(6): 2 707–2 715.
- YUAN Zishun, LU Zhenqian, XU Yue, et al. Ballistic mechanism of the hybrid panels with UHMWPE woven fabrics and UD laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 39(6): 2 707–2 715.