

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.019

环境因素叠加对国产芳纶头盔防弹性能的影响

李强^{1,2}, 张小伟³, 王成⁴, 谭长生², 包婷婷², 李峰², 朱露¹, 梁志¹, 张国君²

(1. 江西联创电声有限公司, 南昌 330096; 2. 西安理工大学材料科学与工程学院, 西安 710000;

3. 中国人民解放军96785部队, 河南洛阳 471000; 4. 北京普凡防护科技股份有限公司, 河北保定 072750)

摘要: 通过对比不同环境条件下国产杂环芳纶头盔弹痕高度和防破片性能V50的变化规律, 深入研究了温度和环境条件对国产杂环芳纶头盔防弹性能的影响。研究表明, 常温条件下, 杂环芳纶材料头盔的弹痕高度值为 (12.34 ± 2.65) mm, V50值为 (736.73 ± 9.6) m/s。相较于常温条件, 叠加温度条件后弹痕高度的平均值增至13.75 mm, 防破片性能V50均值降为703.8 m/s, 防弹性能下降, 这和芳纶在高温下链段断裂、重排及热氧化与低温脆性有关。当引入环境影响因素后, 头盔弹痕高度均值增加至17.1 mm, 防破片性能V50均值降为699 m/s, 说明其防弹性能严重衰减, 这与环境条件导致的芳纶材料老化相关。在所有测试条件下, 杂环芳纶材料头盔最后弹痕高度的最大位置均出现在头盔的前部。

关键词: 国产芳纶; 头盔; 温度; 环境因素; 防弹性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0133-07

Effect of superposition of environmental factors on bulletproof performance of domestic aramid helmet

LI Qiang^{1,2}, ZHANG Xiaowei³, WANG Cheng⁴, TAN Changsheng², BAO Tingting², LI Feng², ZHU Lu¹, LIANG Zhi¹, ZHANG Guojun²

(1. Jiangxi Lianchuang Electroacoustic Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of

Technology, Xi'an 710000, China; 3. Unit 96785 of the People's Liberation Army, Luoyang 471000, China;

4. Beijing Perfect-Protection Technology Incorporated Co., Ltd., Baoding 072750, China)

Abstract : The effects of temperature and environmental conditions on bulletproof performance of domestic heterocyclic aramid helmet were studied by comparing the change rule of bullet depth and V50 speed of anti-fragment performance under different environmental conditions. The results show that under normal temperature conditions, the bullet height value of heterocycle aramid helmet is (12.34 ± 2.65) mm, and the V50 value is (736.73 ± 9.64) m/s. Compared with normal temperature, after temperature superposition, the average bullet height increases to 13.75 mm, the average anti-fragmentation performance of V50 decreases to 703.8 m/s, and the bulletproof performance decreases, which is related to the chain segment fracture, rearrangement, thermal oxidation at high temperature and brittleness at low temperature of aramid. When environmental factors are introduced, the average height of the helmet's bullet increases to 17.1 mm, and the average V50 anti-fragment performance decreases to 699 m/s, indicating that its bulletproof performance is seriously degraded, which is related to the aging of aramid materials caused by environmental conditions. Under all testing conditions, the maximum height of the final bullet mark of the heterocyclic aramid material helmet appears at the front of the helmet.

Keywords : domestic aramid ; helmet ; temperature ; environmental factor ; bulletproof performance

芳纶是一种由芳香族聚酰胺制成的高性能有机纤维, 分子结构主要由苯环和酰胺键组成, 具有高度取向的链状分子结构。这种分子结构赋予了芳纶纤维一系列优异的性能指标, 包括高强度、高

模量、耐高温、耐腐蚀、耐磨损等。芳纶的拉伸强度通常在2.6~3.5 GPa范围内, 而拉伸弹性模量则在70~120 GPa范围内; 部分高性能芳纶如杂环芳纶的拉伸强度可以达到5.0 GPa, 拉伸弹性模量为150~

通信作者: 谭长生, 博士, 副教授, 主要研究方向为轻质高强金属防护性能及损伤机理

收稿日期: 2024-11-09

引用格式: 李强, 张小伟, 王成, 等. 环境因素叠加对国产芳纶头盔防弹性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 133-139.

LI Qiang, ZHANG Xiaowei, WANG Cheng, et al. Effect of superposition of environmental factors on bulletproof performance of domestic aramid helmet[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 133-139.

180 GPa。这些性能使芳纶在各类需要高强度、轻质和耐用性的应用中具有极大的优势^[1-4]。自1960年以来,芳纶材料得到了迅速发展,并被广泛应用于航空航天、汽车、建筑、电子、军事防护等领域。

防弹材料是芳纶应用的重要领域之一。芳纶纤维具有出色的拉伸强度和能量吸收能力,由芳纶制成的复合材料不仅具有优异的物理力学性能,还能有效吸收和分散弹道冲击能量,从而减少穿透和二次杀伤效应,这使得芳纶成为制造防弹衣、防弹头盔和其他防护装备的首选材料,在军事和执法部门的防护装备中得到了广泛应用,极大地提高了人员的安全性^[5-7]。近年来,国产芳纶的研发取得了显著进展。中蓝晨光化工研究设计院有限公司在2006年率先研究成功了国产杂环芳纶,其产品拉伸强度达到5.0 GPa,拉伸弹性模量为150~180 GPa,性能位居国内产量有机纤维之首,达到俄罗斯Rusa产品相当水平,并具有优异的防弹性能^[8]。国产杂环芳纶尤其适合用于高端防弹材料,如防弹头盔、防弹服、战车装甲等装备,可以更好地保障人员的人身安全及为先进装备提供高防护力。在世界各国的军用和民用领域起到了至关重要的作用,近年来备受重视。杂环芳纶高性能纤维的出现,极大地拓展了防弹材料的选择空间,用杂环芳纶纤维制成的复合材料具有优良的物理力学性能和良好的动能吸收性,无二次杀伤效应,其出现还加速了防弹材料向轻量化、舒适化的方向发展^[8-11]。

尽管杂环芳纶材料具有优异的性能,但在实际应用过程中也会受到环境因素的影响,从而导致性能退化。例如,湿热老化过程虽不会导致芳纶纤维的分子结构发生化学变化,但会使纤维聚集态结构随湿热老化时间的延长趋向无序,结晶峰半峰宽由 1.45° 变为 7.63° ^[12]。这种退化行为会影响芳纶纤维的力学性能和防护效果。笔者以常温状态下的防弹性能作为参照,通过研究杂环芳纶在不同环境下的防弹性能,综合评价环境因素对杂环芳纶性能的影响,研究多种环境因素如温度、浸渍、湿热、盐雾、洗消、太阳辐射等对杂环芳纶防弹性能的叠加影响。通过对比不同环境条件下杂环芳纶防弹性能的变化,定量分析影响防弹性能的关键因素,从而为新型防弹材料的开发和应用提供科学依据。研究结果对提高防弹装备的实际防护效果和使用寿命具有重要的指导意义。

1 实验部分

1.1 杂环芳纶结构

杂环芳纶(芳纶III)是一种具有杂环结构的三元共聚对位芳香族聚酰胺纤维,由对苯二胺、对苯二甲酰氯和含有杂环结构的二胺等3种单体通过共缩聚反应形成,如图1所示。在分子结构中,杂环芳纶由多个苯环和杂环结构通过酰胺键($-\text{CO}-\text{NH}-$)连接而成,具有高度取向的链状分子结构。杂环芳纶的杂环结构使其具有超高强度和超高模量,在耐高温、耐冲击、耐磨损、透波等方面均具有优异性能。同时杂环结构也更有利于纤维与树脂的复合,从而提升综合抗弹性能。另外,杂环芳纶还克服了芳纶II、聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维的耐紫外性能较差等缺点,是当今世界上公认综合性能最好的已批产有机纤维。

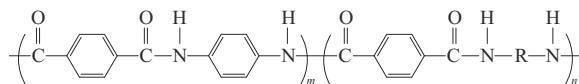


图1 芳纶III的分子结构

Fig. 1 Molecular structure of the aramid III

1.2 头盔结构

本研究所使用的头盔是由江西联创电声有限公司固定人员、固定设备以及固定工艺生产的杂环芳纶头盔。采用中蓝晨光化工研究设计院有限公司生产的STARAMID F-368型杂环芳纶预浸料对头盔进行后处理,在同种工艺、相同环境条件下由同一工程人员铺层,制造头盔60顶,作为试验样本库,具体试验过程中,各项目对应的头盔,在样本库中随机抽取。采用超声相控阵技术对所有样本缺陷进行无损检测,剔除存在工艺缺陷样品,保证样品质量一致性,成品头盔如图2所示。



图2 头盔结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of helmet structure

1.3 头盔弹丸侵彻性能试验

为表征多环境因素对材料的影响程度,设计常温防弹性能为参照系,对比分析多环境因素的影响量。试验装备为1954年式7.62 mm手枪、1951年式7.62 mm手枪弹、专用破片发射枪、1.1 g标准模拟破

片。射击时弹体入射角偏差不大于 5° ,弹速符合规定要求,相邻弹着点中间间距不小于8.0 cm,弹着点中心距离受试品边缘不小于5.0 cm。

1.3.1 温度叠加环境试验方案

在相对湿度为 $60\%\pm 5\%$ 、试验柜无光照的条件下,按高温、低温试验顺序依次对选用头盔施加温度应力。高温条件为 $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$,低温条件为 $(-40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 。将头盔放入试验柜内,调节试验柜温度至规定高温条件,并保持3 h,在3 min之内将头盔转移到规定低温条件,并保持3 h,此过程为一个温度冲击循环;对选用头盔进行该循环共3次,即高-低-高-低-高-低温,每个过程中转移时间小于3 min,完成后取出,在常温避光静置1 h。

防弹性能的试验程序如下。

(1)射击环境温度 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $50\%\sim 70\%$,试验室白炽灯光照条件;

(2)被试装备:杂环芳纶头盔8顶,编号为TK01[#],TK02[#],TK03[#],TK04[#],TK05[#],TK06[#],TK07[#],TK08[#];

(3)陪试装备:54式7.62 mm手枪1支,51式7.62 mm手枪弹若干发,7.62 mm口径专用破片发射枪1支,1.1 g标准模拟破片(柱状楔形)若干个;

(4)按照防弹性能的试验方法,分别对TK01[#],TK02[#],TK03[#],TK04[#]头盔进行手枪弹射击试验;

(5)按照防破片性能的试验方法,分别对TK05[#],TK06[#],TK07[#],TK08[#]头盔进行破片弹射击试验。

1.3.2 环境叠加试验方案

按浸渍、湿热、盐雾、洗消、太阳辐射的试验顺序依次对TK09[#],TK10[#],TK11[#],TK12[#],TK13[#],TK14[#],TK15[#],TK16[#]共八顶头盔施加环境应力,每种环境因素作用一定时长,环境转换时间小于3 min,完成后取出,在常温避光静置1 h。浸渍条件为:水溶液,时间为2 h,温度为 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,试验柜无光照条件。湿热试验条件为:温度为 $(70\pm 2)^{\circ}\text{C}$,时间为72 h,相对湿度为 $80\%\pm 5\%$,试验柜无光照条件。盐雾试验条件为:浓度 $5\%\pm 1\%$ 的NaCl溶液,pH值为6.5~7.2,盐雾沉降率为 $(1\sim 3)\text{ mL}/(80\text{ cm}^2\cdot\text{h})$,温度为 $(35\pm 2)^{\circ}\text{C}$,时间为48 h,试验柜无光照条件。洗消试验条件为: 140°C 水蒸气,时间为1 h,试验柜无光照条件。太阳辐射试验条件为:按照GJB 150.7A-2009程序I——循环试验中的A1,W曲线进行温度、辐照度控制,时间为72 h。

防弹性能试验程序中,射击环境和陪试装备与温度叠加环境试验方案一致。

按照防弹性能的试验方法,分别对TK09[#],TK10[#],TK11[#],TK12[#]头盔进行手枪弹射击试验;按照防破片性能的试验方法,分别对TK13[#],TK14[#],TK15[#],TK16[#]头盔进行破片弹射击试验。

1.4 测试与表征

采用弹击弹痕高度和V50值这两个指标研究杂环芳纶防弹材料的性能。弹击弹痕高度指标用于衡量防弹材料在受到子弹撞击后留下的弹痕高度。本试验弹痕高度值的测定是根据GA 293-2012《警用防弹头盔及面罩》E.3.8条规定:使用卡钳与千分尺测量防弹头盔弹着点弹痕高度,如盔壳表面出现塌陷,使用相应曲面卡板作为初始平面测量。一般来说,弹击弹痕高度越小,表示材料和结构在受到子弹撞击时能够有效地吸收和分散冲击力,减少对人体的伤害。依据GJB 5115A-2012《军用防弹头盔安全技术性能要求》测试V50值。V50值用于评估防弹材料的抗弹击性能及防破片性能,表示材料在受到弹丸射击时,达到50%击穿概率时发射子弹速度的平均值,精确至0.1 m/s。V50值越高,表明防弹材料具有更好的抗弹击能力,可以有效地阻挡和减少子弹的穿透能力。综合来说,弹击弹痕高度和V50值都是评估防弹材料抗弹击性能的重要指标,用户在选择防弹产品时可以参考这些指标来评估材料的防护能力。

2 结果与讨论

2.1 环境因素对头盔弹丸侵彻性能的影响

以常温性能作为参照系,采用二维折线图分析各个数据,对杂环芳纶材料制成头盔的性能进行分析比对,进而表征杂环芳纶的性能。图3展示了杂环芳纶材料制成的头盔的弹痕高度值和V50值,经统计,弹痕高度值为 $(12.34\pm 2.65)\text{ mm}$,V50值为 $(736.73\pm 9.6)\text{ m/s}$ 。常温状态下,杂环芳纶材料加工的头盔枪击后弹痕高度的离散性小,高值与低值之间的差值小于6 mm;此外,常温状态下,杂环芳纶材料加工的头盔防破片性能优异,V50最高值接近750 m/s,且数据离散性较小,高值与低值之间的差值小于25 m/s;最后,弹痕高度最大位置出现在头盔的前部。

图4为温度叠加后的防弹性能,其中常温状态对应的防弹性能用绿色横线表示,绿色阴影带为误

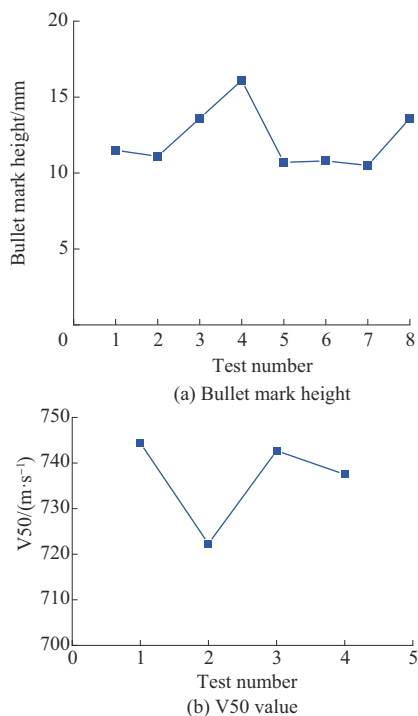


图3 常温环境下芳纶头盔的防弹性能

Fig. 3 Bulletproof performance of aramid fiber helmet under normal temperature environment

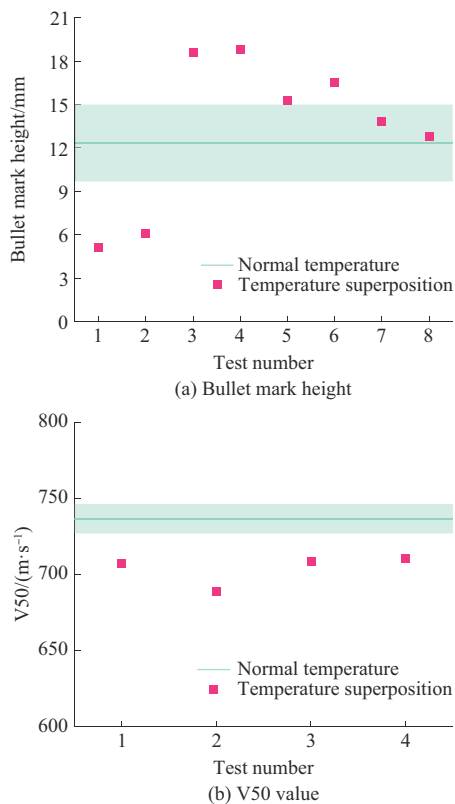


图4 温度叠加后的防弹性能

Fig. 4 Bullet proof performance after temperature superposition

差范围。可以发现,相较于常温状态,在叠加温度后防弹性能下降;如图4a所示,弹痕高度平均值为

13.75 mm,且离散值增加,最高值与最低值差值达到10 mm。此外,对于防破片性能指标V50而言,其值明显下降,均值约为703.8 m/s。最后,弹痕高度的最大位置出现在头盔的前部。

图5为环境叠加后的防弹性能,绿色的数据代表常温性能。由图5看出,防弹性能均出现明显下降。弹痕高度均值约为17.1 mm,较常温数据有明显上升,弹痕高度数据离散性加大,高值与低值之间的差值约为10 mm。V50的均值为699 m/s,较常温数据有明显下降,其最高值约为710 m/s,高值与低值之间的差值约20 m/s,数据离散性降低。最后,弹痕高度最大位置出现在头盔的前部。

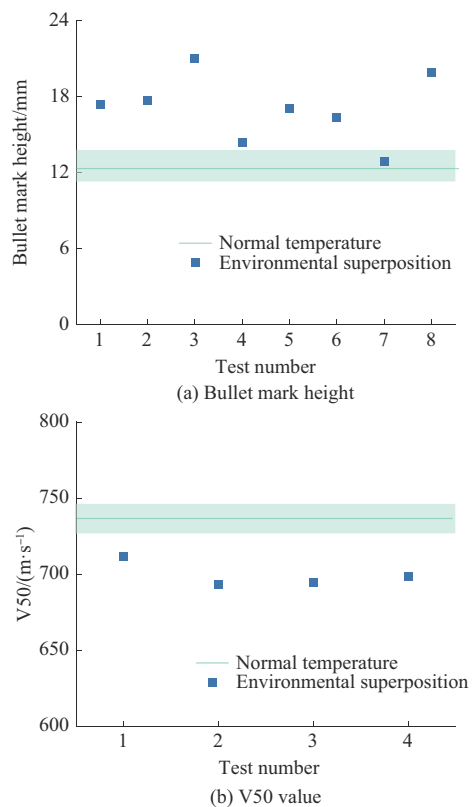


图5 环境叠加后的防弹性能

Fig. 5 Bullet proof performance after environmental superposition

为了进一步比对温度和环境的影响,将这两种因素进行叠加,图6为两种因素叠加后的结果。图6a显示了温度和环境叠加对头盔弹痕高度的影响,可以发现温度和环境因素都增大了头盔弹痕高度值,在一定程度上造成环境性能退化,总体来看,环境因素叠加使弹痕高度的值更大。由图6b可知,虽然温度和环境两种因素叠加对V50的影响基本处于同一水平,都降低了V50,但总体来看,环境叠加因素的V50数值明显低于温度叠加因素。上述结

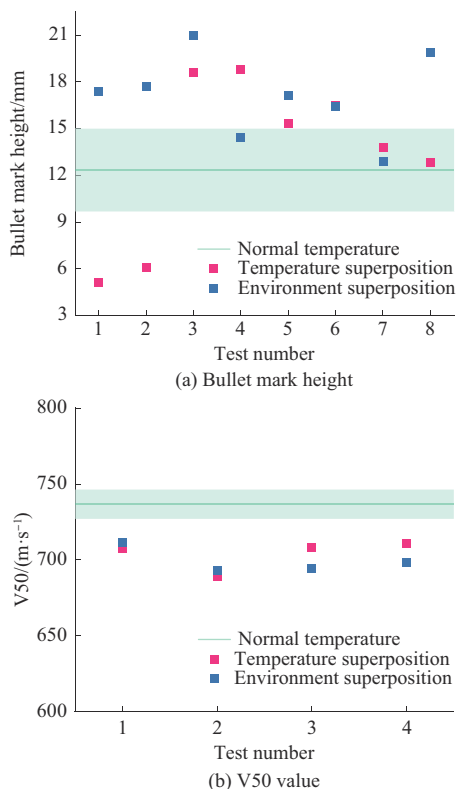


图6 不同因素叠加后的防弹性能

Fig. 6 Bulletproof performance after superposition of different factors

果表明,环境因素对弹痕高度和V50的影响较大,造成更大的防弹性能衰退。

2.2 分析讨论

温度是影响杂环芳纶材料性能的关键因素之一。国产杂环芳纶作为一种高性能纤维材料,在防弹领域的应用日益广泛。在实际应用中,由于我国疆域广阔、环境多样,防弹装备往往会面临各种复杂的环境条件,特别是温度和多种环境因素的叠加作用,这些都会对芳纶材料的防弹性能产生重要影响。在高温条件下,杂环芳纶纤维内部的分子链段运动加剧,可能导致链段断裂或重排,从而降低纤维的强度。此外,高温还会加速杂环芳纶材料的热氧化反应,进一步削弱其性能。蔡敬刚等^[13]发现温度对杂环芳纶材料的性能影响具有显著的非线性特征,杂环芳纶不适合长时间在80℃以上的环境中使用时,当温度超过120℃时,杂环芳纶纤维的断裂强度会出现急剧下降。因此,高温下头盔弹痕高度增加,V50逐渐降低,导致其防弹性能衰退,如图4所示。在低温条件下,杂环芳纶纤维的脆性增加,易于产生裂纹和断裂,同样会降低防弹性能。这种温度敏感性使得杂环芳纶材料在高温环境下的防弹性能受到严重挑战。因此,在设计和使用时杂环芳纶

防弹头盔时,必须充分考虑温度因素的影响,采取相应的防护措施,如使用隔热材料、控制环境温度等。

除了温度因素外,环境因素(如浸渍、湿热、盐雾、洗消和太阳辐射等)也会对杂环芳纶材料的防弹性能产生影响。浸渍和湿热环境会导致芳纶纤维吸水膨胀,从而破坏纤维的内部结构,水分子充斥于基体后会使芳纶发生增塑现象,降低其强度和刚度。此外,湿热环境还会加速芳纶材料的水解反应,进一步降低其性能^[12]。盐雾环境会导致芳纶材料表面产生盐结晶,从而破坏材料的表面结构,特别是盐雾会造成表面发生腐蚀,逐渐形成疏松的结构,降低防弹性能^[14]。同时,盐雾中的氯离子还会加速芳纶材料的腐蚀和老化。洗消环境会对芳纶材料产生强烈的化学作用,导致材料表面产生氧化和老化,从而降低其性能;特别是高温水蒸气熏蒸会加速芳纶材料的热氧化反应,进一步削弱防弹性能^[15]。太阳辐射会导致芳纶材料表面产生光氧化和光老化反应,从而降低其表面硬度和耐磨性。长时间的太阳辐射还会使芳纶材料产生裂纹和空隙,可能会造成大分子链断裂,进一步降低其防弹性能^[16]。因此,在环境因素的叠加影响下,头盔的弹痕高度数值增加,V50值降低,进而引起头盔防弹性能系统性衰退,如图5和图6所示。

经过上述环境叠加试验后,国产杂环芳纶头盔的防弹性能显著下降,这主要是由于树脂与纤维黏结强度的降低、纤维性能的变化、复合材料结构的破坏、界面相的影响以及表面处理的失效等多方面因素共同作用的结果。特别是在实际应用过程中,杂环芳纶材料常常需要承受温度和环境的交替影响,如白天与夜间的温差变化、室内与室外的湿度差异等。这些变化不仅可能导致材料内部的应力变化,还可能加速材料的物理和化学老化过程,进一步降低其防弹性能。

因此,在设计和制造防弹装备时,必须充分考虑材料在不同温度和环境条件下的性能稳定性和耐久性,并采取相应的措施来保护材料,如使用防护涂层、优化材料配方、加强结构设计等,以确保防弹装备在实际应用中能够持续提供有效的防护。此外,结构在一定程度上影响材料性能的发挥,最大的弹击凹陷均产生在头盔前部,表明弹击在同一水平截面时,前部由于结构剪裁导致的层间破坏、

界面损伤均较大,表现为弹痕高度最高。这需要在进行产品结构设计时,充分论证结构方案,通过折边和加强筋提升结构强度;同时可以通过产品的曲面设计,在边缘部位尽可能地保证曲面函数的非二次可导性,实现结构加强,使材料、结构产生协同效应。

3 结论

(1)常温条件下,杂环芳纶材料头盔的弹痕高度值为 (12.34 ± 2.65) mm, V50 值为 (736.73 ± 9.6) m/s。相较于常温状态,叠加温度后防弹性能下降,弹痕高度平均值增加为 13.75 mm,防破片性能 V50 均值降为 703.8 m/s。这是由于在高温条件下,一方面导致链段断裂或重排,从而降低纤维的强度,此外会加速杂环芳纶材料的热氧化反应,进一步削弱其性能。相反,在低温条件下,杂环芳纶纤维的脆性增加,易于产生裂纹和断裂,同样会降低防弹性能。

(2)在叠加环境因素后,头盔弹痕高度均值增加至 17.1 mm,防破片性能 V50 均值降为 699 m/s,说明其防弹性能严重衰减。环境因素对国产杂环芳纶的防弹性能有显著影响,其中环境老化对纤维结构和防弹性能的影响最为显著。因此,在实际应用中需考虑环境因素的影响,采取相应措施保障材料性能。

(3)在所有测试条件下,杂环芳纶材料头盔最后弹痕高度的最大位置出现在头盔的前部,说明头盔结构设计对防弹性能具有显著影响。

(4)通过模拟多种环境条件叠加作用于国产杂环芳纶防弹头盔,进而研究其防弹性能变化,为国产杂环芳纶防弹材料的实际应用提供了科学依据,有助于提升防弹装备的实际防护效果和使用寿命。同时需要进一步探索国产杂环芳纶的改性方法,以提高其在复杂环境下的稳定性和耐久性,为新型防弹材料的开发和应用提供技术支持。

参考文献

- [1] 万雷,吴文静,吕佳滨,等.我国对位芳纶产业链发展现状及展望[J].高科技纤维与应用,2019,44(3):21-26.
WAN Lei, WU Wenjing, LYU Jiabin, et al. The current situation and prospect of para-aramid industry chain in China[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2019, 44(3):21-26.
- [2] 曹兵旗.基于对位芳纶非织造布的柔性防刺材料的设计制备与性能研究[D].上海:东华大学,2023.
CAO Bingqi. Design and preparation of flexible anti-puncture materials based on para-aramid nonwoven fabric and performance [D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [3] 林燕萍.机织层合防弹面料的性能研究[J].现代纺织技术,2016, 24(1):23-26.
LIN Yanping. Properties of anti ballistic impact fabric made of woven laminated[J]. Advanced Textile Technology, 2016, 24(1): 23-26.
- [4] 邱婧,吴国栋,邢军.国产高性能纤维在机场排弹个体防护装置中的应用探析[J].军民两用技术与产品,2021(11):59-61.
QIU Jing, WU Guodong, XING Jun. An analysis of the application of domestically produced high-performance fibres in airport bomb disposal personal protective equipment[J]. Dual Use Technologies & Products, 2021(11):59-61.
- [5] 陈超峰,王熙怡,彭涛,等.国产对位芳纶的挑战和机遇[J].高科技纤维与应用,2015,40(4):11-14.
CHEN Chaofeng, WANG Xiyi, PENG Tao, et al. Challenges and opportunities of domestic aramid fiber[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2015, 40(4):11-14.
- [6] 王凤德,陈超峰,朱建生,等.对位芳纶在防弹领域的应用[J].高科技纤维与应用,2011,36(3):8-12.
WANG Fengde, CHEN Chaofeng, ZHU Jiansheng, et al. The application of para-aramid fiber in bulletproof area[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2011, 36(3):8-12.
- [7] 黄钧铭,于游江,王忠伟,等.对位芳纶应用领域技术标准现状与发展[J].高科技纤维与应用,2016,41(3):38-45.
HUANG Junming, YU Youjiang, WANG Zhongwei, et al. Status and development of technical standards for the application of para-aramid fiber[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2016, 41(3):38-45.
- [8] 王熙怡,陈超峰,彭涛,等.芳纶III在复合材料领域应用的优势探讨[J].合成纤维,2016,45(1):22-25, 47.
WANG Xuyi, CHEN Chaofeng, PENG Tao, et al. Advantage application of aramid III in the field of composite materials[J]. Synthetic Fiber in China, 2016, 45(1):22-25, 47.
- [9] 王静,任航,陈平,等.氧等离子体处理对国产芳纶III纤维表面性能的影响[J].材料研究学报,2018,32(1):12-16.
WANG Jing, REN Hang, CHEN Ping, et al. Surface properties of domestic aramid fiber III modified by oxygen plasma treatment[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(1):12-16.
- [10] 齐大鹏.国产对位芳纶的性能及单兵弹道防护织物的研究[D].河南:中原工学院,2012.
QI Dapeng. Synthetical research on properties of native PPTA fibers and fabrics with impact of bullet-proof[D]. Henan: Zhongyuan University of Technology, 2012.
- [11] 张彦君,曹金鹏,陈超峰,等.芳纶III单向纤维增强复合材料测试方法研究[J].塑料工业,2021,49(6):112-116.
ZHANG Yanjun, CAO Jinpeng, CHEN Chaofeng, et al. Study on test method of aramid unidirectional fiber III reinforced materials [J]. China Plastics Industry, 2021, 49(6):112-116.
- [12] 杨莹雪.多层三维织物及其增强复合材料防弹性能的研究[D].北京:北京服装学院,2021.
YANG Yingxue. Study on ballistic performance of multi-layer

- three-dimensional fabrics and their reinforced composites[D]. Beijing:Beijing Institute of Fashion Technology, 2021.
- [13] 贾储源,苑成策,董继东,等.芳纶纤维湿热老化的试验研究与量子化学模拟[J].化学与粘合,2020,42(5):313-325.
- JIA Chuyuan, YUAN Chengce, DONG Jidong, et al. Experimental study and quantum chemical simulation of the hydrothermal aging of aramid fiber[J]. Chemistry and Adhesion, 2020, 42(5): 313-325.
- [14] 蔡敬刚,王司佳.对位芳纶织物耐温性能研究[J].产业用纺织品,2016,34(7):11-13.
- CAI Jinggang, WANG Sijia. Study on thermal performance of para-aramid fabric[J]. Technical Textiles, 2016, 34(7):11-13.
- [15] 李玥,叶林,赵晓文,等.碳纤维增强环氧树脂复合材料盐雾腐蚀行为及其老化分子机制[J].高分子材料科学与工程,2023,39(5):91-97.
- LI Yue, YE Lin, ZHAO Xiaowen, et al. Salt-spray corrosion behavior and aging molecular mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(5):91-97.
- [16] 周宇,朱方龙.织物湿扩散系数的实验研究[J].纺织学报,2013,34(12):55-59.
- ZHOU Yu, ZHU Fanglong. Experimental study of moisture diffusivity of fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(12): 55-59.
- [17] 肖敏,杨万均,周漪,等.典型大气环境下新型纤维增强复合材料环境适应性分析[J].环境技术,2021,39(2):60-66.
- XIAO Min, YANG Wanjuan, ZHOU Yi, et al. Environmental worthiness analysis of new type of fiber reinforced composites in typical atmospheric environment[J]. Environmental Technology, 2021, 39(2):60-66.
-
- (上接第89页)
- [13] 王进,周如东,张宁,等.1064 nm光纤激光器直写聚酰亚胺成碳工艺参数研究[J].中国激光,2021,48(10):122-130.
- WANG Jin, ZHOU Rudong, ZHANG Ning, et al. Process parameters of direct writing polyimide by 1064 nm fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10):122-130.
- [14] 朱大庆,金曦.CO₂激光直写制作聚酰亚胺多模波导技术的研究[J].激光技术,2010,34(5):686-689.
- ZHU Daqing, JIN Xi. Study on CO₂ laser direct writing polyimide waveguide[J]. Laser Technology, 2010, 34(5):686-689.
- [15] 孙浩瀚.聚酰亚胺材料的激光碳化处理与传感性能研究[D].上海:东华大学,2022.
- SUN Haohan. Laser carbonization treatment of Polyimide materials and their sensing performance[D]. Shanghai:Donghua University, 2022.
- [16] 张宏伟,任妮,薛红涛,等.聚酰亚胺基底金属薄膜激光刻蚀温度场分布[J].中国激光,2016,43(5):100-107.
- ZHANG Hongwei, REN Ni, XUE Hongtao, et al. Temperature distribution for laser etching of metal thin films on polyimide substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5):100-107.
- [17] 蔡颂,徐闻声,余凡,等.CO₂连续激光烧蚀CFRP树脂层工艺优化[J].工程塑料应用,2023,51(11):63-70.
- CAI Song, XU Wensheng, YU Fan, et al. Process optimization of CO₂ continuous-wave laser ablation of CFRP resin layer[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):63-70.