# 基于 3D-DIC 技术的老化 UHMWPE 无纬布 准静态拉伸性能研究

# 罗小豪,李国成,张晓宇,王哲,张佳瑶,王铎<sup>\*</sup>

(杭州智元研究院有限公司,杭州 310024)

摘要:目的 通过研究老化后的超高分子量聚乙烯(UHMWPE)无纬布力学特性,了解防弹衣在自然环 境下的抗老化性能,为防弹装备使用和存储提供科学指导。方法 采用三维数字图像相关技术(3D-DIC) 和万能材料试验机开展了其准静态拉伸力学性能测试。结果 十年自然老化后的 UHMWPE 无纬布应力 应变曲线仍呈近似线性特征,但平均拉伸模量仅为 18.0 GPa。结合试验过程中的全场应变变化过程,分 析了 UHMWPE 无纬布试件的变形特性,发现拉伸过程中应变在分析区域内的分布较均匀。结论 十年 自然老化后的 UHMWPE 无纬布软质防弹衣平均拉伸模量明显降低,防弹性能无法满足使用要求。 关键词:超高分子量聚乙烯;拉伸;应力应变;3D-DIC 中图分类号:TB33 文献标志码:A 文章编号:1001-3563(2024)07-0254-06 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.07.031

# Tensile Properties of Aged Unidirectional UHMWPE Sheets Based on 3D-DIC Technology

LUO Xiaohao, LI Guocheng, ZHANG Xiaoyu, WANG Zhe, ZHANG Jiayao, WANG Duo\*

(Hangzhou Zhiyuan Research Institute, Hangzhou 310024, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the mechanical properties of aged unidirectional UHMWPE sheets, and learn the aging resistance of body armors in natural environment and provide scientific guidance for the use and storage of bullet-resisting equipment. The quasi-static tensile mechanical properties of UHMWPE were tested by 3D-DIC and a universal material testing machine. The experimental results showed that the stress-strain curve of unidirectional UHMWPE sheets after ten years of natural aging was still approximately linear, but the average tensile modulus was only 18.0 GPa. The deformation characteristics of unidirectional UHMWPE sheets specimens were analyzed based on the whole field strain variation process in the test process. It was found that the strain distribution in the analysis area was uniform during the tensile process. After ten years of natural aging, the average tensile modulus of unidirectional UHMWPE sheet soft body armor is obviously reduced, and the bullet-resisting performance cannot meet the requirements of use. **KEY WORDS:** UHMWPE; tensile; stress and strain; 3D-DIC

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维具有密度 低、比强度高、能量吸收性能好等优点,同时超高分 子量聚乙烯无纬布的结构特性相较于其他复合结构 具有更高的抗弹性能。因此,UHMWPE无纬布被广 泛用于防弹衣的制作,是目前世界上最为先进的防弹 衣材料<sup>[1-3]</sup>。防弹衣由于其本身应用场景的原因往往 会面临长期储存的问题,而长期储存后防弹衣的防弹 性能直接关系到防弹衣能否继续使用。因此,防弹复 合材料的老化问题一直被广泛关注,UHMWPE 防弹 材料的防护性能的核心影响因素包括压缩、剪切、拉 伸、分层和弯曲性能<sup>[4-5]</sup>,因此,在对老化 UHMWPE 防弹材料的防弹性能影响研究过程中,其压缩、剪切、 拉伸、分层和弯曲性能是首要关注点。Kartikeya 等<sup>[6]</sup> 提出了一种新的UHMWPE纤维增强复合材料拉伸试 验方法,设计了一种用于拉伸试验的夹具,并通过准 静态拉伸试验获得了UHMWPE纤维增强复合材料的 应力应变曲线。Manikandan等<sup>[7]</sup>研究了短剑麻纤维增 强聚苯乙烯复合材料的吸水性能和老化对其力学性 能的影响,试验结果表明老化使得复合材料的拉伸强 度、弹性模量、断裂伸长率都有所降低,这进一步说 明,老化会对纤维增强复合材料的材料力学性能产生 多方面的削弱。Cheng 等<sup>[8-10]</sup>开展了 UHMWPE 纤维 和树脂对其复合材料防弹性能影响以及纤维和树脂 老化机理研究,结果表明 UHMWPE 复合材料的老化 不仅仅是纤维或者树脂基体的单方面老化造成的,纤 维与基体的力学耦合特性也会随着纤维与基体的老 化而产生严重的降低,这为 UHMWPE 复合防弹材料 老化研究提供了一定的指导。黄献聪等[11]通过傅里叶 变换红外光谱仪等测试方法研究了超高分子量聚乙 烯纤维及其复合材料的热氧老化机理,全面分析了老 化温度等因素对UHMWPE纤维及其复合材料的结构 和热性能、界面性能、力学强度和防弹性能的影响, 结果表明,老化后的 UHMWPE 纤维材料力学性能显 著下降。孙非等<sup>[12]</sup>通过对 UHMWPE 复合防弹层进行 温度、湿度、紫外线等人工加速老化处理,然后进行 打靶测试,得到不同老化情况下的复合防弹层防护性 能变化情况,并采用线性回归方程进行防护性能的预 测,为老化 UHMWPE 复合防弹层的防护性能评估提 供了较为有力的支撑。孟国龙<sup>[13]</sup>参考 ASTM 超高分 子量聚乙烯加速老化标准对 UHMWPE 及其复合材料 进行了不同时间的加速老化试验,通过对老化后试样 的材料形态进行观测,发现老化会使超高分子量聚乙 烯试样表面出现裂纹。通过对不同老化超高分子量聚 乙烯试样的力学性能测试发现随着老化时间的增加, 超高分子量聚乙烯试样的硬度呈现先增大后减小的 变化规律。

目前纤维增强复合材料准静态拉伸试验测量应 变大多采用应变片或引伸计,只能测量某一位置或给 定标距的应变信息,无法获得试件变形过程中的全场 应变信息。数字图像相关(DIC)方法是一种基于数 字图像处理技术的现代光测力学手段,通过跟踪试件 变形前后表面散斑的位置变化来计算试件表面各点 的位移与应变信息,与传统的电阻式应变测量法相比 具有非接触、全场测量等优越性<sup>[14]</sup>。彭奕涵等<sup>[15]</sup>针 对 DIC 测试设备应用于拉伸试验的可靠性进行了系 统的分析,结果表明 DIC 测试方法比应变仪具有更 为广泛的实用性、数据采集更为全面、测试精度更高。 目前暂未有报道采用 3D-DIC 测试方法对自然老化后 的 UHMWPE 无纬布力学性能进行研究,无法全面获 得自然老化后的 UHMWPE 无纬布力学性能参数。本文 采用 3D-DIC 技术对一组自然老化十年后的 UHMWPE 无纬布进行拉伸试验,获得拉伸过程中试件表面全场 应变信息,计算得到材料的弹性模量、泊松比等数据, 并分析材料的破坏特征,有助于为防弹装备使用和存 储提供科学指导。

# 1 基于 3D-DIC 的准静态拉伸试验

### 1.1 3D-DIC 原理

3D-DIC 方法<sup>[16-17]</sup>是一种基于数字图像处理技术 的现代光测力学手段,其测试原理如图 1 所示。首先 通过左右两相机的标定来构建空间点的三维坐标,然 后 3D-DIC 测试系统通过相机拍摄被测物体变形前后 的散斑图,并将这些散斑图以灰度值的矩阵形式存储 在计算机中,此时图像中每个像素点都是一个具有灰 度值的数据点。最后在 3D-DIC 后处理软件中,系统 对变形前后 2 张数字图像中相同的像素点数据选择 合适的算法进行相关性匹配计算,得出待测点的位移 和变形情况。



图 1 DIC 技术基本原理 Fig.1 Schematic diagram of DIC technology

## 1.2 试验方案

测试系统组成如图 2 所示。为了方便相机的拍摄,将 UHMWPE 无纬布拉伸试件面向相机夹持在万能试验机夹头上,UHMWPE 无纬布拉伸试件距离相机大约 1 m。2 台相机分别放在 UHMWPE 无纬布拉伸试件两侧(夹角约为 20°),拍摄试件表面散斑区域的变形过程。2 台相机曝光时间设为 10 ms,相机拍摄方式设为等时间间隔,每隔 1 秒拍摄 1 张照片。为保证在拍摄过程中图片的清晰,采用一个直流 LED强光源射向试件表面,以保证充足的照明。

UHMWPE 无纬布拉伸力学测试在万能拉伸试验机(CMT6503)上进行,在试件加载过程中,利用 3D-DIC 方法对试件进行实时监测。为了保证 DIC 测试系统在试验过程中得出较为精确的试验数据,在 3D-DIC 测试系统的架设过程中,注意以下 4 个事项: 保证两相机的光轴相交于同一点;两相机的夹角至少 为 15°,至多为 60°;保证试件约占画幅 3/4 以上;确 保试件的离面运动在相机景深范围以内。测试系统的 搭建如图 3 所示。



图 2 测试系统示意图 Fig.2 Schematic diagram of test system



图 3 测试系统搭建图 Fig.3 Diagram of test system building

## 1.3 试样制备

本文取某经过十年自然老化后的软质防弹衣上 的单层UHMWPE无纬布为测试对象(厚度为0.1 mm), 测量其老化后的拉伸力学性能(图4)。由于UHMWPE 无纬布厚度较薄,因此本文使用剪刀剪出所需的试件。UHMWPE无纬布的拉伸试件尺寸如图4所示。

由于 UHMWPE 无纬布的抗拉强度极高,单层 UHMWPE 无纬布的厚度仅有 0.1 mm,在万能试验机 上装夹难度较大,因此在试件两端分别黏接长度为 40 mm 的硬质塑料加强片。另外,使用 3D-DIC 技术 进行试件全场应变测量,需要在拉伸试件的中间区域 添加人工散斑,但 UHMWPE 无纬布表面光滑,使用 常规喷漆法制作的散斑容易在试件拉伸的过程中脱 落。因此,本文采用水转印纸的方法将预先计算设计 好的人工散斑附着在拉伸试件的表面,保证了试验过 程中人工散斑附着的可靠性。带有人工散斑的拉伸试 件如图 5 所示。

#### 1.4 试验过程

首先进行 3D-DIC 系统的标定,选择大小为拍摄 画幅 80%左右的标定板,在尽量靠近 UHMWPE 无纬 布拉伸试件的位置做大幅度的 3 个自由度平动和 3 个 自由度的转动。确保在标定过程中,标定板上的所有 点都在相机视场之内。拍摄 40 组以上的图像后在 DIC 分析软件中进行三维坐标计算,为后续试件表面变形 运动分析奠定基础(图 6)。

万能试验机的加载速率为 5 mm/min,采样频率 为 150 Hz, 3D-DIC 测试系统采集图像频率为 1 Hz。 通过万能试验机记录载荷-时间数据, 3D-DIC 系统记 录的全场位移、应变信息。同时对 3D-DIC 系统的时 间进行标定,使其与万能试验机时间完全对应。本文 一共进行 4 组试验,试验过程中随着拉力的增加,试 件从夹持部位脱出, 4 组试验中试件均未被拉断,可 能是基体老化导致对纤维的黏接力下降导致的。



图 4 老化后单层 UHMWPE 无纬布及其拉伸试件 Fig.4 Single layer unidirectional UHMWPE sheet after aging and its tensile test piece



图 5 带有人工散斑的拉伸试件 Fig.5 Tensile specimen with artificial speckle



图 6 三维坐标计算界面 Fig.6 3D coordinate calculation interface

# 2 结果与分析

## 2.1 应力-应变曲线

在 3D-DIC 分析软件中建立标距为 50 mm 的虚拟 引伸计,获得材料在拉伸过程中的应变信息。试验结 果如图 7 所示,从图 7 中可以看到 4 组试验的结果具 有很好的一致性。试件在破坏前应力应变曲线基本保 持为直线,这说明老化后的 UHMWPE 无纬布在准静态 拉伸载荷作用下表现出线性特征。在 0.01 的应变下, 老化后 UHMWPE 无纬布试件的平均应力为 207.8 MPa; 在 0.02 的应变下,老化后 UHMWPE 无纬布试件的平 均应力为 356.7 MPa。根据应力应变曲线可得,老化



Fig.7 Engineering stress-strain curve

后的 UHMWPE 无纬布试件平均弹性模量为 18.0 GPa, 这说明自然老化十年后的 UHMWPE 无纬布拉伸性能 出现了明显下降。因此,UHMWPE 无纬布在储存过 程中要保证良好的储存条件,并确定科学的使用年 限,避免使用中出现老化失效而危及穿戴人员生命。 由于老化导致基体对纤维的黏接力下降,试验过程中 试件极易从夹头中滑脱,在两端粘贴加强片后还是不 能将试件拉断,因此本文未能测出试件的拉伸强度等 信息。在未来对老化后 UHMWPE 无纬布拉伸性能研 究的过程中应注意解决试件的装夹问题,保证试件在 拉伸过程中不会脱落,以便测出试件的拉伸强度、断 裂伸长率等材料性能参数。

#### 2.2 全场应变

第3组试验中老化UHMWPE无纬布试件在不同 拉伸载荷下表面 Mises 应变分布情况如图 8 所示。由 图 8 可得,在整个分析区域中应变分布较为均匀。拉 力为 100 N时,试件上的平均应变为 0.009,200 N时 平均应变为 0.023,比 100 N时增大了 2.6 倍,300 N时 平均应变为 0.036,比 200 N时增大了 1.6 倍。试件 表面 Mises 应变分布没有突变区域,说明在准静态拉 伸过程中,UHMWPE无纬布试件中部(标距区域) 不存在应力集中的现象,试件受力较为均匀。但是在 试件边缘仍然有一些变形不均匀区域,这些区域的应 变值误差较大。这是因为这些区域在试件制作和人工 散斑添加的过程中产生了一些毛刺。3D-DIC 软件散 斑质量评估也表明在试件边缘一些区域散斑质量相 对较低,因此造成试件边缘的应变误差较大。因此数 据提取和处理中,应该尽量靠近试件中部区域。

# 2.3 泊松比

在 3D-DIC 后处理软件中提取试件中部区域沿着 拉伸方向 2 个点和垂直拉伸方向 2 个点的平均应变随 时间变化曲线(图 9)。随着载荷的增大,沿着拉伸 方向的应变呈线性增长的趋势,增加较为迅速。由于 泊松效应,垂直拉伸方向的纤维和基体产生了微小的 收缩。在拉伸过程中,沿着拉伸方向的纤维束承受主 要的拉伸力并伸长,垂直拉伸方向纤维在基体的带动 下相应的发生一定程度的收缩。

通过沿着拉伸方向和垂直拉伸方向的平均应变 曲线可得到泊松比随拉力变化的曲线(图9)。从图 9中可以看出,泊松比随拉力的增大先逐渐减小后增 加。当载荷为50N时,垂直拉伸方向的应变为-0.04%, 沿着拉伸方向的应变为0.4%,此时泊松比为0.10; 当载荷为148N时,垂直拉伸方向的应变为-0.08%, 沿着拉伸方向的应变为1.3%,此时泊松比最小,仅 为0.062;当载荷为260N时,垂直拉伸方向的应变 为-0.3%,沿着拉伸方向的应变为2.3%,此时泊松比 增大到0.13。



图 8 第 3 组试验中老化 UHMWPE 无纬布试件在不同拉伸载荷下表面应变场分布 Fig.8 Contours of von mises strain of aged unidirectional UHMWPE sheets specimens under different tensile loads in the third group of experiments





# 3 结语

本文采用万能试验机配合 3D-DIC 技术,测试了 老化后的 UHMWPE 无纬布在准静态拉伸载荷下的力 学特性。主要结论如下:

1) 老化后的 UHMWPE 无纬布试件在拉伸载荷 作用下,应力应变曲线仍呈近似线性,平均拉伸模量 为 18.0 GPa。

2) 3D-DIC 分析得出的不同载荷下的全场应变云

图表明,老化后的 UHMWPE 无纬布在分析区域内应 变分布较为均匀,随着载荷增大无纬布试件应变逐渐 增大,且增大的趋势在逐渐减小。

3)获得了老化后的 UHMWPE 无纬布沿拉伸方向和垂直拉伸方向的应变随载荷变化曲线,进而得到 了材料在拉伸过程中泊松比随载荷的变化情况。泊松 比随载荷的增加呈先减小后增大的趋势。泊松比从最大 值 0.137 开始逐渐减小,当载荷为 148 N 时减小到最小 值 0.062;当载荷增大到 260 N 时,泊松比增大到 0.13。

#### 参考文献:

- CROUCH I G C. Body Armour-New Materials, New Systems[J]. Defence Technology, 2019, 15(3): 214-253.
- [2] REDDY P R S, REDDY T S, SRIKANTH I, et al. Development of Cost-Effective Personnel Armour through Structural Hy-Bridization[J]. Defence Technology, 2020, 16(6): 1089-1097.
- [3] 何业茂, 焦亚男, 周庆, 等. 弹道防护用先进复合材 料弹道响应的研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1331-1347.
  HE Y M, JIAO Y N, ZHOU Q, et al. Research Progress on Ballistic Response of Advanced Composite for Ballistic Protection[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5): 1331-1347.
- [4] MO G L, MA Q W, JIN Y X, et al. Delamination Process

in Cross-Ply UHMWPE Laminates under Ballistic Penetration[J]. Defence Technology, 2020, 17(1): 278-286.

- [5] NGUYEN L H, RYAN S, ORIFICI A C, et al. A Penetration Model for Semi-Infinite Composite Targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 137: 103438.
- [6] KARTIKEYA K, HEMANT C, AISHA A, et al. Determination of Tensile Strength of UHMWPE Fiber-Reinforced Polymer Composites[J]. Polymer Testing, 2020, 82(1): 106293.
- [7] MANIKANDAN N K C. Effect of Ageing on the Mechanical Properties of Short Sisal Fibre Reinforced Polystyrene Composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2003, 16(3): 249-271.
- [8] CHENG B X, DUAN H T, CHEN S, et al. Effects of Thermal Aging on the Blend Phase Morphology and Tribological Performance of PI/UHMWPE Blend Composites[J]. Wear, 2021, 477: 203840.
- [9] BELOTTI L P, VADIVEL H S, EMAMI N. Tribological Performance of Hygrothermally Aged UHMWPE Hybrid Composites[J]. Tribology International, 2019, 138: 150-156.
- [10] SHEN Z W, HU D, YANG G, et al. Ballistic Reliability Study on SiC/ UHMWPE Composite Armor Against Armor-Piercing Bullet[J]. Composite Structures, 2019, 213: 209-219.
- [11] 黄献聪,来悦,李常胜,等.超高分子量聚乙烯纤维 及其复合材料的热氧老化行为[J]. 兵工学报,2022, 43(12):3211-3220.

HUANG X C, LAI Y, LI C S, et al. Thermo-Oxidative Aging Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fiber and Its Composites[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(12): 3211-3220.

- [12] 孙非, 曲一, 徐诚. 超高分子量聚乙烯材料软质防弹 衣抗弹性能老化衰减规律研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2249-2255.
   SUN F, QU Y, XU C. Research on Attenuation Law of El. (1) P. (1) P. (1) C. P. (1) C. P. (1) C. (2) P. (2) (2
  - Elastic Resistance of UHMW PE Material Soft Bulletproof Vest[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(11): 2249-2255.
- [13] 孟国龙. 加速老化作用下 UHMWPE 复合材料的双轴 拉伸力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
  MENG G L. Study on Biaxial Tensile Mechanical Properties of UHMWPE Composites under Accelerated Aging[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [14] SUN Y, HUANG J, HAN C C, et al. Comparison of In-Plane Mechanical Properties of 2D and 3D Woven Composites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(18): 428267.
- [15] 彭奕涵, 孙新杨. DIC 测试设备应用于拉伸试验的可 靠性分析[J]. 中国科技纵横, 2018(8): 64-66.
  PENG Y H, SUN X Y. Reliability Analysis of DIC Testing Equipment Applied in Tensile Testing[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2018(8): 64-66.
- [16] 张华俊. 基于图像特征匹配技术的数字图像相关法研 究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
  ZHANG H J. Research on Digital Image Correlation Method Based on Image Feature Matching Technology[D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [17] 余尚江,陈晋央,杨吉祥,等.基于数字图像相关的 非接触测量技术及其应用[J].防护工程,2014,36(6):
   69-78.

YU S J, CHEN J Y, YANG J X, et al. Digital Image Correlation Based Non-Contacting Measurement System and Its Application[J]. Protective Engineering, 2014, 36(6): 69-78.