

高强高模和低水渗透性超高分子量聚乙烯 机织覆膜研究

王 丹 林 婧 王 璐 关国平

东华大学 a. 纺织学院, b. 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620

摘 要: 覆膜支架在临床治疗主动脉瘤方面发挥着不可替代的作用。目前, 商用覆膜支架中的覆膜主要为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 机织材料。长期的临床实践发现, PET 机织覆膜的水渗透性较高, 通常需要后处理, 且覆膜破损的案例时有发生。超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 材料具有高强高模的性能特点, 在运动医学领域已有广泛应用。研究将 UHMWPE 纱引入支架覆膜, 制备 UHMWPE 机织覆膜和 PET/UHMWPE 机织覆膜, 并与相同纱线规格的 PET 机织覆膜进行系统地对比和分析, 探究开发高强高模且更低水渗透性的 UHMWPE 机织覆膜的可行性。研究结果表明: UHMWPE 机织覆膜在周向拉伸、轴向拉伸和顶破等力学性能方面均显著优于 PET 机织覆膜 ($p < 0.05$), 其周向拉伸断裂强度约为 PET 机织覆膜的 6.3 倍, 轴向拉伸断裂强度约为 PET 机织覆膜的 3.2 倍, 顶破强力约为 PET 机织覆膜的 3.0 倍。UHMWPE 机织覆膜的水渗透性为 $(20.358 \pm 3.747) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, 低于 PET 机织覆膜 $[(73.397 \pm 4.319) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})]$ ($p < 0.05$)。可见, UHMWPE 机织覆膜具有高强高模及低水渗透性的优势, 故基于 UHMWPE 纱开发腔内隔绝术用支架覆膜是可行的。研究结果为推动新一代覆膜支架产品的开发提供了理论及实践依据。

关键词: 覆膜支架; 机织覆膜; 超高分子量聚乙烯 (UHMWPE); 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET); 高强高模; 水渗透性

中图分类号: TS156

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)05-0001-10

Research on UHMWPE woven graft cover with high strength, high modulus, and low water permeability

Wang Dan, Lin Jing, Wang Lu, Guan Guoping

a. College of Textiles, b. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The covered stents have played an irreplaceable role in clinical treatment of aortic aneurysms. Currently, the graft cover in commercial covered stents is primarily made of woven polyethylene terephthalate (PET) materials. Long-term clinical practice has revealed that PET woven graft cover exhibits high water permeability, often requiring subsequent treatment, and cases of graft cover wear and perforation have been occasionally reported. Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) material has been widely used in the field of sports medicine due to its

收稿日期: 2025-12-12

作者简介: 王丹, 女, 2001 年生, 在读硕士研究生, 研究方向为生物医用纺织材料, wonder0221@163.com

通信作者: 关国平, 教授, 研究方向为生物医用纺织材料与柔性医疗器械, ggp@dhu.edu.cn

high strength and high modulus. In this study, UHMWPE yarns were introduced to fabricate UHMWPE woven graft cover and PET/UHMWPE woven graft cover, which were then systematically compared and analyzed with PET woven graft cover with the same yarn specifications. The feasibility of developing UHMWPE woven graft cover with high strength and high modulus and lower water permeability was explored. The results showed that, the UHMWPE woven graft cover demonstrated significantly superior mechanical properties compared to the PET woven graft cover in terms of circumferential tensile, axial tensile, and bursting strength ($p < 0.05$). Specifically, its circumferential tensile breaking strength, axial tensile breaking strength, and bursting strength were approximately 6.3 times, 3.2 times, and 3.0 times higher than those of the PET woven graft cover. The water permeability of the UHMWPE woven graft cover was $(20.358 \pm 3.747) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$, which was lower than that of the PET graft cover $[(73.397 \pm 4.319) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})]$ ($p < 0.05$). These results indicate that the UHMWPE woven graft cover offers the advantages of high strength and high modulus and low water permeability, so it is feasible to develop graft cover for endovascular surgery based on UHMWPE yarns. The research findings provide theoretical and practical grounds for advancing the development of next-generation covered stent products.

Keywords: covered stent; woven graft cover; UHMWPE; PET; high strength and high modulus; water permeability

心血管疾病是全球重大公共卫生问题,严重危害着人类健康。覆膜支架植入术是治疗主动脉瘤、主动脉夹层等疾病的主流微创手段^[1]。覆膜作为覆膜支架的核心组成部分,其性能直接影响器械的服役性^[2]、生物相容性^[3]和耐久性^[4]。目前,商用支架的覆膜主要由聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)纱织造而成^[5]。PET覆膜具备良好的生物惰性和优良的力学性能^[6],已成功应用于临床数十年。然而,长期的临床应用发现,PET覆膜的极限水渗透性目前仍不能满足临床需求。因此,PET覆膜在使用前通常需采取预凝处理,以降低其水渗透性。此外,在覆膜支架取出物的失效分析研究中,时有覆膜破损案例的报道^[7-9]。这些都限制了PET覆膜支架更广泛、更长久应用。

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)属于高性能聚合物,其具有优异的力学性能和耐疲劳特性。UHMWPE线、缆、绳等产品已在骨科与关节植入物,以及运动医学与软组织修复等领域得到广泛应用^[10-12]。本研究尝试将UHMWPE纱引入支架覆膜中,制备UHMWPE机织覆膜和PET/UHMWPE机织覆膜,并从形态结构、力学性能及水渗透性3个维度系统比较和分析其与PET机织覆膜的差异,全面评估UHMWPE材料用于新一代覆膜支架产品的可

行性,以期开发耐久性更好、水渗透性更低新型覆膜支架产品提供理论及实践参考。

1 纱线与织物的准备

1.1 纱线的选择

4.44 tex/20 f UHMWPE 原纱和 4.44 tex/24 f PET 原纱,皆为实验室自制。

1.2 纱线的处理

织造上机前,对UHMWPE原纱及部分PET原纱进行络丝、倍捻、定型及整经处理。本研究还在倍捻工序之后,探究了定型处理温度(分别为50、60、70及80℃)对UHMWPE定型纱定捻效果及纱线强力的影响。

1.3 上机参数

1.3.1 织物上机密度

参考商用Anaconda覆膜支架中机织覆膜(后文简称“商用Anaconda覆膜”)的织物密度^[13],同时考虑机性能的上限,设计制备的机织覆膜的上机经向密度为900根/(10 cm)、纬向密度为550根/(10 cm)。

1.3.2 织造上机参数

织造上机参数包括总经纱数量、箱号(公制)、每箱穿入数量、穿综方式、穿综方向及综框数量等,

具体汇总见表 1。

表 1 织造上机参数

Tab. 1 On-loom parameters for weaving

项目	数值或工艺
总经纱数量/根	415
公制箱号/[箱·(10 cm) ⁻¹]	200
每箱穿入数量/(入·箱 ⁻¹)	8
穿综方式	顺穿
穿综方向	从左往右
综框数量/页	8

1.4 织物组织结构

参照《织物结构与设计》(第 5 版)^[14]提供的管状平纹织物上机图,确定机织覆膜的组织结构。

1.5 机织覆膜的织造

采用纺织一体化成型技术,分别制备 PET、UHMWPE 及 PET/UHMWPE 管状平纹机织覆膜。具体纱线配置为:PET 机织覆膜,经纱采用 4.44 tex/24 f PET 定型纱,捻度 500 T/m,S 捻,纬纱为 4.44 tex/24 f PET 原纱,无捻;UHMWPE 机织覆膜,经纬纱均采用 4.44 tex/20 f UHMWPE 定型纱,且经纬纱捻度均为 500 T/m,S 捻;PET/UHMWPE 机织覆膜,经纱采用 4.44 tex/24 f PET 定型纱(500 T/m,S 捻),纬纱采用 4.44 tex/20 f UHMWPE 定型纱(500 T/m,S 捻)。

2 纱线及机织覆膜的形态结构、力学性能及水渗透性表征

2.1 纱线及机织覆膜的表现形态

采用多尺度观察法,即先用肉眼观察纱线或机织覆膜表面明显的物理瑕疵,再使用体视显微镜(Nikon SMZ745T 型,配 DS-Fi1 镜头)观察纱线及机织覆膜的微观特征。

2.2 机织覆膜的结构参数

2.2.1 经纬向密度

依据 GB/T 4668—1995 标准,使用体视显微镜(Nikon SMZ745T 型,配 DS-Fi1 镜头,放大 20 倍)在机织覆膜正反面左上、中间、右下共 6 个位点处测量单位长度(10 cm)内的经纬纱根数,得到经纬向密度,结果取平均值。

2.2.2 壁厚

依据 GB/T 3820—1997 标准,使用持续负载厚

度仪(CH-12.7 型,压脚半径 0.5 cm,压强 1 274 Pa)测量机织覆膜壁厚。测量位点分布同 2.2.1 节。

2.2.3 紧度

基于测得的经纬向密度,以及 ImageJ 软件分析体视显微镜图像得到的纱线直径,按照式(1)~式(3)计算表征机织覆膜紧度的关键参数——经向紧度($E_j, \%$)、纬向紧度($E_w, \%$)及总紧度($E_z, \%$)。

$$E_j = d \times P_j \times 100\% \quad (1)$$

$$E_w = d \times P_w \times 100\% \quad (2)$$

$$E_z = E_j + E_w - \frac{E_j \times E_w}{100} \quad (3)$$

式中: d 为纱线直径,mm; P_j 为经向密度,根/(10 cm); P_w 为纬向密度,根/(10 cm)。

2.2.4 孔隙率

参照 YY/T 0500—2021 标准^[15]计算孔隙率。由于本研究制备的是直径为 14 mm 的直管形织物,故参考 GB/T 4669—2008 标准,裁取一定长度的机织覆膜试样,使用 PWS224ZHE 型电子天平称取试样质量并计算其面密度($M, \text{g/m}^2$)。然后,根据式(4)计算试样的表观密度($\rho_f, \text{g/cm}^3$):

$$\rho_f = \frac{M}{T \times 1\,000} \quad (4)$$

式中: T 为机织覆膜壁厚,mm。

最后,根据式(5)计算机织覆膜孔隙率($\varphi, \%$)^[16-17]:

$$\varphi = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: ρ 为纤维的密度, g/cm^3 。

2.3 纱线及机织覆膜的拉伸性能

本研究中,拉伸性能测试根据材料筛选与初步表征的行业惯例,样本量选择 3,结果取平均值。所有试样均在严格一致的工艺条件下制备,以确保数据的可靠性与趋势的明确性。

2.3.1 纱线拉伸性能

参照 GB/T 14344—2022 标准测试纱线的拉伸性能。所有试样测试前均先在温度(20 ± 2)℃、相对湿度(65 ± 4)%的标准大气环境中调湿平衡不少于 24 h。

2.3.2 机织覆膜周向拉伸断裂强度

依据 YY/T 0500—2021 标准,在医用纺织品强力测试仪上测试机织覆膜试样的周向拉伸断裂强力。

测试时,使用半圆柱形夹具以 200 mm/min 的速率沿周向拉伸管状试样直至破裂,记录周向拉伸断裂强力(T_1 , N),随后根据式(6)计算周向拉伸断裂强度(σ_1 , N/mm)^[18-19]。

$$\sigma_1 = \frac{T_1}{2L} \quad (6)$$

式中: L 为试样测试长度,mm。

2.3.3 机织覆膜轴向拉伸断裂强度

本研究引入轴向拉伸断裂强度^[20]的概念,即单位周长上的轴向拉伸强力。机织覆膜试样的轴向拉伸断裂强力依据 YY/T 0500—2021 标准测定,即在医用纺织品强力测试仪上沿管状试样的轴向以 200 mm/min 的恒定速率拉伸试样直至断裂,再根据式(7),利用轴向拉伸断裂强力(T_2 , N)和试样周长计算轴向拉伸断裂强度(σ_2 , N/mm)^[21]。测试时,控制夹持距离为 60 mm,试样长度为 100 mm。

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{\pi D} \quad (7)$$

式中: D 为试样直径,mm。

2.3.4 机织覆膜顶破强力

为评估机织覆膜抗局部顶破能力,依据 YY/T 0500—2021 标准进行探头顶破测试。具体为:使用直径为 1.5 mm 的球形探头,以 50 mm/min 的速度顶试样直至试样破裂,记录试样的顶破强力(T_3 , N)^[22]。

2.4 机织覆膜的水渗透性

参照 YY/T 0500—2021 标准及文献[15]和[23],采用课题组自制的装置^[24],在室温及 16 kPa 的条件下,测量稳态时单位时间内通过管状机织覆膜试样的水流量(Q , mL/min)。试样有效测试长度为 60 mm,直径为 14 mm。根据式(8)计算水渗透性 $[W, \text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})]$:

$$W = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

式中: A 为水流流过管状试样的有效表面积,cm²。

3 结果与讨论

本研究中,数据结果均采用“均值±标准差”的形式呈现,并运用数据分析软件进行统计分析。2组数据之间的差异显著性采用非配对 t 检验, $p <$

0.05(*)表示差异显著, $p < 0.01$ (**)表示差异极显著, $p < 0.001$ (***)表示差异极其显著。

3.1 纱线的表现形态与力学性能

图 1a)~e)为 UHMWPE 原纱及 UHMWPE 定型纱的体视显微镜照片,可以看出,经络丝、倍捻、定型工艺加工后,UHMWPE 定型纱的捻向从原纱的 Z 捻转变成了 S 捻。此外,UHMWPE 原纱外观相对均匀,表面沿长度方向呈现较平整、致密的单一结构特征;UHMWPE 定型纱由于经历了二次反向加捻,纱线内部的扭转应力被部分抵消,但表面仍可观察到沿轴线方向的微观纹理。图 1f)和 g)为 PET 原纱及 PET 定型纱的体视显微镜照片,可以看出,经络丝、倍捻、定型工艺加工后,PET 定型纱抱合更紧密,表现为纱线直径的明显减小。

图 2 为不同定型温度(50、60、70、80 °C)处理的 UHMWPE 纱的应力-应变曲线,可以看出,UHMWPE 原纱经一定温度定型处理后,纱线断裂强度下降,但不同定型温度得到的纱线断裂强度未表现出显著差异($p > 0.05$)。且对比不同定型温度的 UHMWPE 定型纱的定捻效果发现,70 °C 定型处理的效果较好。因此,后文除特指外,涉及的 UHMWPE 定型纱皆为经络丝、倍捻及 70 °C 定型处理后的纱线。

图 3 为 UHMWPE 原纱与 PET 原纱的应力-应变曲线,可以看出,UHMWPE 原纱具有远高于 PET 原纱的断裂强力,以及更低的断裂伸长率。覆膜支架植入后需长期承受血液流动产生的脉动压力,以及可能的结构性挤压^[25]。UHMWPE 材料高强度、高耐磨的特性,以及更低的蠕变性,正好能提供机织覆膜长久的结构完整性,可有效预防动脉瘤破裂。因此,在新一代高性能覆膜支架的研发中,UHMWPE 纱可能是更为可靠且耐久的材料。

3.2 机织覆膜形态结构

3.2.1 表现形态

图 4 为 3 种机织覆膜的体视显微镜照片,可以观察到它们显著的结构差异。3 种机织覆膜中,PET 定型纱加捻痕迹明显,复丝抱合紧密,纱体结构硬挺,织造过程中易产生箱痕并形成相对明显的间隙;UHMWPE 定型纱虽经过了加捻与定型处理,但其内部复丝仍保留了一定的分散性,这使得其在织造过程中能更好地填充交织点间的间隙,有助于形成结构均匀、无明显织造箱痕的织物表现形态。

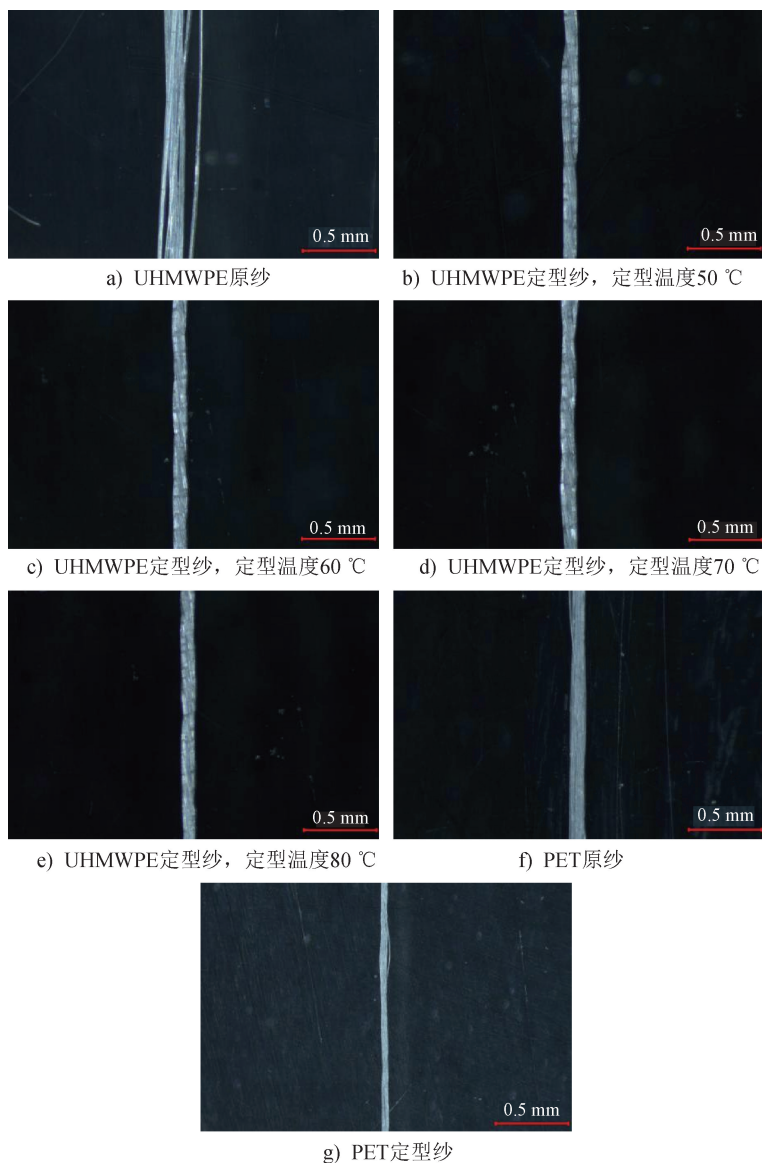


图 1 UHMWPE 纱和 PET 纱体视显微镜照片

Fig. 1 Stereo microscope images of UHMWPE yarns and PET yarns

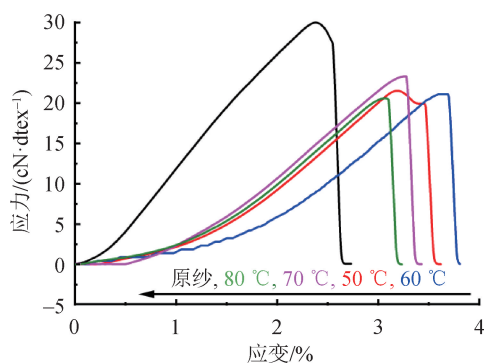


图 2 不同定型温度处理的 UHMWPE 纱的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of UHMWPE yarns treated at different setting temperatures

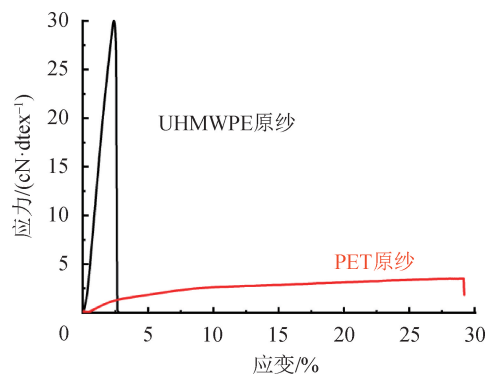


图 3 UHMWPE 原纱与 PET 原纱的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of UHMWPE and PET raw yarns

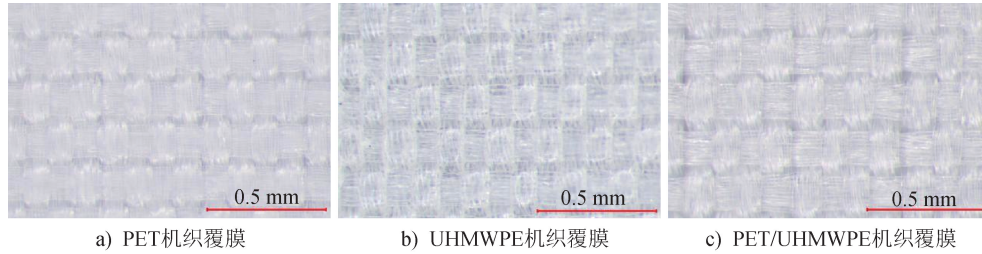


图4 机织覆膜的体视显微镜照片
Fig. 4 Stereo microscope images of woven graft cover

3.2.2 结构参数

测得3种机织覆膜的结构参数如表2所示。

3.2.2.1 经纬向密度

3种机织覆膜均采用相同的钢筘和相近的经纱张力织造,设计的经纬向密度分别为900根/(10 cm)和550根/(10 cm)。由表2可知,3种机织覆膜的实际经纬向密度存在差异。其中,PET机织覆膜与UHMWPE机织覆膜的实际经向密度分别为

(928.0±27.4)根/(10 cm)和(911.0±12.8)根/(10 cm),纬向密度分别为(569.0±11.3)根/(10 cm)和(575.0±29.6)根/(10 cm),均大于设计值。这主要与织物下机后经纬纱张力消失,纱线发生收缩有关。PET/UHMWPE机织覆膜的实际经向密度略低于设计值,而纬向密度高于设计值,这一现象表明,不同材料对织物下机后的收缩行为影响不同,机织覆膜中2种纱线的相互作用可能抑制了经向收缩。

表2 3种机织覆膜的结构参数

Tab. 2 Structural parameters of three types of woven graft cover

项目	PET 机织覆膜	UHMWPE 机织覆膜	PET/UHMWPE 机织覆膜
经向密度/[根·(10 cm) ⁻¹]	928.0±27.4	911.0±12.8	886.7±17.5
纬向密度/[根·(10 cm) ⁻¹]	569.0±11.3	575.0±29.6	577.8±8.6
壁厚/mm	0.086 5±0.001 0	0.135 4±0.008 0	0.119 1±0.007 0
纱线直径/mm	0.127±0.012	0.131±0.010	0.138±0.012
紧度/%	103.54±1.92	104.28±1.38	104.66±0.88
孔隙率/%	36.82±0.72	30.88±3.86	55.00±2.50

3.2.2.2 壁厚

覆膜壁厚关系到覆膜的力学性能、柔顺性及可输送性。目前,商用覆膜的壁厚通常控制在0.1~0.3 mm^[26]。较小的壁厚有助于减小覆膜支架的整体体积,提升植入过程的灵活性,能适配更细的输送鞘管。但壁厚过小也可能带来相应的挑战,例如削弱覆膜的力学性能与水渗透性,增加手术操作难度,并潜在地提升远期破裂风险。而较大的壁厚虽能够为覆膜提供更优异的力学性能和物理屏障效果,但这往往要牺牲材料的柔顺性和可输送性,导致血管的天然顺应性降低,继而引发血流动力学扰动,甚至提升再狭窄的发生概率。

比较3种机织覆膜的壁厚(表2)可以发现:PET机织覆膜壁厚最小,PET/UHMWPE机织覆膜壁厚次之,UHMWPE机织覆膜壁厚最大。这一方面

与PET纤维的体积密度显著大于UHMWPE纤维,相同线密度的纱线,PET纱的表观直径显著小于UHMWPE纱有关;另一方面与织物经纬纱结构相关。PET机织覆膜中经纱为加捻定型纱,较为紧密,而纬纱采用无捻纱,因此经纬纱交织点的厚度相对较小;UHMWPE机织覆膜为确保其织造顺利,经纬纱皆采用与PET定型纱相同捻度的UHMWPE定型纱,所形成的交织点厚度较有捻定型经纱与无捻纬纱交织的更大,UHMWPE机织覆膜壁厚大于PET机织覆膜;而PET/UHMWPE机织覆膜经纱为PET定型纱,纬纱为UHMWPE定型纱,壁厚居于两者之间。但无论如何,UHMWPE机织覆膜和PET/UHMWPE机织覆膜的壁厚均在可接受的范围内。

3.2.2.3 紧度

从表2可以看出,3种机织覆膜的紧度均大于

100%,且无显著差异($p>0.05$),表明 3 种机织覆膜均达到了支架覆膜所需的极致致密化水平。此现象源于对支架覆膜“高密低渗”的核心要求。织造覆膜时,为实现近零渗透,纱线在高压下挤压变形并部分重叠,形成了“过度填充”的物理结构。

3.2.2.4 孔隙率

从表 2 可以看出,3 种机织覆膜在孔隙率方面存在显著差异,根本原因在于纱线的物理特性及交织作用。PET 机织覆膜孔隙率约为 37%,这与纱线在织造过程中被适度压扁形成了典型的致密结构有关。UHMWPE 机织覆膜孔隙率最低(约 31%),这可能是因为纱线极高的刚性抵抗了织造压缩,加之

复丝抱合性较差,导致了纱线本体蓬松,进而减少了纱线间的宏观孔隙体积。PET/UHMWPE 机织覆膜孔隙率表现异常偏高(约 55%),原因可能与经纬纱在物理性能上存在差异有关,交织点处纱线因变形能力失配而产生了“架桥”效应,阻碍了纱线间的紧密贴合,进而形成了更为发达和连通的孔隙网络^[27]。

3.3 机织覆膜的力学性能

测得 3 种机织覆膜的力学性能如表 3 所示,其中 UHMWPE 机织覆膜力学性能测试及其断口形貌如图 5 所示,3 种机织覆膜的相关力学性能曲线如图 6 所示。

表 3 3 种机织覆膜的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of three types of woven graft cover

项目	PET 机织覆膜	UHMWPE 机织覆膜	PET/UHMWPE 机织覆膜
周向拉伸断裂强度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	9.924±0.525	62.349±5.812	61.327±0.952
轴向拉伸断裂强度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	14.735±0.348	46.873±2.946	15.040±0.138
顶破强力/N	54.172±1.004	163.951±4.447	84.103±4.171

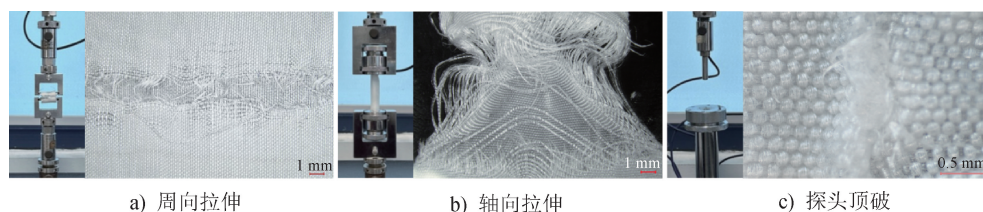


图 5 UHMWPE 机织覆膜力学性能测试及其断口形貌

Fig. 5 Mechanical properties testing and fracture morphology of UHMWPE woven graft cover

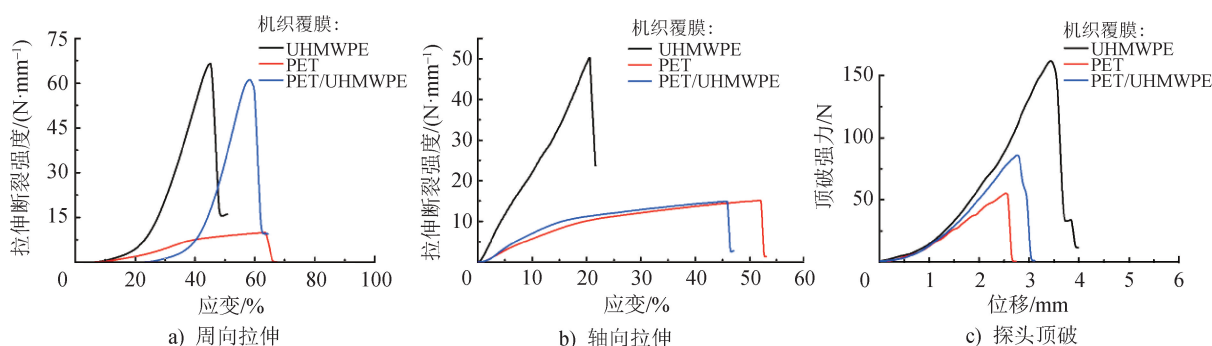


图 6 3 种机织覆膜的力学性能曲线

Fig. 6 Mechanical properties curves of three types of woven graft cover

3.3.1 周向拉伸断裂强度

周向拉伸断裂强度体现了织物纬纱方向的力学强度。从表 3 可以看出,UHMWPE 机织覆膜的周向拉伸断裂强度约为 PET 机织覆膜的 6.3 倍,

可见 UHMWPE 材料可提高机织覆膜周向拉伸性能。UHMWPE 定型纱本身具有极高的比强度和模量,能赋予织物优异的抗拉伸性能,同时它在织造过程中能形成稳定的结构,有利于应力均匀分

布,从而整体提高织物的周向拉伸断裂强度与使用可靠性。这对于覆膜支架植入后抵抗血流压力、维持管腔长期通畅具有重要意义。商用 Anaconda 覆膜的周向拉伸断裂强度为 $(16.74 \pm 0.91) \text{ N/mm}^{[20]}$,其采用 PET 材料制作。本研究制备的 3 种机织覆膜的周向拉伸强度均满足覆膜支架的最低要求 (5.5 N/mm) 。

3.3.2 轴向拉伸断裂强度

从表 3 可以看出,3 种机织覆膜的轴向拉伸断裂强度总体存在显著差异 ($p < 0.05$)。进一步比较发现:UHMWPE 机织覆膜的轴向拉伸断裂强度最高,约为 PET 机织覆膜和 PET/UHMWPE 机织覆膜的 3.2 倍和 3.1 倍;而 PET/UHMWPE 机织覆膜与 PET 机织覆膜之间的轴向拉伸断裂强度差异无统计学意义 ($p > 0.05$),两者数值较为接近且标准差较小,表明其强度稳定性良好。这一结果表明,尽管 UHMWPE 定型纱具有极高的比强度和模量,能够显著提升机织覆膜的轴向力学性能,但仅将 UHMWPE 定型纱用作纬纱时,对 PET/UHMWPE 机织覆膜轴向强度的贡献有限,原因在于轴向载荷主要由经纱承担。

3.3.3 顶破强力

从表 3 可以看出,3 种机织覆膜的顶破强力总体差异极其显著 ($p < 0.001$)。进一步比较发现:UHMWPE 机织覆膜的抗顶破性能最优,其顶破强力约为 PET 机织覆膜的 3.0 倍,约为 PET/UHMWPE 机织覆膜的 1.9 倍;PET/UHMWPE 机织覆膜的顶破强力为 $(84.103 \pm 4.171) \text{ N}$,与 PET 机织覆膜差异显著 ($p < 0.05$),与 UHMWPE 机织覆膜差异极其显著 ($p < 0.001$)。这表明,引入 UHMWPE 定型纱能够有效提升机织覆膜抵抗局部集中载荷的能力,且抗顶破性能与 UHMWPE 定型纱的加入量正相关。

3.3.4 小结

比较 3 种机织覆膜的力学性能可以看出,纱线原料对机织覆膜的多项力学行为有决定性影响。UHMWPE 机织覆膜在周向拉伸断裂强度、轴向拉伸断裂强度及顶破强力方面均显著优于另 2 种机织覆膜 ($p < 0.05$),表明其在承受周向血流压力、轴向牵伸以及抵抗支架磨损等方面具有更高的可靠性。

设计 PET/UHMWPE 机织覆膜的初衷是,通过在纬向引入高强度、高耐磨的 UHMWPE 定型纱,解

决金属支架尖端对覆膜的局部磨损问题。且试验结果表明,该设计能显著提升覆膜的周向拉伸断裂强度与顶破强力,但由于其轴向仍由 PET 定型纱主导,其轴向性能提升不明显。

3.4 水渗透性

商用 Anaconda 覆膜的水渗透性为 $(39.05 \pm 3.53) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})^{[20]}$,测得 UHMWPE 机织覆膜的水渗透性为 $(20.358 \pm 3.747) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 、PET 机织覆膜的水渗透性为 $(73.397 \pm 4.319) \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,可见 UHMWPE 机织覆膜的水渗透性达到了预期目标。UHMWPE 定型纱中适度分散的单丝使其在交织过程中更易形成连续且均匀的覆盖层,减少水的渗透^[28-29]。此外,覆膜壁厚也是影响水渗透行为的关键因素。水在压力差的作用下透过织物的过程,本质就是流体流经纤维构成的复杂多孔介质的过程^[30]。在这一过程中,覆膜壁厚较大,则水渗透的路径更长、更复杂。根据流体力学原理,流体流经多孔介质时会与材料表面持续摩擦,路径越长、越复杂,则摩擦累积效应越强,水分子与纤维发生碰撞或被吸附的概率越高,且每一次相互作用都伴随能量的损耗和动量的变化,水流阻力增大,渗透率进一步降低。此外,壁厚较大的覆膜还伴随着平均孔径的减小和孔隙率的降低。UHMWPE 机织覆膜正是基于增加路径长度、提高曲折度和摩擦阻力、减少有效孔径等多重机制,获得了更优的抗水渗透能力。而 PET 机织覆膜需经过致密化处理才能使其水渗透性接近商用 Anaconda 覆膜。

4 结论

本研究以 4.44 tex/24 f PET 原纱与 4.44 tex/20 f UHMWPE 原纱为原材料,分别制备了 PET、UHMWPE 和 PET/UHMWPE 管状平纹机织覆膜,并对 3 种机织覆膜的形态结构、力学性能及水渗透性进行了系统地比较和分析,发现 UHMWPE 机织覆膜表面结构均匀、无明显织造瑕疵与孔洞,各项结构参数满足覆膜结构要求,且在力学性能和抗水渗透性方面优势显著,更契合血管覆膜支架的应用需求。研究证实了利用 UHMWPE 定型纱开发机织覆膜的可行性。但 UHMWPE 机织覆膜较大的壁厚和较高的刚性可能对覆膜支架的缝合以及血管顺应性和柔

顺性带来一定挑战,未来尚需在这些方面作进一步的探究,如不局限于单一材料,着眼多尺度结构设计,在纬向引入低模量弹性纤维以构建“刚-柔”复合体系,或通过局部组织变化(如边缘采用更疏松的绉纹组织),提升界面贴合性等。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] SHU Y, GUO Y L, ZHENG Y, et al. RNA methylation in vascular disease: a systematic review[J]. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, 2022, 17(1): 323.
- [2] HU Q X, HUANG Z W, ZHANG H G, et al. Coaxial electrospun Ag-NPs-loaded endograft membrane with long-term antibacterial function treating mycotic aortic aneurysm[J]. *Materials Today Bio*, 2024, 25: 100940.
- [3] LAZIC I, OBERMEIER A, DIETMAIR B, et al. Treatment of vascular graft infections: gentamicin-coated ePTFE grafts reveals strong antibacterial properties *in vitro*[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2022, 33(3): 30.
- [4] KADAVIL H, ZAGHO M, ELZATAHRY A, et al. Sputtering of electrospun polymer-based nanofibers for biomedical applications: a perspective [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(1): 77.
- [5] DESYATOVA A, MACTAGGART J, KAMENSKIY A. Effects of longitudinal pre-stretch on the mechanics of human aorta before and after thoracic endovascular aortic repair (TEVAR) in trauma patients[J]. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2020, 19(1): 401-413.
- [6] NDAGANO U N, CAHILL L, SMULLEN C, et al. The current state-of-the-art of the processes involved in the chemical recycling of textile waste [J]. *Molecules*, 2025, 30(2): 299.
- [7] FANG H Y, LEE W C, KUO F Y. A stent fracture associated with giant coronary aneurysm [J]. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2020, 36(1): 13-14.
- [8] WANHAINEN A, NYMAN R, ERIKSSON M O, et al. First report of a late type III endoleak from fabric tears of a Zenith stent graft[J]. *Journal of Vascular Surgery*, 2008, 48(3): 723-726.
- [9] ZARINS C K, ARKO F R, CRABTREE T, et al. Explant analysis of AneuRx stent grafts: relationship between structural findings and clinical outcome [J]. *Journal of Vascular Surgery*, 2004, 40(1): 1-11.
- [10] LU X J, MENG Q G, WANG J, et al. Transient viscoelastic lubrication analyses of UHMWPE hip replacements[J]. *Tribology International*, 2018, 128: 271-278.
- [11] DE MELLO GINDRI I, SILVEIRA DA SILVA L, VITOR SALMORIA G, et al. Ibuprofen-loaded UHMWPE for orthopedics applications: preliminary evaluation of mechanical and biological properties [J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(10): 10907-10919.
- [12] HIRANAKA T, FURUMATSU T, OKAZAKI Y, et al. Clinical evaluation of suture materials for transtibial pullout repair of medial meniscus posterior root tear[J]. *Knee Surgery & Related Research*, 2022, 34(1): 39.
- [13] 林婧. 血管覆膜支架织物覆膜的梯度化设计、成型及耐久特性研究 [D]. 上海: 东华大学, 2019.
- [14] 荆妙蕾. 织物结构与设计 [M]. 5 版. 北京: 中国纺织出版社, 2014.
- [15] 国家药品监督管理局. 心血管植入物 血管假体 管状血管移植物和血管补片: YY/T 0500—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [16] 刘雪莹, 邹婷, 王璐. 纤维原料对机织人工血管织物结构和力学性能的影响 [J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(10): 1-11.
- [17] 胡婧怡, 李超婧, 毛吉富, 等. 纺织基人工血管管壁结构对其性能的影响规律 [J]. *东华大学学报 (自然科学版)*, 2024, 50(3): 78-84.
- [18] HERNANDEZ-SANCHEZ D, COMTOIS-BONA M, MUÑOZ M, et al. Manufacturing and validation of small-diameter vascular grafts: a mini review [J]. *iScience*, 2024, 27(6): 109845.
- [19] MOGHE A K, GUPTA B S. Small-diameter blood vessels by weaving: prototyping and modelling [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2008, 99(5): 467-477.
- [20] 杜佳, 林婧, GUIDOIN R, 等. 具有局部耐久结构覆膜支架织物覆膜的成型与性能研究 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2017, 36(2): 252-256.
- [21] LI C J, WANG F J, DOUGLAS G, et al. Comprehensive mechanical characterization of PLA fabric combined with PCL to form a composite structure

- vascular graft[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017, 69: 39-49.
- [22] YANG X Y, WANG L, GUAN G P, et al. Preparation and evaluation of bicomponent and homogeneous polyester silk small diameter arterial prostheses [J]. Journal of Biomaterials Applications, 2014, 28 (5): 676-687.
- [23] GUAN G P, YU C L, FANG X, et al. Exploration into practical significance of integral water permeability of textile vascular grafts [J]. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 2021, 19: 22808000211014007.
- [24] 关国平, 胡星友, 沈高天, 等. 压强可控的人工血管整体水渗透性测试仪及其使用方法: CN201510418726.1 [P]. 2017-09-19.
- [25] BAI M T, LI D, XU K Y, et al. Rapid morphological measurement method of aortic dissection stent based on spatial observation point set[J]. Bioengineering, 2023, 10(2): 139.
- [26] 关颖. 血管覆膜支架生物力学: 径向顺应性和纵向柔顺性的动态精细化研究 [D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [27] FEI X P, GUO L P, LU J T, et al. Effect of steam curing temperature on performance of high ductility cementitious composites (part I: modified fiber bridging model, performance and mechanism) [J]. Construction and Building Materials, 2025, 458: 139747.
- [28] 张洁, 刘新金. UHMWPE 复合纱的纺织及性能测试 [J]. 丝绸, 2021, 58(4): 24-28.
- [29] ZHAO Z Y, DONG Z J, CHEN C Y, et al. Synergistically improving interface behavior by designing physical twisting structure and “rigid-flexible” interface layer on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber surface[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 199: 111805.
- [30] MOHAMMADI M, SHAFIEI M, ZARIN T, et al. Investigation of smoothed particle hydrodynamics (SPH) method for modeling of two-phase flow through porous medium: application for drainage and imbibition processes[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 22144.

欢迎投稿 2026 年《产业用纺织品》

《产业用纺织品》(月刊), 大 16 开, 全彩色印刷, 定价 12.00 元/册, 全年 144.00 元, 中国标准连续出版物号 ISSN 1004-7093, 邮发代号 4-492。
CN 31-1595/TS

《产业用纺织品》创刊于 1983 年, 由教育部主管, 东华大学、全国产业用纺织品科技情报站主办, 中国产业用纺织品行业协会协办, 东华大学期刊中心编辑出版, 月刊, 是全国产业用纺织品领域具有权威性的期刊之一; 为《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊, 已入编中国学术期刊(网络版)、万方数据-数字化期刊群、中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台等; 多次入编《中文核心期刊要目总览》; 现为 CACJ 中国应用型核心期刊; 入选《纺织领域高质量科技期刊分级目录(2025 版)》T3 级; 知网 CI 指数位居纺织科学技术类期刊 Q2 区; 获评上海市高校特色科技期刊; 被 EBSCO 数据库收录; “综述”栏目入选第七届华东地区期刊“优秀栏目”。

秉承“创新、严谨、求实”的办刊作风, 《产业用纺织品》致力于建设高质量、高水平一流学术期刊。期刊以“产业用纺织品”为特色, 主要刊登国内外有

关纺织品的综述文章, 科研、生产技术报告, 报道相关领域的新产品、新材料、新技术及新设备, 并介绍相关的专利、标准、测试方法, 以及相关领域的行业动态、市场信息等。

2026 年, 《产业用纺织品》重点选题方向包括高品质非织造材料、安全防护与应急救援用纺织品、航空航天用高性能纺织品、海洋产业与渔业用纺织品、医疗健康用纺织品、交通运输用纺织品、土工建筑用纺织品、过滤用纺织品等, 欢迎自荐栏目主持人。热忱欢迎国内外纺织高等院校师生、科研人员、产业用纺织行业相关企业工程技术人员等将优秀研究论文发表在《产业用纺织品》上。

《产业用纺织品》承接相关广告, 并热诚为客户宣传, 欢迎有意者来电或 E-mail 联系。

地址: 上海市延安西路 1882 号

东华大学出版社楼 207 室

电话: 021-62378228

E-mail: techtex@dhu.edu.cn

采编平台: <https://cyyf.cbpt.cnki.net>

