

编织参数对双层编织管孔隙率的影响

时子祥¹ 孟粉叶² 杨旭东¹ 胡吉永^{1,3}

1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;
2. 嘉兴职业技术学院 时尚设计学院, 浙江 嘉兴 314000;
3. 安徽恒益智能科技股份有限公司, 安徽 界首 236500

摘要: 编织管的性能和应用受其孔隙率的影响。为探究编织参数对双层编织管孔隙率的影响, 制备不同编织角度、编织根数与编织纱直径的双层编织管试样并对比其孔隙率。结果表明, 随着编织角度、编织根数和编织纱直径的增加, 双层编织管的孔隙率减小; 编织角度、编织根数及编织纱直径与双层编织管的孔隙率均存在高度相关性, 且编织纱直径对双层编织管孔隙率的影响最大, 编织角度的影响相对较小。

关键词: 编织技术; 双层编织管; 编织角度; 编织根数; 编织纱直径; 孔隙率; 线性回归分析

中图分类号: TS 111.8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)02-0024-06

Influence of braiding parameters on the porosity of double-layer braided tubes

Shi Zixiang¹, Meng Fenyue², Yang Xudong¹, Hu Jiyong^{1,3}

1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Fashion Design Institute, Jiaxing Vocational & Technical College, Jiaxing 314000, Zhejiang, China;
3. Anhui Hengyi Smart Technology Co., Ltd., Jieshou 236500, Anhui, China

Abstract: The performance and application of braided tubes are affected by their porosity. To investigate the influence of braiding parameters on the porosity of double-layer braided tubes, the samples of double-layer braided tubes with different braiding angles, braiding yarn number and braiding yarn diameters were made and their porosity was compared. The results showed that with the increase of braiding angle, braiding yarn number and braiding yarn diameter, the porosity of the double-layer braided tubes decreased. There was a high correlation between the braiding angle, braiding yarn number, braiding yarn diameter and the porosity of the double-layer braided tube, and the braiding yarn diameter had the greatest impact on the porosity of the double-layer braided tube, while the impact of the braiding angle was relatively small.

Keywords: braiding technique; double-layer braided tube; braiding angle; braiding yarn number; braiding yarn diameter; porosity; linear regression analysis

基金项目: 安徽省制造业重点领域技术攻关项目(JB22053)

收稿日期: 2024-09-26

作者简介: 时子祥, 男, 2000年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为编织技术

通信作者: 胡吉永, 教授, hujy@dhu.edu.cn

近年来,由纺织纤维制成的管状材料在航空、医疗、复合材料和组织工程^[1-3]等诸多领域备受欢迎。这种管状材料可通过编织^[4]、机织^[5]、针织^[6]和非织造^[7]等工艺制备。相对而言,采用编织法制备管状材料的速度更快、效率更高,且可通过改变材料类型和编织工艺满足不同产品的应用需求。对于编织成型的管状材料(编织管),编织参数显著影响材料孔隙结构和孔隙率,进而影响其性能和实际应用。通常,较大的孔隙和较高的孔隙率易导致编织管径向抗压性能下降。孔隙形状、大小、分布及孔隙率是影响编织管质量的关键因素^[8-9]。

目前,针对单层编织管孔隙率的研究已取得一系列进展。如:Rebello 等^[10]通过改变纱线直径、编织角度(纱线与芯轴方向的夹角)等探究了影响编织管孔隙率的因素,发现编织管孔隙率随着纱线直径的减小而增大,随着编织角度的增大而减小;Li 等^[11]建立了纱线数量、编织角度、纱线直径等编织参数与编织管孔径、孔隙率之间的关系方程,用以预测不同参数编织管的孔隙结构;Alpyildiz^[12]基于对编织纱线卷曲形态的考虑,构建了不同结构编织管的几何模型,该模型不仅适用于多种不同的编织结构,而且适用于编织角度、纱线数量、纱线直径及芯轴直径等结构参数变化的情况;Lou 等^[13]探究了孔隙结构对编织管力学性能的影响。

随着技术的发展,编织管的应用领域不断扩大。如在电子雾化领域,通过改变编织结构制备的孔隙率可调(10%~70%)的编织管,能够作为雾化芯替代传统的陶瓷芯,实现成本更低、结构更均匀且雾化效果更好的电子雾化产品的制备。然而,前期试验表明,单层编织管无法满足雾化过滤率及适配装配等特定应用需求,双层编织结构是可行的解决方案。基于此,有必要探究双层编织结构下各编织参数对编织管孔隙率的影响。

本文以双层编织管为研究对象,探究编织材料和编织参数对其孔隙率的影响,旨在为满足特定要求的编织管的制备提供原料选择与工艺参数方面的支持。编织过程中,影响编织管孔隙率的因素主要有编织角度、编织根数与编织纱直径,本文将采用单一变量控制法探讨上述各编织参数对双层编织管孔隙率的影响。

1 试验部分

1.1 试验材料

本文制备的双层编织管主要用于电子雾化领域,其基本工作原理:编织管通过芯吸效应将中空多孔金属管内部的雾化液经由金属管壁上的小孔输送到编织材料表面。因此,采用的编织材料需具有良好的吸湿性且对人体无健康危害。棉纤维作为一种天然纺织材料,具有良好的透气性和吸湿性,并且可通过加捻等工艺处理赋予其不同的强度,因而适合制作应用于电子雾化领域的编织管。

试验材料主要为棉纱和中空多孔金属管,具体规格参数如表 1 所示。

表 1 试验材料的规格参数

Tab. 1 Specification parameters of experimental materials

| 试验材料 | 规格 |
|---------|-------------------------------|
| 合股棉纱 | 线密度 14 tex×2,直径(0.26±0.01) mm |
| 棉单纱 | 线密度 14 tex,直径(0.16±0.01) mm |
| 中空多孔金属管 | 长 10 mm,内径 1.4 mm,外径 1.6 mm |

1.2 试验设计

为探讨编织角度、编织根数与编织纱直径这 3 个因素与双层编织管孔隙率的关系,分别选择 6、8 和 12 根不同直径的棉纱(合股棉纱和棉单纱),通过调整编织机的上机工艺参数,改变编织角度,分别制备实际编织角度为 63°、56°、40°和 30°的单、双层编织管。通过单层编织结构分析双层编织管孔隙率的变化情况及其原因。

1.3 双层编织管的制备

为实现连续化编织,使用尼龙线串联数个中空多孔金属管形成芯轴。根据 1.2 节的试验设计方案,采用高速编织机(110-12×1 型,徐州七星机械有限公司)在芯轴表面均匀编织棉纱,制备不同编织角度、编织根数与编织纱直径的双层编织管。双层编织管的制备过程示意如图 1 所示。

1.4 性能测试及分析

1.4.1 表面形貌测试

为确保双层编织管的应用稳定性,首先要求其形态结构均匀。采用电子显微镜(HDMI200C-B 型,深圳市宗源伟业科技有限公司)观察双层编织

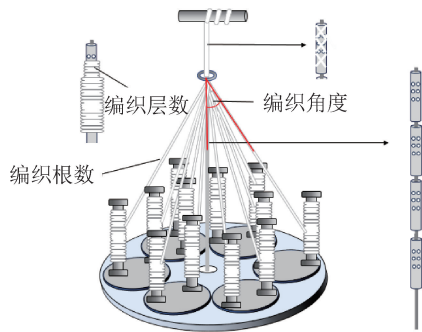


图1 双层编织管的制备过程示意

Fig. 1 Diagram of preparation process of double-layer braided tubes

管的表面形态,并测量编织角度等相关参数。

1.4.2 孔隙率测试

对于圆管结构的编织管,难以通过直接拍摄其表面,测试管壁孔隙结构并计算孔隙率。因此,使用火棉胶(热固化后不收缩)对编织管进行固化处理再展开,将三维编织管转化成二维平面结构,以更准确地拍摄管壁结构并计算编织管孔隙率。具体操作如下:将火棉胶涂覆于编织管表面,静置3~5 min,待火棉胶干透后将编织管沿轴线切开、展平,然后拍摄其表面形态照片,通过图像分析软件 Image J 计算孔隙率。双层编织管孔隙率具体测试流程如图2所示。每种试样测试3次,结果取平均值。孔隙面积与测试面积之比即为孔隙率。

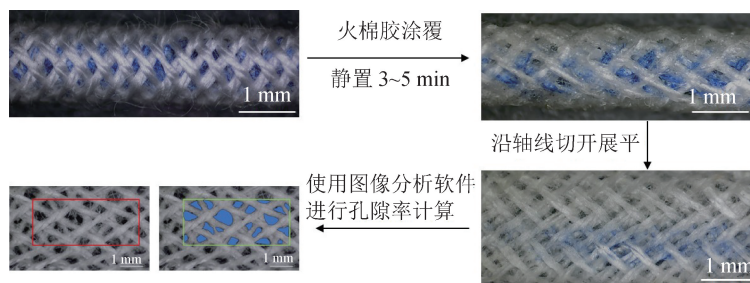


图2 双层编织管孔隙率测试流程

Fig. 2 Test process of porosity of double-layer braided tubes

2 结果与讨论

2.1 编织角度对编织管孔隙率的影响

编织纱直径为 (0.26 ± 0.01) mm、编织根数为6时,4种编织角度的双层编织管的孔隙率测试结果如图3所示。可以看出,其他条件一定时,随着编织角度的增加,双层编织管的孔隙率减小,这与 Rebelo 等^[10]的研究结果基本一致,但存在一定的差异:文献[10]得出编织角度与孔隙率的关系曲线趋于线性,而本文得到的二者关系曲线为非线性。可能的原因如下:一是编织材料的差异导致的,文献[10]采用的是尼龙等弹性较小的材料,随着编织角度的变化,其编织纱直径几乎不发生改变,而本文采用的是具有一定弹性的棉纱,其在不同编织角度下的直径存在差异,进而影响编织管的孔隙率;二是本文的研究对象是双层编织管,编织管外层会对内层产生影响,造成孔隙率随编织角度呈非线性变化;三是文献[10]选取的编织角度范围较小($20^\circ \sim 35^\circ$),而本

文选取的编织角度范围较大($30^\circ \sim 63^\circ$),孔隙率变化幅度也相应较大。此外,本文编织角度对孔隙率影响的研究结果,与 Li 等^[11]推导出的理论孔隙率随编织角度的变化情况趋于一致,只是数值上存在一定的差异,原因是文献[11]的模型主要用于预测单层编织管孔隙率,而本文的试验对象是双层编织管,故不完全适用。

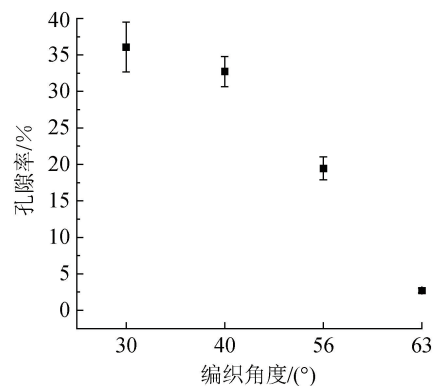


图3 编织角度对双层编织管孔隙率的影响

Fig. 3 Effect of braiding angle on porosity of double-layer braided tubes

相同测试面积下不同编织角度的编织管孔隙面积变化情况如图 4 所示。由图 4a)~图 4c)可以看出,对于单层编织管,随着编织角度的减小,编织管表面纤维的交错减少,相同测试面积下编织管的孔隙面积增大,即孔隙率增大;由图 4d)~

图 4f)可以看出,对于双层编织管,存在外层纱线覆盖内层纱线和孔隙区域的情况,且编织角度越大,外层纱线覆盖内层孔隙的情况越明显,相同测试面积下编织管的孔隙面积越小,孔隙率也越小。

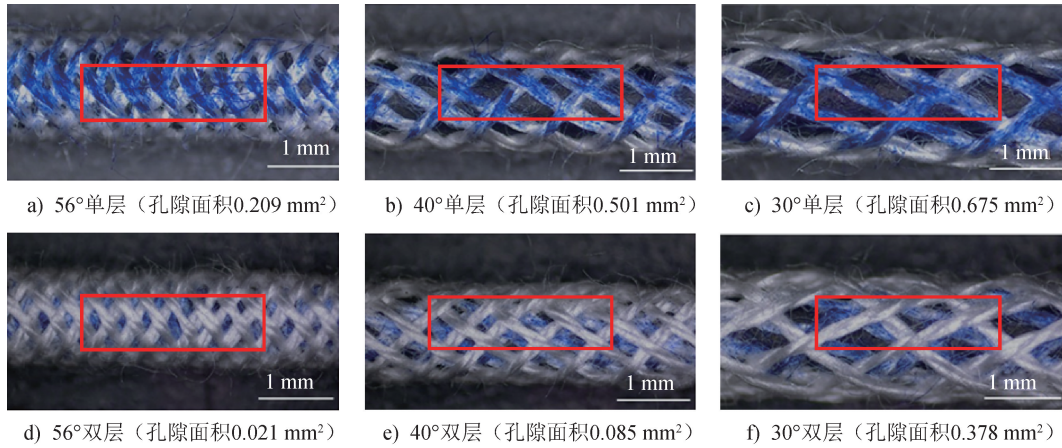


图 4 相同测试面积下不同编织角度的编织管孔隙面积变化情况

Fig. 4 Pore area changes of braided tubes with different braiding angles under the same test area

2.2 编织根数对编织管孔隙率的影响

编织纱直径为 (0.26 ± 0.01) mm、编织角度为 40° 时,4 种编织根数的双层编织管的孔隙率测试结果如图 5 所示。可以看出,其他条件不变时,随着编织根数的增加,编织管孔隙率减小,这与 Li 等^[11]得到的结果趋于一致,但由于文献[11]选择的编织根数(8、16、32)与本文不同,因此孔隙率的变化程度存在一定的差异。由图 6a)~图 6c)可以看出,对于单层编织管,随着编织根数的减少,编织管表面纤维的交错减少,相同测试面积下编织管的孔隙面积增大;由图 6d)~图 6f)可以看出,对于双层编织管,

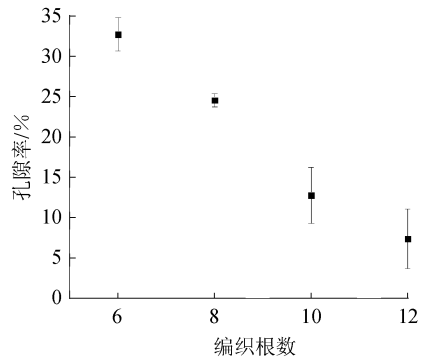


图 5 编织根数对双层编织管孔隙率的影响

Fig. 5 Effect of braiding yarn number on porosity of double-layer braided tubes

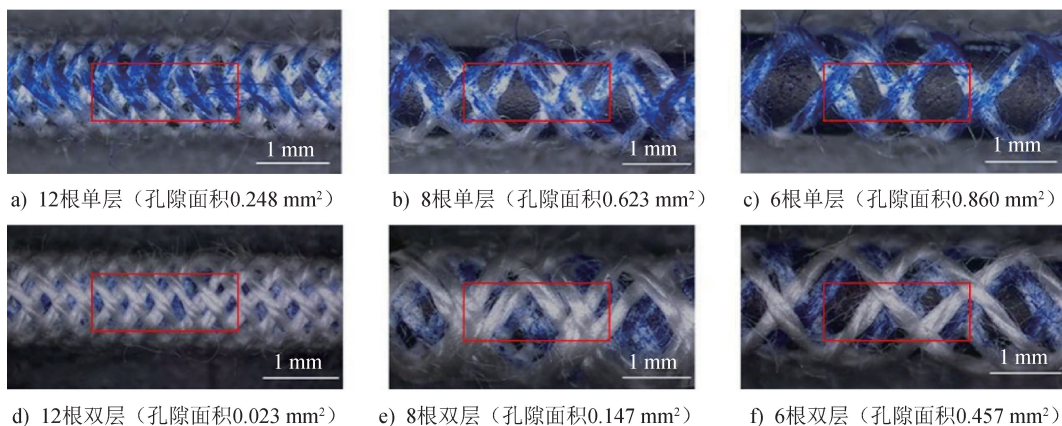


图 6 相同测试面积下不同编织根数的编织管孔隙面积变化情况

Fig. 6 Pore area changes of braided tubes with different braiding yarn number under the same test area

编织根数越多,外层纱线覆盖内层孔隙的面积就越大,相同测试面积下编织管的孔隙率越小。

2.3 编织纱直径对编织管孔隙率的影响

编织根数为 8 时,不同编织角度下 2 种编织纱直径的双层编织管的孔隙率测试结果如图 7 所示。可以看出,其他条件不变时,采用直径为 (0.16 ± 0.01) mm 的棉单纱制备的编织管孔隙率明显高于直径为 (0.26 ± 0.01) mm 的合股棉纱制备的编织管。

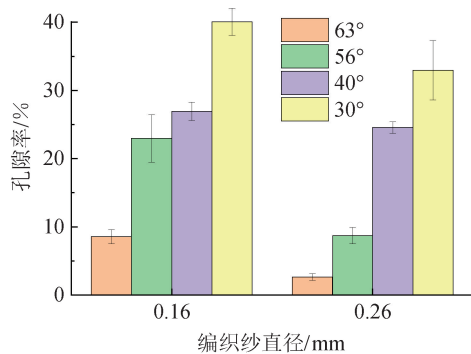


图 7 编织纱直径对双层编织管孔隙率的影响

Fig. 7 Effect of braiding yarn diameter on porosity of double-layer braided tubes

图 8 示出了不同编织纱直径下单层编织管的孔隙面积差异,类比说明双层编织管的孔隙率既受编织纱直径的影响,又受单层编织管孔隙率的影响。可知,直径大的纱线会占据更多原本较小的孔隙区域,从而导致大直径纱线编织的双层编织管孔隙率更小。

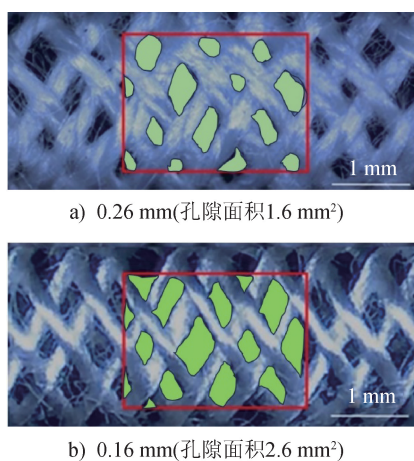


图 8 同一测试面积(7.7 mm²)下不同直径编织纱编织的单层编织管的孔隙面积对比

Fig. 8 Comparison of pore areas of single-layer braided tubes with different braiding yarn diameter under the same test area (7.7 mm²)

对编织角度、编织根数和编织纱直径与孔隙率进行 Spearman 相关性分析。具体判断标准如下:当相关性系数 $R \geq 0.8$ 时,判定两者之间存在高度相关性;当 $0.5 \leq R < 0.8$ 时,为中度相关;当 $0.3 \leq R < 0.5$ 时,为低度相关;当 $R < 0.3$ 时,则视为不相关。Spearman 相关性分析结果显示:编织角度 ($R = 1.00, P < 0.01$)、编织根数 ($R = 1.00, P < 0.01$) 及编织纱直径 ($R = 0.95, P < 0.01$) 与孔隙率之间均呈现出高度相关性。

采用多重线性回归分析方法,根据编织角度、编织根数和编织纱直径预测编织管的孔隙率,具体结果见表 2,得到线性回归方程如式(1)所示。

$$p = 100.035 - 0.724\theta - 3.157n - 89.594d \quad (1)$$

式中: p 为孔隙率; θ 为编织角度; n 为编织根数; d 为编织纱直径。

表 2 多重线性回归结果

Tab. 2 Multiple linear regression results

| 变量 | 系数 | 标准误差 | 标准化系数 |
|-------|---------|--------|---------|
| 编织角度 | -0.724 | 0.065 | -11.099 |
| 编织根数 | -3.157 | 0.379 | -8.337 |
| 编织纱直径 | -89.594 | 16.936 | -5.290 |

F 检验是一种评估整体回归方程显著性的方法,旨在检验所有自变量对因变量产生的影响是否显著。当 F 检验结果呈现出显著性 ($P < 0.001$) 时,意味着至少有一个自变量能够解释一部分因变量的变异,从而证实构建的检验模型合理。此外,调整后 R^2 值受自变量个数的影响相对较小,是一个更为稳健的指标,用于衡量模型所能解释的因变量变化的百分比。 R^2 值在 0 和 1 之间,其值越接近 1,说明模型的拟合效果越好。

多重线性回归分析得出 $F = 73.56, P < 0.001$,调整后 R^2 值为 0.875,表明该回归方程中 3 个自变量(编织角度、编织根数和编织纱直径)对孔隙率的影响均具有统计学意义。

上述研究结果表明,编织角度、编织根数和编织纱直径均影响多层编织管的孔隙率,且编织纱直径对孔隙率的影响最大,编织角度对孔隙率的影响相对较小。

3 结论

本文使用具有良好吸湿性且对人体无健康危害的棉纱制备单层和双层编织管,探讨编织参数对双层编织管孔隙率的影响。结果表明,双层编织管的孔隙率随着编织角度、编织根数及编织纱直径的增大而减小,且编织角度、编织根数及编织纱直径与双层编织管的孔隙率均存在高度相关性。多重线性回归分析结果表明,编织纱直径对双层编织管孔隙率的影响最大,编织角度对双层编织管孔隙率的影响相对较小。



参考文献

- [1] FREEMAN J W, WOODS M D, LAURENCIN C T. Tissue engineering of the anterior cruciate ligament using a braid-twist scaffold design [J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(9): 2029-2036.
- [2] TATE J S, KELKAR A D, WHITCOMB J D. Effect of braid angle on fatigue performance of biaxial braided composites[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(10): 1239-1247.
- [3] TANG Z X, POSTLE R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials Part I: fabric structure and fibre volume fraction[J]. Composite Structures, 2000, 49(4): 451-459.
- [4] 张万灵. 可降解管道支架的纺织参数对其径向压缩性能的影响[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [5] 李倩, 王云云, 李毓陵, 等. 机织人工气管的性能分析[J]. 产业用纺织品, 2011, 29(6): 12-14.
- [6] 张佩华, 王文祖, 陈南梁. 针织医用金属内支架的编织工艺研究[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2002, 28(5): 30-33.
- [7] 何建龙, 李文龙, 张帆, 等. 纤维素长丝直接成网非织造技术的新进展[J]. 合成纤维, 2022, 51(2): 27-31.
- [8] AKBARI M, TAMAYOL A, BAGHERIFARD S, et al. Textile technologies and tissue engineering: a path toward organ weaving [J]. Advanced Healthcare Materials, 2016, 5(7):751-766.
- [9] MILLER K S, KHOSRAVI R, BREUER C K, et al. A hypothesis-driven parametric study of effects of polymeric scaffold properties on tissue engineered neovessel formation[J]. Acta Biomaterialia, 2015, 11: 283-294.
- [10] REBELO R, VILA N, FANGUEIRO R, et al. Influence of design parameters on the mechanical behavior and porosity of braided fibrous stents [J]. Materials & Design, 2015, 86: 237-247.
- [11] LI C J, WANG X M, ZHAO F, et al. Modeling of braiding parameter impact on pore size and porosity in a tubular braiding fabric[J]. e-Polymers, 2017, 17(3): 221-226.
- [12] ALPYILDIZ T. 3D geometrical modelling of tubular braids[J]. Textile Research Journal, 2012, 82(5): 443-453.
- [13] LOU C W, LU P C, HU J J, et al. Effect of manufacturing parameters and thermal treatment on the properties of tubular braids and tubular knits [J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 36(4): 421-430.

惟创新者进
惟创新者强
惟创新者胜