

先进材料

医用透析原纸的研究现状及发展趋势

张燊¹, 傅成龙¹, 陶叶晗¹, 吕艳娜¹, 白亮亮², 潘高峰^{2*}, 王海松^{1*}
(1.大连工业大学, 辽宁 大连 116034; 2.牡丹江恒丰纸业, 黑龙江 牡丹江 157013)

摘要: **目的** 综述医用透析纸的研究现状, 介绍医用透析纸的相关标准以及基本性能特征, 并对其应用前景和发展趋势进行展望, 为今后医用透析纸的研究提供思路和方法。 **方法** 通过系统检索国内外相关文献, 归纳并分析医用透析纸在标准规范、材料性能和技术发展方面的研究进展, 同时对比现有医用透析纸的技术标准, 综述性能优化的主要方法和实现路径, 包括透气性、抗菌性、湿强度和力学强度等关键性能的改进策略。 **结果** 研究表明, 传统医用透析袋主要由透明塑料薄膜制成, 尽管在强度和成型性上具有一定优势, 但在环保性和可持续性方面难以满足需求; 以植物纤维为主要原料制备的医用透析纸, 因优异的透气性、抗菌性、湿强度和力学强度, 成为取代塑料薄膜的理想选择。 **结论** 当前, 医用透析纸逐步替代塑料薄膜, 凭借优异性能在医疗包装领域广泛应用, 但高端产品仍以国际企业为主导, 国内产品在性能稳定性和多功能性上与国外产品相比还存在一定差距。未来, 医用透析纸的发展将聚焦多功能性与环保性, 通过原料多样化和工艺优化实现性能提升和更广泛的应用。加强技术研发与产业化能力, 将是国内企业缩小差距、满足市场需求的关键路径。

关键词: 透气性; 抗菌性; 医疗包装; 湿强度

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0001-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.001

Current Situation and Development Trend of Medical Dialysis Base Paper

ZHANG Yu¹, FU Chenglong¹, TAO Yehan¹, LYU Yanna¹, BAI Liangliang²,
PAN Gaofeng^{2*}, WANG Haisong^{1*}

(1. Dalian Polytechnic University, Liaoning Dalian 116034, China;

2. Mudanjiang Hengfeng Paper Co., Ltd., Heilongjiang Mudanjiang 157013, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research status of medical dialysis paper, introduce the relevant standards and basic performance characteristics of medical dialysis paper, and prospect its application prospect and development trend, so as to provide ideas and methods for the future research of medical dialysis paper. By systematically searching relevant literature at home and abroad, this study summarized and analyzed the research progress of medical dialysis paper in terms of standards, material properties and technical development. At the same time, the existing technical standards of medical dialysis paper were compared, and the main methods and realization paths of performance optimization were reviewed, including the improvement strategies of key properties such as air permeability, antibacterial property, wet strength and mechanical strength. The study showed that the traditional medical dialysis bag was mainly made of transparent plastic films. Although it had certain advantages in strength and formability, it was difficult to meet the current demand in terms of environmental protection and sustainability. The medical dialysis paper prepared by plant fiber as the main raw material became an ideal choice to replace plastic film because of its excellent permeability,

收稿日期: 2024-10-09

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF1105205); 国家自然科学基金 (22208040)

*通信作者

antibacterial property, wet strength and mechanical strength. At present, medical dialysis paper is gradually replacing plastic films, and is widely used in the field of medical packaging with excellent performance, but high-end products are still dominated by international enterprises, and there is still a certain gap between domestic products and foreign products in performance stability and versatility. In the future, the development of medical dialysis paper should focus on versatility and environmental protection, and improve performance and a wider range of applications through raw material diversification and process optimization. Strengthening technology research and development and industrialization capabilities will be the key path for domestic enterprises to narrow the gap and meet market demand.

KEY WORDS: air permeability; bacterial barrier; medical packaging; wet strength

医用透析纸是指用于医疗器械和无菌保持的一种特殊包装材料,旨在确保灭菌过程中灭菌因子能够有效渗透,同时在灭菌后阻止微生物的进入,保持包装内部的无菌环境^[1]。随着国家“禁/限塑令”相关政策的发布实施和绿色低碳等政策的出台,使用透析纸代替塑料或合成聚合物淋膜医疗包装材料的“以纸代塑”概念成为医用透析包装发展的新方向^[2]。与石油基透析纸相比,由天然纤维经过现代造纸工艺制成的医用包装透析纸袋具有绿色环保、使用便捷等优势^[3]。

透析纸一般具有较好的透气性、较高的湿强度以及抗菌性,可以应用于医疗包装、食品类包装、包装耗材、空气过滤和分析检测等,见图1。近年来,医用透析纸的市场需求逐年增加,且应用领域越来越广泛,涵盖医疗器械、药品、食品、保健品等^[4]。随着环保意识的提升,医用透析纸逐渐替代塑料包装,产量呈现持续快速增长趋势。政府对医疗卫生及大健康产业的重视和投入增加,为医用透析纸的生产提供了良好的发展机遇^[5]。

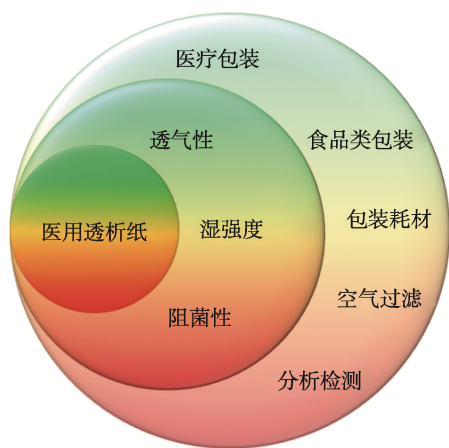


图1 医用透析纸的基本性能及应用
Fig.1 Basic properties and applications of medical dialysis paper

1 医用透析纸的生产现状和标准

1.1 医用透析纸的生产现状

目前,医用透析纸的生产处于快速发展阶段,特别是随着国家对医疗卫生投入的增加和医疗水平的

提升,医用透析纸的需求随之扩大。在发达国家,医用透析纸已随着灭菌包装的发展进入较为成熟的产业阶段^[6],主要的生产企业有法国斯迪迈医疗科技有限公司(STERIMED Infection Control)、法国奥维纸业有限公司(ARJOWIGGINS)、瑞典毕瑞科纳公司(BillerudKorsnas)、美国杜邦公司(DuPont)等^[7]。其中,法国斯迪迈医疗科技有限公司从一家小型造纸企业逐渐成长为世界医疗包装材料行业的引领者,公司生产的POLYBOND™透析纸是以天然纤维为原料生产的医用包装材料,适用于环氧乙烷和辐照灭菌,最终包装的无菌维持期最短为180 d,最长可达5 a^[8]。

医用透析纸市场中,复合加工纸与合成纸展现出不同的性能特点和应用优势^[9]。复合加工纸通常由植物纤维原纸与塑料薄膜(如聚乙烯、聚丙烯)复合而成,这种结构赋予其良好的强度、阻隔性和透气性,同时成本相对较低,因此在医疗器械包装领域得到广泛应用,特别适用于需要一定强度和阻隔性能的包装。合成纸(如特卫强™)由无数细小聚乙烯纤维纺黏而成,具有高强度、高阻隔性、不易变形、防潮湿和抗水渍等特性,成为高端医疗器械包装的首选材料,特别是在需要高强度、高阻隔性和良好透气性的场合,如一次性穿刺器械、医用敷料、手术包等包装中表现优异。复合加工纸以成本优势占据中低端市场,而合成纸则以其独特的性能优势在高端市场占据一席之地^[10]。

医用透析纸的国内市场大部分被国外企业垄断,这些企业进入中国市场较早,凭借优异的产品质量长期在高端市场占据主要份额^[11]。随着国内研发的投入,目前部分国内企业已经能够生产出性能接近国外产品标准的透析纸,市场份额也在逐步提高。国内生产医用透析纸的公司主要从食品包装纸和卷烟纸等行业转型发展而来,具有一定的生产基础和技术积累,生产厂家主要包括仙鹤股份有限公司、浙江恒达新材料股份有限公司、民丰特种纸股份有限公司、浙江凯丰新材料股份有限公司、华邦古楼新材料有限公司以及浙江凯丰特种纸业有限公司等^[12-13]。其中,仙鹤股份有限公司无论是市场份额、产品质量还是口碑,都保持着行业领先地位,其产品主要为透析原纸、高温自粘纸、低温自粘纸和M型透析纸4种类型,可以广泛用于医疗无菌屏障系统的包装,如一次性防护服、口罩、手术器械、医用手套、医用注射器等,

能够满足下游客户多种用途的需求。

1.2 医用透析纸的标准

目前,美国国家标准学会(American National Standards Institute, ANSI)、国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)等都未颁布医用透析纸的正式标准,生产指标通常由市场和生产厂家协商制定^[14]。例如,法国奥维纸业公司给出定量为 70 g/m² 的医疗包装纸的标准,对透气度、抗张强度等性能做出规定,要求纸张的透气度为 0.20~6.0 μm/(Pa·s),典型值为 5.7 μm/(Pa·s),并对撕裂度、干湿耐破度、干湿抗张强度、吸水性、孔径、孔隙率、粗糙度提出要求。我国尚未颁布医用透析纸的国家标准,但是国际产品的引进和质量要求,促进了我国医疗器械灭菌包装纸产品的标准化发展。国内产品主要参考的《医用包装纸》(GB/T 35594—2017)^[15],不仅对透气度和强度性能有所要求,还增加氯化物含量、硫酸盐含量和 pH 值的规定,但是缺少对孔径、孔隙率的相关要求。随着医用透析纸的发展和市场需求的提高,浙江省品牌建设联合会在《医用包装纸》(GB/T 35594—2017)的基础上率先发布《医用透析原纸》(T/ZZB 1290—2019),成为当下医用透析纸行业中比较认可的产品标准。医用透析纸的不同标准具体对比见表 1。

由表 1 可知,国外厂家在生产时制定的标准比国

内更加严格。国内的团体标准在国家标准的基础上进一步对性能提出严格要求,有助于保证产品质量。

2 医用透析纸的基本性能特征

2.1 透气性

国内厂家主要使用环氧乙烷蒸汽进行灭菌,利用高压环氧乙烷蒸汽消灭包装内部的细菌和孢子。这意味着包装材料需具有出色的透气性,以确保蒸汽能够完全渗透,并在灭菌后几乎无任何气体残留,因此医用透析纸的透气性是关键性能指标之一^[16]。提升纸张透气性研究汇总见表 2。

纸张透气性的提升主要依赖纤维结构优化和造纸工艺调整^[23]。纤维排列与孔隙率的控制至关重要,降低纤维叠加密度和选用高孔隙率原料(如高长宽比纤维和大粒径填料)能够显著提高透气性。打浆程度、湿部成形过程中的压实程度以及涂布和压光工序的优化,直接影响纸张的孔隙结构,从而改善其透气性。化学改性剂的引入,特别是疏水性和分散性添加剂,能有效减少空气流动的阻力,进一步提升透气性。改善纸张透气性的关键在于减少纤维之间的连接,一方面可以选用本身细长的纤维,在成型时能够形成较大的孔隙;另一方面可以对纤维进行改性处理,以达到透气效果。

表 1 不同医用透析纸标准对比
Tab.1 Comparison of different medical dialysis paper standards

指标名称	《医用包装纸》 (GB/T 35594—2017)	法国奥维纸业企业标准	《医用透析原纸》 (T/ZZB 1290—2019)
透气度/(μm·Pa ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.20~6.0	0.20~6.0, 典型值 5.7	≥3.00
撕裂度/mN	≥300	纵向≥300, 典型值 640 横向≥300, 典型值 740	≥400
干耐破度/kPa	≥200	≥200, 典型值 350	≥250
湿耐破度/kPa	≥35	≥35, 典型值 80	≥80
干抗张强度/(kN·m ⁻¹)	纵向≥4.0	纵向≥4.0, 典型值 7.3	纵向≥4.80
	横向≥2.0	横向≥2.0, 典型值 3.9	横向≥2.50
湿抗张强度/(kN·m ⁻¹)	纵向≥0.80	纵向≥0.8, 典型值 1.1	纵向≥0.80
	横向≥0.45	横向≤0.4, 典型值 0.7	横向≥0.45
吸水性/(g·m ²)	≤20.0	≤20, 典型值 18	≤20.0
孔径/μm	—	≥30, 典型值 15	≤30
氯化物含量/(mg·kg ⁻¹)	≤0.05	—	≤0.05
硫酸盐质量分数/%	≤0.25	—	≤0.25
pH	5.0~8.0	—	5.0~8.0
平滑度(正面)/s	≤40	—	≥30.0
孔隙率(本特森法)/(mL·min ⁻¹)	—	≤530, 典型值 500	—
粗糙度(本特森法)/(mL·min ⁻¹)	—	正面≤500, 典型值 260	—
		网面≤500, 典型值 200	

表 2 提升纸张透气性研究汇总
Tab.2 Summary of research on improving paper permeability

改良方法	研究者	具体方案	性能
改善浆料配比与机械处理	季剑锋等 ^[17]	阔叶木与针叶木浆的配比为 3 : 1, 湿强剂为 1.0%, 施胶为 1 : 1, 压光压力为 30 N/cm	透气度达到 5.1 μm/(Pa·s), 最大等效孔径<15 μm, 能够达到较好的透气性要求
	宗书霞等 ^[18]	针叶木浆 (25° SR) 配比为 75%, 控制伸长率为 33%	纸张的透气度达到 360 μm/(Pa·s)
生物酶处理	刘皓等 ^[19]	滤水酶为 0.2 mL, 黏胶纤维为 20% (pH=6, 2 h)	制造出满足国际标准的医用透析纸产品
化学处理	左金华 ^[20]	2.0%水溶性马来酸酐酰化壳聚糖 (MAAC) 与不同羧甲基壳聚糖 (CMCS) 复配	MAAC 为 2.0%时, 透气度达 8.98 μm/(Pa·s); O-CMCS 为 2.5%, 透气度达 7.98 μm/(Pa·s)
	Liu 等 ^[21]	在-14~8 °C下, 利用 NaOH/尿素/硫脲体系处理纤维	纸张的透气度达 113.6 μm/(Pa·s), 松厚度达 5.5 cm ³ /g
涂覆处理	Ma 等 ^[22]	丙烯酸和三聚氰胺混合树脂 (10%) 处理纸浆, 140 °C固化	纤维排列变松散, 纸张透气性提高

综上, 透气性是医用透析纸的关键性能指标, 研究人员从纤维选择^[24]、打浆度调控^[25]、化学改性^[26]、添加剂优化^[27]及工艺参数调整^[28]等方面提出多种提升透气性的策略。绿色环保理念逐步融入透析纸的研发, 通过引入纳米纤维素、多糖^[29]等可再生材料, 不仅改善了透气性, 还兼顾了环保和可持续发展要求。

2.2 湿强度

在高温高压的蒸汽灭菌环境中, 透析包装材料需具备较强的湿强度^[30]、良好的疏水性和较低的吸水率, 以确保其在储存过程中的稳定性和保护作用^[31], 因此在生产过程中提高透析原纸的湿强度至关重要。表 3 为提升纸张湿强度的研究汇总。

要增强纸张的湿强度, 除了选用高长径比的纤维原料, 也可在生产中添加湿强剂。湿强剂能够与纸张纤维形成网状的无定形交织结构, 并在纤维表面或内部生成缩合型高聚物, 这些聚合物在纸张干燥过程中会固化并转化为不溶于水的物质^[39]。湿强剂中的官能团可与纤维中的羟基反应, 生成新的共价键, 这种共价键的强度通常优于纤维之间的氢键。由于纤维与水

分子之间的氢键结合减少, 纤维的润胀性和伸缩变形受到抑制, 结合强度得到增强, 最终有效提高纸张的湿强度。增强纸张湿强度的方法还有离子液体处理、碱尿体系处理等, 其机理是通过纤维素的溶解产生流动性的溶胶化纤维, 显著提高抗水性并减小纤维之间的空隙, 提升水浸透纸张的难度, 进而增强纸张的湿强度^[40]。

2.3 抗菌性

抗菌性是指透析纸具有阻止外界物质侵入纸张的能力, 有助于防止医疗器械在灭菌中或灭菌后受到细菌的感染^[41]。医用透析纸阻隔颗粒物的性能受原纸孔径和孔隙率的影响, 二者共同决定材料的过滤精度和透气性^[42]。孔径过大可能降低过滤效率, 过小则会显著增加流体阻力, 因此需在高效截留颗粒物与低阻透气性之间取得平衡。适度的孔隙率有助于提升透气性, 但过高的孔隙率可能导致孔隙分布不均, 影响过滤效果^[28]。通过优化纤维排列和微观结构设计, 结合功能化涂层或多层复合结构, 可在不显著增加阻力的情况下提高性能, 从而满足高效低阻的应用需求。

表 3 提升纸张湿强度研究汇总
Tab.3 Summary of research on improving wet strength of paper

改良方法	研究者	具体方案	性能
改变原料与添加助剂	周文春等 ^[32]	针叶木浆 45°SR, AKD 0.24%, PPE 1%	湿强度纵向为 34.7 N·m/g, 横向为 18.4 N·m/g
化学处理	李丽梅 ^[33]	将纤维用硫酸水解及中和, 利用形成的含水混杂体系处理纸张	纸张湿强度显著提高, 湿/干强度比提高 300%左右
	Jin 等 ^[34]	碱质量分数 8%, 温度-6 °C, 浸泡 2 s, 冷冻 15 min, 洗涤 10 min	湿抗张强度和湿耐破强度分别提高 380%和 1 150%
	Xu 等 ^[35]	ZnCl ₂ 质量分数 60%, 温度 65 °C, 浸渍 10 min, 洗涤 12 min	湿抗张指数提升 2 倍
离子液体与溶液处理	Ichiura 等 ^[36]	纸浸入离子液体后转入乙醇, 用蒸馏水清洗后干燥 (5 min, 110 °C, 1.1 MPa)	离子液体最短 5 s 可提高纸张的湿强度
	Yamamoto 等 ^[37]	浸入磷酸和尿素的混合溶液处理后加热 (140 °C, 1.5 h), 用蒸馏水清洗后干燥 (5 min, 110 °C, 1.1 MPa)	纸张湿强度有所提高
添加增强物质	Liu 等 ^[38]	添加 60% CNFs 并结合使用 8%的 NaOH 处理纸张	湿强度提高 26 倍

从微生物屏障的角度来看,当被高温蒸汽长期渗入时,透析性材料有可能丧失抗菌性,合格的包装材料应具备在消毒后仍能维持屏障微生物的能力^[43]。纸张的抗菌性可以通过直接抗菌或者间接抗菌来实现^[44]。直接抗菌是指抗菌纸中的抗菌剂直接与包装材料接触,从而达到抗菌效果,其机理是通过抗菌材料直接接触细胞,破坏细胞壁或膜,阻碍物质传输,导致细胞膜破损和细胞内容物外泄,从而引发细胞死亡^[45]。间接抗菌是指在纸张中添加某种物质来破坏微生物的生长环境,以此抑制微生物的生长与繁殖^[46]。

抗菌纸要实现抗菌功能,最主要的物质是抗菌剂,可分为无机抗菌剂、有机抗菌剂和天然抗菌剂^[47]。无机抗菌剂的抗菌机理主要包括破坏细胞膜蛋白、抑制微生物的复制、通过活性氧产生催化氧化反应。有机抗菌剂的抗菌机理主要包括穿透微生物细胞壁,改变渗透压,扰乱细胞膜的结构组成,破坏细胞膜和蛋白质的合成系统等。天然抗菌剂的抗菌机理主要包括破坏微生物膜蛋白、改变渗透压、抑制 ATP 合成等^[48]。例如,属于天然抗菌剂的壳聚糖本身具有良好的抗菌性,壳聚糖涂布纸经研究可作为食品、医疗等行业的抗菌包装材料^[20,49-50]。壳聚糖能够抑制细菌的生长,主要因为其结构中的阳离子可与细菌细胞膜的阴离子相互作用,导致细胞内电解质和细胞质成分泄漏^[51]。提升纸张抗菌性的研究汇总见表 4。

由表 4 可知,纸基材料的抗菌性提升主要依赖引入抗菌颗粒,如纳米 TiO₂、Zn²⁺、纳米银等,这些颗粒通过涂布或喷涂等方式与纤维结合,提升抗菌性。现有方法普遍存在抗菌范围小、持续时间短以及效果差等问题,开发简便、高效且安全的新型抗菌技术提升纸张的抗菌性已成为亟待解决的关键问题。

3 医用透析纸的应用

由于透析纸具有特殊的透气性、抗菌性和湿强度,可广泛应用于医疗器械包装、药品包装、特殊食品包装、

实验室耗材包装、酒店一次性用具包装等领域,还可作为空气过滤纸的替代品应用在空调、汽车等设备上,甚至作为检测用纸的基材提高其灵敏度和响应性^[58-60]。

3.1 医疗包装领域

医用透析纸主要用于封装需经 EO 环氧乙烷或高压蒸汽灭菌处理的医疗器械,如医用导管、止血纱布、人工关节、高频手术电极、医用探头、留置针、医用气球、医用配件、手术衣、喉罩和一次性血液回路等,也可应用于医疗设备套装包装。对于包含多个组件的医疗设备套装,一般将透析纸制作成复合包装袋,将所有相关部件整合在一个无菌环境中,以便于医护人员快速、安全地取出使用^[61]。

3.2 食品类包装

食品类包装透气纸主要包括药品包装和食品包装。某些对无菌条件要求较高的药品,如无菌粉末、液体药物制剂或注射用药物,可能采用透析纸作为外包装材料,以确保产品在使用前为无菌状态。由于透析纸能够提供无菌屏障系统,可用于一些保健品、食品的无菌贮存。将纳米纤维素和壳聚糖进行改性制备的透析纸在食品包装中展现出良好的应用潜力^[62],纳米纤维素的加入提高了纸张的力学性能,而壳聚糖则显著增强了抗菌性,有效抵御食品中的致病微生物,为食品包装提供一种安全、环保的解决方案。将海藻酸钠、纤维素纳米纤维、乙基纤维素和聚乙烯醇缩丁醛制备的具有水油防护功能的涂层涂覆于透析纸,制得具有优异的防水性、防油性和较低气透性的纸张,展现透析纸在食品包装中的潜力,尤其是在环保、可回收和生物降解方面^[63]。

3.3 包装耗材

包装耗材类透气纸主要包括实验室耗材包装及一次性用具包装等。实验室中使用的各类一次性无菌耗材,如采样拭子、培养皿、移液器吸头等,常采用透

表 4 提升纸张抗菌性研究汇总
Tab.4 Summary of research on enhancing bacteriostatic properties of paper

改良方法	研究者	具体方案	性能
调整孔径	Stodolak-Zych 等 ^[52]	电纺工艺调控孔径,测试抗菌活性和药物释放性能	大孔径加速药物释放,增强初期抗菌性,小孔径延缓释放,实现持续作用
	Chen 等 ^[53]	构建微纳米孔结构,引入银纳米颗粒或金属-有机框架(MOFs)作为抗菌剂	高效细菌截留(>99%)和低阻气流(压降<150 Pa)显著提高长期抗菌性
制备抗菌颗粒并与纸张混合	曹晓瑶等 ^[54]	纳米 TiO ₂ 和羧甲基壳聚糖的最佳质量比为 1.5 : 1	抗菌纸的抗菌率达到 86.5%
	刘皓 ^[55]	氧化锌的最佳添加量为 1.5%,壳聚糖氧化锌的最佳负载量为 20%	最大抑菌圈直径超过 15 mm,显示卓越的抗菌效果
	冯启明等 ^[56]	在 ZnCl ₂ 溶液(45%, 70 °C)中浸渍 2 min, NaOH 溶液的 pH 值为 12	对大肠杆菌的抗菌率达到 76.9%
	Marwa 等 ^[57]	纳米银的质量分数从 0.01% 提高到 1.0% 时,纸张的抗菌性随之提高	对金黄色葡萄球菌和革兰氏阳性菌保持 9.4% 的抗菌率(25 a 老化)

析纸包装进行无菌保护。一次性用具包装主要为酒店提供的一次性牙刷和一次性剃须刀等对无菌有要求的产品包装,在更加环保的同时还能够保持无菌环境。

3.4 分析检测

透析纸的高透气度、抗菌性等性能使其成为分析检测的基材。通过物理或化学方法将具有响应功能的材料负载到透析纸上,从而起到检测作用。透析纸与MXene等结合制备的复合纸基传感器具有良好的防水透气性^[64-65],传感器可以安全佩戴在人体皮肤上,并且可以在不同环境(正常环境、潮湿环境、水下环境)实时监测生理信号,为可穿戴技术提供可靠、经济、环保的解决方案。这些研究为透析纸在生物检测领域的应用提供了有效途径,特别是在环境友好性和可降解性方面。透析检测纸具有较高的灵敏度、瞬时响应以及实时检测等特性,在便携式检测领域展现出巨大的潜力^[66]。透析纸的优良透气性有利于过滤有害气体,通过适当的组装可以制成空气过滤器件或产品。

4 医用透析纸的发展趋势

医用透析纸作为医疗包装材料的核心组成,其研发与生产正朝着多功能化、高性能化与环保化方向快速发展。在现有的以传统木浆或棉麻纤维(如龙须草)为主的基础上^[67],通过技术升级实现材料性能的提升,成为未来发展的重要趋势。

1) 丝光化技术的应用与纤维选择。丝光化技术已被证明能够显著改善透析纸的透气性,对满足医用包装中高效气体的交换需求具有重要意义^[68]。优选具有丝光化处理潜力的长纤维原料,通过工业化加工实现大规模生产,是当前研究与产业化的关键方向。通过优化纤维的结晶度和表面性质,不仅可以提升材料的力学强度和稳定性,还可实现更高效的气体渗透性能,为进一步功能开发奠定基础。

2) 复合纤维的引入与力学强度的提升。在丝光化处理的基础上引入黏胶纤维、聚乳酸纤维等生物基化学纤维^[7],是增强透析纸物理强度的有效手段。这些纤维不仅能够提高材料的拉伸强度和抗撕裂性能,还具有良好的生物相容性和环境友好性,符合现代医疗器械对包装材料的严格要求。复合材料的应用还可以通过调控纤维比例和排列方式实现性能的定制化,以满足不同医疗场景的需求。

3) 抗菌性的提升。随着医疗卫生标准的不断提高,透析纸的抗菌性成为研发重点^[69]。未来的透析纸可能通过外部杀菌涂层和内部抗菌功能材料的结合,实现对包装内部物品的内外全方位无菌保护。例如,通过在材料中引入抗菌填料(如纳米银、抗菌多糖),

可显著提升透析纸的抑菌能力。为应对包装袋可能出现的泄漏或破损,材料还需具备快速响应能力,能够在无菌环境被破坏的第一时间发出预警并抑制污染扩散,从而保障医疗器械的使用安全性。

4) 环保与可持续发展方向。在全球对环保要求日益严苛的背景下,开发以可降解生物基材料为核心的透析纸已成为重要的发展方向。例如,聚乳酸纤维和其他绿色纤维材料的使用,不仅可以显著降低材料生产和废弃过程中的碳足迹,还能够在保持高性能的同时满足医疗包装对环保性的要求。废弃材料的回收与再利用技术需进一步研究,为构建闭环生产和循环经济提供解决方案。

5) 学科交叉与应用范围拓展。未来,医用透析纸的发展将进一步依赖多学科交叉创新。例如,结合材料科学、生物医学工程和智能传感技术,可开发具有实时监测和智能响应功能的透析纸。医用透析纸具有环保、经济、可视、卫生等优点,常被用于替换传统的棉布、塑料等医疗器械灭菌包装。随着性能的提升,其应用不再局限于医疗器械灭菌,已经逐渐拓展到食品、保健品等领域的无菌包装,为产品提供更安全和可靠的保护。具有优异性能的透析纸经改进后,可用于空气过滤、吸附等领域^[70]。

5 结语

医用透析纸行业的发展正面临多重机遇与挑战,从满足国内外市场需求、推动多功能化发展到响应绿色低碳政策,行业需要在技术创新、产品优化与应用拓展方面持续发力。未来,通过多学科交叉研究以及产业链上下游的深度协作,医用透析纸将在医疗包装和相关领域发挥更加重要的作用,为医疗行业的可持续发展提供有力支持。

1) 医用透析纸行业快速发展,市场需求增长。全球医疗需求的持续增长,特别是在人口老龄化和重大疾病诊疗需求日益增加的推动下,医用透析纸行业迎来快速发展期。国内市场,医疗行业的升级和对高性能医疗包装材料的需求增长,为透析纸市场创造广阔的空间。目前,国际知名企业依然在高端医用透析纸市场中占据主导地位,尤其是在核心技术、功能化产品研发以及产业链整合能力方面,国内企业尚处于劣势。国际品牌的优势不仅体现在产品性能上,还包括其在全球供应链管理、质量控制和市场品牌影响力等方面的综合竞争力。例如,高端医用透析纸的气体透过性、湿强度和生物相容性要求严格,国际企业通过高精度生产设备和先进制造工艺,能够确保产品性能的稳定性与一致性。因此,国内企业在提升技术研发能力的同时,还需优化生产管理流程,加强国际认证体系的建设。随着国内市场对高端医用材料自主

化需求的加剧,政策层面的支持为行业创新提供了动力。例如,通过专项研发基金、技术孵化平台以及产学研合作模式的推广,可以帮助国内企业更快突破技术瓶颈,提升核心竞争力。在全球化竞争格局下,这不仅是行业发展的必然选择,也关系到医疗产业链的安全和稳定。

2) 医用透析纸的多功能化发展。多功能化已成为医用透析纸发展的核心趋势。传统透析纸在医疗包装中的应用主要依赖其优异的透气性和抗菌性,随着医疗器械和包装技术的升级,对透析纸的功能要求逐步提升。例如,高湿强度材料的研发能够有效解决透析纸在高湿环境中强度下降的问题,进一步提升包装材料的可靠性。通过引入先进涂层技术和多层复合工艺,透析纸的抗菌性得到显著强化,能够更有效地阻隔微生物穿透风险,从而提高包装内部的无菌保障水平。在多功能化发展过程中,透析纸的抗菌性和抗病毒性是重点研究方向之一。例如,在透析纸的纤维结构中添加具有广谱抗菌性的纳米材料(如纳米银、氧化锌纳米颗粒),或者利用具有天然抑菌功能的生物基高分子材料(如壳聚糖),可以显著提高抗菌效果。这种技术在医疗器械包装中尤为重要,不仅能够保护内部器械的无菌环境,还可以延长包装物的储存期限。智能化功能的引入为透析纸的多功能化发展提供新的可能。例如,通过集成可变色指示剂或智能传感材料,透析纸可以实现实时监测包装内的环境状态,如湿度、温度和气体含量的变化。这一创新不仅提升了透析纸的附加值,还扩展了它在高端医疗和工业领域的应用前景。

3) 扩展医用透析纸的应用领域,响应政策需求。在全球范围内,“禁/限塑令”相关政策的推进以及环保法规的日益严格,为医用透析纸在传统医疗包装以外的领域开辟新的发展空间。作为一种可降解的环保材料,透析纸的开发与推广不仅符合绿色经济的发展要求,也为替代传统塑料包装提供可行的解决方案。例如,在药品和食品包装中,透析纸以其优异的透气性和抗菌性满足包装材料的基本性能要求,同时其良好的降解性能显著降低塑料废弃物对环境的污染。随着技术进步,透析纸在空气过滤、污染控制和环境检测领域的应用潜力逐渐显现。例如,在空气过滤器领域,通过优化纤维排列和孔隙结构设计,透析纸能够实现对颗粒物和微生物的高效过滤。透析纸的可降解性使其在一次性过滤装置中的使用具有显著优势。通过功能性改性,如引入静电纤维或光催化材料,透析纸可以实现对气态污染物(如甲醛、二氧化硫)的去除,为空气净化技术的升级提供新路径。

在响应国家低碳政策方面,透析纸的生产技术需要进一步优化。例如,通过开发绿色制浆技术、减少化学试剂的使用以及提高原材料的利用率,能够有效降低透析纸的碳排放和资源消耗。废弃透析纸的回收和再利

用技术是未来研究的重要方向,通过构建完整的材料循环利用体系,为实现低碳经济提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] RYAN P. Evaluation of Rigid Container Systems for Sterilization[J]. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 1989, 10(11): 525-526.
- [2] LI P Y, ZHOU X Y, JIAN B X, et al. Facile Preparation of Soybean Protein-Based Oil-Resistant Paper for Food Packaging[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 222: 119431.
- [3] TIFFANY R, BUDDE C T, NIKOLINE O, et al. Reducing Plastic in the Operating Theatre: Towards a More Circular Economy for Medical Products and Packaging[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135379.1-135379.10.
- [4] 薛亿娇, 华飞果, 张红杰, 等. 功能型纸基包装材料的应用现状和发展趋势[J]. *中国造纸*, 2020, 39(11): 70-77.
XUE Y J, HUA F G, ZHANG H J, et al. Application Status and Development Trend of Functional Paper Based Packaging Materials[J]. *China Pulp & Paper*, 2020, 39(11): 70-77.
- [5] 曹毛毛, 李贺, 陈万青. 以筛查为抓手, 加强消化系统肿瘤防控[J]. *中国肿瘤*, 2019, 28(10): 723.
CAO M M, LI H, CHEN W Q. Take Screening as the Starting Point to Strengthen the Prevention and Control of Digestive System Tumors[J]. *China Cancer*, 2019, 28(10): 723.
- [6] KHAN M S, SHADMAN S A, KHANDAKER M M R. Advances and Current Trend of Bioactive Papers and Paper Diagnostics for Health and Biotechnological Applications[J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2022, 35: 100733.
- [7] 徐红霞. 一种可降解高阻菌医疗防护用纳米透析纸的制备方法[J]. *中华纸业*, 2023, 44(19): 156-158.
XU H X. Preparation Method of a Biodegradable and High Bacterial Barrier Nano-Dialysis Paper for Medical Protection[J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2023, 44(19): 156-158.
- [8] 浙江省造纸行业协会. 中国医疗器械灭菌包装透析纸行业发展现状与展望[J]. *造纸信息*, 2017(2): 25-29.
Zhejiang Paper Industry Association. Development Status and Prospect of Medical Device Sterilization Packaging Dialysis Paper Industry in China[J]. *China Paper*

- Newsletters, 2017(2): 25-29.
- [9] 孙碧颖, 柏金枝, 张辉. 灭菌医疗器械主要包装形式以及特点研究[J]. 中国包装, 2023, 43(1): 7-12.
SUN B Y, BAI J Z, ZHANG H. Research on Main Packaging Forms and Characteristics of Sterilized Medical Devices[J]. China Packaging, 2023, 43(1): 7-12.
- [10] 中国造纸学会特种纸专业委员会. 高附加值特种纸产品未来可期[J]. 造纸信息, 2022(4): 38-41.
China Paper Society Special Paper Committee. High Value-Added Special Paper Products Can Be Expected in the Future[J]. China Paper Newsletters, 2022(4): 38-41.
- [11] HASAN K M F, HORVÁTH P G, ALPÁR T. Potential Natural Fiber Polymeric Nanobiocomposites: A Review[J]. Polymers, 2020, 12(5): 1072.
- [12] 付柄清, 左金华, 章飞洋, 等. 不同取代羧甲基壳聚糖的制备及其对医用透析纸性能的影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6747-6756.
FU B Q, ZUO J H, ZHANG F Y, et al. Preparation of Chitosan with Different Substitutions of Carboxymethyl Chitosan and Its Effect on the Properties of Medical Dialysis Paper[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 41(12): 6747-6756.
- [13] 杨旭, 李瑞瑞. 浙江省造纸工业 2023 年运行报告及 2024 年展望[J]. 中华纸业, 2024, 45(7): 68-72.
YANG X, LI R R. Zhejiang Paper Industry Operation Report for 2023 and Outlook for 2024[J]. China Pulp & Paper Industry, 2024, 45(7): 68-72.
- [14] 季剑锋, 刘文, 史海真, 等. 国产与进口医疗器械灭菌包装纸的对比研究[J]. 中华纸业, 2020, 41(10): 18-25.
JI J F, LIU W, SHI H Z, et al. A Contrastive Study on Domestic and Imported Medical Device Sterilization Packaging Paper[J]. China Pulp & Paper Industry, 2020, 41(10): 18-25.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 医用包装纸: GB/T 35594—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Medical Packaging Paper: GB/T 35594-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] SHEN Y, LI B H, YAO Z Y, et al. Sterile Paper-Plastic Barrier System for Pressure Sterilization[J]. Thermal Science, 2024, 28(3A): 2211-2215.
- [17] 季剑锋, 刘文, 胡江涛, 等. 医用透析纸透气性能的研究[J]. 中国造纸, 2015, 34(9): 21-26.
JI J F, LIU W, HU J T, et al. Research on Permeability of Medical Dialyzing Paper[J]. China Pulp & Paper, 2015, 34(9): 21-26.
- [18] 宗书霞, 丁雪峰, 马晓东, 等. 影响吸水衬纸透气性的因素[J]. 纸和造纸, 2016, 35(6): 1-3.
ZONG S X, DING X F, MA X D, et al. Factors Influencing the Permeability of Absorbent Paper[J]. Paper and Paper Making, 2016, 35(6): 1-3.
- [19] 刘皓, 鲁杰, 程意, 等. 生物酶法优化医用透析纸性能[J]. 造纸科学与技术, 2019, 38(4): 39-43.
LIU H, LU J, CHENG Y, et al. Optimization of the Performance of Medical Dialysis Paper by Enzyme Treatment[J]. Paper Science & Technology, 2019, 38(4): 39-43.
- [20] 左金华. 壳聚糖的改性及在透析纸中的应用研究[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2023.
ZUO J H. Study on Modification of Chitosan and Its Application in Dialysis Paper[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science & Technology, 2023.
- [21] LIU W B, YANG L, LYU X H. High-Permeability Filter Paper Prepared from Pulp Fiber Treated in NaOH/Urea/Thiourea System at Low Temperature[J]. Bioresources, 2015, 10(3): 5620-5632.
- [22] MA J, ZHOU X, ZHANG D, et al. Improving Air Permeability of Paper with Acrylic and Melamine Resins[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014, 92(5): 823-827.
- [23] 李由, 韩文佳, 吴芹, 等. 生物基高阻氧复合材料研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(12): 6386-6398.
LI Y, HAN W J, WU Q, et al. Research Progress of Bio-Based High Oxygen Barrier Composites[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 41(12): 6386-6398.
- [24] HUANG Y T, KASUGA T, NOGI M, et al. Clearly Transparent and Air-Permeable Nanopaper with Porous Structures Consisting of TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibers[J]. RSC Advances, 2023, 13(31): 21494-21501.
- [25] HASSAN M L, BRAS J, MAURET E, et al. Palm Rachis Microfibrillated Cellulose and Oxidized-Microfibrillated Cellulose for Improving Paper Sheets Properties of Unbeaten Softwood and Bagasse Pulps[J]. Industrial Crops & Products, 2015, 64: 9-15.
- [26] NONG G, LI P, LI Y, et al. Preparing Tea Filter Papers with High Air Permeability from Jute Fibers for Fast Leaching[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 140:

- 111619.
- [27] LI A, XU D, ZHANG M, et al. Grafting Nanocellulose with Diethylenetriaminepentaacetic Acid and Chitosan as Additive for Enhancing Recycled OCC Pulp Fibres[J]. *Cellulose*, 2022, 29(3): 2017-2032.
- [28] FENG J Y, ZHANG J C. Preparation and Oil/Air Filtration Properties of Hemp Paper[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2015, 45(1): 3-32.
- [29] ZHU K K, SHI S, CAO Y, et al. Robust Chitin Films with Good Biocompatibility and Breathable Properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 212: 361-367.
- [30] ŠKOC M S, JURAN J, REZIC I. Effect of Sterilization Methods on Chemical and Physical-Mechanical Properties of Cotton Compresses[J]. *Molecules*, 2024, 29(15): 3541.
- [31] 崔海丽, 姬小蔓. 一次性材料包装的无菌物品在不同储存环境下有效期研究[J]. *护理研究*, 2017, 31(10): 1227-1229.
- CUI H L, JI X M. Study on Valid Period of Sterile Items with Disposable Material Packaging in Different Storage Environment[J]. *Nursing Research*, 2017, 31(10): 1227-1229.
- [32] 周文春, 宋连珍, 叶一心. 高档医用透析纸的试制[J]. *纸和造纸*, 2014, 33(9): 56-59.
- ZHOU W C, SONG L Z, YE Y X. Research on Medical Dialyzing Paper[J]. *Paper and Paper Making*, 2014, 33(9): 56-59.
- [33] 李丽梅. 基于纤维水解/溶解构建多功能型高湿强纸[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- LI L M. Construction of Multifunctional High Wet Strength Paper Based on Fiber Hydrolysis/Dissolution[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.
- [34] JIN G F, ZHAI R, KOU S L, et al. Production of High Wet Strength Paper Using a NaOH-Thiourea-Urea Aqueous Solution[J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 2018, 64(5): 213-219.
- [35] XU Y, JIN G, ZHAI R, et al. Preparation of High Wet-Strength Paper from Rice Straw Pulp by Treatment with ZnCl_2 Aqueous Solution[J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 2020, 66(1): 46-52.
- [36] ICHIURA H, HIROSE Y, MASUMOTO M, et al. Ionic Liquid Treatment for Increasing the Wet Strength of Cellulose Paper[J]. *Cellulose*, 2017, 24(8): 3469-3477.
- [37] YAMAMOTO Y, ICHIURA H, OHTANI Y. Improvement of Wet Paper Strength Using a Phosphoric Acid-Urea Solution[J]. *Cellulose*, 2019, 26(8): 5105-5116.
- [38] LIU H, YANO H, ABE K. Co-Reinforcement of Paper Wet Strength by Cellulose Nanofibers and NaOH Treatment[J]. *Cellulose*, 2023, 30(9): 5911-5921.
- [39] 翟睿, 王慧丽, 胡志军, 等. 基于碱脲溶剂体系胶化作用的湿强纸的制备[J]. *中国造纸学报*, 2019, 34(3): 24-30.
- ZHAI R, WANG H L, HU Z J, et al. Preparation of Wet-Strength Paper Based on the Jellification of Alkali-Urea System[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2019, 34(3): 24-30.
- [40] 翟睿, 赵会芳, 周小凡. 利用氢氧化钠-尿素-氧化锌-水体系制备湿强纸的研究[J]. *纤维素科学与技术*, 2019, 27(3): 30-35.
- ZHAI R, ZHAO H F, ZHOU X F. Study on Wet-Strength Paper Based on the Solation Action of the NaOH-Urea- $\text{ZnO-H}_2\text{O}$ System[J]. *Journal of Cellulose Science and Technology*, 2019, 27(3): 30-35.
- [41] ZHANG Y T, DAI C L, YUAN J G, et al. A Bacteriostatic and Hemostatic Medical Dressing Based on PEG Modified Keratin/Carboxymethyl Chitosan[J]. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2023, 72(18): 1397-1405.
- [42] LINŠAK Ž, RAŽOV L, FURLAN N, et al. Bacteria Filtration Efficiency for Different Types of Protective Face Masks[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10): 5972.
- [43] LOU Y T, CHANG W W, CUI T Y, et al. Microbiologically Influenced Corrosion Inhibition Mechanisms in Corrosion Protection: A Review[J]. *Bioelectrochemistry*, 2021, 141: 107883.
- [44] 李彭勃, 郑小芳. 抗菌纸的制备及抗菌效果的研究综述[J]. *中华纸业*, 2023, 44(8): 19-22.
- LI P B, ZHENG X F. A Study on the Preparation of Antibacterial Paper and Its Antibacterial Effect[J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2023, 44(8): 19-22.
- [45] 姚希燕, 唐晓宁, 王晓楠, 等. 无机抗菌材料抗菌机理研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(1): 105-111.
- YAO X Y, TANG X N, WANG X N, et al. Research Progress on Antibacterial Mechanisms of Inorganic Antibacterial Materials[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(1): 105-111.
- [46] ZHANG J K, GUO Z W, CHEN S, et al. High-Barrier, Strong, and Antibacterial Paper Fabricated by Coating Acetylated Cellulose and Cinnamaldehyde for Food Packaging[J]. *Cellulose*, 2021, 28(7): 4371-4384.
- [47] 赵思琪, 张浪, 刘骞, 等. 天然抗菌剂纳米乳液的制备、抑菌机理及在肉类保鲜中的应用研究进展[J]. *肉*

- 类研究, 2022, 36(4): 48-56.
- ZHAO S Q, ZHANG L, LIU Q, et al. Preparation, Antibacterial Mechanism of Natural Antimicrobial-Loaded Nanoemulsions and Their Application in Meat Preservation: A Literature Review[J]. Meat Research, 2022, 36(4): 48-56.
- [48] 赵亚珠, 郝晓秀, 孟婕, 等. 抗菌食品包装纸的研究现状及发展趋势[J]. 包装工程, 2018, 39(15): 88-94.
- ZHAO Y Z, HAO X X, MENG J, et al. Research Status and Development Trend of Antimicrobial Food Wrappers[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(15): 88-94.
- [49] VALH J V, KREZE T, ZEMLJIC L F. Preparation of Antimicrobial Paper Sheets Using Chitosan[J]. Cellulose Chemistry and Technology, 2017, 51(1/2): 75-81.
- [50] LIU P T, MENG W S, WANG S, et al. Quaternary Ammonium Salt of Chitosan: Preparation and Antimicrobial Property for Paper[J]. Open Medicine, 2015, 10(1): 473-478.
- [51] BIAN N Y, YANG X L, ZHANG X L, et al. A Complex of Oxidised Chitosan and Silver Ions Grafted to Cotton Fibres with Bacteriostatic Properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 262: 117714.
- [52] STODOLAK-ZYCH E, DZIERZKOWSKA E, MATWALLY S, et al. Multifunctional Porous Membranes with Antibacterial Properties[J]. International Journal of Polymeric Materials, 2019, 68(1/5): 19-26.
- [53] CHEN M X, HU Q, WANG X Y, et al. A Review on Recent Trends of the Antibacterial Nonwovens Air Filter Materials: Classification, Fabrication, and Application[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 330: 125404.
- [54] 曹晓瑶, 黄元盛. 纳米 TiO_2 /羧甲基壳聚糖复合涂料的制备及其在抗菌纸中的应用[J]. 中华纸业, 2015, 36(10): 25-28.
- CAO X Y, HUANG Y S. Preparation of Nano- TiO_2 /Carboxymethyl Chitosan Compounded Coatings and Its Application in Antibacterial Paper[J]. China Pulp & Paper Industry, 2015, 36(10): 25-28.
- [55] 刘皓. 抗菌性医用纸基功能材料的制备及其性能研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2021.
- LIU H. Preparation and Properties of Antibacterial Medical Paper-Based Functional Materials[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2021.
- [56] 冯启明, 石黎花, 吴明, 等. 纳米氧化锌抗菌纸的制备及其抗菌性能的研究[J]. 中国造纸, 2019, 38(3): 37-43.
- FENG Q M, SHI L H, WU M, et al. Preparation of Nano- ZnO Antibacterial Paper and Its Antibacterial Performance[J]. China Pulp & Paper, 2019, 38(3): 37-43.
- [57] MARWA S, GEIOUSHY R A, SAMYA E, et al. Enhancing the Anti-Ageing, Antimicrobial Activity and Mechanical Properties of Surface-Coated Paper by Ag@TiO_2 -Modified Nanopigments[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(48): 72515-72527.
- [58] PORTO K M B, NAPOLITANO C M, BORRELY S I. Gamma Radiation Effects in Packaging for Sterilization of Health Products and Their Constituents Paper and Plastic Film[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 142: 23-28.
- [59] 裴玉芳, 王雯, 周晶, 等. 供应室物品包装材料及阻菌性能的研究进展[J]. 河北医药, 2016, 38(19): 3014-3016.
- PEI Y F, WANG L, ZHOU J, et al. Research Progress of Packaging Materials and Antibacterial Properties of Supplies in Supply Room[J]. Hebei Medical Journal, 2016, 38(19): 3014-3016.
- [60] 杨爽, 杨贤鹏, 王宝俊, 等. 基于核酸的纸基荧光生物传感器的设计及应用[J]. 化学进展, 2021, 33(12): 2309-2315.
- YANG S, YANG X P, WANG B J, et al. Design and Applications of Fluorogenic Nucleic Acid-Based Paper Biosensors[J]. Progress in Chemistry, 2021, 33(12): 2309-2315.
- [61] 束然然, 王鑫, 徐洁, 等. 不同纸塑包装对灭菌器械的保护效果观察[J]. 中国消毒学杂志, 2024, 41(7): 544-546.
- SHU R R, WANG X, XU J, et al. Observation on the Protection Effect of Different Paper-Plastic Packaging on Sterilized Instruments[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2024, 41(7): 544-546.
- [62] EL-SAMAHY M A, MOHAMED S A A, ABDEL R M H, et al. Synthesis of Hybrid Paper Sheets with Enhanced Air Barrier and Antimicrobial Properties for Food Packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 168: 212-219.
- [63] ZHU R F, HE Z B, SUN C, et al. Fabrication of Recyclable High-Barrier Water- and Oil-Proof Paper by Sodium Alginate/Cellulose Nanofiber/Ethyl Cellulose/Polyvinyl Butyral[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 203: 117084.
- [64] GUAN M, LIU Y, DU H, et al. Durable, Breathable, Sweat-Resistant, and Degradable Flexible Sensors for

- Human Motion Detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 462: 142151.
- [65] LI A, XU J, ZHOU S T, et al. All-Paper-Based, Flexible, and Bio-Degradable Pressure Sensor with High Moisture Tolerance and Breathability through Conformally Surface Coating[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(52): 2410762.
- [66] XIAO G, HE J, QIAO Y, et al. Facile and Low-Cost Fabrication of a Thread/Paper-Based Wearable System for Simultaneous Detection of Lactate and pH in Human Sweat[J]. Advanced Fiber Materials, 2020, 2(5): 265-278.
- [67] 李海军, 王海毅. 龙须草制浆造纸性能研究及其在配抄文化用纸中的应用[J]. 黑龙江造纸, 2011, 39(1): 8-12.
- LI H J, WANG H Y. Studies on Pulping Properties of Chinese Alpine Rush and Its Applications on Culture Paper Furnish[J]. Heilongjiang Pulp & Paper, 2011, 39(1): 8-12.
- [68] 范婧雯, 惠岚峰, 刘忠, 等. 漂白硫酸盐针叶木浆的丝光化处理条件优化[J]. 天津造纸, 2019, 41(4): 7-11.
- FAN J W, HUI L F, LIU Z, et al. Optimization of Mercerization Conditions for Bleached Kraft Coniferous Wood Pulp[J]. Tianjin Paper Making, 2019, 41(4): 7-11.
- [69] 张萍. 一次性使用最终灭菌包装材料在医院消毒供应中心的质量控制方面的探讨[C]// 中华护理学会第7届消毒供应中心发展论坛论文汇编, 2011: 559-562.
- ZHANG P. Discussion on the Quality Control Aspects of Single-Use Final Sterilization Packaging Materials in Hospital Disinfection and Supply Centers[C]// Compilation of Papers from the 7th Sterilization and Supply Center Development Forum of the Chinese Nursing Association, 2011: 559-562.
- [70] 俞文军. 空气过滤纸及其阻燃改性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- YU W J. Study on Air Filter Paper and Its Flame Retardant Modification[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.