

碳纤维湿法造纸工艺及碳纤维纸基功能材料的研究进展

张丛菲

兰州石化职业技术大学 数媒与印刷工程学院 甘肃兰州 730000

摘要：碳纤维湿法造纸工艺是制备高性能碳纤维纸基功能材料的核心技术，其通过原料预处理、浆料分散、网部成形、树脂浸渍及热压后处理等有序环节，实现碳纤维与辅助纤维的均匀复合，赋予材料高强、高导、耐高温及柔韧多孔的特性。本文系统梳理碳纤维湿法造纸的具体工艺操作与关键参数，深入剖析燃料电池气体扩散层用碳纸、电磁屏蔽碳纸、电热碳纸及摩擦材料用碳纸的性能要求与制备要点，结合近年研究成果总结工艺优化方向，指出当前面临的原料界面结合弱、功能稳定性不足等挑战，为碳纤维纸基功能材料的产业化应用提供技术参考。

关键词：碳纤维湿法造纸；纸基功能材料；燃料电池气体扩散层；电磁屏蔽

引言

碳纤维含碳量超过90%，是兼具高强度、高模量、低密度的新型纤维材料，被称作“黑色黄金”。碳纤维纸融合碳纤维的优异性能与纸基材料的均匀多孔、柔韧特性，在电磁防护、电加热、燃料电池、摩擦材料等领域应用广泛。当前碳纤维纸制备以湿法造纸工艺为主，该工艺设备兼容性好、工艺成熟度高，可通过调控参数实现材料性能定制，但在原料预处理效率、浆料分散均匀性、功能长效性等方面仍需突破。本文围绕碳纤维湿法造纸工艺的具体实施路径与功能材料特性展开研究，旨在明确工艺核心要点，推动技术优化与产业落地。

一、碳纤维湿法造纸研究现状

碳纤维湿法造纸凭借设备兼容性好、工艺成熟度高及产品性能稳定的优势，成为当前碳纤维纸基材料的主流制备方法。近年研究主要聚焦工艺优化与性能提升，形成多维度技术探索方向。薛奎^[1]等人2023年针对纸基摩擦材料原纸开展研究，发现TBP与CPAM复配使用可改善碳纤维在纸页表面的沉积均匀性，显著提升原纸的抗张强度与撕裂强度，为原料界面结合优化提供新思路。蒙邦爱^[2]等人2024年关注匀度指数对碳纸性能的影响，通过调控成形工艺参数将匀度指数控制在85以上，使碳纸的孔隙率波动范围缩小至5%以内，解决传统工艺中匀度差导致的性能不稳定问题。袁晓君^[3]等人2021年探索造纸法制备碳纤维增强热塑性复合材料，通过优化热压工艺参数，使复合材料的拉伸强度达到110MPa，弯曲强

度突破200MPa，拓展湿法造纸工艺在复合材料领域的应用。整体来看，当前研究已从单一工艺环节优化转向全流程协同调控，但在高碳纤维含量纸页的成形及功能长效性方面仍需深入探索。

二、碳纤维湿法造纸工艺分析

1. 原料预处理工艺

原料预处理是确保湿法造纸顺利开展的基础，核心在于调整碳纤维特性与选择适配辅助纤维。碳纤维长度需严格控制在5-12mm，长度小于3mm会导致纤维搭接不足，无法形成有效导电与力学支撑网络；长度超过12mm则易造成浆料团聚，降低纸页匀度。预处理时先采用机械短切设备将碳纤维裁剪至目标长度，再通过化学氧化刻蚀改善表面惰性，常用铬酸氧化法在纤维表面引入羟基与羧基，提升纤维、辅助纤维的结合能力。辅助纤维选择需兼顾强度与相容性，植物纤维中针叶木化学浆应用广泛，打浆度需控制在48° SR，此参数下纸页耐破指数大于5kPa·m²/g，撕裂指数大于8mN·m²/g；合成纤维中芳纶浆粕与PET皮芯纤维优势显著，PET皮芯纤维与碳纤维混抄时，碳纤维含量达70%仍能保证纸页成形性，且透气度与导电性最优。

2. 浆料分散工艺

浆料分散直接决定纸页匀度与性能一致性，需精准控制分散剂类型、用量及浆料浓度。分散剂优先选择阳离子聚丙烯酰胺与聚氧化乙烯复配体系，二者质量比设定为3:1，总用量控制在0.0059%，可实现碳纤维均匀分散。浆料浓度需分阶段调控，储存浓度设定为0.4%-

0.8%，避免纤维沉降。上网浓度降至0.02%–0.08%，该浓度为常规植物纤维浆料的1/10，可减少纤维在网部的聚集。分散过程中保持搅拌速率300–500r/min，确保浆料湍动适中，既避免纤维断裂，又防止团聚，可通过在线粒度仪实时监测纤维分散状态，及时调整搅拌参数。

3.网部成形工艺

网部成形是将分散后浆料转化为湿纸幅的关键环节，核心在于控制成形设备参数与脱水速率。成形设备多采用长网成形器，网速设定为3–5m/min，需与浆料上网速度精准匹配，减少纤维定向排列差异。脱水分为真空脱水与压榨脱水两步，真空脱水初始压力0.02MPa去除游离水，逐步提升至0.05MPa，避免湿纸幅结构破坏；压榨脱水线压力控制在15–20kN/m，压榨时间10–15s，使湿纸幅干度达到30%–35%。成形过程中需实时监测湿纸幅厚度，通过调整上网流量将厚度偏差控制在±5%以内，采用激光测厚仪实现连续监测，确保湿纸幅厚度均匀。

4.树脂浸渍工艺

树脂浸渍旨在提升纸页强度与功能稳定性，需根据应用场景选择树脂类型与控制浸渍量。常用树脂包括酚醛树脂、丙烯酸树脂与丁苯胶乳，摩擦材料用碳纸优先选择酚醛树脂，浸渍量控制在27%，此参数下纸基摩擦材料动态摩擦系数稳定在0.35–0.4，磨损率降至 $1.5 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{J}$ ；电磁屏蔽用碳纸多采用丙烯酸树脂，

与铁硅铝粉按3:1比例混合涂布，可使屏蔽效能达到56dB。浸渍工艺采用辊涂方式，涂覆速度与纸幅运行速度同步控制在2–3m/min，确保树脂均匀渗透。固化过程需严格控制温度与时间，酚醛树脂浸渍后在170℃下固化4min，既保证树脂充分固化，又避免纸页性能受损。

5.热压后处理工艺

后处理是性能优化最后环节，包括干燥、功能化改性、裁切复卷，需依产品需求定制方案。干燥控制温度与速率，避免收缩变形，采用热风干燥分阶段控温：初始80–90℃脱去表面水分，防止纤维收缩；中间100–110℃加速内部水分蒸发；最终90–95℃平衡水分。干燥时间依厚度定，50μm薄型纸约10min，500μm厚型纸约30min。温度过高纸张收缩率达5%–8%，尺寸精度下降；过低则含水率超8%，影响电学性能，100℃恒温干燥15min可使含水率控制在3%–5%，电阻率稳定在 $0.139 \Omega \cdot \text{cm}$ 。功能化改性拓展应用，电磁屏蔽纸涂布20%浓度银包铜粉涂料，厚度0.05mm，抗张指数与电导率提升；燃料电池气体扩散层需2500–3000℃高温石墨化，保温2h，导热系数从 $1.5 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 升至 $3.0 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ；抗静电纸浸渍5%季铵盐抗静电剂，体积电阻率从 $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。裁切复卷保障精度与质量，裁切设备数控精度±0.1mm，复卷张力依厚度定，薄型纸50–100N，厚型纸100–200N，避免拉伸或松散。碳纤维湿法造纸关键工艺参数及作用见表1。

表1 碳纤维湿法造纸关键工艺参数

工艺环节	核心参数	参数范围	作用
原料预处理	碳纤维长度	5–12mm	保证纤维搭接与纸页成形性
原料预处理	针叶木浆打浆度	48° SR	提升纸页耐破与撕裂强度
浆料分散	CPAM与PEO质量比	3:1	优化碳纤维分散效果
浆料分散	上网浓度	0.02%–0.08%	减少纤维在网部聚集
网部成形	网速	3–5m/min	匹配浆料上网速度，保证匀度
网部成形	压榨线压力	15–20kN/m	提升湿纸幅干度至30%–35%
树脂浸渍	酚醛树脂浸渍量	27%	稳定摩擦材料动态摩擦系数
热压后处理	温度	170–180℃（酚醛树脂基）	确保树脂完全固化
热压后处理	压力	1.6–2.0MPa	优化纸页结构，保证性能

经分析，相关工艺参数覆盖原料、分散、成形、浸渍及热压全流程，实际生产中可根据产品性能需求微调，如制备高导电纸时可适当提高碳纤维含量，同步增加分散剂用量。此外，在制备高强度纸时，可优化树脂浸渍量、热压参数，确保工艺与性能目标匹配。

三、碳纤维纸基功能材料类型及特性

1.燃料电池气体扩散层用碳纸

燃料电池气体扩散层用碳纸是质子交换膜燃料电池的核心部件，承担导气、排水、导电与支撑催化剂的功能，对性能要求严苛。该类碳纸需具备均匀多孔结构，

孔隙率控制在35%–45%，孔径分布集中在5–20 μm ，确保氢气与氧气顺畅传输，同时快速排出生成水。制备过程中需经过2000–3000 $^{\circ}\text{C}$ 高温石墨化处理，提升碳纤维结晶度，使电阻率降至 $0.1\Omega\cdot\text{cm}$ 以下，保证导电性能稳定。碳纸厚度需精准控制，阳极厚度80–120 μm ，阴极厚度140–170 μm ，厚度偏差小于5%，避免因厚度不均导致电池输出功率波动。当前该类碳纸面临连续石墨化设备技术瓶颈，需突破设备限制实现规模化生产，满足燃料电池产业化需求。

2. 电磁屏蔽碳纸

电磁屏蔽碳纸利用碳纤维的高导电性实现电磁信号衰减，适用于电子设备外壳、通信基站等场景，核心性能指标为屏蔽效能与柔韧性。该类碳纸需构建完整导电网络，可通过添加碳纳米管或金属粉提升性能，碳纳米管与碳纤维混合时，二者质量比1:1可使电导率达280.1S/m，在175–1600MHz频段屏蔽效能44dB；金属粉选择银包铜粉，通过涂布工艺附着于碳纸表面，可使导电性显著提升，屏蔽效能突破50dB。碳纸厚度控制在0.1–0.3mm，需具备良好柔韧性，弯曲1000次以上仍保持屏蔽效能稳定，避免使用过程中因形变导致性能下降。制备时需控制导电填料分散均匀性，避免局部聚集导致屏蔽性能波动，同时通过树脂浸渍提升填料与纤维的结合力，防止填料脱落。

3. 电热碳纸

电热碳纸基于焦耳热效应实现发热，适用于采暖地板、医疗保健设备，核心性能指标为发热温度、电热转换效率与温度均匀性。该类碳纸发热温度范围30–250 $^{\circ}\text{C}$ ，可通过调整电压实现温度调控；电热转换效率大于97%，相比传统金属电热材料节能15%–30%，且辐射远红外线波长4–14 μm ，符合人体保健需求。制备关键在于构建均匀导电网络，碳纤维含量控制在20%–30%，含量过低会导致电阻过大，发热效率下降；含量过高则纸页脆性增加，柔韧性降低。纸页匀度需严格控制，温度差不超过7 $^{\circ}\text{C}$ ，满足JG/T286–2010标准要求，可通过优化分散剂用量与成形参数提升匀度，确保发热均匀。

4. 摩擦材料用碳纸

摩擦材料用碳纸适用于自动变速箱湿式离合器，核

心性能指标为动态摩擦系数、动静摩擦因数比与磨损率。该类碳纸动态摩擦系数需稳定在0.35–0.4，动静摩擦因数比接近1，可减少换挡冲击，提升传动平顺性；磨损率需降至 $1.5\times 10^{-8}\text{cm}^3/\text{J}$ 以下，确保使用寿命。制备时需选择适配树脂，丁苯胶乳与聚酰亚胺树脂复配使用可显著提升摩擦稳定性，经过双重浸渍处理后，碳纸在10万次摩擦循环后磨损率仅增加5%。可添加ZnO晶须或SiO₂纳米粒子优化性能，ZnO晶须添加量20%–30%可使摩擦系数波动范围缩小至 ± 0.02 ；SiO₂纳米粒子修饰碳纤维表面可增加粗糙度，使动静摩擦因数比达到0.971，同时提升耐热性，在200 $^{\circ}\text{C}$ 高温下摩擦性能仍保持稳定。

结语

碳纤维湿法造纸工艺是连接碳纤维原料与高性能纸基功能材料的核心纽带，其通过原料预处理、浆料分散、网部成形、树脂浸渍及热压后处理的有序协同，实现材料性能的精准调控。当前燃料电池气体扩散层用碳纸、电磁屏蔽碳纸、电热碳纸及摩擦材料用碳纸已展现出明确应用价值，但仍面临原料预处理效率低、高碳纤维含量纸页成形难、功能稳定性不足等挑战。未来需聚焦技术突破，开发高效环保的原料预处理技术，优化浆料分散工艺以提升均匀性，研发长效稳定的功能改性方法。同时，推动连续石墨化设备等关键装备的国产化，降低生产成本，助力碳纤维纸基功能材料在新能源汽车、工业机器人、微型核电等新兴领域的应用落地。

参考文献

- [1] 薛奎, 窦文芳, 欧章明, 等. TBP和CPAM对纸基摩擦材料原纸表面碳纤维沉积及强度性能的影响[J]. 中国造纸学报, 2023, 38(01): 18–24.
- [2] 蒙邦爱, 陈逸菲, 孔之奇, 等. 匀度指数对碳纸原纸强度与孔隙特性的影响研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(03): 40–46.
- [3] 袁晓君, 孙其忠, 刘江涛, 等. 添加气相生长碳纤维对改善碳纸性能的研究[J]. 中国造纸, 2023, 42(01): 33–37.