·燃料电池关键材料与系统性能优化技术专题·

# 气体扩散层碳纤维及碳纸的研究进展

吴磊[1]　范丹丹[2]

（1. 陕西氢能研究院有限公司，西安 712046；2. 西安瑞诚方环境科技有限公司，西安 712046）

【欢迎引用】吴磊，范丹丹. 气体扩散层碳纤维及碳纸的研究进展[J]. 汽车文摘，2026(6): 13-17.

【Cite this paper】WU L, FAN D D, et al. Research Progress on Carbon Fiber and Carbon Paper for Gas Diffusion Layer[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(6): 13-17.

【摘要】气体扩散层作为燃料电池膜电极的核心组件，其性能直接影响电池的功率密度、耐久性和成本。碳纤维及碳纸是构成气体扩散层的基础，从碳纤维的材料体系，碳纸的制备工艺等方面，系统综述了碳纤维及碳纸的研究进展，分析了碳纤维及碳纸在质子交换膜燃料电池实际应用中的表现，探讨了其对电池功率密度、耐久性和成本的影响，总结了当前面临的关键技术瓶颈与未来的发展趋势，为高性能气体扩散层的研发与产业化提供理论指导和技术参考。

**关键词：燃料电池；气体扩散层；碳纸；碳纤维**

**中图分类号：**TM911.4　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20250198

# Research Progress on Carbon Fiber and Carbon Paper for Gas Diffusion Layer

Wu Lei[1], Fan Dandan[2]

（1. Shaanxi Hydrogen Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 712046; 2. Xi'an Ruichengfang Environmental Technology Co., Ltd., Xi'an 712046）

【**Abstract**】As a core component of the fuel cell membrane electrode assembly, the Gas Diffusion Layer (GDL) exerts a direct influence on the power density, durability, and cost of the cell. Carbon fiber and carbon paper constitute the foundation of the GDL. This review systematically examines recent research progress in carbon fibers and carbon paper, encompassing aspects such as the material systems of carbon fibers and the fabrication processes of carbon paper. Furthermore, it analyzes the performance of these materials in practical Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) applications, and explores their specific impacts on battery power density, durability, and cost. Finally, the study summarizes current critical technical bottlenecks and future development trends, aiming to provide theoretical guidance and technical references for the research, development, and industrial production of high-performance GDLs.

**Key words: Fuel cells, Gas diffusion layer, Carbon paper, Carbon fiber**

## 0　引言

气体扩散层（Gas Diffusion Layer，GDL）是燃料电池膜电极的核心组件，承担着气体传输、电子传导及水热管理等多重功能，其性能在一定程度上直接影响了燃料电池的功率密度、耐久性和成本[1]。碳纤维及碳纸是构成GDL的核心材料。近年来，针对碳纤维材料体系优化、碳纸制备工艺改进以及GDL结构与性能协同设计的相关研究取得了一定进展。本文旨在梳理和总结用于GDL的碳纤维及碳纸的研究进展，为该领域的未来发展提供参考。

## 1　碳纤维

### 1.1　碳纤维材料体系

碳纤维是一种具有高强度、轻量化等特性的高性能纤维材料（图1）[2]。其化学稳定性强，在燃料电池工作环境下，可抵抗高温、高湿、酸性等反应环境与反应气体的侵蚀，同时碳纤维高强度、低密度的特点既能为膜电极提供可靠的机械支撑，又能减轻质量，满足燃料电池对轻量化的需求。不同类型的碳纤维，其结构、组成和性能存在显著差异，直接影响碳纸的力学强度、导电性、亲疏水性等关键参数。

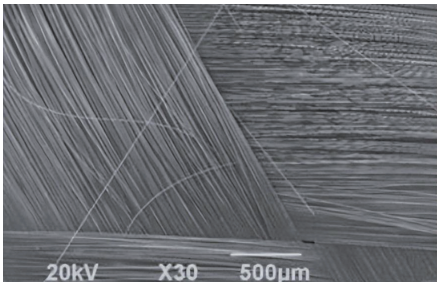



图1 碳纤维电镜图

目前，用于GDL的碳纤维主要包括聚丙烯腈（PAN）基、沥青基和粘胶基（表1）[3]。其中，PAN基碳纤维凭借其优异的综合性能，应用为最广泛（图2）。它具有较高的比表面积、良好的柔韧性和可纺性，通过精确控制纺丝、预氧化和碳化工艺，可以获得结构规整、性能可控的碳纤维。相比之下，沥青基碳纤维具有更高的密度和各向异性结构，其石墨化程度更高，导电性和导热性更优。然而，其脆性较大、柔韧性差，难以制成大面积、均匀的纤维毡，限制了其在GDL中的应用。粘胶基碳纤维则具有独特的微孔结构，比表面积非常大，但强度和模量较低，是用于特殊领域的过滤和吸附材料。

表1 碳纤维对比

| 类型 | 优势 | 缺点 |
|---|---|---|
| PAN基 | 综合性能优异，应用最广泛；工艺可控性强 | 导电性、导热性较沥青基稍弱 |
| 沥青基 | 密度高、各向异性结构；石墨化程度高，导电、导热性更优 | 脆性大、柔韧性差 |
| 粘胶基 | 具有独特的微孔结构，比表面积非常大 | 强度和模量较低 |

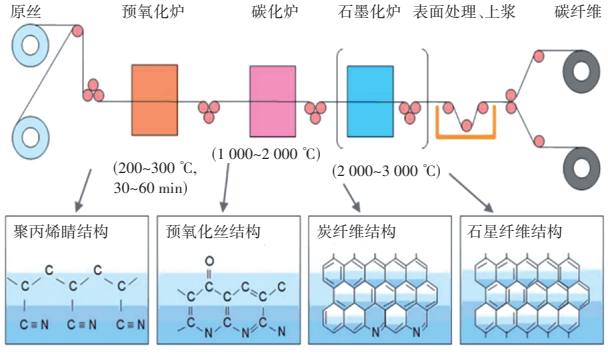



图2 PAN原丝到碳纤维的流程示意

### 1.2 碳纤维的优化处理

碳纤维表面惰性是制约其与聚合物粘结剂界面结合的主要瓶颈，为提升碳纸亲水性及纤维与粘结剂的结合力，对碳纤维进行预处理与表面改性至关重要。

目前主流改性方法包括3类：（1）氧化处理，通过化学氧化或电化学氧化在碳纤维表面引入羧基、羟基等含氧官能团，强化碳纤维与PTFE的氢键等化学键的结合。Zhang等[4]采用浓硝酸处理碳纤维后，其与PTFE的结合强度提升4倍。（2）接枝改性，借助自由基引发或化学接枝手段引入磺酸基、胺基等有机官能团，调节疏水性与化学稳定性。Park等[5]通过自由基接枝磺酸基改性碳纤维，制备的碳纸在长期耐久性测试中性能衰减率仅为未改性样品的1/3。（3）涂层改性，在碳纤维表面涂覆Pt、Pt-Ru合金等催化活性材料构建微反应位点，减少催化层用量。Zhang等[6]采Pt-Ru合金涂层改性后，催化层用量降低25%，同时维持了良好的电催化性能。

综上，对碳纤维进行有效预处理与表面改性，不仅能显著优化碳纸的整体性能，还为后续与催化层的结合筑牢基础，是提升GDL综合性能的核心环节之一。

## 2 碳纸

### 2.1 碳纸的制备

在选定并预处理好碳纤维后，将其加工成具有特定结构和性能的碳纸，是GDL制备的核心环节。碳纸是燃料电池膜电极GDL的核心支撑结构，承担着GDL物理支撑、传质、导电等多重功能[7]。其依靠多孔纤维网络确保燃料电池反应气体能够高效扩散至膜电极催化层，同时材料的疏水处理能够抑制液态水滞留，结合基底多孔纤维材料的高热导特性实现均匀的水热管理。目前主流的碳纸制备工艺主要包括湿法成型和干法成型，湿法成型因规模化优势成为主流（表2）。

表2 成型工艺对比

| 成型工艺 | 核心原理 | 优势 |
|---|---|---|
| 湿法成型 | 水分散纤维，真空网部脱水成型 | 规模化生产产能高，孔隙均匀性偏差小，成本低 |
| 干法成型 | 纤维机械铺展，通过热粘合或化学粘合成型 | 纤维分散均匀性好，产品柔性佳、透气性优，生产流程相对简单 |

碳纸的制备一般包括预处理分散、抄造成型、碳化处理及疏水改性4个关键环节，湿法成型工艺基本流程如下（图3）。

（1）预处理分散：先将碳纤维长丝切断为0.5~3 mm短切纤维，经机械搅拌或超声分散于去离子水制备0.1%~0.5%悬浮液，Zhang等[8]通过调控分散工艺实现纤维无团聚分散。

（2）抄造成型：随后采用湿法抄纸，向悬浮液中添加造孔剂与酚醛树脂黏结剂，调节浓度至0.2%~0.8%，经真空抽吸、干燥形成孔隙率70%~85%、孔径

10~100 μm的纤维网络。Waseem等[9]通过精准调控造孔剂粒径将碳纸孔径控制在20~50 μm。

(3)碳化处理:碳化过程在$N_2$氛围下分段升温100 ℃~1 500 ℃,部分工艺进一步经1 600 ℃以上高温石墨化增强导电性。袁晓君等[10]采用分段工艺使碳纸电导率最高达500 S/m。

(4)疏水改性:最后以5%~20% PTFE乳液浸渍碳化原纸,350~400 ℃烧结构建疏水网络。Lobato等[11]优化PTFE浓度至10%,实现水接触角140°且孔隙率75%的性能平衡。

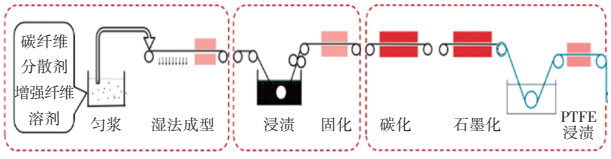



图3 碳纸湿法成型工艺示意

这些工艺的协同优化为碳纤维纸在燃料电池等领域的应用提供了性能支撑,相关研究进展也为工业化参数调控提供了依据。目前,质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell,PEMFC)碳纸市场中日本东丽由于早期优势占比较多(图4),德国西格里在规模化产量中具有成本优势,国内国氢科技等企业逐步打通全流程自主生产,产品对标国际,以更低的成本优势提升碳纸国产化率。

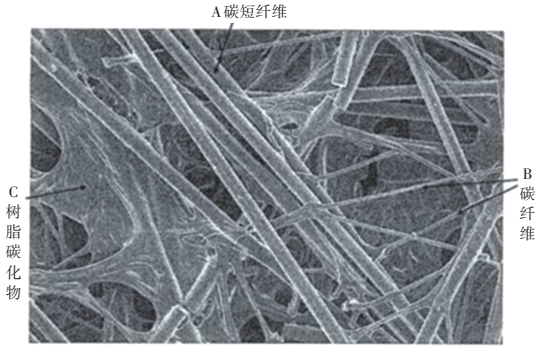



图4 东丽碳纸

### 2.2 碳纸的关键性能

碳纸的孔隙结构与厚度、密度等关键指标是决定燃料电池传质效率和机械稳定性的核心结构参数。碳纸的主要作用包括:导电作用、传质作用、支撑作用、导热作用。

孔隙结构借由大孔、中孔、微孔的不同占比实现差异化设计,平衡气体扩散与水管理,通过扫描电子显微镜形貌观察、压汞法等手段量化参数。倪学鹏等[12]研究发现,采用聚氧化乙烷与羟甲基纤维素复配分散剂可提升碳纤维分散均匀性,优化孔结构与导电性,采用梯度孔隙结构设计,多层铺叠技术能使碳纸透气率提升20%,有效避免水淹。厚度与密度需在机械支撑和低电阻间平衡,PEMFC用碳纸厚度通常为50~200 μm。张龙飞等[13]研究表明,将碳纸厚度从150 μm减至80 μm时,在提升密度维持强度的同时其体积电阻可降至52 $m\Omega \cdot cm^2$。导电性与疏水性是保障碳纸电子传输和水管理能力的关键功能参数。导电性设计聚焦碳纤维含量、排列方式优化,通过四探针法表征。Zhang等[14]通过碳纤维定向排列并添加5%导电炭黑,使电导率提升至180 S/m,添加碳纳米管改性可将电阻率降至$5.81\times10^{-3}$ Ω·cm。疏水性通常依靠PTFE涂覆量进行调控,以接触角为表征标准。Sahli等[15]发现PTFE与石墨粉配比1∶1时可兼顾疏水性与导电性,另一研究显示PTFE浓度10%时单电池性能最佳,而Yoshimune等[16]研究发现过量PTFE(>20%)会导致气体渗透率下降25%。

综上,碳纸关键性能聚焦孔隙结构、厚度密度、导电性与疏水性。碳纸作为燃料电池气体扩散层的基底层,具备导电、传质、支撑、导热四大核心特性,分别实现电子传输、气液传质、机械支撑膜电极及反应热传递的功能,是保障燃料电池电、质、热传输与结构稳定性的关键组件。

## 3 燃料电池中的应用

### 3.1 在燃料电池功中的功能

气体扩散层用碳纤维及碳纸是燃料电池的核心功能支撑组件,其核心作用在于为催化层与质子交换膜提供稳定机械支撑以避免膜结构破损,同时构建反应气体(氢气、氧气)与生成水的高效传质通道,实现反应物快速扩散与产物及时排导,有效规避“水淹”与“干化”现象对电池性能的影响。依托碳纤维材料优异的电子导电性,该组件可高效导出催化层表面电化学反应产生的电子,构建外电路电流通路,且其导热特性能够辅助调控电池运行温度场,保障反应体系温度均衡。

作为基底层的碳纤维及碳纸凭借高孔隙率、优良耐腐蚀性及稳定机械强度等关键特性,可适配质子交换膜燃料电池、直接甲醇燃料电池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)、固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)等不同类型燃料电池的工作需求,是维系电池长期稳定高效运行的重要结构与功能基础(图5)。

### 3.2 对燃料电池功率密度的影响

GDL的性能直接影响电池的欧姆损失和活化损

失。较低的电阻和较高的气体渗透率可以显著降低欧姆损失，从而提高电池的功率密度。研究表明，Muirhead等[17]通过构建分级孔隙结构、Maheshwari等[18]优化碳纸厚度，均显著提升了功率密度。综合来看，优化碳纸孔隙结构与厚度可使燃料电池功率密度提升10%~20%，为高功率燃料电池设计提供了技术支撑。

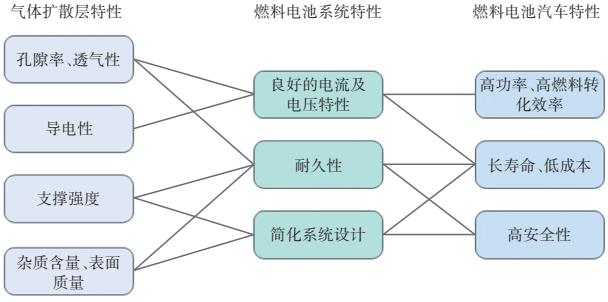



**图5　碳纸在燃料电池中的功能**

### 3.3　对燃料电池耐久性的影响

燃料电池在长期运行过程中，GDL面临着复杂的物理和化学环境。碳纤维的化学稳定性、碳纸与催化层及双极板之间的界面结合强度，是决定GDL耐久性的关键。在高电流密度下，水淹和干斑的交替出现会导致碳纸与催化层界面处发生开裂，最终导致电池性能衰减。因此，增强界面结合力是提高耐久性的核心。Jiao等[19]观测到高电流密度下水淹与干斑交替引发的界面开裂会导致性能衰减。因此，Zhang等[20]通过表面改性增强界面结合力，Chen等[21]通过高温石墨化提升碳纤维抗氧化性，均有效提升了GDL耐久性，为电池长期可靠运行提供了优化路径。

### 3.4　对燃料电池成本的影响

碳纤维及其制品是GDL成本的主要构成部分。降低碳纤维的生产成本、提高碳纸的生产效率、减少材料浪费，是降低燃料电池总成本的关键。Semitekolos等[22]通过废旧碳纤维回收降低原料成本，Zhang等[23]探索木质素基碳纤维替代材料，这些从材料创新与工艺优化出发的研究，成为当前降低GDL成本、推动燃料电池大规模应用的主要方向。

## 4　面临的挑战

### 4.1　面临的技术瓶颈

尽管碳纤维及碳纸技术已取得显著进展，但是在燃料电池应用中仍面临若干关键技术瓶颈。

（1）界面结合性能欠佳：碳纸与催化层之间的粘结力不足，在循环应力作用下易发生界面剥离，是影响电池长期耐久性的核心瓶颈之一，需通过表面改性或复合结构设计实现碳纸与催化层的强固界面结合。

（2）水热管理效能受限：在高功率密度运行工况下，水的生成与排出难以实现动态平衡，过量液态水会堵塞孔隙进而降低气体渗透率，水分不足则会导致催化层干涸并增加活化损失，开发具有智能水管理功能的GDL是未来研究的重要突破口。

（3）成本控制与规模化制备面临挑战：碳纤维的高成本制约了燃料电池的大规模商业化应用，同时如何实现碳纸大规模、低成本且高质量稳定生产，也是其产业化进程中亟待解决的难题。

### 4.2　未来发展趋势

未来，碳纤维及碳纸的研究将围绕多功能一体化设计、新型材料与复合结构、绿色可持续制备工艺及与膜电极组件协同优化等方向深入推进。在多功能一体化设计维度，开发集高导电性、高气渗透率、优异水管理能力与长耐久性于一体的GDL，是该领域的核心发展目标。在新型材料与复合结构领域，探索石墨烯、碳纳米管、金属有机框架等新型纳米材料与碳纤维的复合体系，或设计具有仿生结构的碳纸，有望赋予其更优异的综合性能。绿色可持续制备工艺的发展聚焦于低能耗、无污染的技术路径。此外，从系统层面将GDL与催化层、质子交换膜进行协同设计与优化，可实现膜电极组件性能的最大化，为燃料电池的性能突破与产业化应用奠定关键基础。

## 5　结束语

GDL作为燃料电池的核心功能组件，其性能提升在很大程度上需要依靠于碳纤维及碳纸技术的持续发展。本文系统综述了碳纤维的材料体系、预处理技术，碳纸的湿法制备工艺，以及其孔隙结构、导电性、疏水性等关键性能的研究进展。研究表明，通过对碳纤维实施表面改性、优化碳纸制备工艺并精细调控其宏观结构，可显著提升GDL的综合性能，进而有效改善燃料电池的功率密度、耐久性并降低成本。然而，当前GDL技术在界面结合性能、水热管理能力及成本控制等方面仍面临挑战。未来研究需聚焦于多功能一体化设计、新型材料应用、绿色制备工艺以及与膜电极组件的协同优化，以期开发出性能更优、成本更低、耐久性更强的下一代GDL，为燃料电池技术的规模化应用奠定基础。

**参　考　文　献**

[1] 王阳峰，任博，王红涛，等. 质子交换膜燃料电池用碳纤维纸技术的关键及产业化研究进展[J]. 储能科学与技术，

2025, 14(3): 984-996.

[2] 齐姝婧, 韩勇锡, 李梦涵, 等. 碳纤维复合材料的应用领域及预测[J]. 化学工业, 2021, 39(2): 33-35,47.

[3] KIM S, KUK Y S, CHUNG Y S, et al. Preparation and Characterization of Polyacrylonitrile-Based Carbon Fiber Papers[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2014, 20(5): 3440-3445.

[4] ZHANG Y, ZHU S, LIU Y, et al. The Mechanical and Tribological Properties of Nitric Acid-treated Carbon Fiber-Reinforced Polyoxymethylene Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(15): 41812.

[5] PARK J, OH H, HA T, et al. A Review of the Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Durability and Degradation[J]. Applied Energy, 2015, 155(10): 866-880.

[6] ZHANG J, QU X, HAN Y, et al. Engineering PtRu Bimetallic Nanoparticles with Adjustable Alloying Degree for Methanol Electrooxidation: Enhanced Catalytic Performance[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 263: 118345-118354

[7] PARK S, POPOV B N. Effect of a GDL Based on Carbon Paper or Carbon Cloth on PEM Fuel Cell Performance[J]. Fuel, 2011, 90(1): 436-440.

[8] ZHANG L F, CHEN D Y, WANG Q, et al. Ultra-Thin Carbon-Fiber Paper Fabrication and Carbon-Fiber Distribution Homogeneity Evaluation Method[C]// 第二届新型材料与化学工业国际学术会议论文集, 2017:1-7.

[9] WASEEM S, MAHESHWARI P H, MAHESHWARI P, et al. Configuring the Porosity and Microstructure of Carbon Paper Electrode Using Pore Formers and Its Influence on the Performance of PEMFC[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(12): 02838.

[10] 袁晓君, 王虹, 刘江涛, 等. 石墨化温度对质子交换膜燃料电池用碳纸性能的影响[J]. 化工新型材料, 2024, 52(6): 94-97.

[11] LOBATO J, CAIZARES P, RODRIGO M A, et al. Influence of the Teflon Loading in the Gas Diffusion Layer of PBI-Based PEM Fuel Cells[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2008, 38(6):793-802.

[12] 倪学鹏, 王燕青, 李坤明, 等. 氢燃料电池用碳纤维纸的工艺优化及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2025(4): 61-70.

[13] 张龙飞, 王奇, 徐恩, 等. 超薄碳纤维纸的制备工艺与性能[J]. 化工新型材料, 2018, 46(10): 161-164+169.

[14] ZHANG Q, WANG J, ZHANG B Y, et al. Improved Electrical Conductivity of Polymer/Carbon Black Composites by Simultaneous Dispersion and Interaction-Induced Network Assembly[J]. Composites Science and Technology, 2019, 179(6): 106-114.

[15] SAHLI M, CABLE A, CHETEHOUNA K, et al. Preparation and Characterization of Polytetrafluoroethylene (PTFE)/Thermally Expanded Graphite (TEG) nanocomposites[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 124(9): 175-181.

[16] YOSHIMUNE W, KATO A, YAMAGUCHI S, et al. Comprehensive Analysis of Wettability in Waterproofed Gas Diffusion Layers for Polymer Electrolyte Fuel Cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(28): 9-11.

[17] MUIRHEAD D, BANERJEE R, GEORGE M G, et al. Liquid Water Saturation and Oxygen Transport Resistance in Polymer Electrolyte Membrane Fuel cell Gas Diffusion Layers[J]. Electrochimica Acta, 2018, 274: 16-20.

[18] MAHESHWARI P H, SINGH R, MATHUR R B. Effect of the Thickness of Carbon Electrode Support on the Performance of PEMFC[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2012, 673: 32-37.

[19] JIAO K, LI X. Water Transport in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2011, 37(3): 221-291.

[20] ZHANG X F, YAO T T, LIU Y T, et al. Plasma-Oxidized Gas Diffusion Layers for Enhancing Electrochemical Properties of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Fuel, 2025, 384: 38433956Z.

[21] CHEN L, FANG T, SONG C, et al. Catalytic Graphitization of Boron on the Fabrication of High-Performance Carbon Papers for Gas Diffusion Layers in PEMFCs[J]. Catalysis Communications, 2021, 157: 106332.

[22] SEMITEKOLOS D, TERZOPOULOU S, ZECCHI S, et al. Performance Restoration of Chemically Recycled Carbon Fibres Through Surface Modification with Sizing[J]. Polymers, 2024, 17(1): 33-38.

[23] ZHANG M, OGALE A A, et al. Effect of Temperature and Concentration of Acetylated-Lignin Solutions on Dry-Spinning of Carbon Fiber Precursors[J]. Journal of Applied Polymer Science, [2016-04-20] (2025-12-09). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.43663.

（责任编辑　明慧）