

引用格式: 李团锋, 张璐瑶, 樊润林, 等. 复合石墨双极板材料及性能的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(2): 102-111.  
LI Tuanfeng, ZHANG Luyao, FAN Runlin, et al. Research progress in composite graphite bipolar plate materials and properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(2): 102-111.

# 复合石墨双极板材料及性能的研究进展

## Research progress in composite graphite bipolar plate materials and properties

李团锋<sup>1</sup>, 张璐瑶<sup>2,3</sup>, 樊润林<sup>2,3</sup>, 孟晓敏<sup>2,3</sup>, 胡杨月<sup>1,4</sup>, 刘 聪<sup>1</sup>,  
温序晖<sup>1,4\*</sup>, 郑俊生<sup>2,3\*</sup>, 明平文<sup>2,3</sup>

(1 东方电气(成都)氢燃料电池科技有限公司, 成都 611731;  
2 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 3 同济大学  
汽车学院, 上海 201804; 4 长寿命燃料电池四川省  
重点实验室, 成都 611731)

LI Tuanfeng<sup>1</sup>, ZHANG Luyao<sup>2,3</sup>, FAN Runlin<sup>2,3</sup>,  
MENG Xiaomin<sup>2,3</sup>, HU Yangyue<sup>1,4</sup>, LIU Cong<sup>1</sup>,  
WEN Xuhui<sup>1,4\*</sup>, ZHENG Junsheng<sup>2,3\*</sup>, MING Pingwen<sup>2,3</sup>

(1 Dongfang Electric Fuel Cell Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China;  
2 Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University,  
Shanghai 201804, China; 3 College of Automotive Studies, Tongji  
University, Shanghai 201804, China; 4 Long-Life Fuel Cell Key  
Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China)

**摘要:** 质子交换膜燃料电池(PEMFC)中的双极板起到传递电子、分配气体、电池内水管理、支撑膜电极组件等作用,也是保证燃料电池堆低成本的关键部件。本文对双极板材料(金属、石墨和复合材料)、作用、优势及挑战进行了分析,其中复合石墨双极板以其长寿命和耐腐蚀的特质,具备与其他双极板竞争的优势,近年来受到高度关注;对石墨形成导电网络的相关因素(涉及填料尺寸、形态,辅助填料桥接石墨颗粒)、聚合物的成分与固化条件以及成型工艺条件对性能的影响规律进行了讨论。未来,开发具有优异综合性能的复合石墨双极板,掌握并优化聚合物结构及反应路径对其性能的平衡作用,使现有配方及成型方法适应大规模生产,将大大增强质子交换膜燃料电池在更多领域的大规模应用。

**关键词:** 双极板; 石墨; 树脂; 复合材料; 质子交换膜燃料电池

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2022.000941

**中图分类号:** TM911.4; TQ127.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)02-0102-10

**Abstract:** Bipolar plates play a role in electron transfer, gas distribution, water management, supporting membrane electrode assembly in the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and is also a key component to ensure low cost of fuel cell stack. In this paper, bipolar plate materials (metal, graphite and composite materials), functions, advantages and challenges are reviewed. Among them, the composite graphite bipolar plate stands out with its long cycle life and high corrosion resistance, and has received high attention in recent years. The factors related to the conductive network formed by graphite (including the size and shape of filler and the auxiliary filler bridging graphite particles), the composition and curing conditions of polymer, and the influence of the molding process conditions on the properties were discussed in this paper. In the future, the development of composite graphite bipolar plates with excellent comprehensive performance, making existing formulas and forming methods suitable for large-scale production by mastering and optimizing the balance between polymer structure and reaction path on their performance,

will greatly enhance the large-scale application of proton exchange membrane fuel cells in more fields.

**Key words:** bipolar plate; graphite; resin; composite material; PEMFC

质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 是一种将燃料和氧化剂的化学能直接转换成电能的连续发电装置, 具有能量转换效率高、发电效率受负载变化影响小、有害物和碳排放少等优点, 被认为是 21 世纪最有发展前景的发电技术之一<sup>[1-3]</sup>。单体燃料电池是质子交换膜燃料电池的基本单元, 但实用化的电池必须由多个单体电池以串联方式层叠组合构成电堆, 以满足实际应用的电压。

电堆是燃料电池系统的核心, 也是发生电化学反应的场所, 主要由双极板、膜电极组成。如图 1<sup>[4]</sup>所示, 氢气和氧气分别通过双极板通入到膜电极的阳极和阴极, 在催化剂的作用下发生氧化反应和还原反应, 释放的能量以电能的形式输出。作为电堆中的“骨架”, 双极板约占电堆成本的 30%, 质量约占 60%~80%。此外, 双极板不仅要具备“骨架”支撑作用, 也要起到收集电流、分配气体、为冷却液提供通道等作用。由于双极板在电堆中的重要性, 优化燃料电池双极板结构和性能对提升燃料电池电堆耐久性、降低燃料电池成本、提高燃料电池比功率和比能量具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

鉴于此, 美国能源部 (United States of Department of Energy, DOE) 对其性能指标提出了发展目标, 见表 1<sup>[7-9]</sup>。可以看到, 随着未来可以预见的氢燃料电池产

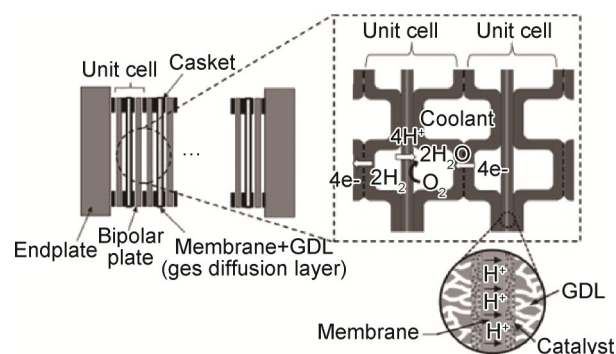


图 1 质子交换膜燃料电池示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of PEMFC<sup>[4]</sup>

业体系逐渐完善和市场份额逐渐扩大的趋势下, 对于质子交换膜燃料电池关键部件之一的双极板性能要求在不断提升, 涵盖的性能衡量指标也在不断变多。此外, 不同的应用场景也对双极板的结构、性能等有不同的要求。比如, 运输载具需要电堆的高功率密度, 并能够承受恶劣的工作环境, 其中的温度、湿度和负载变化快, 对极板的厚度、稳定性要求高; 而在固定式发电站中, 双极板的尺寸和体积不是主要的限制因素, 而更为关注双极板的寿命和可靠性。根据应用场景需求而有的放矢地进行选择, 是双极板设计的一个基础。

表 1 质子交换膜燃料电池双极板性能 DOE 指标<sup>[7-9]</sup>

Table 1 DOE technical targets for composite bipolar plates for PEMFC<sup>[7-9]</sup>

| Property                                   | DOE targets in 2020 year                                                        | DOE targets in 2025 year                                                     |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Electrical conductivity                    | 100 S/cm                                                                        | >100 S/cm                                                                    |
| Area specific resistance                   | $0.01 \Omega \cdot \text{cm}^2$                                                 | $<0.01 \Omega \cdot \text{cm}^2$                                             |
| Flexural strength                          | 25 MPa                                                                          | 40 MPa                                                                       |
| Thermal conductivity                       | $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$                          | $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$                       |
| Gas permeability (@80 °C, 300 kPa, 100%RH) | $1.3 \times 10^{-14} \text{ cm}^3/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Pa})$ | $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Pa})$ |
| Water absorption (at 24 h)                 | —                                                                               | < 0.3%                                                                       |
| Corrosion resistance                       | $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$                                                     | $<1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$                                                 |
| Cost                                       | 3 \$/kW                                                                         | 2 \$/kW                                                                      |

## 1 PEMFC 双极板材料

电堆对双极板的要求极为苛刻。从功能方面, 要求双极板材料是电与热的良导体、具有一定的强度以及较高的气体致密性等; 从稳定性方面, 要求双极板在燃料电池酸性和湿热环境下具有耐腐蚀性、各项性能稳定和无污染; 从产品化方面, 要求双极板材料在减薄的同时, 易加工成型、成本低。

目前, 双极板可以分为石墨双极板、金属双极板、

复合双极板三类, 如表 2<sup>[10-12]</sup>所示。

### 1.1 金属双极板

金属具备突出的导电、导热性能和力学性能, 满足双极板在燃料电池运行的高导电、高抗弯强度需求, 且金属材料的高韧性在交通运输等应用场景下更能满足燃料电池的抗震性能。在满足气密性和强度条件下成型的双极板厚度能达到 0.1 mm 以内, 可显著降低燃料电池电堆的体积。常用的金属极板材料主要包括贵金属、不锈钢和钛合金等。其中不锈钢具

表 2 不同类型双极板性能对比<sup>[10-12]</sup>  
Table 2 Comparison of different types of bipolar plates<sup>[10-12]</sup>

| Type                    | Manufacturing method                                      | Advantage                                                                                                                     | Disadvantage                                                                                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Graphite bipolar plate  | Artificial graphite impregnated resin                     | High corrosion resistance;<br>high thermal and electric conductivity;<br>light weight                                         | Brittle, poor mechanical property;<br>poor machinability and high cost;<br>poor gas tightness with large thickness   |
| Metal bipolar plate     | Stainless steel titanium covered with surface coating     | High thermal and electric conductivity;<br>good mechanical property;<br>non-porous, high gas barrier property                 | High density;<br>low corrosion resistance;<br>membrane and catalyst poisoning, surface modification required         |
| Composite bipolar plate | Composition of graphite and thermoset/thermoplastic resin | Light mass;<br>high corrosion resistance;<br>short formation time, suitable for batch production;<br>good mechanical property | Promotion of domestic technology level required;<br>relatively low electric conductivity compared to graphite plates |

有良好的成型性能和经济性能,是研究最为广泛的金属双极板材料。但不锈钢在燃料电池的酸性工况下易发生腐蚀,而溶解的金属离子会导致催化剂中毒,降低燃料电池寿命。同时,腐蚀产生的钝化膜会增加双极板与气体扩散层间的接触电阻,降低燃料电池电堆的输出功率。为了提高金属极板的耐腐蚀性能,表面改性是性能提升的一个主要策略<sup>[13-15]</sup>,但这会降低极板的电导率,增加极板成本,同时,表面涂层与金属双极板的稳定结合也是需要进一步研究的课题。

1.2 石墨双极板

石墨具备高电导率和耐腐蚀的本征特性,是最早用作双极板的材料。石墨双极板由石墨和可石墨化聚合物均匀混合后,经过等静压定型以及烧结使聚合物石墨化制成无流场光板,后续经过机加工雕刻流道制备而成。为保证良好的气密性以及 在装配过程中的结构稳定,石墨双极板需要具备较大的厚度。其次,石墨板流道的机加工过程成品率和生产效率较低,以及需要长时间的加热过程以实现高温石墨化。这些不利因素使得石墨双极板的生产成本昂贵;同时,石墨板的高温烧结工艺造成了石墨极板脆性较高且透气性较差。这些天然的不足阻碍了石墨板在燃料电池中的大规模应用<sup>[14,16]</sup>。

1.3 复合石墨双极板

复合石墨极板的出现是为了解决石墨极板存在的厚度高、易脆、透气性差和不容易加工的问题。复合石墨极板是应用聚合物树脂作黏结剂,以石墨等碳基材料作导电填料制备的新型燃料电池双极板,具有成本低、质量轻、寿命长等优点。复合石墨双极板中,树脂基体可以增强力学性能并黏结导电填料,是提升气密性、抗弯强度等性能的主要研究对象;以石墨为代表的导电填料在复合材料中相互连接,形成传导网

络,是复合石墨板的导电导热的结构基础。

2 复合石墨双极板的主要材料

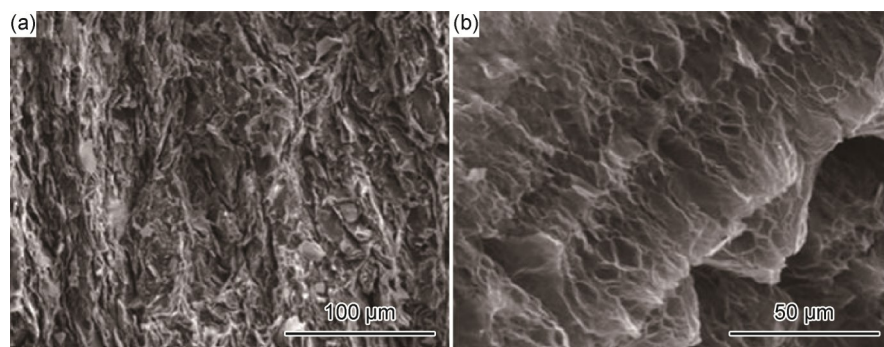
2.1 石墨

石墨性质,包括电导率、结构特性(尺寸、形状、比表面积等)以及在复合材料中填料的体积分数、分布和取向以及石墨颗粒间填料间距等特性会直接影响复合双极板的性能。目前,复合石墨双极板使用的石墨主要分为两大类:鳞片石墨和膨胀石墨。鳞片石墨天然形成,具有良好的导电、导热性能;膨胀石墨是鳞片石墨经过插层处理后经过高温膨胀而成,呈疏松、多孔的蠕虫状结构。图 2<sup>[11]</sup>对制成的复合石墨双极板的截面进行比较,可以发现,鳞片石墨更多地呈现一种紧密和撕裂的形状,而膨胀石墨更多呈现一种蓬松、多层的结构。

导电填料的粒径对复合石墨板性能有较大影响。导电填料粒径大小为 325~500 目时,复合石墨双极板的导电性和抗弯强度会随着粒径的减小产生较大线性变化,而当粒径大小减至 500 目以上时,抗弯强度受粒径的影响较小,而电导率仍保持下降趋势<sup>[11]</sup>。此外,在一定范围内石墨粒径越小,树脂对石墨颗粒的浸润越充分,未润湿的石墨颗粒蒸发及未充分混合而形成的孔隙越少,因孔隙产生的应力集中减少,导致石墨颗粒与树脂间的界面结合力减小。而树脂含量较高时,界面结合力与界面面积成正比,因此石墨粒径越小,树脂分布越均匀,石墨与树脂接触面积越大。故在二者共同作用下使得小粒径石墨制成的复合材料的抗弯强度更高<sup>[17-19]</sup>。粒径继续减小后,复合材料的强度在树脂自身的结合强度作用下而保持稳定<sup>[11]</sup>。

但是,随着石墨粒径的减小,石墨颗粒间被不导



图 2 石墨 SEM 图<sup>[11]</sup> (a)鳞片石墨;(b)膨胀石墨Fig. 2 SEM images of graphite<sup>[11]</sup> (a)flake graphite;(b)expanded graphite

电的聚合物隔离,导电填料间的接触电阻增大,导致复合石墨双极板的导电性降低<sup>[20]</sup>。为了进一步提升导电率,通过不同粒径的石墨颗粒匹配以增加石墨颗粒间接触成为了一种可能的方案。Dhakate 等<sup>[21]</sup>发现,当大小粒径的填料比例为 9:1 时,复合极板在抗弯强度没有损失的同时,导电率提升接近 100%。Shen 等<sup>[22]</sup>通过几何最密堆积计算出粒径匹配的最佳比例,减少大粒径石墨颗粒间的堆积间隙,增加了石墨间的接触面积,从而提升了复合极板导电性。

## 2.2 树脂

树脂,也称为高分子聚合物,在复合双极板中作为黏结剂,是保证复合双极板的气密性和抗弯强度的基础<sup>[16,23]</sup>。目前复合石墨板中使用的树脂主要包括热固性树脂和热塑性树脂。选用热塑性树脂为黏结剂时,碳基填料通过熔融混合的方式与树脂混合均匀,经挤出成型在模具中一次成型复合双极板,具有生产周期短、制备效率高的优点。但是热塑性树脂通常黏度较大,导致导电填料的容许浓度上限较小且与填料间的界面结合较差,影响复合双极板的导电性和抗弯强度。热固性树脂作为黏结剂可以与导电填料经过干法或者湿法的方式均匀分散,再通过热模压工艺一次成型。热固性树脂黏度较低,可以在高填料浓度下与碳基填料形成较好的界面结合,与填料形成均匀的分布相,达到理想的导电性和抗弯强度<sup>[16,24-27]</sup>。

目前使用较多的热固性树脂有环氧树脂、酚醛树脂等。这些热固性树脂分子链中通常具有较多的活性基团,在成型过程中相互交联,形成稳定的分子结构,且易于形成网状结构,使得极板尺寸稳定性较好<sup>[28-29]</sup>。

## 2.3 碳基辅助导电填料

复合石墨双极板的碳基辅助导电填料主要包括炭黑(carbon black)、石墨烯(graphene)、碳纳米管(carbon nanotube)和碳纤维(carbon fiber)等。辅助导电填料在复合石墨双极板中的含量相对较少,一般不超过

5%(质量分数,下同)。少量添加炭黑、碳纤维、碳纳米管等辅助导电材料,可在有效填充双极板空隙,增加导电通路的同时,通过与树脂官能团形成共价键或直接改善双极板的韧性,增强双极板的抗弯强度,使复合材料双极板的导电性与力学性能均获得提升。前期关于辅助导电填料的研究主要为通过梯度实验验证其种类和比例对性能的影响<sup>[6,16,30]</sup>,随着研究的深入,辅助导电填料的表面改性也逐渐得到了关注,如利用硝酸、过氧化氢等对其进行表面官能团化,羧基、羟基等官能团可以与树脂发生聚合反应,从而起到增强基材间的连接力进而改善复合石墨双极板性能的作用<sup>[31-34]</sup>。

炭黑是最常用的导电添加剂,将炭黑作为辅助填料用于制备复合材料,可以在石墨颗粒间形成额外的导电路径,和膨胀石墨达到导电协同效果,进而实现电导率的提升<sup>[35-36]</sup>。然而,炭黑因高比表面积的特点,相比于石墨更难被树脂润湿,易于在复合材料内部发生团聚,当浓度超过一定界限,炭黑的团聚体难以有效填充在石墨颗粒间的缝隙间,导致复合石墨板的导电性和抗弯强度大幅减小<sup>[37-38]</sup>。

石墨烯也是一种常用的导电添加剂,它是一种只有一个碳原子厚度的二维材料,具有 5000 W/(mK)的高热导率和 6000 S/cm 的高电导率,以及优异的力学性能。Phuangngamphan 等<sup>[39]</sup>开发了以石墨和石墨烯填充聚苯并噁嗪的高导电复合双极板,用适宜浓度的石墨烯取代石墨能明显提升复合极板的导电导热性和弯曲模量<sup>[40]</sup>。但当石墨烯超过一定浓度时易发生团聚,树脂和石墨烯之间无法有效地结合,导致气孔形成,使得导电性和抗弯强度都降低<sup>[41]</sup>。

碳纤维是一种含碳量高于 90% 的高强度高模量纤维,其具有密度小、导电性、力学性能、化学稳定性好的特点,被广泛用作导电添加剂。碳纤维的高拉伸强度在复合双极板中可以提高双极板的机械强度。Ghosh 等<sup>[42]</sup>将不同长度的碳纤维作为辅助填料加入石

墨酚醛复合板中,其中1 mm长度的碳纤维对于复合极板的机械强度增强效果最为明显,并对导电性能也有一定程度的提升。但是,碳纤维长度过大会趋向于发生团聚,导致分布不均从而削弱增强效果<sup>[43-46]</sup>。

碳纳米管是一种由碳原子 $sp^2$ 杂化形成的管状碳纳米材料,也是常用的导电添加剂。它的固有力学性能好,拉伸强度在50 GPa以上,为钢的100倍,且具有长径比高的优点,施加到复合材料上的负载会转移到碳纳米管上,基体和填料间能更好地结合,使得复合极板的抗弯强度、模量增加<sup>[34]</sup>。碳纳米管的p电子对形成了大范围的离域 $\pi$ 键,具有良好的导电性,以纳米尺度添加到石墨颗粒间隙之间可以形成高导电相,从而改善石墨颗粒间的导电导热接触。此外,碳纳米管在导电聚合物中取向具有随机性,因此对于具有高取向性的石墨材料,添加碳纳米管增强的不仅有面内电导率,还有面间电导率。然而,碳纳米管作辅助填料也有一定程度的缺陷,其主要问题在于长径比高,易发生团聚,使得提升导电导热性和抗弯强度效果降低<sup>[47-49]</sup>。

本课题组在研究石墨粒径对导电性影响的基础上,进一步探究了不同石墨粒径条件下辅助填料对于复合双极板导电性和弯曲强度的影响<sup>[11]</sup>。实验数据表明,相比于其他粒径尺寸的鳞片石墨作导电基材,在1000目的鳞片石墨中添加辅助填料,其性能强化作用达到最佳。

### 3 制备工艺过程对复合石墨板性能的影响

复合石墨板通常是由石墨与树脂经过充分混合后,形成母料,然后填入模具中经过热压定型制成。制备工艺及后处理技术的选择会直接影响复合石墨板的宏观及微观结构,进而直接影响复合石墨极板的性能<sup>[50]</sup>。

对于制备工况而言,需要控制反应过程使固化过程和加压过程相匹配,避免加压过快导致树脂溢出,又避免加压过慢导致内部孔隙率过大。为达到缩短生产周期的目的,还需要在保证生产质量的前提下尽可能加快固化反应速度,比如控制添加促进剂的含量、控制反应温度可以加剧分子间的作用速度而增强树脂的反应速度。Simaafrookhteh等<sup>[27]</sup>研究了成型条件对热固性酚醛树脂制备复合双极板成型缺陷的影响,酚醛树脂在固化过程中会产生水蒸气和氨气等小分子化合物,树脂固化过程中开模并以慢速合模能达到理想的排气效果。Kim等<sup>[51]</sup>开发了一种介电测量法用来监测连续热轧过程中复合极板树脂固化的状态。

在酚醛树脂的固化过程中以能量损耗因数来衡量树脂中偶极子和离子的迁移率,从而确定热轧过程中树脂固化的最适温度。

对母料采取不同加工工序会使其最终呈现不同的微观结构,进而表现出各向同性和各向异性的差异<sup>[52]</sup>。压缩处理石墨的平面取向随着石墨含量增加而不断增加,因为压缩过程中的压力会更有效地转移到石墨片上,而挤压-压缩处理得到的石墨在压缩形成样品之前已经通过挤压在树脂基质中随机取向,各向同性更突出,在结构上引入的薄弱点更少,弯曲强度增强,但挤压过程中高剪切力形成缺陷,使挤压-压缩复合材料的面内电导率更低。

本课题组对复合双极板制备开发了一种预成型石墨板及树脂渗透方法<sup>[53-54]</sup>,即采用预成型的石墨板建立连续导电网络,以消除树脂对导电材料间连接的不利影响,并减少结构缺陷。在树脂含量为25%时,该方式所制双极板的电导率及抗弯性能均高于未采用预成型的双极板,可有效均衡并优化复合双极板性能。

采用表面处理和吸附模压过程中溢出的过多树脂是解决复合极板表面树脂富集、减小燃料电池欧姆损耗的主要方法。Kim等<sup>[30]</sup>使用火焰处理复合双极板表面的方法使表面树脂富集层炭化以优化接触电阻,适用于批量化处理。固化后的酚醛树脂经过火焰处理后通过聚合、缩合、脱氢、氢转移的方式炭化,可以降低双极板和气体扩散层之间的接触电阻。Antunes等<sup>[16]</sup>使用电磁场和炭黑开发了一种选择性加热表面技术以去除碳纤维增强复合板表面富集树脂层,使用微波设备产生的电磁场加热高比表面积的炭黑,表面富集的树脂层在高温下被炭化去除,能够达到增强导电性的目的,且内部的碳纤维不会受到破坏,极板的抗弯强度不会受到影响。

### 4 复合石墨双极板的性能优化

复合石墨双极板由聚合物作黏结剂和碳材料作导电填料充分混合后制成,其中聚合物形成三维网状结构,使得双极板具有一定的抗弯强度,碳材料形成导电通路,使得双极板具备传输电子的功能。受限于双极板实际应用中的体积及质量要求,聚合物和碳材料其中一方的过量添加势必导致另一方添加量的减少,即仅通过调整混合比例对力学性能和导电性能其中一方的提升,必会在一定程度上对另一性能造成损耗。因此,在不改变最优基本配比的基础上,为进一步实现复合石墨双极板的性能优化,便需要有针对性



地从其他方面进行操作。如对于力学性能而言,采用官能团化处理碳材料以提升其与聚合物的相容关系,减少团聚<sup>[33,55-58]</sup>;对于导电性能,石墨进行插层处理或者掺杂改性能够提升石墨的本征电导率,进行表面官能团化增强离散能够优化导电网络,均有利于复合极板的导电性增强<sup>[59-61]</sup>。现阶段的性能优化更多地从导电材料为切入点,扬长避短使其兼顾导电和力学性能,通过调整和比较微观结构可提高优化过程的针对性及效率<sup>[9]</sup>,二者以外其他性能的研究也在同步进行中。

#### 4.1 力学性能优化

许多因素决定了复合石墨双极板的力学性能,比如石墨的粒径、石墨在树脂基体中的分散状态。石墨的表面特性使得树脂与石墨之间通常不能紧密地黏合,且小粒径颗粒更易发生团聚,均匀离散难度较高。通过对石墨表面改性引入新的官能团,能有效提升石墨与树脂的界面性能,进而实现复合石墨双极板力学性能的提升。此外,通过对树脂进行改性优化,具有较多极性基团的相容剂对树脂枝接,促进石墨与树脂的相容性,进而也对复合双极板机械强度的提升起到了重要作用。

Lee等<sup>[58]</sup>将石墨进行氧氟化处理作为填料,氟化乙烯丙烯作为黏结剂制备复合板,与未经处理的石墨作为填料相比,氧氟化石墨复合板的弯曲强度显著提高,表明氧氟化石墨表面的官能团提升了石墨与氟化乙烯丙烯之间的物理相互作用。Lv等<sup>[62]</sup>利用3%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 和 $1.6 \times 10^{-6}$   $\text{FeSO}_4$ 制成芬顿试剂改性碳纤维制备复合极板,经芬顿试剂处理后,SEM断面中碳纤维被拉断而不是被拉出,可以提高复合双极板抗弯强度。

Athmouni等<sup>[63]</sup>使用硝酸对多壁碳纳米管进行官能团化,可使界面作用更强,增强抗冲击能力;界面黏附性、负载转移更好,提升弯曲性能;黏度低有利于模腔填充,尤其是流动通道的薄壁处,并在官能团化后与基体间形成更好的相互作用,表面更光滑,没有任何裂缝。Bühler等<sup>[64]</sup>提出碳纤维的施胶剂多为环氧树脂基,与非极性聚丙烯基体之间的相容性差,导致性能改善不明显,使用分子上有短有机链的钛酸酯作偶联剂,一端有机官能团与聚丙烯相容,一端无机官能团与填料相容,使填料和基体间附着力增强,进而增加机械强度。

#### 4.2 导电性能优化

对于双极板导电性能的测量通常分为面间电导率和面内电导率,受压过程中,石墨颗粒趋向于沿平面方向平行分布,使得面间电导率会低于面内电导率,所以调节导电性能的一个重要方面就是对石墨颗

粒的取向控制。极板总电阻由接触电阻和体电阻组成,其中接触电阻占主导地位。接触电阻的影响因素包括由于凹凸不平的局部接触产生的集中电阻和表面覆盖不同性质的薄膜产生的膜电阻。在测量过程中使用更高压力或对样品进行表面处理,可最大限度地减少接触电阻的影响<sup>[65]</sup>。

Kim等<sup>[33]</sup>在不同的氧化条件下将多壁碳纳米管羧基化处理,将羧基化的多壁碳纳米管作为填料制备导电复合材料,得到了更低的渗流阈值,说明羧基增强了多壁碳纳米管在树脂溶液中的润湿性,使其在树脂溶液中更易被分散均匀。石墨通过氧化处理引出含氧基团,在官能团处石墨六元环晶格产生缺陷,在高温下用氨气尿素等作氮源对含氧官能团石墨进行还原,氮原子能取代缺陷处的碳原子,掺杂的氮原子根据在石墨晶格中的不同位置形成吡啶氮、吡咯氮和石墨氮,其中吡咯氮有两对p电子对形成共轭 $\pi$ 键,增大石墨的载流子浓度,提升石墨的导电性<sup>[60-61,66-68]</sup>。

Alavijeh等<sup>[69]</sup>利用纳米铜提高导电性,纳米级铜可以很好地分散在聚合物和石墨基体中,填充孔隙释放导电性能,抗弯强度和密度也有所提升,但若在复合块体中添加超过5%的纳米铜,电导率和抗弯强度反而会降低。Naji等<sup>[66]</sup>提出,虽然电导率和热导率会随着碳纳米管含量的增加而增加,但填料含量高的复合材料熔体黏度高,加大挤压工艺难度。引入增塑剂能够缓解填料含量高达53%时的加工难度,可有效实现双极板的高电导率。

在双极板表面覆上一层柔软的导电材料比其他表面处理方法能更有效地降低界面接触电阻,且脱模后不需要表面处理,酸性环境中不易腐蚀。Yu等<sup>[6]</sup>通过覆盖石墨涂层降低与气体扩散层(GDL)的接触电阻,当石墨涂层厚度为50  $\mu\text{m}$ 时,有石墨涂层的总电阻和界面接触电阻是传统复合双极板的10%和4%。

#### 4.3 其他性能的优化

除了导电性能和力学性能,双极板的其他性能对于推广PEMFC的应用同样至关重要<sup>[70]</sup>。为了提高复合石墨板的热导率,需要高含量的导电填料产生连续的传导网络,并最大限度地减少由声子散射、边界散射和缺陷散射这三种现象引起的热阻。面间热导率是将热量传输出电池的关键特性<sup>[71-72]</sup>。高纵横比的碳纳米管随机取向提高了三个方向的热导率,并桥接相邻的石墨烯和石墨,形成传导网络。Witpathomwong等<sup>[34]</sup>论证了石墨烯/碳纳米管二元导电填料制成的双极板中热性能的影响因素,复合材料的耐热性会随着温度的升高而增强,且碳纳米管含量越高,温度变化对复合材料的热阻率影响程度越大<sup>[73-74]</sup>。

对于燃料电池而言,有效进行水管理方可保证各部件的正常运行,电池内水管理是双极板承担的作用之一。研究发现碳纳米管表面存在羧基等亲水性官能团,随着碳纳米管含量的增加,吸水性能有所提升<sup>[34]</sup>,然而碳纳米管含量继续增高后会形成聚集,水反而更容易渗透,只有含少量碳纳米管时,树脂才可润湿所有颗粒,有效隔水<sup>[75]</sup>。

## 5 结束语

本文对质子交换膜燃料电池不同类型双极板的优缺点、复合石墨双极板的主要材料、成型方法以及性能优化进行了系统性的综述。石墨和金属双极板虽各有优势,但由于材料本征特性所造成的问题或难以解决,或生产成本过高,因此规避了两种双极板严重缺陷的复合石墨双极板被广泛研究。复合石墨双极板主要由导电填料和树脂组成,常通过高温模压成型,具有长寿命、耐腐蚀的优点,有望进一步提升双极板的综合性能,为未来质子交换膜燃料电池的大规模应用助力。

不过,复合石墨板的导电和力学性能难以同时兼顾,现已通过选择不同种类的材料、优化成分配比以及表面改性等途径,为复合石墨双极板性能的平衡带来进步;与此同时,参与水管理能力的优劣、加工的难易等也是选取双极板材料时无法忽略的方面,针对不同性能的要求有目的地调整材料,优化成型加工步骤,可定向地完成有特殊要求的高性能双极板的研发。

复合石墨双极板未来的工作重点可总结为以下3点:(1)进一步开发优异的复合石墨树脂材料,探究聚合物结构对极板性能的影响;(2)优化聚合物反应路径以构建新型聚合网络,在双极板的导电性能和力学性能间达到平衡与提升;(3)使现有配方及成型方法适应大规模生产,增进质子交换膜燃料电池在交通运输、储能等领域的应用。

## 参考文献

- [1] 孙鹏,李忠芳,王传刚,等. 燃料电池用高温质子交换膜的研究进展[J]. 材料工程,2021,49(1):23-34.  
SUN P, LI Z F, WANG C G, et al. Research progress of high temperature proton exchange membranes applied in fuel cells[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(1): 23-34.
- [2] 李伟,李争显,刘林涛,等. 多孔金属流场双极板研究进展[J]. 材料工程,2020,48(5):31-40.  
LI W, LI Z X, LIU L T, et al. Recent progress of porous metal filed in bipolar plate[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(5): 31-40.
- [3] 王倩倩,郑俊生,裴冯来,等. 质子交换膜燃料电池膜电极的结构优化[J]. 材料工程,2019,47(4):1-14.  
WANG Q Q, ZHENG J S, PEI F L, et al. Structural optimization of PEMFC membrane electrode assembly[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(4): 1-14.
- [4] YU H N, LIM J W, SUH J D, et al. A graphite-coated carbon fiber epoxy composite bipolar plate for polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23): 9868-9875.
- [5] XIE F, SHAO Z G, HOU M, et al. Recent progresses in H<sub>2</sub>-PEMFC at DICP[J]. Journal of Energy Chemistry, 2019, 36: 129-140.
- [6] WEE J H. Applications of proton exchange membrane fuel cell systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1720-1738.
- [7] 周志凌,胡砚强,赖富明. PEMFC不锈钢双极板防腐涂层研究综述[J]. 广州化工,2023,51:36-39.  
ZHOU Z L, HU Y Q, LAI F M. Review on anticorrosive coatings for stainless steel bipolar plates of PEMFC[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51: 36-39.
- [8] 孙贤伟,李希超,赵经香,等. 质子交换膜燃料电池双极板防护涂层研究进展[J]. 表面技术,2023,52:26-36.  
SUN X W, LI X C, ZHAO J X, et al. Research progress on protective coatings for bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells[J]. Surface Technology, 2023, 52: 26-36.
- [9] FAN R L, PENG Y H, TIAN H, et al. Graphite-filled composite bipolar plates for fuel cells: material, structure, and performance[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2021, 37(9): 1-16.
- [10] FENG L L, CHEN Y, LI J G, et al. Research progress in carbon-based composite molded bipolar plates[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(5): 585-593.
- [11] ZHENG J S, PENG Y H, FAN R L, et al. Study on carbon matrix composite bipolar plates with balance of conductivity and flexural strength[J]. Chinese Chemical Letters, 2023, 34(5): 107616-107620.
- [12] 杜真真,王珺,王晶,等. 质子交换膜燃料电池关键材料的研究进展[J]. 材料工程,2022,50(12):35-50.  
DU Z Z, WANG J, WANG J, et al. Research progress of key materials in proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(12): 35-50.
- [13] LENG Y, MING P W, YANG D J, et al. Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: materials, flow channel design and forming processes[J]. Journal of Power Sources, 2020, 451: 227783.
- [14] SONG Y, ZHANG C, LING C Y, et al. Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(54): 29832-29847.
- [15] WU S D, YANG W M, YAN H, et al. A review of modified metal bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(12): 8672-8701.
- [16] ANTUNES R A, De OLIVEIRA M C L, ETT G, et al. Car-

- bon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: a review of the main challenges to improve electrical performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196 (6):2945-2961.
- [17] CHEN H, LIU H B, LI J X, et al. Characteristics and preparation of polymer/graphite composite bipolar plate for PEM fuel cells[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(7):755-767.
- [18] HEO S I, YUN J C, OH K S, et al. Influence of particle size and shape on electrical and mechanical properties of graphite reinforced conductive polymer composites for the bipolar plate of PEM fuel cells[J]. *Advanced Composite Materials*, 2012, 15(1): 115-126.
- [19] DHAKATE S R, SHARMA S, MATHUR R B. A low-density graphite-polymer composite as a bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells [J]. *Carbon Letters*, 2013, 14(1):40-44.
- [20] RAFI-UD-DIN, ARSHAD M, SALEEM A, et al. Fabrication and characterization of bipolar plates of vinyl ester resin/graphite-based composite for polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2016, 29 (10): 1315-1331.
- [21] DHAKATE S R, MATHUR R B, SHARMA S, et al. Influence of expanded graphite particle size on the properties of composite bipolar plates for fuel cell application [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23:934-941.
- [22] SHEN C, PAN M, YUAN R. The effect of particle size gradation of conductive fillers on the conductivity and the flexural strength of composite bipolar plate [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(3): 1035-1039.
- [23] DENG H, LIN L, JI M, et al. Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials[J]. *Progress in Polymer Science*, 2014, 39(4):627-655.
- [24] CHO E A, JEON U S, HA H Y, et al. Characteristics of composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 125(2):178-182.
- [25] LI K C, ZHANG K, WU G Z. Fabrication of electrically conductive polymer composites for bipolar plate by two-step compression molding technique[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 130(4):2296-2302.
- [26] SAN F G B, OKUR O. The effect of compression molding parameters on the electrical and physical properties of polymer composite bipolar plates [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(36):23054-23069.
- [27] SIMAAFROOKHTEH S, KHORSHIDIAN M, MOMENIFAR M. Fabrication of multi-filler thermoset-based composite bipolar plates for PEMFCs applications: molding defects and properties characterizations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(27):14119-14132.
- [28] LEE H E, CHUNG Y S, KIM S S. Feasibility study on carbon-felt-reinforced thermoplastic composite materials for PEMFC bipolar plates[J]. *Composite Structures*, 2017, 180:378-385.
- [29] SAADAT N, DHAKAL H N, TJONG J, et al. Recent advances and future perspectives of carbon materials for fuel cell[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110535-110555.
- [30] KIM M K, LIM J W, KIM K H, et al. Bipolar plates made of carbon fabric/phenolic composite reinforced with carbon black for PEMFC[J]. *Composite Structures*, 2013, 96:569-575.
- [31] KONG M Q, LIU C J, TANG B, et al. Improved mechanical and thermal properties of trifunctional epoxy resins through controlling molecular networks by ionic liquids[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(19):8080-8089.
- [32] CRIVELLO J V, ALDERSLEY M F. Supramolecular diaryliodonium salt-crown ether complexes as cationic photoinitiators [J]. *Journal of Polymer Science Part A*, 2013, 51(4):801-814.
- [33] KIM Y J, SHIN T S, CHOI H D, et al. Electrical conductivity of chemically modified multiwalled carbon nanotube/epoxy composites[J]. *Carbon*, 2005, 43(1):23-30.
- [34] WITPATHOMWONG S, OKHAWILAI M, JUBSILP C, et al. Highly filled graphite/graphene/carbon nanotube in polybenzoxazine composites for bipolar plate in PEMFC[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(55):30898-30910.
- [35] DU L, JANA S C. Highly conductive epoxy/graphite composites for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 172(2):734-741.
- [36] ADLOO A, SADEGHI M, MASOOMI M, et al. High performance polymeric bipolar plate based on polypropylene/graphite/graphene/nano-carbon black composites for PEM fuel cells [J]. *Renewable Energy*, 2016, 99:867-874.
- [37] SUHERMAN H, SAHARI J, SULONG A B. Effect of small-sized conductive filler on the properties of an epoxy composite for a bipolar plate in a PEMFC[J]. *Ceramics International*, 2013, 39 (6):7159-7166.
- [38] CRISTINA L D O M, SAYEG I J, ETT G, et al. Corrosion behavior of polyphenylene sulfide-carbon black-graphite composites for bipolar plates of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(29):16405-16418.
- [39] PHUANGNGAMPHAN M, OKHAWILAI M, HIZIROGLU S, et al. Development of highly conductive graphite-/graphene-filled polybenzoxazine composites for bipolar plates in fuel cells [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(11):47183-47192.
- [40] KIM S H, WOO J S, PARK S Y. Poly (phenylene sulfide) graphite composites with graphite nanoplatelets as a secondary filler for bipolar plates in fuel cell applications [J]. *Macromolecular Research*, 2020, 28(11):1010-1016.
- [41] SUHERMAN H, DWEIRI R, MAHYOEDIN Y, et al. Investigation of electrical-mechanical performance of epoxy-based nanocomposites filled with hybrid electrically conductive fillers[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11):115010-115018.
- [42] GHOSH A, GOSWAMI P, MAHANTA P, et al. Effect of carbon fiber length and graphene on carbon-polymer composite bipolar plate for PEMFC[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2014, 18(12):3427-3436.
- [43] KIM J W, KIM N H, KUILLA T, et al. Synergy effects of hybrid carbon system on properties of composite bipolar plates for fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(17):5474-5480.
- [44] LIM J W, LEE D G. Surface modifications of gasketless carbon



- composite bipolar plates for gas tightness of PEM fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(28): 12343-12352.
- [45] TAHERIAN R, HADIANFARD M J, GOLIKAND A N. Manufacture of a polymer-based carbon nanocomposite as bipolar plate of proton exchange membrane fuel cells[J]. Materials & Design, 2013, 49: 242-251.
- [46] YANG S W, YANG Y C, HE P, et al. Insights into the oxidation mechanism of  $sp^2$ - $sp^3$  hybrid carbon materials: preparation of a water-soluble 2D porous conductive network and detectable molecule separation [J]. Langmuir, 2017, 33(4): 913-919.
- [47] DHAKATE S R, SHARMA S, CHAUHAN N, et al. CNTs nanostructuring effect on the properties of graphite composite bipolar plate[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(9): 4195-4200.
- [48] LEE H E, HAN S H, SONG S A, et al. Novel fabrication process for carbon fiber composite bipolar plates using sol gel and the double percolation effect for PEMFC[J]. Composite Structures, 2015, 134: 44-51.
- [49] NAJI A, KRAUSE B, PÖTSCHKE P, et al. Hybrid conductive filler/polycarbonate composites with enhanced electrical and thermal conductivities for bipolar plate applications[J]. Polymer Composites, 2018, 40(8): 3189-3198.
- [50] ALO O A, OTUNNIYI I O, SADIKU E R, et al. Processing methods for conductive polymer composite bipolar plates: effect on plate quality and performance[J]. Fuel Cells, 2023, 23: 136-160.
- [51] KIM M K, CHOE J H, LIM J W, et al. Manufacturing of the carbon/phenol composite bipolar plates for PEMFC with continuous hot rolling process [J]. Composite Structures, 2015, 132: 1122-1128.
- [52] PARK H J, WOO J S, PARK S Y. Poly(phenylene sulfide)-graphite composites for bipolar plates with preferred morphological orientation[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2019, 36(12): 2133-2142.
- [53] LIN F R, SHENG Z J, HANG P Y, et al. The conductive network optimization of composite graphite plates and its morphological analysis [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 102-117.
- [54] MING P W, ZHENG J S, ZHANG C M, et al. Layered graphite composite bipolar plate and its processing system: CN2138453 34U [P]. 2021-07-30.
- [55] LEE M H, KIM H Y, OH S M, et al. Structural optimization of graphite for high-performance fluorinated ethylene-propylene composites as bipolar plates[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(48): 21918-21927.
- [56] GANGULI S, ROY A K, ANDERSON D P. Improved thermal conductivity for chemically functionalized exfoliated graphite/epoxy composites[J]. Carbon, 2008, 46(5): 806-817.
- [57] PARK N, LEE J, MIN H, et al. Preparation of highly conductive reduced graphite oxide/poly(styrene-co-butyl acrylate) composites *via* miniemulsion polymerization [J]. Polymer, 2014, 55(20): 5088-5094.
- [58] LEE M H, KIM H Y, KIM J, et al. Influence of oxyfluorinated graphite on fluorinated ethylene-propylene composites as bipolar plates[J]. Carbon Letters, 2019, 30(3): 345-352.
- [59] LI J, VAISMAN L, MAROM G, et al. Br treated graphite nanoplatelets for improved electrical conductivity of polymer composites[J]. Carbon, 2007, 45(4): 744-750.
- [60] KONDO T, CASOLO S, SUZUKI T, et al. Atomic-scale characterization of nitrogen-doped graphite: effects of dopant nitrogen on the local electronic structure of the surrounding carbon atoms [J]. Physical Review B, 2012, 86(3): 35436-35441.
- [61] POH H L, ŠIMEK P, SOFER Z, et al. Boron and nitrogen doping of graphene *via* thermal exfoliation of graphite oxide in a  $BF_3$  or  $NH_3$  atmosphere: contrasting properties[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(42): 13146-13153.
- [62] LV B, SHAO Z G, HE L, et al. A novel graphite/phenolic resin bipolar plate modified by doping carbon fibers for the application of proton exchange membrane fuel cells[J]. Progress in Natural Science-Materials International, 2020, 30(6): 876-881.
- [63] ATHMOUNI N, MIGHRI F, ELKOUN S. Surface modification of multiwall carbon nanotubes and its effect on mechanical and through-plane electrical resistivity of PEMFC bipolar plate nanocomposites[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(1): 294-301.
- [64] BUHLER R, THOMMEN M, LECANUT J M, et al. Highly conductive polypropylene-based composites for bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Fuel Cells, 2021, 21(2): 155-163.
- [65] SHAIGAN N, YUAN X Z, GIRARD F, et al. Standardized testing framework for quality control of fuel cell bipolar plates[J]. Journal of Power Sources, 2021, 482: 228972-228988.
- [66] NAJI A, KRAUSE B, POTSCHKE P, et al. Extruded polycarbonate/Di-Allyl phthalate composites with ternary conductive filler system for bipolar plates of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(6): 64004-64016.
- [67] HE Z X, SHI L, SHEN J X, et al. Effects of nitrogen doping on the electrochemical performance of graphite felts for vanadium redox flow batteries [J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39(5): 709-716.
- [68] GHANASHYAM G, JEONG H K. Synthesis of nitrogen-doped plasma treated graphite for supercapacitor applications[J]. Chemical Physics Letters, 2019, 725: 31-37.
- [69] ALAVIJEH M S, KEFAYATI H, GOLIKAND A N, et al. Synthesis and characterization of epoxy/graphite/nano-copper nanocomposite for the fabrication of bipolar plate for PEMFCs [J]. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2019, 9(1): 11-18.
- [70] 金杰, 韩岁伍, 安腾, 等. CrN 和 CrNiN 涂层在模拟质子交换膜燃料电池环境中的电化学性能及疏水性能[J]. 材料工程, 2016, 44(10): 33-40.
- JIN J, HAN S W, AN T, et al. Electrochemical behavior and hydrophobic properties of CrN and CrNiN coatings in simulated proton exchange membrane fuel cell environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(10): 33-40.
- [71] 李岳, 李炯利, 朱巧思, 等. 石墨烯导热材料研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 1-13.
- LI Y, LI J L, ZHU Q S, et al. Research progress in graphene based thermal conductivity materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(11): 1-13.

- [72] 李岳,李炯利,梁佳丰,等. 三维木头海绵-石墨烯/环氧树脂复合材料的制备及性能[J]. 材料工程,2023,51(9): 200-207.  
LI Y, LI J L, LIANG J F, et al. Preparation and properties of epoxy composites reinforced by three-dimensional wood sponge-graphene[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(9): 200-207.
- [73] 刘文君,韩海涛,鲁芹,等. 石墨烯/PLA吸波复合材料等效传热性能分析[J]. 航空材料学报,2023,43(2): 75-82.  
LIU W J, HAN H T, LU Q, et al. Analysis of equivalent heat transfer performance of graphene/PLA absorbing composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(2): 75-82.
- [74] 董博,余超,邓承继,等. 碳化硅陶瓷导热性能的研究进展[J]. 材料工程,2023,51(1): 64-75.  
DONG B, YU C, DENG C J, et al. Research progress in thermal conductivity of SiC ceramics[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(1): 64-75.
- [75] 朱礼宝,李永清,朱锡. 温度对玻璃纤维/环氧复合材料吸湿扩散行为的影响[J]. 航空材料学报,2021,41(6): 74-80.  
ZHU L B, LI Y Q, ZHU X. Effects of temperature on moisture absorption and diffusion behavior of glass fiber/epoxy composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(6): 74-80.
- 
- 基金项目:**国家重点研发计划(2018YFB1502504)  
**收稿日期:**2022-11-08;**修订日期:**2023-12-05  
**通讯作者:**温序晖(1989—),女,高级工程师,硕士,研究方向为质子交换膜燃料电池堆设计开发,联系地址:四川省成都市高新西区西芯大道18号中国东方电气集团有限公司(611731),E-mail:wenxh@dongfang.com;郑俊生(1979—),男,副研究员,博士生导师,研究方向为车用新能源技术,联系地址:上海市嘉定区安亭镇曹安公路4800号同济大学新能源工程中心411室(201804),E-mail: jszheng@tongji.edu.cn
- (本文责编:高 磊)