

# 面向 AI 服务器应用需求的低介电聚苯醚材料研究进展

任偲彤<sup>1</sup>, 王 轶<sup>1\*</sup>, 潘钦鹏<sup>2</sup>

(1. 桂林电子科技大学 广西电子信息材料构效关系重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林格莱斯科技有限公司, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**随着 AI 技术的快速发展, AI 服务器对聚苯醚材料的介电性能提出了更高要求。常规聚苯醚(PPO)因介电常数偏高, 难以满足 AI 服务器高频信号传输对低介电常数、低介电损耗及优异热稳定性的需求。本文从物理改性和化学改性两个方面, 综述了近年低介电低介损 PPO 材料的研究进展, 同时梳理了改性 PPO 在 AI 服务器核心部件的应用发展情况, 并对其未来发展前景进行了展望。

**关键词:** AI; 聚苯醚; 低介电常数; 物理改性; 化学改性

## Research progress of low-dielectric polyphenylene ether materials for AI server applications

REN Sitong<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1\*</sup>, PAN Qinpeng<sup>2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Information Materials, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Guilin GLESI Scientific Technology Co., Ltd., Guilin 541004, China)

**Abstract:** With the rapid development of AI technology, AI servers have raised higher requirements for the dielectric properties of polyphenylene ether (PPO) materials. Conventional PPO has a high dielectric constant, making it difficult to meet the requirements of high-frequency signal transmission in AI servers for low dielectric constant, low dielectric loss, and excellent thermal stability. This paper reviewed the research progress of low-dielectric and low-dielectric loss PPO materials in recent years from both physical and chemical modification perspectives, summarized the application and development of modified PPO in core components of AI servers, and provided an outlook on its future development prospects.

**Key words:** AI; polyphenylene ether; low dielectric constant; physical modification; chemical modification

## 0 引言

AI 服务器作为支撑 AI 模型的核心算力载体, 正朝着高算力密度、高运行稳定性方向快速迭代<sup>[1]</sup>。这种高频、高带宽的运行场景, 对服务器内部核心高分子材料的介电性能提出了严苛要求, 不仅需满足低介电常数(介电常数 $<2.5$ )以减少信号传输延迟, 还要具备超低介电损耗(介电损耗 $<0.002$ )以最大限度降低高频信号传输过程中的能量损耗<sup>[2-3]</sup>。

聚苯醚, 即聚 2,6-二甲基-1,4-苯醚(其结构式如图 1 所示), 简称 PPO。PPO 的分子中仅含 C-C、C-H、C-O 等弱极性键, 无强极性基团, 分子偶极矩小, 介电常数低, 同时, 分子链中苯环的共轭结构赋

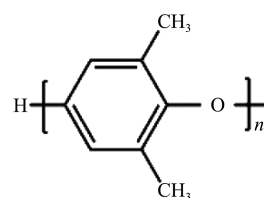


图 1 聚苯醚结构式

Fig.1 The chemical structure of PPO

予其高刚性, 使分子链运动受限, 减少了高频电场下的偶极取向极化。这些结构特点共同作用, 让 PPO 在 1 MHz 频率下具有低介电常数(2.45)与低介电损耗(0.000 7), 同时凭借本征介电性能优异、热稳定性突出及化学稳定性良好<sup>[4]</sup>等优势, 成为适配 AI 服务器需求的核心材料之一。

然而, 纯 PPO 存在加工流动性差、熔体黏度高、难以成型复杂结构部件<sup>[5]</sup>、机械强度不足(弯曲强度

基金项目: 广西电子信息材料构效关系重点实验室项目(桂科 AD25069070)。

约为 60 MPa,无法满足基板与封装部件的结构要求)等缺陷,限制了其在 AI 服务器关键部件中的直接应用。因此,通过改性技术优化 PPO 的介电性能、加工性能与力学性能<sup>[6]</sup>,成为推动其在 AI 服务器领域规模化应用的关键突破口。

近年来,科研界与产业界围绕 AI 服务器用低介电低介损 PPO 材料的改性展开了大量研究,形成了物理改性与化学改性两大技术路径<sup>[7]</sup>,且相关改性材料已在 AI 服务器的多个核心部件中逐步实现规模化应用,成为支撑高频、高算力场景的关键基础材料。为此,本文将围绕低介电低介损 PPO 材料的两大改性路径及相关应用进展展开综述,并探讨其在 AI 服务器领域的应用现状与发展趋势。

1 聚苯醚改性方法

受限于纯 PPO 自身分子链结构特性,导致难以直接制备出符合 AI 服务器高频信号传输标准的高性能部件。针对这些痛点,当前行业界与科研界主要采用物理改性与化学改性两大技术路径对 PPO 进行性能优化。

物理改性是指不改变其分子主链结构,通过共混、填充等物理方式与其他材料复合,改善其性能短板并保留本征优势的方法;化学改性是将大分子量的 PPO 进行再分配反应,在 PPO 的分子结构中引入可交联的活性基团或极性基团,从而实现性能优化的方法。表 1 描述了 PPO 不同改性类型的核心特征以及关键特性。

表 1 不同改性类型 PPO 材料的描述及核心特性对照表

Table 1 Comparison table of description and core characteristics of PPO materials with different modification types

| 类型          | 描述                                   | 关键特性                 |
|-------------|--------------------------------------|----------------------|
| 纯 PPO       | 未改性的聚苯醚,通常呈土黄色粉末状                    | 耐热性、电绝缘性、化学稳定性       |
| 改性聚苯醚(MPPO) | 包括共混、填充等物理改性及分子链调控改性、官能团改性、交联改性等化学改性 | 改善的加工性能、力学性能、耐热性、电性能 |
| 共混改性 PPO    | 与 PS、PA、PBT 等其他聚合物共混                 | 提高的冲击强度、更好的加工流动性     |
| 填充改性 PPO    | 加入氧化铝等填料                             | 降低成本、改善尺寸稳定性和表面光洁度   |
| 化学改性 PPO    | 通过分子链调控改性、官能团改性等方法改变分子结构             | 改善的加工流动性、兼容性、特殊功能化   |

1.1 物理改性

如前文所述,物理改性是指在不改变 PPO 分子主链化学结构与化学键的前提下<sup>[8]</sup>,通过物理手段调控其性能,以弥补纯 PPO 加工流动性差、冲击韧性不足、成本较高等缺陷,拓展其应用场景的改性技术。这种改性技术核心是借助“物理混合”“形态调控”等手段,优势在于工艺简单、成本可控,能最大程度保留 PPO 低介电、高热稳定性等本征优势,且性能调控灵活,适配现有工业化生产,但存在界面相容性受限、性能提升有瓶颈、长期稳定性不足及填料分散要求高的短板。常见的物理改性方式有聚合物共混改性和填料填充改性两种形式。

1.1.1 共混改性

田勇等<sup>[9]</sup>认为,环氧树脂(EP)与聚苯醚(PPO)体系作为高性能热固性/热塑性树脂混合物,可兼容现有 EP 覆铜板生产装置与工艺,是制备高性能覆铜板的理想树脂基体。而玻璃纤维布能发挥承载作用,因此借助其增强 EP/PPO 体系,成功制备出玻璃纤维布增强的 EP/PPO 复合材料,填补了该类复合材料在力学、介电、界面及耐热性能研究上的空白。研究结果显示,树脂含量对该复合材料的性能有着显著影响:当树脂质量分数约为 40% 时,复合材料的弯曲强度达到最大值;而当树脂质量分数超过 30% 后,复合材料的介电常数随着树脂含量的增加变化逐渐变缓,此时理论计算值和实际测量值基本一致。经过硅烷偶联剂处理过的玻璃纤维,和 EP/PPO 树脂之间的界面结合力得到明显提高,使得复合材料的弯曲性能变得更好,能够满足高性能覆铜板的制备要求。

肖成伟等<sup>[10]</sup>认为,甲基丙烯酸聚苯醚因具有高刚性芳香骨架、无强极性基团,兼具极低吸水率、优异介电性能等特性,是研制高端介质基材的理想原材料,因此选用了马来酸酐化聚丁二烯-苯乙烯共聚物(Ricon 184MA6)改性甲基丙烯酸聚苯醚,并加入球型二氧化硅与玻璃纤维,制得热固性聚苯醚复合介质基材。结果表明,Ricon 184MA6 可改善树脂与无机物、铜箔的相容性及粘接性,提升基材玻璃化转变温度与热稳定性,还能让基材在高频下保持低介电常数、低介损与低吸水率,适配高频高速领域需求。表 2 为热固性聚苯醚复合介质基材的性能测试结果,制备得到的复合介质基材在频率为 10 GHz 时,介电常数为 3.45,介电损耗为  $3.66\times 10^{-3}$ ,5%

热失重( $T_{d5\%}$ )为443.2℃,吸水率为0.22%。

表2 热固性聚苯醚复合介质基材的性能测试结果<sup>[10]</sup>

| Table 2 Performance test results of thermosetting polyphenylene ether composite media substrate <sup>[10]</sup> |                                       |                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
| 测试项目                                                                                                            | 测试条件                                  | 测试结果                |
| 介电常数                                                                                                            | 10 GHz                                | 3.45                |
| 介电损耗                                                                                                            | 10 GHz                                | $3.66\times10^{-3}$ |
| $T_{d5\%}/^{\circ}\text{C}$                                                                                     | 升温速率 10℃/min, 测试温度范围 25~900℃          | 443.2               |
| 热导率<br>/(W/(m·K))                                                                                               | ASTM D5470-17                         | 0.86                |
| 热膨胀系数<br>/( $\times10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )                                                      | X                                     | 38                  |
|                                                                                                                 | Y                                     | 35                  |
|                                                                                                                 | Z                                     | 32                  |
| 吸水率/%                                                                                                           | ASTM D570-22, 浸入 50℃ 的蒸馏水中 48 h 后进行测试 | 0.22                |

郭正强<sup>[11]</sup>认为,PPO虽具备优异的高温稳定性、电绝缘性和力学性能,适合应用于电子封装等高端领域,但加工流动性差、耐击穿与抗热氧老化性能难以满足高电压、高温工况需求,因此通过多步改性制备PPO基复合材料。首先考虑到聚苯乙烯(PS)与PPO相容性好并且成本较低,以PS共混改性PPO制得MPPO,再加入苯乙烯-马来酸酐共聚物(SMA)制得SMA/MPPO复合材料,随后掺入表面改性的六方氮化硼(Ah-BN),最后添加抗氧剂1035优化复合材料的性能。研究发现,PS能改善PPO的加工流动性与力学性能;SMA可提升复合材料的热稳定性与耐击穿性能,减少载流子迁移;Ah-BN进一步增强复合材料的耐击穿性能,还能改善燃烧性能;抗氧剂1035则有效提升复合材料的抗热氧老化性能,减缓高温下性能退化。通过SEM等表征可知,各改性组分与PPO基体相容性良好,未对材料整体性能产生不良影响。最终制得的PPO基复合材料兼具优良性能,适配电子封装等领域需求。

1.1.2 填充改性

ZHANG W W等<sup>[12]</sup>认为,PPO作为高频覆铜板绝缘层的理想树脂基体,虽具备低介电常数、低介电损耗及良好化学稳定性等优势,但存在热导率低(纯树脂仅为0.291 W/(m·K))、无机填料与有机基体界面结合能力弱、导热网络不连续等缺陷,限制了其在高算力AI服务器中的应用。氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )成本低、热导率优,是提升PPO复合材料散热性的高效填料。但它与PPO基体相容性差、易产生空隙,

单一粒径难形成致密导热通路。因此作者采用KH-560硅烷偶联剂改性 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 以改善其与PPO的相容性,再将3种不同粒径的改性 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 分级混合,填充于PPO中制得复合介电层材料,具体流程如图2所示。

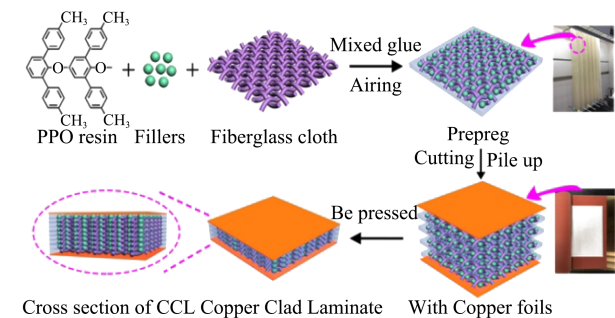


图2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填充PPO基覆铜板的制备流程<sup>[12]</sup>

Fig.2 Preparation process of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  filled PPO based copper-clad laminates<sup>[12]</sup>

通过将粒径为20  $\mu\text{m}$ 和2  $\mu\text{m}$ 的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 按特定比例进行分级复配时发现:当质量分数为50%的20  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与质量分数为15%的2  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ 进行复配再填充到PPO中时,复合材料的热导率达到0.646 W/(m·K),介电损耗低至 $4.67\times10^{-3}$ (5 GHz),且弯曲强度(306 MPa)维持在优异水平,同时,复合材料的吸水率也降至最低,仅为0.364%。

GE M等<sup>[13]</sup>认为,高频覆铜板(CCLs)对绝缘层材料的热导率、介电性能、界面结合力及吸水率均有严苛要求。而PPO具备低介电特性,是高频领域理想的基体材料,但纯PPO热导率不足,需通过填料改性来优化性能。因此作者将六方氮化硼(hBN)及表面包覆二氧化硅的hBN作为填料,混入PPO中,制得用于高频覆铜板的绝缘层复合材料。研究发现,随填料含量变化,复合材料性能呈现明显规律:当hBN质量分数为48%时,复合材料的热导率达到1.08 W/(m·K),介电损耗仅为 $4.9\times10^{-3}$ (5 GHz);当表面包覆二氧化硅的hBN质量分数为33%时,覆铜板的剥离强度提升至1.1 N/mm,较相同含量未改性hBN的覆铜板高45.7%,但热导率因二氧化硅界面热阻降至0.639 W/(m·K)。此外,两类填料均使复合材料的介电常数维持在3.0以下(5 GHz),且hBN质量分数小于30%时,复合材料吸水率低于1%。通过微观表征可知,包覆能改善hBN与PPO的界面结合能力,但过量填料易导致复合材料内部产生空隙缺陷,反而降低复合材料的弯曲强度与热导率。

## 1.2 化学改性

化学改性是通过化学反应改变PPO分子主链或侧链的化学结构。与物理改性不同,该方式需打破PPO原有化学键并形成新化学键,从分子层面重构材料的结构,以突破纯PPO加工流动性差、耐溶剂性不足、功能单一等局限,可实现性能的突破性提升与功能拓展,结构稳定性更强,能精准适配高频、高温等严苛应用场景。但改性PPO面临工艺复杂、成本较高、反应条件苛刻的问题。常见化学改性主要包括分子链调控改性、官能团改性、交联改性。

### 1.2.1 分子链调控改性

分子链调控改性是通过改变聚合工艺、催化体系或进行再分配反应,精确调控PPO的分子量、分子量分布与端基结构,旨在从根本上改善其加工流动性、熔体黏度与介电性能,以满足高频高速应用需求。

裴红静<sup>[14]</sup>以CuBr-芳香胺为催化体系,催化2,6-二甲基苯酚氧化聚合合成PPO,由于不同应用场景对PPO分子量需求不同,中高分子量PPO加工性能差,低分子量PPO更适配高频通信等领域,探索出了催化剂浓度、混合溶剂、原位再分布3种方法调控PPO分子量。研究发现,该体系合成的PPO介电性能突出,部分催化体系(如CuBr-4-氨基吡啶、CuBr-N-甲基苄胺)制得的PPO介电常数低于传统脂肪胺催化产品,且介电损耗更低,在高频应用场景下信号传输损耗小,同时PPO热稳定性良好,初始分解温度较高。

吴志民等<sup>[15]</sup>认为,高频电路对PCB基材的介电性能要求严苛,传统基材信号传输损耗大,而常规分子量PPO存在耐溶剂性差、熔体黏度高、流动性不佳等缺陷,氰酸酯树脂虽耐热性好、吸水率低,但力学性能不足,因此以2,6-二甲基苯酚(DMP)和2,2-双(4-羟基-3,5-二甲基苯基)丙烷(TMBPA)为原料,在铜络合物催化、氧气条件下共聚,制得低分子量双端羟基聚苯醚(PPO-2OH),并将其与氰酸酯树脂(BADCy)复合,制备出PPO-2OH/BADCy复合材料。研究发现,随PPO-2OH添加量的变化,复合材料性能呈现规律变化:介电性能方面,相较于纯BADCy,含PPO-2OH的复合材料介电常数更低,仅当PPO-2OH质量分数超20%时介电损耗才急剧增加;力学性能上,PPO-2OH质量分数为10%时复合

材料的断裂伸长率较纯BADCy提升近1倍,PPO-2OH质量分数为15%时复合材料的拉伸强度达最大值63.31 MPa;热稳定性与吸水性方面,PPO-2OH的引入对复合材料起始分解温度和低吸水率特性的影响较小,仍能满足应用需求。

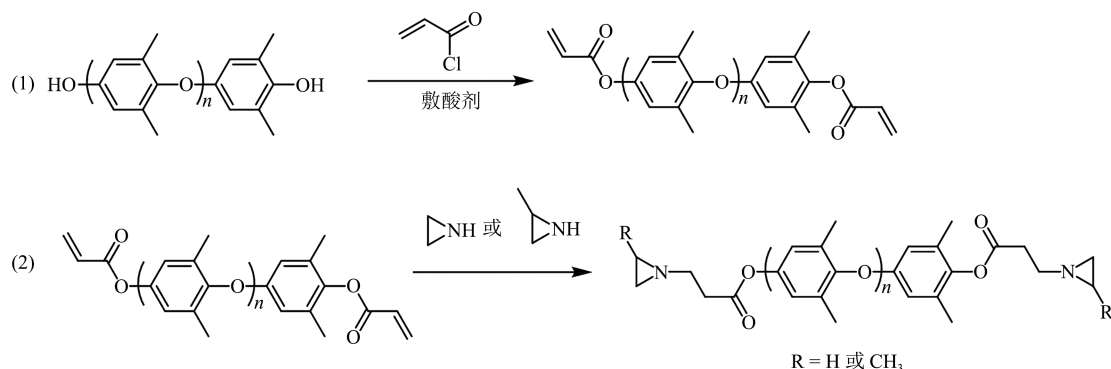
### 1.2.2 官能团改性

官能团改性是在不改变PPO主链结构的前提下,通过化学反应在其分子链端基或侧基引入特定的功能性基团(如马来酰亚胺、氮丙啶、环氧基等)。该改性旨在赋予PPO新的化学反应活性、极性或功能,为进一步复合或交联提供“桥梁”,但不直接构建三维交联网络。

吕敬坡等<sup>[16]</sup>认为,PPO虽因低介电常数、低介电损耗等特性成为高频覆铜板的理想基材,但缺乏可交联活性基团,限制了其工业应用。而马来酰亚胺类树脂耐热性、尺寸稳定性优异,若将其基团引入PPO可互补性能,因此设计了侧基改性路线。先用N-溴代琥珀酰亚胺(NBS)对PPO进行溴化处理,制得溴化率为15%的溴化聚苯醚(BrPPO);再基于Diels-Alder反应,用咪喃保护马来酰亚胺并与BrPPO反应,合成出侧基含马来酰亚胺基团的改性聚苯醚(MPPO)。研究发现,用MPPO制备的覆铜板,介电性能基本保持稳定,耐热性、力学性能以及尺寸稳定性均有提升。

周强村等<sup>[17]</sup>针对PPO作为热塑性树脂存在的加工性、耐溶剂性不足及与环氧树脂相容性欠佳等问题,通过“后聚合修饰”策略对PPO端基进行化学改性:第1步先让PPO端基羟基与丙烯酰氯发生酰基化反应,在端基引入丙烯酰基,为后续接枝氮丙啶基团搭建活性桥梁;第2步借助迈克尔加成反应,让氮丙啶与PPO端基的丙烯酰基结合,最终在PPO端基成功接枝高反应活性的氮丙啶基团,得到氮丙啶改性聚苯醚(MPPO),具体步骤如图3所示。整个改性过程的核心是在不改变PPO分子主链化学结构与化学键的前提下,通过两步化学反应在PPO端基引入功能性的氮丙啶官能团。

石凯<sup>[18]</sup>以PPO为基体树脂,分别采用对氯甲基苯乙烯(VBC)、环氧氯丙烷(ECH)对其进行端基改性,制得端乙烯基聚苯醚与端环氧基聚苯醚两种改性树脂。研究发现,随改性剂用量与反应条件变化,树脂性能呈现明显规律:端乙烯基聚苯醚在PPO与NaOH质量比为1:4、PPO与VBC质量比为

图3 氮丙啶改性聚苯醚的制备方法<sup>[17]</sup>Fig.3 Preparation method of aziridine modified polyphenylene ether<sup>[17]</sup>

1:2.8且在60℃反应时,羟基转化率达99%,介电常数达到最优为2.791(1 MHz),介电损耗约为0.005(1 MHz),热稳定性与未改性PPO差异较小;端环氧基聚苯醚在65℃、PPO与NaOH质量比为1:4时,羟基转化率达99%,介电常数达到最优为2.351(1 MHz),介电损耗约为0.01(1 MHz),且PPO与NaOH质量比为1:5时热分解温度略有提升。改性过程未对PPO后续固化及应用性能产生不良影响,适配高频覆铜板需求。

### 1.2.3 交联改性

交联改性是指通过化学反应在PPO分子链间构建共价键连接,形成三维网络结构(如热固性交联、超支化结构)。该改性旨在显著提升PPO的热稳定性、力学性能、尺寸稳定性和耐溶剂性,使其适用于高频、高温、高可靠性的严苛应用场景。

HUANG P<sup>[19]</sup>等认为,线性PPO存在熔点高、熔体黏度大,需用溶剂混合且难以完全去除的问题,因此采用超支化结构PPO(HB-PPO)进行改性。该HB-PPO呈“中心核-多支链”三维拓扑结构,端基含羟基等活性基团,三维结构减少分子链紧密堆砌,赋予低极性与高自由体积特性,为优化介电性能创造条件。经表征,制备的复合材料无明显相分离,适配高频电子封装等应用场景需求。

曹凯悦<sup>[20]</sup>等以PPO为基体树脂,分别构建PPO-聚乙烯醇(PVA)与PPO-超支化聚对氯甲基苯乙烯(HVBC)交联体系。研究发现,两种交联体系均能针对性优化PPO的性能,且能维持较好的力学韧性。

### 1.3 改性方法总结

针对AI服务器对材料低介电、高热导、易加工的需求,PPO的物理改性与化学改性各有优劣:物

理改性工艺简单、成本可控、量产可行性高,能通过填料或共混灵活调控材料的机械强度等性能,适配中低端应用场景,但存在界面相容性不足及高频适配性有限的问题。化学改性则可实现极致性能,结构-性能匹配度与高频稳定性更优,适配高端核心部件,却受限于工艺复杂、成本偏高、技术壁垒高的短板。实际应用中,物理改性多用于成本敏感的中低端应用场景,化学改性则适配高频、耐温性严苛的高端部件。

## 2 聚苯醚在AI服务器中的应用

AI服务器的算力核心依赖于高频、高速、高密度集成的硬件系统。改性聚苯醚凭借其可调控的分子结构和优异的综合性能,已渗透至从主板到芯片封装,乃至热管理系统的多个关键部件,其应用深度和广度正不断拓展。

### 2.1 在高频高速覆铜板中的应用

覆铜板作为信号传输的物理载体<sup>[21]</sup>,其介电性能的优劣直接决定AI服务器数据传输的速率与保真度。在高频高速应用场景下,覆铜板要求基板材料具备低介电常数与低介电损耗的协同优化,以最大限度降低信号传输延迟与能量损耗<sup>[22]</sup>。同时,由于覆铜板在组装与运行中需经历多次回流焊与长期高温环境,材料还需具备较高的玻璃化转变温度( $T_g > 180^\circ\text{C}$ )与低Z轴热膨胀系数,以确保尺寸稳定性,防止孔壁断裂与层间分离<sup>[23]</sup>。

通过氮丙啶进行改性是一条高效的技术路径。氮丙啶化合物因其高活性的三元环结构,可与PPO分子链上的羟基等官能团发生开环反应,从而在聚苯醚链上引入可交联的胺基基团<sup>[24]</sup>。这一改性不仅保留了聚苯醚主体的低介电骨架,更重要的是赋予其热固性行为。经过改性的树脂在与固化剂反应

后,可形成致密的三维网络结构。研究表明,采用此工艺制备的覆铜板,在10 GHz高频下,其介电常数可稳定在2.8左右,介电损耗低至0.003以下。这一数值远低于传统环氧树脂基覆铜板,能够显著降低信号在传输过程中的能量损耗。此外,交联结构赋予了材料更高的玻璃化转变温度和更低的Z轴热膨胀系数,确保了PCB在AI服务器经多次回流焊制程及长期高温运行下的尺寸稳定性和可靠性,有效避免了孔壁断裂等缺陷。

PPO与氰酸酯树脂的共混改性体系也展现出强大的竞争力。有研究采用氰酸酯(DAP)与PPO共混改性,制备出的复合材料在保持低介电损耗的同时,其热分解温度高达420℃以上,弯曲强度超过400 MPa<sup>[25]</sup>。这种兼具优异介电性能、耐热性和机械强度的复合材料,非常适合于制造AI服务器中需要承载较重散热器或连接器的厚大PCB板,在严苛环境下仍能保持结构的稳定。

## 2.2 在先进芯片封装基板与中介层中的应用

随着AI芯片算力密度的爆炸式增长,传统的封

装技术已难以满足要求,2.5D/3D等先进封装技术成为必然选择<sup>[26]</sup>。在此领域中,封装基板和中介层作为连接芯片与外部世界及芯片与芯片之间的微观桥梁,其材料要求极为苛刻。

与覆铜板相比,芯片封装基板更强调在微米甚至亚微米尺度下的性能均匀性、热机械匹配性及工艺兼容性<sup>[27]</sup>。在介电性能方面,材料不仅需保持极低的介电损耗,还需在毫米波段下具备优异的信号完整性,以适应芯片内部超高带宽互连。在热性能方面,由于封装过程涉及多次高温制程,材料必须具有极高的热稳定性( $T_g > 250^\circ\text{C}$ ),并严格控制热膨胀系数以匹配硅等材料,避免热应力导致的翘曲或对位失准。

聚苯醚型邻苯二甲腈树脂(PPOCN)在此背景下脱颖而出。该材料体系的核心在于邻苯二甲腈基团在加热或催化剂作用下,通过氰基的加成反应形成高度共轭的酞菁交联网络<sup>[28]</sup>,具体合成路线如图4所示。

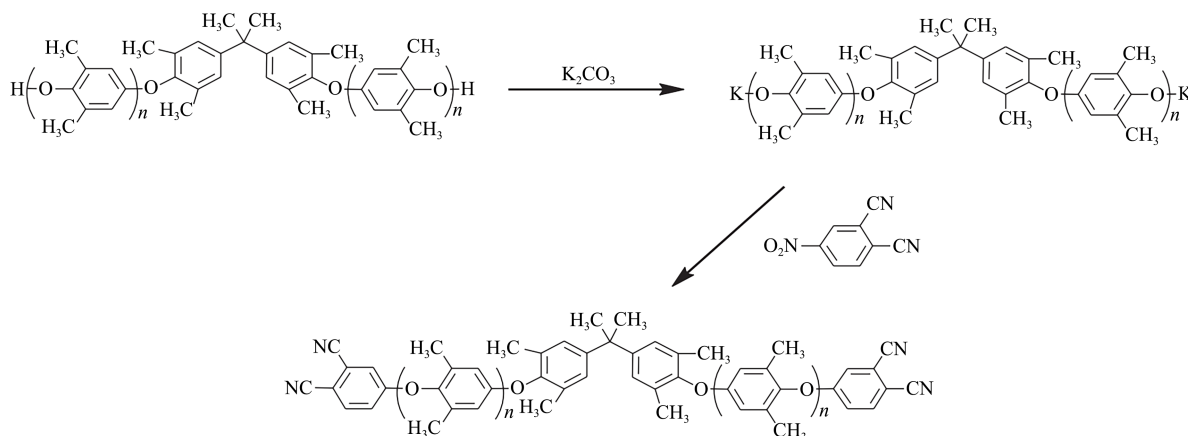


图4 聚苯醚型邻苯二甲腈树脂(PPOCN)合成路线<sup>[28]</sup>

Fig.4 Synthesis route of polyphenylene ether phthalonitrile resin (PPOCN)<sup>[28]</sup>

这种交联结构赋予材料卓越的耐热性能:PPOCN具备交联反应活性,固化物的玻璃化转变温度( $T_g$ )为295℃,5%热失重温度( $T_{d5\%}$ )为419.3℃,与PPO原料相比热稳定性显著提高,远高于目前主流的高温环氧树脂、BT树脂乃至聚酰亚胺。对于需要经历多次回流焊(特别是无铅焊料所需的高温峰值)的先进封装流程,这种超高的热稳定性意味着基板几乎不会发生热变形或降解,保证了微米级甚至亚微米级互连线路的对位精度。

除了极致的耐热性外,其固有的低损耗特性在封装级互连中也很重要。在2.5D封装中,硅中介层

或封装基板上的再布线层(RDL)负责将GPU核心与高带宽内存(HBM)以极短的距离互连,信号速率极高。聚苯醚型邻苯二甲腈基板极低的介质损耗可低至0.002~0.004,能够最大限度地减少信号在芯片内部传输时的衰减和畸变<sup>[29]</sup>,这对于维持HBM与计算核心之间的超高数据带宽至关重要<sup>[30]</sup>。

## 2.3 在高导热金属基复合介质基板中的应用

AI服务器中的电源管理芯片(PMIC)和电压调节模块(VRM)在高效运作时会产生大量的集中热量,若这些热量不能及时导出,将导致效率下降甚至失效。为此,亟需开发兼具高导热、低介电损耗

及可靠绝缘性能的复合材料作为介电层<sup>[31]</sup>。以改性聚苯醚为基体,填充高导热陶瓷填料(如氮化铝、氮化硼等),可构建出导热网络连续、介电性能优异的复合体系,实现“高效散热、低损耗传输、强绝缘保障”的一体化解决方案。

徐红等<sup>[32]</sup>针对高介电聚苯醚陶瓷复合介质基板的制备开展了相关体系研究。在该体系中,改性后的聚苯醚树脂作为连续相,提供了优异的电绝缘性和粘接性,而均匀分散的高体积分数的陶瓷填料则构建了高效的导热通路。制备的高介电聚苯醚陶瓷复合介质基板介电损耗 $\leq 0.003$ ,图5为复合介质基板在1~13 GHz频率范围内的介电损耗变化趋势图。

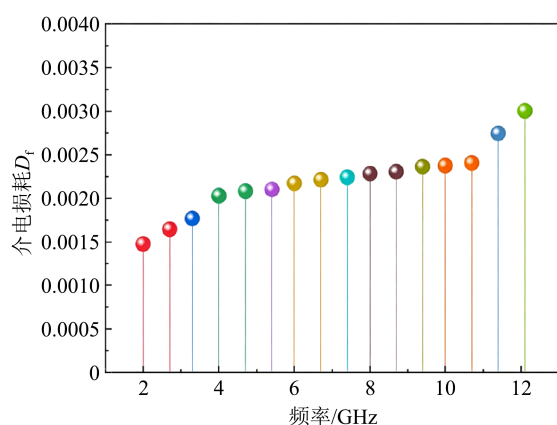


图5 产品的介电损耗随频率变化图<sup>[32]</sup>

Fig.5 Diagram of dielectric loss of the product as a function of frequency<sup>[32]</sup>

当这种复合材料与铝或铜等金属基板结合制成金属基覆铜板时,电源芯片产生的热量可以通过介电层迅速传导至金属基底<sup>[33]</sup>,再由外接散热装置高效导出。这种“低损耗传输信号、高效率导出热量”的特性,使得PPO基高导热基板成为保障AI服务器电源子系统稳定、高效运行的关键材料,尤其适用于GPU供电等大电流、高热流密度场景。

## 2.4 在特定功能部件中的前瞻性拓展应用

改性聚苯醚的应用前景早已突破了传统电路基板的范畴,其广阔的潜力正日益显现<sup>[34]</sup>。PPO分子结构具备高度的可定制性与可设计性,为材料性能的精细调控提供了无限可能。通过针对性的分子修饰与结构优化,可以使其满足AI服务器中不同功能部件对材料散热性、介电特性及机械强度<sup>[35]</sup>等多元化且苛刻的需求。

例如,对聚苯醚进行选择性溴化改性,可以调

控其亲疏水性、链段刚性及成膜性能<sup>[36]</sup>。以此制备的溴化聚苯醚基超滤膜,虽然当前主要应用于水处理,但其在精密控制膜孔径和分布方面展现的技术能力,预示着其在未来AI服务器浸没式液冷系统中作为过滤或净化功能元件的潜在价值,可用于维持冷却液的长周期纯净度与稳定导热性能。

另一方面,基于超临界流体的物理发泡技术为制备轻量化功能材料开辟了新途径。利用超临界CO<sub>2</sub>流体作为物理发泡剂制备的阻燃聚苯醚合金泡沫,是一项前沿技术。超临界CO<sub>2</sub>流体能够高效渗透到聚苯醚/阻燃剂合金中,在压力释放和升温过程中形成均匀细密的闭孔泡沫结构。这种泡沫材料不仅密度极低,实现了有效的轻量化,而且其闭孔结构能有效阻隔水汽,保持极低的介电常数(可接近空气的1.0)<sup>[37]</sup>。

这种兼具超低介电、轻质<sup>[38]</sup>、高阻燃<sup>[39]</sup>的泡沫材料,在未来追求极致效率的AI服务器中,可作为高性能的天线罩内部填充材料<sup>[40]</sup>、机箱内部的轻质隔热/隔断结构,甚至在特定设计中用作低介电常数的支撑骨架,展现出广阔的应用前景。

## 3 聚苯醚在AI领域未来发展趋势

随着AI服务器向高频率、高带宽、高集成度方向发展,聚苯醚的演进呈现出以下关键趋势:①复合化与高性能化:为了满足AI硬件对材料综合性能的苛刻要求,聚苯醚正由单一材料向复合材料发展。这种复合化趋势使聚苯醚能够同时满足AI设备对低介电损耗、高可靠性和良好加工性的多重需求。②多孔化与低介电化:多孔化设计有望将材料介电常数降至2.0以下,为AI服务器提供更低传输损耗的基板材料<sup>[41]</sup>。③功能化与智能化:聚苯醚正从传统的结构材料向结构-功能一体化材料转变,如聚苯醚/HOFs混合基质膜在气体分离方面的功能<sup>[42]</sup>,展示了其在AI设备特殊环境控制中的应用潜力。这种功能化拓展使聚苯醚能够为AI系统提供除绝缘支撑外的更多增值功能。④绿色化与低成本化:面对AI产业对材料规模化供应的需求,聚苯醚的绿色制造技术日益受到高度重视。通过再分配反应精确调控分子量<sup>[43]</sup>,以及开发连续流聚合工艺<sup>[44]</sup>,可实现产品性能的精准控制和生产过程的优化。同时,废旧塑料与聚苯醚的共混再生研究<sup>[45]</sup>,为降低材料成本提供了新的技术路径。

在AI产业快速发展的推动下,聚苯醚材料正沿着复合化、多孔化、功能化和绿色化的方向协同发展。具有超低介电常数和介电损耗的聚苯醚基材料<sup>[46]</sup>,将继续为AI算力基础设施的性能提升提供关键材料支撑。

#### 4 结束语

AI算力时代的全面到来,为聚苯醚等高分子电介质材料创造了前所未有的发展机遇。追求更低的介电常数与介电损耗,已成为高分子材料领域最活跃、最具战略价值的研究方向之一。

结合当前技术瓶颈与应用需求,未来聚苯醚的发展应聚焦4大具体方向:一是深耕结构-性能精准调控,通过分子链拓扑结构优化、功能性基团定向接枝等手段,实现介电常数、热稳定性与加工性的协同突破,解决现有改性技术中性能相互制约的问题;二是推进复合改性技术升级,重点开发高分散性、低界面阻抗的无机-有机复合体系,构建高效导热与超低介电兼具的多功能复合材料,适配AI服务器高热流密度与高频传输的双重需求;三是突破绿色低成本制备工艺,完善连续流聚合工艺、分子量精准调控及废旧材料再生技术,降低规模化生产门槛,打破国外技术垄断;四是强化产学研协同创新,针对先进封装基板、高导热介质层等核心应用场景,开展定制化材料研发与工程化验证,加速国产化材料的性能对标与市场替代。

期待国内产学研各界深化协作,共同推进低介电聚苯醚材料的国产化进程,为我国AI算力基础设施的持续发展提供坚实的材料支撑。

#### 参考文献 References

- [1] ZAHIDUL ISLAM M D, FU Y, DEB H, et al. Polymer-based low dielectric constant and loss materials for high speed communication network: dielectric constants and challenges[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 200: 112543.
- [2] ZHANG C, HE X, LU Q. Polyimide films with ultralow dielectric loss for 5G applications: influence and mechanism of ester groups in molecular chains[J]. *European Polymer Journal*, 2023, 200: 112544.
- [3] 皇甫梦鸽,李一丹,张燕,等.面向5G应用需求的低介电高分子材料研究与应用进展[J]. *绝缘材料*, 2020, 53(8): 1-9.  
HUANGFU Mengge, LI Yidan, ZHANG Yan, et al. Research and application progress of low dielectric polymers for 5G communication[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(8): 1-9.
- [4] KINOSHITA M, NEMOTO T, SOUDA T, et al. Semiquantitative analysis of thermal degradation in polyphenyleneether[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2000, 68(3): 437-443.
- [5] 杨青林,周松,李璨然,等. SEBS-g-MAH对PPO/PA66复合材料性能和形貌的影响[J]. *中国塑料*, 2025, 39(3): 30-35.  
YANG Qinglin, ZHOU Song, LI Canran, et al. Effect of SEBS-g-MAH on properties and morphology of PPO/PA66 blends[J]. *China Plastics*, 2025, 39(3): 30-35.
- [6] SUN S, FAN K, YANG J, et al. Surface modification engineering on polymer materials toward multilevel insulation properties and subsequent dielectric energy storage[J]. *Materials Today*, 2024, 80: 758-823.
- [7] 强悦悦,蔡会武,王延东,等.聚苯醚树脂在高频覆铜板中的应用研究[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(11): 21-25.  
QIANG Yueyue, CAI Huiwu, WANG Yandong, et al. Research on the application of polyphenylene ether resin in highfrequency copper clad laminates[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(11): 21-25.
- [8] STACK S, O'DONOGHUE O, BIRKINSHAW C. The thermal stability and thermal degradation of blends of syndiotactic polystyrene and polyphenylene ether[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2003, 79(1): 29-36.
- [9] 田勇,王秀芳,杨卓如.玻璃纤维布增强EP/PPO复合材料性能及应用[J]. *工程塑料应用*, 2008(6): 46-49.  
TIAN Yong, WANG Xiufang, YANG Zhuoru. Properties and applications of glass fiber cloth reinforced EP/PPO composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2008(6): 46-49.
- [10] 肖成伟,张运湘,刘志林,等.热固性聚苯醚复合介质基材的制备及其性能分析[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(增刊1): 234-237.  
XIAO Chengwei, ZHANG Yunxiang, LIU Zhilin, et al. Preparation and performance analysis of thermosetting PPO composite dielectric substrates[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(S1): 234-237.
- [11] 郭正强. PPO基复合材料耐击穿及抗热氧化性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.  
GUO Zhengqiang. Study on the dielectric breakdown resistance and thermo oxidative aging resistance of PPO matrix composites[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.
- [12] ZHANG W W, LU C, GE M N, et al. Surface modified and gradation-mixed  $Al_2O_3$  as an effective filler for the polyphenylene oxide (PPO) insulative layer in copper clad laminates[J]. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2020, 31(23): 21602-21616.
- [13] GE M, ZHANG J, ZHAO C, et al. Effect of hexagonal boron nitride on the thermal and dielectric properties of polyphenylene ether resin for highfrequency copper clad laminates[J]. *Materials & Design*, 2019, 182: 108028.
- [14] 裴红静. 铜(I)-芳香胺催化体系合成聚苯醚及其分子量调控研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2024.  
PEI Hongjing. Synthesis and molecular weight mediation of Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) catalyzed by Cu(I)-aromatic amine system[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024.
- [15] 吴志民,王涛,谭柳,等.低分子量双端羟基聚苯醚的制备及固

- 化性能[J]. 广东石油化工学院学报,2024,34(4):15-24.
- WU Zhimin, WANG Tao, TAN Liu, et al. Preparation and curing properties of low molecular weight polyphenylene ether with double terminal hydroxyl[J]. Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology,2024,34(4):15-24.
- [16] 吕敬坡,栗俊华,胡亚坤,等. 侧基含马来酰亚胺基团聚苯醚的合成与表征[J]. 高分子材料科学与工程,2022,38(6):140-144.
- LÜ Jingpo, SU Junhua, HU Yakun, et al. Synthesis and characterization of side-chain maleimide-containing polyphenylene ether[J]. Polymer Materials Science and Engineering,2022,38(6):140-144.
- [17] 周强村,郑烁佳. 氮丙啶改性聚苯醚的制备及其在覆铜板中的应用[C]//第二十四届中国覆铜板技术研讨会,2023.
- ZHOU Qiangcun, ZHENG Shuojia. Preparation of aziridine modified polyphenylene ether and its application in copper cladding[C]//The 24th China Copper Cladding Technology Symposium,2023.
- [18] 石凯. 高频覆铜板用改性聚苯醚树脂的制备及性能研究[D]. 西安:西安科技大学, 2021.
- SHI Kai. Study on preparation and performance of modified polyphenylene ether resin for high frequency copper clad laminates[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [19] HUANG P, GU A, LIANG G, et al. Curing behavior and dielectric properties of hyperbranched poly(phenylene oxide)/cyanate ester resins[J]. Journal of Applied Polymer Science,2011,121(4):2113-2122.
- [20] 曹凯悦. 基于聚苯醚的交联型碱性聚合物电解质膜的制备及性能研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
- CAO Kaiyue. Preparation and properties of cross-linked alkaline polymer electrolyte membrane based on polyphenylene oxide [D]. Changchun: Jilin University,2022.
- [21] LI H, BAO F, LAN X, et al. Fluorinated polyimide with triphenylpyridine structure for 5G communications: low dielectric, highly hydrophobic, and highly transparent[J]. European Polymer Journal,2023,197:112327.
- [22] 师剑英.《浅析覆铜板用聚苯醚树脂的改性技术》[C]//第二十二届中国覆铜板技术研讨会,2021:29.
- SHI Jianying. A brief analysis of the modification technology of polyphenylene ether resin for copper cladding[C]//The 22nd China Copper Cladding Technology Symposium,2021:29.
- [23] 闫沁宇. 高速高频覆铜板用改性聚苯醚的合成与性能表征[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- YAN Qinyu. Synthesis and characterization of modified polyphenylene oxide for high speed and high frequency CCLs[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2021.
- [24] 杨帆. 改性聚苯醚的制备及其在覆铜板中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2023.
- YANG Fan. Preparation of modified polyphenylene ether and its application in copper clad plate[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2023.
- [25] 步晓君,许星烨,贾宇翔,等. DAP/聚苯醚改性氰酸酯树脂复合材料及其性能[J]. 复合材料科学与工程,2023(3):108-111,119.
- BU Xiaojun, XU Xingye, JIA Yuxiang, et al. Properties of DAP/polyphenylene oxide modified cyanate ester and its composites [J]. Composite Materials Science and Engineering,2023(3):108-111,119.
- [26] GAO P, ADNAN M. Overview of emerging electronics technologies for artificial intelligence: a review[J]. Materials Today Electronics,2025,11:100136.
- [27] 门秀婷,李铭新. 电子元器件用低介电常数聚酰亚胺研究进展[J]. 绝缘材料,2022,55(12):10-19.
- MEN Xiuting, LI Mingxin. Research Progress in low dielectric constant polyimide films for electronic devices[J]. Insulating Materials,2022,55(12):10-19.
- [28] 张鑫伟,陆奇,王芳,等. 聚苯醚型邻苯二甲腈树脂及其复合材料[J]. 复合材料学报,2025,42(1):191-199.
- ZHANG Xinwei, LU Qi, WANG Fang, et al. Polyphenylene ether typephthalonitrile resin and its composite materials[J]. Journal of Composite Materials,2025,42(1):191-199.
- [29] 何雪梅. 印制电路用聚苯醚基复合材料的构建及性能研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- HE Xuemei. Design and performance research of polyphenylene oxide based composite materials for printed circuits board[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China,2018.
- [30] KAMRUL M I, NOV L, CHUNG J Y, et al. Broadband insertion loss measurement of flexible copper clad laminate with direct-metallization[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 356: 114349.
- [31] PENG Z, GUO Q, ZHANG L, et al. High thermal conductivity and low dielectric polyimide nanocomposites using diamine-assisted mechanochemical exfoliation boron nitride and insitu polymerization under pressure[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,488:150824.
- [32] 徐红,钱有,雒文凯,等. 高介电聚苯醚陶瓷复合介质基板制备与研究[C]//第二十五届中国覆铜板技术研讨会,2024.
- XU Hong, QIAN You, LUO Wenkai, et al. Preparation and research of high dielectric polyphenylene ether ceramic composite dielectric substrate[C]//The 25th China Copper Cladding Technology Symposium,2024.
- [33] SCOBBO J J. Conductive polyphenylene ether/polyamide blends for electrostatic painting applications[M]//RUPPRECHT L. Conductive Polymers and Plastics. Canada: William Andrew Publishing,1999:181-187.
- [34] 孟运东,潘俊健,方克洪. 一种聚苯醚改性的低介电损耗覆铜板的开发与应用[C]//第二十届中国覆铜板技术研讨会,2019.
- MENG Yundong, PAN Junjian, FANG Kehong. Development and application of a low dielectric loss copper-clad laminate modified with polyphenylene ether[C]//The 20th China Copper Cladding Technology Symposium,2019.
- [35] HIFUMI R, TOMITA I. Low dielectric, good adhesive, and flame-retardant aromatic poly(ether)s with phosphine sulfide groups[J]. Macromolecules,2024,57(18):8763-8771.

- [36] 刘学園. 溴化聚苯醚基超滤膜及阴离子交换膜的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.  
LIU Xueyuan. Preparation and characterization of BPPO-based ultrafiltration membranes and anion exchange membranes[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [37] 吕正阳. 超临界二氧化碳制备阻燃聚苯醚合金泡沫的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.  
LÜ Zhengyang. Study on the preparation of flame-retardant polyphenylene ether alloy foam by supercritical carbon dioxide [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.
- [38] 李蝶, 翟文涛, 黄朋科, 等. 改性聚苯醚微发泡材料的制备及阻燃性能表征[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11): 115-120.  
LI Die, ZHAI Wentao, HUANG Pengke, et al. Preparation and flameretardancy characterization of microcellular modified PPE [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11): 115-120.
- [39] 边策, 曹金波, 毕立, 等. 不同无卤阻燃剂对PPO/HIPS合金性能影响研究[J]. 上海塑料, 2021, 49(2): 27-31.  
BIAN Ce, CAO Jinbo, BI Li, et al. Effect of different halogen-free flame retardants on properties of PPO/HIPS alloy[J]. Shanghai Plastics, 2021, 49(2): 27-31.
- [40] 侯燕, 徐志财, 黄赤, 等. 雷达罩用高性能氰酸酯树脂制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 7-13, 21.  
HOU Yan, XU Zhicai, HUANG Chi, et al. Preparation and properties of high performance cyanate ester resin for radome[J]. Application of Engineering Plastics, 2021, 49(2): 7-13, 21.
- [41] 钟绍信. 低介电玻璃纤维增强聚碳酸酯/改性聚苯醚复合材料的性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
ZHONG Shaoxin. Performance study of low dielectric glass fiber reinforced polycarbonate/modified polyphenylene ether composite[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [42] 王子哈. 聚苯醚/HOFs混合基质膜的制备及其氧合性能[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.  
WANG Zihan. Preparation and oxygenation properties of polyphenylene ether/HOFs mixed matrix membrane[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [43] 朱新军, 邹水平, 谢富春, 等. 聚苯醚再分配反应分子量调节及其结构分析[J]. 塑料工业, 2022, 50(11): 76-81.  
ZHU Xinjun, ZOU Shuiping, XIE Fuchun, et al. Molecular weight adjustment and structural of poly (phenylene oxide) prepared ether by redistribution[J]. China Plastics Industry, 2022, 50 (11): 76-81.
- [44] 邵宇航. 聚苯醚与聚苯胺连续流聚合反应研究及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.  
TAI Yuhang. Study and application of continuous flow polymerization of polyphenylene oxide and polyaniline[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.
- [45] 赵今. 废旧高抗冲聚苯乙烯与聚苯醚共混物的结构与性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.  
ZHAO Jin. Study on the Structure and properties of recycle high impact polystyrene and polyphenylene oxide blend[D]. Taiyuan: North China University, 2022.
- [46] 卢翔, 曾鸣, 谭登福, 等. 面向超高频通信应用的低介电聚苯醚树脂的研究进展[J]. 绝缘材料, 2022, 55(5): 10-18.  
LU Xiang, ZENG Ming, TAN Dengru, et al. Research progress in low dielectric polyphenylene oxide for super high-frequency communication applications[J]. Insulating Materials, 2022, 55(5): 10-18.

收稿日期: 2025-10-17; 修回日期: 2025-12-11。

#### 作者简介:

任偲彤(2005—), 女(汉族), 河北保定人, 主要从事聚苯醚材料的研究;

通信作者: 王轶(1985—), 女(蒙古族), 山东莱州人, 高级工程师, 主要从事功能高分子材料、新能源材料的研究。