

# 聚合物导电微球研究进展

苗世豪, 付慧莉\*

武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年6月9日

## 摘要

聚合物导电微球因其在微观尺度上实现了导电通路结构的可设计性, 解决了传统导电材料在精密加工、界面相容性以及多功能集成方面的根本性难题, 在柔性电子、高端封装、生物传感及新能源等领域受到广泛关注。将纳米级导电材料均匀、稳定地引入并固定于微球基体是制备聚合物导电微球的技术关键。本文综述了聚合物导电微球的主要制备方法, 对比分析了各种制备方法的优缺点, 概述了聚合物微球的性能表征方法和典型应用领域, 并对其未来发展方向进行了展望。

## 关键词

导电微球, 聚合物, 制备方法, 性能表征, 应用

# Research Progress on Polymer Conductive Microspheres

Shihao Miao, Huili Fu\*

School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: April 16, 2026; accepted: May 22, 2026; published: June 9, 2026

## Abstract

Polymer conductive microspheres have attracted considerable attention in the fields of flexible electronics, high-end packaging, biosensing and new energy due to their ability to form customizable conductive pathway structures at the microscopic level, addressing the core issues that have long plagued traditional conductive materials, such as precision processing limitations, poor interface compatibility, and challenges in multifunctional integration. The uniform and stable incorporation of nanoscale conductive materials into along with their effective immobilization onto the microsphere matrix, represents the core technology for fabricating polymer conductive microspheres.

\*通讯作者。

**This paper provides a comprehensive review of the primary preparation methods in polymer conductive microspheres as well as conducts a comparative analysis of the strengths and weaknesses associated with each preparation approach. It also delineates the performance characterization methods and typical applications of such microspheres and offers insights into their prospective development directions.**

## Keywords

**Conductive Microspheres, Polymer, Preparation Method, Performance Characterization, Application**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,新型的三维导电材料因其超高的比表面积、较轻的质量、优异的结构稳定性及优良的力学性能和导电性能等优点,在新能源和生物医学等领域受到研究者的广泛关注[1]-[4]。

导电微球在众多新型三维导电材料中脱颖而出,核心在于它在微观尺度上实现了“导电通路结构的可设计性”,解决了传统导电材料在精密加工、界面相容性以及多功能集成方面的根本性难题[5][6]。导电微球的导电通路构建实现点对点的接触,导电通路稳定可控,此外还具备极强的可设计性[7]。

聚合物导电微球作为一种新型复合三维导电材料,兼具优异的力学性能与卓越的导电性能。这类材料通过精妙的“核-壳”或均匀复合结构,将导电通路构筑于微纳米尺度,从而在宏观绝缘或半绝缘的聚合物基体中为电子传输提供了可控的微观通路。这种独特的性能与结构特征,使其迅速突破了传统三维导电复合材料界面相容性差、加工方式受限以及功能单一的局限,成为柔性电子[8]、高端封装[9]、生物传感[10]及新能源[11][12]等前沿领域的核心基础材料之一。

聚合物导电微球的技术关键是如何将纳米级导电材料均匀、稳定地引入并固定于微球基体。目前,聚合物导电微球的主流制备策略分为两大类,一类是先制备聚合物微球基底,再进行表面导电化处理,如表面镀层法[13]-[18]、表面接枝聚合法[19]-[23]和模板法[24]-[27]等;另一类则是直接制备聚合物导电微球,如共混法[28]-[31]和自组装法[32]-[35]等。本文将从聚合物导电微球的制备方法、性能表征和前沿应用三个方面展开介绍。

## 2. 聚合物导电微球的制备方法

### 2.1. 表面镀层法

表面镀层法制备导电微球的原理是在已合成的绝缘或半导体的基体微球表面,通过物理或化学方法,构建一层均匀、致密且连续的金属或导电材料层,从而赋予其导电性。其核心目标是形成类似“金属球”的结构。表面镀层法主要分为化学镀、电镀和真空镀等方法[13][14]。其优点是制备的微球导电性高、微球基底可控(尺寸、单分散性好)且工艺相对成熟。但同时也面临着导电层可能不均匀或脱落、成本较高和环境污染等问题。此方法制备的聚合物导电微球主要用于各向异性导电膜(ACF)、电子封装材料、压敏元件和热敏元件等。

Tian [15]等人通过化学镀的方法在聚二甲基硅氧烷(PDMS)微球表面镀银,制备了一系列具有不同粒径和壳层厚度的弹性 PDMS@Ag 核壳微球,借助溶剂挥发诱导的微球之间毛细管作用,使具有窄尺寸分

布的 PDMS@Ag 微球致密规则堆积形成三维导电网络, 实现了在极低银含量下可伸缩导体金属级电导率与大应变的结合, 解决了高导电性与高拉伸性难以兼得的矛盾。Han [16]等人将活化的聚苯乙烯(PS)微球进行化学镀镍, 在外加交流电场作用下, Ni@PS 微球在环氧树脂中形成有序网络, 提升了复合材料导电性, 实现了使用低含量导电填料获得高导电性的导电粘合剂。Liu [17]等人通过化学镀技术及原位氧化还原法制备了 PS@Ni/Au 金属复合微球。此微球具有 Ni-Au 双金属壳层, 兼顾了高导电性和抗氧化性的优势, 并用于丙烯酸酯类各向异性导电胶的应用。Chen [18]等人提出利用多巴胺(PDA)的邻苯二酚基团作为还原剂和钯催化剂的锚定位点, 在 PS 微球表面引发化学镀镍, 制备的各向异性导电胶表现出良好的粘接与各向异性导电性。

## 2.2. 表面接枝聚合法

表面接枝聚合法制备导电微球的原理是在基体微球表面通过化学方法构筑活性位点, 以此作为“锚点”或“种子”, 引发导电填料(如碳纳米管 CNTs、石墨烯 GO)或导电单体(如苯胺、吡咯 Py)聚合, 从而在微球表面形成一层通过化学键连接的、牢固的导电壳层[19]。其最核心的特征是导电层与基体微球之间通过共价键或强相互作用结合, 这从根本上区别于物理吸附或包埋。其优点在于导电层结合牢固(共价键)、可设计性强(功能化)、环保(通常水相反应)。但也存在着过程复杂、导电率通常低于金属以及对微球表面化学性质有要求等问题。此方法制备的聚合物导电微球主要用于生物医药、催化和微电子器件等。

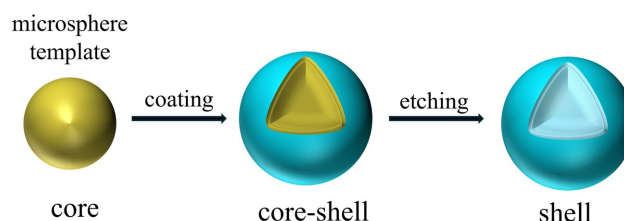
陈[20]等人采用分散聚合法制备了聚甲基丙烯酸缩水甘油酯高分子微球(PGMA), 再利用乙二胺(EDA)在微球表面引入胺基, 从而使微球表面的胺基和 GO 上的羧基发生酰胺反应, 得到 PGMA@GO 核-壳复合微球, 并探究了不同条件下 PGMA@GO 复合微球对亚甲基蓝吸附性能的影响。Du [21]等人针对空心玻璃微球(HGM)表面光滑、难以均匀包覆的问题, 开发了浮选-羟基化-胺化的集成预处理工艺, 在 HGM 表面富集羟基和氨基作为“活化中心”。这些基团通过与吡咯环的亲核/亲电作用, 均匀富集单体并促进链增长, 最终实现了聚吡咯(PPy)在 HGM 表面的均匀包覆, 为在惰性微球表面构建牢固导电层提供了明确的化学途径和工艺范例。王[22]等人通过乳液聚合法制备聚苯胺(PANI), 将其包覆在磺化处理后的 HGM 表面, 其目的是利用导电 PANI 与轻质空心微球结合制备功能性导电材料。Cheng [23]等人将 Py 的乙醇溶液与聚(苯乙烯-甲基丙烯酸) P (St-MAA)微球水分散体混合。在反应体系中加入盐酸和过硫酸铵水溶液, 引发 Py 聚合。聚合反应后对样品进行离心和清洗, 得到 P(St-MAA)@PPy 导电微球, 将此微球与纤维膜相结合可制备出高性能的压阻式传感器并用于人体运动监测。

## 2.3. 模板法

模板法制备导电微球的原理是使用一种具有特定尺寸与形貌的预制“模板”作为核心模具或支架, 使导电材料在其表面或内部空间进行沉积、聚合或组装, 最终通过保留或移除模板, 得到具有模板所定义的精密结构的导电微球。其最核心的特征是“形态复制”与“结构设计”, 能够制备出其它方法难以实现的复杂、有序的微观结构。其优点是可制备中空结构(高比表面), 微球尺寸均一和分散性好[24]。也存在着步骤繁琐、模板去除可能破坏结构、成本高等缺点。此方法所制备的聚合物导电微球主要用于生物医药和能源方面, 如药物可控释放、电磁材料、水处理、催化和微波吸收等。模板法制备导电微球的示意图如图 1 所示。

刘[25]等人以三聚氰胺甲醛树脂(MF)微球为模板包覆 MXene 纳米片, 经热处理后原位生长 CNT, 形成了 MXene-Co-CNT 微球。该材料具有大比表面积和优异的电催化活性, 可用于高灵敏检测硝基芳烃化合物。杨[26]等人以 PS 微球为模板, 将 PANI 和 CNTs 层层组装在模板表面得到核壳微球, 最后刻蚀去除模板, 制备出 PANI/CNTs 复合中空微球, 可用于高性能超级电容器的电极材料。Pang [27]等人报道了

一种巧妙且可控的一步合成策略, 通过使用  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  空心球作为牺牲模板, 合成具有可调壁厚的多层壳结构的聚(3,4-乙烯二氧噻吩)(PEDOT)和 PPy 空心微球, 利用蚀刻效应使单体能够渗透到  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  空心模板壳的内部表面, 并且通过程序化的反应温度过程逐步去除模板, 得到多层壳结构导电聚合物空心微球。这种多层壳结构的 PEDOT 微球具有出色的微波吸收性能。



**Figure 1.** Schematic diagram of the template method for preparing conductive microspheres  
**图 1.** 模板法制备导电微球的示意图

## 2.4. 共混法

共混法制备导电微球的原理是通过物理机械混合的方式, 将导电填料(如炭黑、碳纳米管、金属纳米颗粒)均匀分散到聚合物单体、预聚物或聚合物溶液中, 再利用特定的物理化学过程使其固化成型, 从而将导电填料包埋在聚合物基体中, 形成导电微球[28][29]。其核心的特征是导电填料与基体之间主要为物理结合, 导电性依赖于填料在基体内相互接触形成的网络。其优点在于工艺简单、可大批量生产、成本相对较低。但也存在着填料易团聚以及微球形貌和均一性控制难等问题。此方法所制备的聚合物导电微球主要用于吸附材料和传感材料。

周[30]等人以间苯二酚-甲醛为原料, 二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )为硬模板, 喷雾干燥得到中孔炭微球, 研究了中孔炭微球对水溶液中  $\text{Cr}^{6+}$  的吸附性能。Li [31]等人提出了一种基于多壁碳纳米管/聚二甲基硅氧烷(MWCNTs/PDMS)微球的柔性应变传感器的制备方法。将 MWCNTs 水溶液与 PDMS 的环己烷溶液混合, 制得了 MWCNTs/PDMS 乳液, 以水包油型 Pickering 乳液为敏感材料, 在室温下制备了具有导电性和弹性的 MWCNTs/PDMS 微球, 该应变传感器可以识别不同身体部位的运动。

## 2.5. 自组合法

自组合法制备导电微球的原理, 是利用分子或纳米尺度构件之间固有的相互作用力(如氢键、静电作用、 $\pi$ - $\pi$  堆积等), 在适当的条件下, 让这些构件自发地、有序地聚集、排列并稳定形成一个结构确定的微球, 同时将导电性能整合到该有序结构中。其最核心的特征是“自发有序”与“动态平衡”, 是一种由下而上、依赖热力学的智能组装过程。其优点在于环境友好、结构新颖、材料利用效率高以及成本低廉[32]。但也存在着过程难精确控制、重复性差、难以大规模生产的缺点。此方法所制备的聚合物导电微球主要用于高端封装中的阵列式异方导电胶和光子晶体中的有序结构材料。

Cho [33]等人研究通过干法包覆和自组装, 依次在 PS 微球上负载了金纳米颗粒(AuNPs)和 CNTs 两种不同形状的导电填料, 以极低的贵金属含量实现了导电微球的电传导。Li [34]等人采用 Stober 法制备了  $\text{SiO}_2$  微球, 并用聚二烯丙基二甲基氯化铵(PDDA)对其进行了修饰, 得到了带正电的  $\text{SiO}_2$  微球。将  $\text{SiO}_2$  微球与微小的 GO 片混合, 形成了自组装的 GO 包裹的  $\text{GO}@SiO_2$  微球结构, 最后将其制成湿度传感器并应用于猪的呼吸频率监测。Su 等人[35]利用自组装微球阵列构建定向三维导电网络。利用 PS 微球与分散的 CNTs 组装在一起形成具有三维有序结构的层状导电网络, 并将 PDMS 渗透到三维网络结构中制得导电薄膜, 开发出的感应膜被用作智能传感器来监测交通流量信息。

**Table 1.** Comparative analysis of preparation methods for polymer conductive microspheres  
**表 1.** 聚合物导电微球制备方法对比分析

方法	导电层	导电性	结合方式	优点	缺点
表面镀层法	金属	极高	机械嵌合与弱化学键	导电性极高, 屏蔽/导热性好, 工艺成熟	成本高, 工艺有污染, 镀层可能脱落
表面接枝聚合法	导电聚合物	中等	强化学键/共价键	结合力强, 功能可设计, 柔韧性好	导电性中等, 工艺复杂, 单体可能自聚
模板法	导电材料	中等	自支撑或物理/化学吸附	结构控制能力强, 可制中空/多孔等复杂结构	步骤繁琐, 模板移除可能破坏结构
共混法	导电填料	较低	物理包埋	工艺简单, 成本低, 易大规模生产	填料易团聚, 需高负载, 结合力弱
自组装法	导电纳米单元	中等	非共价键作用力	结构精巧智能, 可并行组装	动力学难控, 条件敏感

上述不同的制备方法对比分析如表 1 所示。这五种制备方法各有优劣, 共同构成了一个层次分明、功能互补的“材料工具箱”, 为未来广泛的应用探索与深入的实验研究提供了极大的便利与清晰的路径。研究者可根据具体的导电、力学、响应性或生物相容性等要求选择方法, 从而高效地制备出面向能源、传感和生物医学等不同前沿领域的功能化聚合物导电微球。

### 3. 聚合物导电微球的性能表征方法

聚合物导电微球的性能表征主要分为形貌结构表征、导电性能分析以及成分分析三大类。形貌结构表征主要为扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM), 导电性能分析最常用的为四探针法(FPP), 成分分析主要为傅里叶变换红外光谱(FTIR)、拉曼光谱(Raman)以及 X 射线光电子能谱(XPS)等。

#### 3.1. 扫描电子显微镜(SEM)

SEM 主要观察微球表面形貌、粒径、单分散性以及结构均匀性等。通过扫描电子显微镜可以看出微球整体形貌、表面粗糙度以及导电聚合物层是否完整覆盖等。此外, 场发射扫描电子显微镜(FESEM)还可观察更精细的表面纳米结构。

#### 3.2. 透射电子显微镜(TEM)

TEM 主要观察内部及核壳结构、测定壳层厚度。对于核壳结构的微球, 透射电子显微镜能清晰观察核壳界面和测定导电壳层的厚度。

#### 3.3. 四探针法(FPP)

FPP 是常用的薄膜测试法, 此方法可避免接触电阻的干扰。将微球压制成片后测试, 可反映微球的导电性能。

#### 3.4. 傅里叶变换红外光谱(FTIR)

FTIR 表征官能团、化学键和分子结构。通过特征峰的存在确认导电聚合物是否成功包覆。

#### 3.5. 拉曼光谱(Raman)

Raman 主要用于研究核壳结构, 表征微球的分子结构、共轭结构有序性和掺杂状态。可深入分析微球的分子振动信息, 其高空间分辨率能用于研究单个微球的核壳结构, 能够判断壳层的完整性。

### 3.6. X 射线光电子能谱(XPS)

XPS 主要表征表面元素组成、化学态和定量分析, 可以精确判断导电聚合物薄膜中的掺杂剂、氧化态等。

## 4. 聚合物导电微球的典型应用领域

聚合物导电微球由于其可设计的结构与性能, 应用前景极为广阔。

在电子互连领域, 它们作为各向异性导电胶的关键导电粒子在垂直方向导通电流, 同时在水平方向保持绝缘, 实现了芯片与基板间的高密度、高可靠性连接。该领域对聚合物导电微球的性能需求在于满足高精度、高导电性以及优异的连接可靠性, 因此多选用表面镀层法, 即先制备高分子微球内核, 再通过物理或化学方法在其表面形成金属镀层[9]。

在新能源领域, 多孔聚合物导电微球可作为锂离子电池[36]、钠离子电池[37]以及超级电容器[38]的三维电极材料, 提供更短的离子扩散路径和更高的活性物质负载量。该领域对聚合物导电微球的性能需求在于解决电极材料的缺陷, 实现电池高的比容量、优异的倍率性能和超长的循环寿命。在锂离子电池中, 通过功能化修饰的聚合物前驱体自组装法构建三维互联微球[36]; 在钠离子电池中, 常用喷雾热解结合模板法制备由纳米单元组装而成的多孔微球[37]; 而在超级电容器中, 则可通过喷雾干燥结合表面接枝聚合法, 获得高比表面积的三维互连多孔结构微球[38]。这些方法能有效构筑具有丰富的导电网络、高孔隙率和稳定结构的三维架构。

在生物医学领域, 表面功能化的聚合物导电微球可用于高灵敏度生物传感器的构建。该领域对聚合物导电微球的性能需求是优异的生物相容性、可降解性和导电性, 制备这类导电微球最合适的方法是采用“软硬模板法”制备核壳结构或多孔结构的导电微球。如使用聚合物等作为牺牲模板, 通过表面接枝聚合或自组装等化学方法, 精准构筑导电聚合物微球[39]。

此外, 在电磁屏蔽[40]、隐身涂层[41]以及柔性应变传感器[42]等领域, 聚合物导电微球也展现出不可替代的应用价值。因此, 持续开发高效、环保、性能可精准调控的聚合物导电微球制备技术, 对于推动上述领域的高质量发展具有重要意义。

## 5. 局限性与展望

目前聚合物导电微球的综合性能还存在着诸多局限性: ① 微球存在粒径分布不均或镀层(如 Ni、Au)结合力不足的问题, 不同批次生产的微球在性能上可能存在差异。② 在持续的电场和复杂环境下, 容易发生导电聚合物层的氧化还原反应或磨损而变得不稳定, 导致导电性能随时间发生不可逆的变化, 最终导致结构失效。③ 在可穿戴设备中存在刚柔矛盾, 可穿戴设备在反复弯折下既要保证导电层的完整性, 又要通过弹性核有效吸收应力, 因此对核壳结构的设计提出了极高要求。

针对上述问题, 使用微流控技术可实现微球尺寸、形貌和结构的一致性, 通过激光技术可实现微球的定位融合与排布, 突破现有制备方法的极限, 实现结构与功能的一体化构建。在微球表面引入纳米级钝化层或新型复合涂层, 可抑制金属电化学迁移, 增强抗腐蚀能力, 大幅提升在湿热环境下的应用可靠性。在核壳设计方面, 可从简单的“硬核硬壳”向多层梯度模量演进, 如设计外层为超薄高导电层、内层为低模量应力缓冲层的结构, 可满足折叠屏等极端柔性需求。

随着电子封装、能源存储和生物传感等领域的持续技术更新, 未来聚合物导电微球还可向多功能集成智能界面材料发展, 如用于表皮电极或植入式器件的柔性互连, 与活体细胞或组织形成“生物混合界面”, 用于心脏组织工程等再生医学领域等, 在生物医用领域发挥重要的作用。

## 基金项目

国家自然科学基金(51603157); 湖北省自然科学基金(2016CFB296); 武汉工程大学教学研究项目(X2022021)。

## 参考文献

- [1] Jin, S., Xin, S., Wang, L., Du, Z., Cao, L., Chen, J., *et al.* (2016) Carbon Nanostructures: Covalently Connected Carbon Nanostructures for Current Collectors in Both the Cathode and Anode of Li-S Batteries (*adv. Mater.* 41/2016). *Advanced Materials*, **28**, 9016-9016. <https://doi.org/10.1002/adma.201670287>
- [2] Gong, X., Zhang, X., Wang, D., Jing, C. and Zhang, Y.X. (2025) Three-Dimensional Graphene Aerogel Materials for Supercapacitors: Strategies and Mechanisms. *Energy & Environmental Materials*, **8**, e70054. <https://doi.org/10.1002/ceem2.70054>
- [3] Zhu, L., Chen, S., Zhou, M., An, S., Liang, L., Shen, Y., *et al.* (2024) Regulation of Mechanical Properties of Conductive Polymer Composites. *Chinese Journal of Polymer Science*, **42**, 1855-1880. <https://doi.org/10.1007/s10118-024-3203-8>
- [4] Prabu, S., Chiang, K., TVM, S. and Pallavolu, M.R. (2025) 3D Hierarchical NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@WO<sub>3</sub>/Cu<sub>2</sub>S Heterostructures and Biomass-Derived Carbon Electrodes for High-Performance All-Solid-State Supercapacitors. *Journal of Power Sources*, **630**, Article 236087. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.236087>
- [5] Liu, Y., Pan, Y., Zheng, Z., Zhang, H., Sun, R. and Zhu, P. (2025) A Sandwich-Structured Anisotropic Conductive Film with Robust Interfacial Reliability and Conductivity for Functional Electrical Interconnections. *Chemical Engineering Journal*, **505**, Article 159721. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159721>
- [6] Li, J., Duan, Y., Cao, H., Wang, Y., Lu, X., Xu, Y., *et al.* (2025) Pressure-Adaptive Core-Shell Liquid Metal Microspheres for Reliable Flip-Chip Interconnects. *Chemical Engineering Journal*, **520**, Article 165694. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165694>
- [7] Yu, J., Liu, S., Wang, P., Li, Z., Duan, S., Sang, M., *et al.* (2025) Interface Engineering Assisted 3D Printing of Silicone Composites with Synergistically Optimized Impact Resistance and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness. *Small*, **21**, Article 2500323. <https://doi.org/10.1002/smll.202500323>
- [8] Niu, S., Wang, T., Liang, C., Shi, Y., Tian, G., Yang, D., *et al.* (2026) Flexible Pressure Sensor with Tunable Sensitivity and Responsive Range for Adaptive Wearable Electronics. *InfoMat*, **8**, e70059. <https://doi.org/10.1002/inf2.70059>
- [9] Hao, C., Jiang, C., Chen, J., Zhang, X., Xiang, Y., Lou, F., *et al.* (2026) Preparation of Array-Patterned Anisotropic Conductive Films Using Magnetic Polystyrene Microspheres. *Progress in Organic Coatings*, **210**, Article 109695. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109695>
- [10] Guo, T., Luo, L., Wang, L., Zhang, F., Liu, Y. and Leng, J. (2025) Smart Polymer Microspheres: Preparation, Microstructures, Stimuli-Responsive Properties, and Applications. *ACS Nano*, **19**, 18003-18036. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c00998>
- [11] Jiang, Z., Yan, S., Ge, Z., Shu, J., Wang, M. and Ge, X. (2025) Preparation and Properties of High-Performance Self-Thermoregulatory Electrode Materials Based on Cage-Like Microspheres. *Journal of Energy Storage*, **132**, Article 117753. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117753>
- [12] Chang, Z., Lei, L., Zhu, L., Quan, Y., Ren, Z., Qian, Y., *et al.* (2025) Remarkably Boosted High-Temperature Energy Storage of a Polymer Dielectric Induced by Polymethylsilsesquioxane Microspheres. *Materials Horizons*, **12**, 284-292. <https://doi.org/10.1039/d4mh01305k>
- [13] Melentiev, R., Yudhanto, A., Tao, R., Vuchkov, T. and Lubineau, G. (2022) Metallization of Polymers and Composites: State-of-the-Art Approaches. *Materials & Design*, **221**, Article 110958. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110958>
- [14] Jain, A., Pal, S., Li, S., Abbott, N.L. and Yang, R. (2024) Single-Step Synthesis of Shaped Polymeric Particles Using Initiated Chemical Vapor Deposition in Liquid Crystals. *Science Advances*, **10**, Article No. 13. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp5573>
- [15] Tian, K., Chen, C., Li, Q., Cao, X., Chen, X., Fu, Q., *et al.* (2023) Evaporation-Induced Closely-Packing of Core-Shell PDMS@Ag Microspheres Enabled Stretchable Conductor with Ultra-high Conductance. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article 2308799. <https://doi.org/10.1002/adfm.202308799>
- [16] Han, Z., Wang, J., You, Q., Liu, X., Xiao, B., Liu, Z., *et al.* (2021) AC Electric-Field Assistant Architecting Ordered Network of Ni@PS Microspheres in Epoxy Resin to Enhance Conductivity. *Polymers*, **13**, Article 3826. <https://doi.org/10.3390/polym13213826>
- [17] Liu, T., Liu, B. and Zhang, M. (2024) Preparation of Au-Ni Bimetallic-Coated Monodisperse PS@Ni/Au Microspheres with Excellent Conductivity and Their Application in Acrylate-Based Anisotropic Conductive Adhesives. *Polymer*, **307**, Article 127282. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127282>

- [18] Chen, Y., Hao, C., Zhang, H., Xue, W., Cai, S., Jiang, C., *et al.* (2024) The Preparation of Polystyrene/Nickel Core-Shell Particles for Anisotropic Conductive Films (ACFs). *Progress in Organic Coatings*, **195**, Article 108662. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108662>
- [19] Li, J., Yoon, S.J., Hsieh, B., Tai, W., O'Donnell, M. and Gao, X. (2015) Stably Doped Conducting Polymer Nanoshells by Surface Initiated Polymerization. *Nano Letters*, **15**, 8217-8222. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b03728>
- [20] 陈树龙, 朱锡淼. 核-壳结构 PGMA@GO 复合微球的制备及其对亚甲基蓝吸附性能研究[J]. 化学工程师, 2024, 38(4): 44-47.
- [21] Du, Y., Zhang, J., Wang, N., Liu, L., Wang, J., Liu, Y., *et al.* (2024) Formation Mechanism of Polypyrrole-Coated Hollow Glass Microspheres (PPy@HGMS) Composite Powder. *Materials*, **17**, Article 5595. <https://doi.org/10.3390/ma17225595>
- [22] 王羽莹, 贾宜亮, 吴一婷, 等. 聚苯胺/空心玻璃微球导电材料的制备研究[J]. 辽宁化工, 2023, 52(8): 1110-1112.
- [23] Cheng, H., Wang, B., Yang, K., Yang, Y.Q. and Wang, C. (2021) A High-Performance Piezoresistive Sensor Based on Poly (Styrene-Co-Methacrylic Acid)@polypyrrole Microspheres/Graphene-Decorated TPU Electrospun Membrane for Human Motion Detection. *Chemical Engineering Journal*, **426**, Article 131152. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131152>
- [24] 张春雷. 导电聚合物中空微球/掺氮石墨烯复合物的制备及其电化学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [25] 刘雨, 李厚桑, 姚庆双, 等. MXene-碳纳米管微球的制备及其对硝基芳烃化合物的电化学检测性能[J]. 分析化学, 2025, 53(3): 407-417.
- [26] 杨超. 碳纳米管复合中空微球的制备及其在超级电容器中的应用[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [27] Pang, R., Hu, X., Zhou, S., Sun, C., Yan, J., Sun, X., *et al.* (2014) Preparation of Multi-Shelled Conductive Polymer Hollow Microspheres by Using Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Hollow Spheres as Sacrificial Templates. *Chem. Commun.*, **50**, 12493-12496. <https://doi.org/10.1039/c4cc05469e>
- [28] Sureshkumar, M., Na, H.Y., Ahn, K.H. and Lee, S.J. (2015) Conductive Nanocomposites Based on Polystyrene Microspheres and Silver Nanowires by Latex Blending. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 756-764. <https://doi.org/10.1021/am5071392>
- [29] Jiang, H., Xu, L., Chen, G. and Fang, X. (2022) Aqueous Solution Blending Route for Preparing Flexible and Antistatic Polyimide/carbon Nanotube Composite Films with Core-Shell Structured Polyimide/Graphene Microspheres. *Polymer Composites*, **43**, 6062-6073. <https://doi.org/10.1002/pc.26907>
- [30] 周建国. 喷雾干燥法制备中孔/中空炭微球及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- [31] Li, T., Li, J., Zhong, A., Han, F., Sun, R., Wong, C., *et al.* (2020) A Flexible Strain Sensor Based on CNTs/PDMs Microspheres for Human Motion Detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, **306**, Article 111959. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111959>
- [32] 李彰凌. 弹性导电微球的制备及其在高灵敏压力传感器上的应用[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 中国科学院大学(中国科学院宁波材料技术与工程研究所), 2023.
- [33] Cho, Y.M., Lee, S.-S., Park, C.R., Kim, T.A. and Park, M. (2021) Enhanced Electrical Conductivity of Polymer Microspheres by Altering Assembly Sequence of Two Different Shaped Conductive Fillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **149**, Article 106562. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106562>
- [34] Li, J., Li, B., Liao, Z., Duan, Y., Fu, X., Huang, Y., *et al.* (2025) Graphene Oxide Wrapped-Silica Microspheres Humidity Sensor with Fast Response/Recovery, High Sensitivity, and Selectivity for Pig Respiratory Rate Monitoring. *Science China Technological Sciences*, **68**, Article 1220203. <https://doi.org/10.1007/s11431-024-2811-7>
- [35] Su, L., Liang, M., Wang, J., Xin, X., Jiao, Y., Wang, C., *et al.* (2023) Robust Orientation-3d Conductive Network Enabled High-Performance Flexible Sensor for Traffic Monitoring: Role of Surface Functionalization on Self-Assembled Microspheres Arrays. *Chemical Engineering Journal*, **468**, Article 143564. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143564>
- [36] Li, K., Yuan, G., Liu, X., Ding, L., Zhang, H. and Lei, W. (2026) Engineering Micro-Nano Structures of SiOC via Boron Doping-Induced Self-Assembly for Superior Cyclic Stability of Lithium-Ion Batteries. *eScience*, **6**, Article 100485. <https://doi.org/10.1016/j.esci.2025.100485>
- [37] Lee, J.S., Saroha, R. and Cho, J.S. (2022) Porous Microspheres Comprising CoSe<sub>2</sub> Nanorods Coated with N-Doped Graphitic C and Polydopamine-Derived C as Anodes for Long-Lived Na-Ion Batteries. *Nano-Micro Letters*, **14**, Article No. 113. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00855-z>
- [38] Meng, Q., Shan, J., Zheng, W. and Xu, Y. (2025) A Novel Strategy Combining Spray Drying and One-Step Activation for the Preparation of Polypyrrole-Coated Chitosan-Modified Cellulose Nanocrystals Microspheres with 3D Interconnected Porous Structure Used for Supercapacitor Electrodes. *International Journal of Biological Macromolecules*, **320**, Article 145670. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145670>

- 
- [39] 刘宇. 聚吡咯和聚 3,4-乙烯二氧噻吩微球的制备与葡萄糖生物传感器的构建[D]: [博士学位论文]. 成都: 四川农业大学, 2017.
- [40] Lu, X., He, J.-M., Xu, Y.-D., Wei, J., Li, J., Long, H., *et al.* (2023) Conductive Microsphere Monolayers Enabling Highly Conductive Pressure-Sensitive Adhesive Tapes for Electromagnetic Interference Shielding. *Advances in Manufacturing*, **11**, 212-221. <https://doi.org/10.1007/s40436-022-00421-1>
- [41] Liu, P., He, Z., Li, X., Ding, L., Liu, S. and Kong, J. (2025) Multifunctional Hollow Carbon Microspheres Enable Superior Electromagnetic Wave Response and Corrosion Barrier. *Advanced Materials*, **37**, Article 2500646. <https://doi.org/10.1002/adma.202500646>
- [42] Chen, W., Wang, Z., Li, Q., Jin, X., Liu, H. and Zhou, H. (2020) Hollow Polyaniline Microsphere Functionalized Paper with Multimodal Sensitivity to Strain, Humidity, and Pressure. *ACS Applied Electronic Materials*, **2**, 247-253. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.9b00724>