

快速微波技术制备导电纳米材料及其在分析检测领域的应用

王春风

山东寿光检测集团有限公司理化室, 山东 寿光

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

当前, 全球正在经历着产业革命和技术革新, 中国也积极践行绿色、清洁、可持续发展理念。快速微波合成技术作为一种新兴的材料制备方法, 能够利用独特的电磁加热方式有效弥补传统加热方式的不足, 进而实现更均匀、更高效的材料制备, 在科学研究和工业应用中展示出广阔的前景。导电纳米材料凭借其独特的电学性能和多功能特性, 在生物、环境、食品和光学检测领域发挥着重要作用。将快速微波合成技术应用于导电纳米材料的制备有望进一步加速检测技术的发展和产业升级。本文全面概括了快速微波技术在导电纳米材料合成中的独特优势, 并系统总结了导电纳米材料在检测领域的应用。随着研究的深入和技术的进步, 快速微波技术合成导电纳米材料并应用于检测领域的未来将更加光明, 值得持续关注和探索。

关键词

快速微波合成, 导电纳米材料, 生物检测, 环境检测

Preparation of Conductive Nanomaterials by Fast Microwave Technology and Their Application in Analytical Detection Field

Chunfeng Wang

Physical and Chemical Laboratory, Shandong Shouguang Testing Group Co., Ltd., Shouguang Shandong

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

Currently, the world is experiencing an industrial revolution and technological innovation, while

文章引用: 王春风. 快速微波技术制备导电纳米材料及其在分析检测领域的应用[J]. 分析化学进展, 2025, 15(2): 276-286. DOI: 10.12677/aac.2025.152027

China is actively practicing the concept of green, clean and sustainable development. Rapid microwave synthesis technology, as an emerging material preparation method, enables to utilize unique electromagnetic heating to effectively compensates for the shortcomings of traditional heating methods, and then realizes a more uniform and efficient material preparation, which demonstrates a broad prospect in scientific research and industrial applications. Conductive nanomaterials play an important role in biological, environmental, food and optical detection due to their unique electrical properties and multifunctional characteristics. The application of rapid microwave synthesis technology to prepare conductive nanomaterials is expected to further accelerate the development of detection technology and industrial upgrading. This review provides a comprehensive overview of the unique advantages of rapid microwave technology in the synthesis of conductive nanomaterials and systematically summarizes the applications of conductive nanomaterials in the field of detection. With the deepening of research and technological advances, the future of rapid microwave technology for synthesizing conductive nanomaterials and applying them in the field of detection will be brighter and worthy of continuous attention and exploration.

Keywords

Rapid Microwave Synthesis, Conductive Nanomaterials, Biological Detection, Environmental Detection

Copyright © 2025 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, 导电纳米材料因其出色的导电性、灵活性和多功能性等特质, 在生物医学、能源存储与转换及环境科学等重要研究领域表现出巨大的潜力, 受到了广泛关注[1]-[3]。特别是在检测领域, 导电纳米材料也具有巨大的发展潜力, 其可用于构建高性能的气体传感器、光学传感器、电化学传感器等[4]-[6]。随着绿色可持续理念的深化和发展, 导电纳米材料的高效快速合成正在成为研究热点。快速微波合成技术是一种利用微波辐射加速化学反应的技术[7]。相较于传统的合成技术, 其能够明显降低能耗、缩短反应时间, 并有望实现导电纳米材料的宏量制备[8]-[11]。本文综述了快速微波合成技术在导电纳米材料制备中的实际应用, 以期导电纳米材料在后续检测领域的应用和研究提供相关参考。

2. 快速微波合成技术的基本原理和优势

微波是一种能够输出能量的电磁辐射, 其频率通常在 300 MHz 到 300 GHz 之间。在微波合成过程中, 被辐射的物质的温度会迅速升高, 加速化学反应, 进而实现导电纳米材料的快速制备[12]-[15]。微波加热的作用机制主要包括极化效应、导电效应和微波与材料相互作用[16]。极化效应是指在微波辐射作用下, 材料中的极性分子会迅速朝向电场方向移动, 从而产生热量。不同于传统的传导或对流加热方式, 这种方式能够实现更快速的温度升高[17]。导电效应是指微波能引起导电物质中自由电子的快速运动, 从而在材料内部产生热量[18]-[20]。微波引起的这种导电加热现象在导电纳米材料的合成中尤为重要[21]-[24]。微波与材料的相互作用取决于微波频率和材料介电特性, 两者之间的匹配程度对于微波加热效果至关重要。不同材料的介电常数和损耗因子不同, 在微波场中的加热效率亦不相同[25]。

相较于传统的热合成方法, 快速微波合成具有多种优势, 具体如图 1 所示: (1) 反应速率明显提升: 微波合成技术能够显著缩短反应时间, 通常可在几分钟内实现传统热合成方法历经数小时甚至数天的反

应,极大地提高了合成效率[26]。(2) 高产率:该技术能够显著增强反应物分子活性,有利于化学反应的充分进行,进而实现更高的反应产率[27][28]。(3) 高选择性:该技术能够实现更均匀的温度分布,减少了热梯度对材料性质的影响,有效降低了副反应的发生几率[29][30]。(4) 环境友好:该技术在低温下进行,显著降低了能量消耗,并且能够实现无溶剂快速反应,符合绿色可持续发展理念[31]-[33]。(5) 多功能性和多样性:该技术通过控制具体反应参数,能够实现多种复合材料的高通量可控制备,进一步拓宽了其应用领域[34][35]。

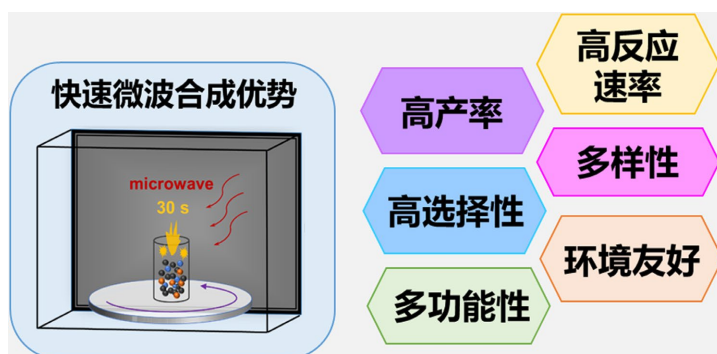


Figure 1. Advantages of fast microwave synthesis technology
图 1. 快速微波合成技术优势

3. 快速微波合成技术制备导电纳米材料的主要过程

快速微波合成技术制备导电纳米材料的过程主要包括四个部分,见图2。(1) 反应物选择与准备:选择合适的反应原料,通常包括金属盐、还原剂、稳定剂和传导微波载体等[36]。对于固相微波而言,需要将所有反应物充分混合均匀[37]。针对液相微波反应,则需将反应物均匀分散在合适的溶剂中。(2) 进行微波辐射加热:将反应物置于微波反应器并施加微波辐射。通过调节微波辐射强度和时间来准确控制材料合成[38]。(3) 导电纳米材料形成:高能微波辐射下反应物迅速升温,并发生充分的化学反应[39]。纳米材料快速成核生长,其尺寸、形貌和组成可通过调整反应时间、温度和实验气氛等参数来控制[40]。(4) 反应后处理:通常需要通过离心、洗涤和干燥等步骤进行后处理,以去除未反应的物质和副产物,提高产品的纯度和性能[41]。

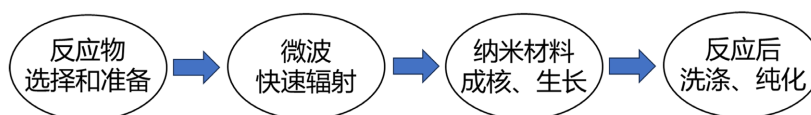


Figure 2. Main process of fast microwave fabricated conductive nanomaterials
图 2. 快速微波制备导电纳米材料主要过程

4. 导电纳米材料在检测领域的应用

导电纳米材料在检测领域的应用十分广泛,特别是在生物、气体、环境和食品领域,如图3所示。

4.1. 生物领域

导电纳米材料能够利用其自身电导率的变化,检测葡萄糖浓度[42][43]。具体原理是葡萄糖分子能够在酶的作用下发生氧化,产生的电子转移到导电聚合物会引起其表面电导率改变,并且产生的电流信号与葡萄糖浓度成正比[44]-[47]。此外,一些导电纳米材料能够实现DNA和蛋白质检测[48]-[50]。导电纳

米材料通过与 DNA 或蛋白质发生相互作用或碱基配对, 实现和 DNA 杂交和蛋白质结合[51] [52]。研究发现, 可通过观察溶液的颜色和电导率的变化来间接反馈 DNA 和蛋白质的存在和浓度[53]-[55]。

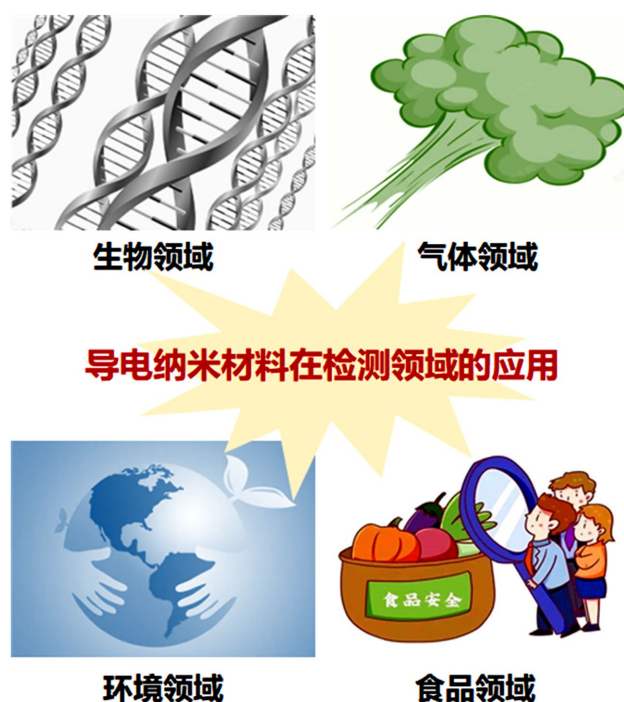


Figure 3. Conductive nanomaterials in the detection field
图 3. 导电纳米材料在检测领域的应用

4.2. 气体领域

导电纳米材料能够高效检测挥发性有机物以及有害气体。例如, 多壁碳纳米管、金属氧化物纳米颗粒等对挥发性有机物具有良好的气敏响应性能[56]-[58]。当挥发性有机物分子吸附在其表面时, 会改变其电子结构和导电性, 从而使传感器的电阻发生变化, 根据电阻变化程度可检测挥发性有机物的种类和浓度[59] [60]。例如, 在检测环境中的苯、甲苯等有机溶剂时, 碳纳米管基气体传感器表现出较高的灵敏度和选择性[61]-[63]。在工业废气排放监测中, 利用导电纳米颗粒传感器可实时检测一氧化碳、甲醛、甲烷等有害气体的浓度[64]-[67]。

4.3. 环境领域

一些导电纳米材料如石墨烯、纳米金等可用于构建电化学传感器来检测环境中的重金属离子等[68]-[70]。通过在其表面修饰特定的官能团或配体, 使其与重金属离子发生特异性结合来影响导电纳米材料的氧化还原电位或电流响应, 从而实现了对重金属离子的定量检测[71]。例如, 用石墨烯修饰的电极对汞离子具有良好的选择性和灵敏度, 可用于环境水样中汞离子的检测[72] [73]。导电纳米材料能够实现水体和土壤中污染物的高效检测, 为环境监测和修复提供了一种新的手段[74] [75]。

4.4. 食品领域

导电纳米材料可用于检测食品中的有害物质或营养成分[76]。例如, 利用导电复合纳米材料制备的电化学免疫传感器, 可同时检测多种黄曲霉毒素, 实现对食品质量的快速、灵敏检测[77] [78]。

5. 快速微波合成技术调控导电纳米材料的具体策略和实际检测应用

在快速微波合成导电纳米材料的研究中，导电纳米材料的组成、形貌和结构等极大程度的影响了其在检测领域的应用。对导电纳米材料进行精准调控有助于构建高性能、多功能的检测体系，下面是一些具体的调控策略和应用。

5.1. 导电纳米材料形貌调控

导电纳米材料的尺寸和形态(如均匀分散与聚集)与其性能和应用密切相关[79]-[81]。较小的粒径有利于暴露更高的比表面积和展现独特的物理化学性质，这有利于增强导电纳米材料在催化和电子传导方面的优越性[82][83]。同时，均匀分散的导电纳米颗粒能够形成均匀优质的电导网络，而聚集的导电纳米颗粒则可能引起导电通路中断，从而降低导电性[84]。不同维度的纳米材料具体不同的特点以适应应用场景，相关总结见表 1。

Table 1. Summary of the characteristics of nanomaterials in different dimensions
表 1. 不同维度纳米材料特点总结

种类		特点
零维纳米材料	纳米颗粒、量子点	高表面能、吸附力强、量子化现象
一维纳米材料	纳米线、纳米管	高强度、高导电性、高导热性
二维纳米材料	纳米片	高比表面积、独特光电性质
三维纳米材料	纳米复合材料	协同效应、可设计性

研究发现，快速微波合成技术能够有效控制导电纳米颗粒的平均粒径和分散程度。通过调节微波辐射的功率和时间，可以获得不同粒径的纳米颗粒。较高的微波功率能够导致更快的加热速率，从而加速反应进程，导致粒子快速形成并聚集。例如，在 400 瓦的微波功率下，合成时间为 10 分钟时，所制备的金纳米颗粒平均粒径为 22 纳米，并且均匀分散[85]。同时，这种快速加热可能导致颗粒的尺寸减小和形态的变化。合成的金纳米颗粒可与 DNA 相互作用，并改变其电学性能，进而用于 DNA 检测。具体而言，金纳米颗粒可通过与 DNA 的碱基配对或静电作用结合，当 DNA 发生杂交反应时，金纳米粒子的聚集状态改变，导致溶液的颜色和电导率发生变化，以此来检测其存在和浓度。例如，在合成氧化锌纳米颗粒时，增加微波功率会导致颗粒尺寸的减小并改变其形态[86]。氧化锌对一氧化碳、硫化氢等有害气体具有敏感的电学响应。当有害气体与金属氧化物纳米颗粒表面发生化学反应时，会导致其电阻或电容等电学参数发生变化，以此实现对有害气体的快速检测。诸如此类，不同维度的纳米材料在分析检测领域发挥着不同的作用，相关总结见表 2。上述研究证明快速微波合成技术能够利用微波辐射强度和时间有效控制导电纳米材料的合成过程，从而影响其最终的形貌特征。

5.2. 导电纳米材料组分控制

导电纳米材料的组成成分对其性能起着至关重要的作用。其中，金属纳米材料是导电纳米材料中最常见的成分之一，其具有快速的电子传输能力。在实际应用中，研究者往往对导电纳米材料的需求较高，以应对多场景应用。这需要对单纯的金属纳米材料进行组分调控，例如掺杂、构建异质结以及引入碳基导电载体。通过掺杂低成本的金属或其他非金属元素到高导电性的金属基纳米材料中，可以在不显著降低导电性的情况下扩大导电纳米材料的应用空间。例如，将在利用快速微波合成制备的铜系金属掺杂的

钕纳米材料可以应用于能源转换领域[87]。同时，将锰元素掺杂到硫化锌/钨(III)纳米复合材料中能够有效提高环境水体中的氟离子的检测效率[88]。同时，构建异质结构是一种高效导电纳米材料设计思路。具体而言，可以调节快速微波合成过程中的反应气氛，制造富氧环境，从而在原有的金属基体中引入部分金属氧化物，进而构建具有丰富异质界面的导电纳米材料[89][90]。例如，钴基氧化物因其 $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ 循环及强吸附能力的优势在电化学检测领域广泛应用。但其有限的导电性和比表面积限制了其进一步发展。可利用微波法构建相应的异质结构来弥补上述缺陷，实现葡萄糖、重金属离子等生物小分子检测[91]。诸如此类，相应的金属化合物异质结构的构建同样展现出优异的应用前景。例如，构建金属硒化物基异质结传感器应用于农药检测领域[92]。在导电纳米材料中，碳基导电纳米材料因其优异的电导率和机械强度而广泛应用于各种领域，非常具有研究价值。其中，碳纳米管的高表面积和化学稳定性使其易于功能化，这对导电纳米材料的性能提升至关重要。利用快速微波合成技术，可以在碳纳米管表面均匀嵌入功能纳米材料，赋予了其更多的物理化学性能，极大丰富了其检测范围[93][94]。与碳纳米管结构类似，石墨烯是单层碳原子以六边形排列构成的二维材料，石墨烯的柔韧性和轻量化特性使其在可穿戴设备和柔性电子器件中具有潜在的应用，有助于实现便携式检测装置的制备[95]。快速微波辐射能够均匀的在石墨烯表面发生化学反应，快速制备石墨烯基复合材料，为检测技术的发展提供支持。相关复合材料的检测应用总结见表3。

Table 2. Applications of nanomaterials in different dimensions
表 2. 不同维度纳米材料应用

	典型材料	实际应用
零维纳米材料	金纳米颗粒	DNA、RNA 检测
	银纳米颗粒	蛋白质检测
	金属氧化物纳米颗粒	有害气体检测
一维纳米材料	碳纳米管	电化学检测
	硅纳米线	噪声分析检测
二维纳米材料	氮化硼纳米片	核酸检测
	金属磷化物纳米片	病毒检测
	金属基纳米片	电化学检测
	二硫化钼纳米片	DNA 检测
三维纳米材料	银/氧化锌纳米颗粒	重金属离子
	金属颗粒/碳纳米管	电化学检测
	金属有机框架/碳纳米管	电化学传感
	氧化铜/羧基化碳纳米片	有机物检测

Table 3. Summary of composite nanomaterials detection applications
表 3. 复合纳米材料检测应用总结

	特点	应用场景
金属基材料	高比表面积、高导热性能、良好韧性和延展性、可调控性	生物医学、电子、能源等分析检测领域
碳纳米管基材料	高比表面积、高化学稳定性、高载流子迁移率	传感、生物医学、环境监测等领域
石墨烯基材料	高导电性、高导热性能、良好的化学稳定性	电子、生物医学、能源等分析检测领域

5.3. 导电纳米材料结构控制

晶体结构和材料缺陷的作用对导电纳米材料至关重要。晶体结构决定了材料的基本性质，而缺陷则对材料的性能产生显著影响。不同的原子的排列方式会导致不同的物理和化学性质，这些性质直接影响材料的导电性、机械强度、光学特性等[96]。微波辐射可以显著加快晶体材料的成核过程，其对成核阶段的影响比对生长阶段的影响更为显著，并决定了最终材料的晶相[97][98]。微波合成中的温度和反应时间控制对纳米材料晶相至关重要。在微波合成中，温度的快速变化可以促使材料在短时间内经历不同的相变，从而优化最终的晶相[99]。此外，适当微波功率下，材料的成核速率显著提高，导致最终产品的晶相更为均匀。缺陷是指晶体结构中的偏差，这些偏差可能由多种原因造成，包括生长过程中出现的错误、外部应力、辐射影响等。缺陷不仅是不可避免的，而且适度的缺陷密度可以显著改善材料的性能。例如，利用氧缺陷来提高金属氧化物的导电性[100]。微波辐射过程中，可以通过调节辐射时间来控制导电纳米材料中的缺陷含量，进而构筑不同的系列导电纳米材料，这有助于快速筛选高性能潜在材料[101]。例如，可通过缺陷工程提升硫化铟和钨酸铋纳米材料的光电转换效率，进而实现对肿瘤标志物的超灵敏性检测[102]。缺陷的构建也有利于二维纳米材料对重金属原子的捕捉，进而提升其检测能力[103]。

6. 总结与展望

快速微波合成技术作为一种新兴的材料制备技术，凭借其高效、环保、可持续的优势，在导电纳米材料的制备中展现了广泛的应用前景。通过减少能耗、降低化学废物和使用环保溶剂，微波合成不仅为材料科学的发展提供了动力，也为环境保护做出了重要贡献。同时，导电纳米材料的多样性为微波快速合成技术提供了广阔的研究和应用空间。利用微波合成技术快速合成丰富多样的导电纳米材料，并进一步探索这些材料的特性和在检测领域的应用，可以为生物、气体、环境和食品检测等领域带来创新和进步。在未来，随着技术的不断进步和应用的拓展，微波合成有望在更广泛的领域中发挥其潜力，推动可持续发展的实现。

参考文献

- [1] 黄家劲. 导电纳米复合材料的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2021.
- [2] 卢德娟, 周家帆, 丁昊, 等. 高长径比银纳米线的合成及其在透明导电电极中的应用研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(4): 272-277.
- [3] 谢慧娟, 魏高亮, 张海光, 等. 电辅助聚苯撑/碳纳米管复合导电膜处理地表水性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2024, 64(6): 581-588.
- [4] 李萍, 倪艳荣, 李承斌, 等. 纳米导电填料在导电胶中的应用研究进展[J/OL]. 材料导报, 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20241030.1933.018.html>, 2025-05-16.
- [5] 刘嘉铭, 王琪, 高智勇. 复合碳纳米导电油墨在压触式印刷电子器件中的应用[J]. 包装工程, 2024, 45(19): 153-163.
- [6] 孙芸. 近红外光响应纳米光疗剂的设计及其生物医学应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- [7] 李偲. 新型碳纳米材料微波特性实验与应用研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [8] 赵娜. 金属氧化物气敏材料的微波辅助碳诱导制备及性能调控[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2023.
- [9] 袁程, 沈迁, 张瑞文, 等. 快速微波合成铂铜合金作为高效氧还原电催化剂[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(3): 1133-1140.
- [10] 王瑞琪, 石恒杰, 孙彦丽, 等. 金属有机框架 UiO-66 的制备及储氢性能: 微波与传统溶剂热制备的比较[J]. 燃料化学学报(中英文), 1-13.
- [11] 房川琳, 李哲皓, 李静, 等. 微波合成纳米氧化镁实验教学的条件探究[J]. 实验科学与技术, 2024, 22(2): 81-86+107.

- [12] 王陆瑶, 孟东, 李璐. “热效应”或“非热效应”——微波加热反应机理探讨[J]. 化学通报, 2013, 76(8): 698-703.
- [13] 彭元东, 易健宏, 罗述东, 等. 微波技术在金属材料制备中的应用现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 742-747.
- [14] 李昂, 赵振宇, 李洪, 等. 微波诱导高分散 Pd/FeP 催化剂构筑及其电催化性能研究[J]. 化工学报, 2024, 75(4): 1594-1606.
- [15] 舒静, 任丽丽, 张铁珍, 等. 微波辐射在催化剂制备中的应用[J]. 化工进展, 2008(3): 352-357.
- [16] 麻孝勇, 莫羨忠. 微波在合成纳米材料中的应用[J]. 化工技术与开发, 2007(2): 38-41+17.
- [17] 彭虎, 李俊. 微波高温加热技术进展[J]. 材料导报, 2005(10): 100-103.
- [18] 张城博, 陶晓萍, 蒋文超, 等. 微波辅助合成促进铬酸铋晶体的光生电荷分离[J]. 物理化学学报, 2024, 40(1): 36-37.
- [19] 杨霞, 王胜平, 马新宾. 微波技术在催化剂制备中的应用[J]. 化学通报, 2004(9): 641-647.
- [20] 王继业, 许赤兵, 宋会花, 等. 微波加热在无机固相反应中的应用[J]. 河北师范大学学报, 2004(4): 396-400.
- [21] 刘崇波, 杨茗, 安琪, 等. 微波法超快制备泡沫镍负载的 Co/Zn 氧化物增强硫离子氧化反应活性[J]. 化学研究与应用, 2024, 36(9): 2056-2063.
- [22] 李芳良, 李月珍, 农兰平. 微波技术在化学中的应用新进展[J]. 广西科学, 2004(2): 121-126.
- [23] 苏灿. 导电衬底上微波辅助合成钴基纳米材料的电化学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [24] 冯杏彬. Bi/In 基 MOFs 材料的快速制备及其电催化 CO₂ 还原产甲酸的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [25] 杨华明, 黄承焕, 宋晓岚, 等. 微波合成无机纳米材料的研究进展[J]. 材料导报, 2003(11): 36-39.
- [26] 高文圣, 雷鹰, 李雨, 等. 微波快速合成碲掺杂方钴矿及其性能研究[J]. 金属功能材料, 2019, 26(1): 16-21.
- [27] 肖舒宁, 霍梦佳, 程学健, 等. 微波法高效光催化材料合成研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(1): 82-93.
- [28] 吴雪珂. Ru 基纳米材料的微波合成及其电催化析氢和肼氧化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
- [29] 曲铭松, 龚福忠, 尹作栋. 微波法合成超级电容器材料 CuCo₂S₄ 及其电化学性能[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(1): 161-167.
- [30] 卓佐西, 秦刚华, 刘春红, 等. 微波辅助双模板剂体系快速合成纳米 SSZ-13 分子筛及 NH₃-SCR 脱硝性能研究[J]. 现代化工, 2023, 43(5): 153-158.
- [31] 买慧娟, 杨雷, 周毛措. 超快速微波辅助合成相变储能纳胶囊[J]. 辽宁化工, 2024, 53(1): 35-38.
- [32] 张愉. 微波辅助含磷生物分子快速合成羟基磷灰石超长纳米线研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [33] Mary, J.A., Manikandan, A., Kennedy, L.J., Bououdina, M., Sundaram, R. and Vijaya, J.J. (2014) Structure and Magnetic Properties of Cu-Ni Alloy Nanoparticles Prepared by Rapid Microwave Combustion Method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **24**, 1467-1473. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(14\)63214-3](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(14)63214-3)
- [34] 汪忠伟, 黎波, 辛宇尘, 等. 快速微波法制备掺氮石墨烯用于碱性氧还原电催化剂(英文) [J]. 催化学报, 2014, 35(4): 509-513.
- [35] 吴秀勇, 无添加剂快速微波水热法制备空心微球形貌勃姆石粉体[Z]. 山东省, 泰山医学院, 2013-12-01.
- [36] Xu, S., Zhong, G., Chen, C., Zhou, M., Kline, D.J., Jacob, R.J., *et al.* (2019) Uniform, Scalable, High-Temperature Microwave Shock for Nanoparticle Synthesis through Defect Engineering. *Matter*, **1**, 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.05.022>
- [37] Shi, Y., Zhang, D., Miao, H., Zhang, W., Wu, X., Wang, Z., *et al.* (2021) A Simple, Rapid and Scalable Synthesis Approach for Ultra-Small Size Transition Metal Selenides with Efficient Water Oxidation Performance. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 24261-24267. <https://doi.org/10.1039/d1ta07644b>
- [38] 杨枫. 微波快速合成石墨烯/纳米银及电化学传感应用[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [39] Fei, H., Dong, J., Wan, C., Zhao, Z., Xu, X., Lin, Z., *et al.* (2018) Microwave-Assisted Rapid Synthesis of Graphene-supported Single Atomic Metals. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1802146. <https://doi.org/10.1002/adma.201802146>
- [40] 涂华民, 张秀凤, 张迈生. 轻稀土氟化物的微波固相快速合成法[J]. 稀有金属, 2004(5): 875-879.

- [41] Yu, W., Zhang, Y., Qin, Y., Zhang, D., Liu, K., Bagliuk, G.A., *et al.* (2022) High-Density Frustrated Lewis Pair for High-Performance Hydrogen Evolution. *Advanced Energy Materials*, **13**, Article ID: 2203136. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203136>
- [42] 朱科达, 朱荣妹. 金属有机框架及其复合材料在葡萄糖无酶电化学传感器中的应用[J]. 材料研究与应用, 2024, 1: 9.
- [43] 蒋昆, 余义冉, 张雯雯, 等. 基于 Pd/ZnS 纳米复合材料的无酶葡萄糖生物传感器的研究[J]. 纺织报告, 2024, 43(10): 13-17.
- [44] 吴朝玲, 何若彤, 谢卫红, 等. 基于双酶活性 Fe₃O₄MNPs@GOX 复合材料的葡萄糖比色传感检测[J]. 分析试验室, 1-9.
- [45] 郭旭玲. Cu_xO 修饰 RGO 柔性电化学传感器及汗液葡萄糖检测特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [46] 郝亚君. MXene 基葡萄糖检测功能化纸芯片的制备与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [47] 马晨飞. 用于检测葡萄糖和镍离子的功能化光纤传感技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2024.
- [48] 易姿, 杨丽霞, 黄小贝, 等. 基于单链 A30-DNA 金纳米簇的荧光传感法检测维生素 B1 [J]. 广州化工, 2024, 52(23): 81-84.
- [49] 彭晨曦, 龚国傲, 蔡珂, 等. 纳米金复合碳材料修饰的免疫传感器检测血清中 CYFRA21-1 [J]. 传感器与微系统, 2025, 44(1): 114-118.
- [50] 程梦晴. 基于 MOF 纳米材料构建传感器用于 DNA 和 Cu²⁺的检测研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西中医药大学, 2023.
- [51] 卿阳. 基于纳米材料在 DNA 荧光生物传感器中的应用对 microRNA 的检测研究[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2023.
- [52] 彭东. 氮掺杂纳米材料和 DNA 酶用于重金属离子等污染物的检测吸附研究[D]: [博士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [53] 王晓静. 新型纳米材料基电化学 DNA 传感器的构建及其在 KRAS 基因检测中的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [54] 徐柳. 基于石墨烯类纳米材料检测生物标志物[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [55] 陈桥. 基于几种纳米材料的生物传感新方法探索及其在检测 HBV DNA 和葡萄糖中的应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [56] 张俊杰. 氧化物纳米结构气体传感器及其在氧气检测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [57] 时超. 氧化镍基纳米复合材料的制备及其对丙酮气体检测的应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2024.
- [58] 刘加兴. 纳米异质材料与气体检测[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2023.
- [59] 蒋喆. 纳米材料的制备及其在气体检测中的应用[J]. 浙江化工, 2023, 55(3): 28-33.
- [60] 盛福深, 胡杰华. 金掺杂二氧化锡纳米纤维的高性能气体检测系统[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(8): 224-228.
- [61] 罗晨晨. 吸附剂掺杂的碳纳米管检测 SF₆ 放电分解组分的气敏特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [62] 张晓星, 孟凡生, 常涛, 等. 羟基化碳纳米管检测油中溶解气体的理论分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1957-1961.
- [63] 汤思蕊. 单壁碳纳米管气体传感器阵列及其对变压器油中气体的检测特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [64] 倪森. 面向室内一氧化碳检测的电子鼻技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [65] 张阿梅. 建筑环境下基于 ZnO 纳米线甲醛气体检测传感器的研究[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(10): 1857-1862.
- [66] 张赛赛. 瓦斯气体检测用 NiO 基纳米材料的构筑与敏感性能研究[D]: [博士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
- [67] 葛美英. 金属氧化物纳米材料在 CO 气体检测中的应用[Z]. 上海市, 上海纳米技术及应用国家工程研究中心有限公司, 2016-12-01.

- [68] 赵虎. 土壤重金属检测方法 & 污染治理技术研究[J]. 山西化工, 2024, 44(11): 115-117.
- [69] 胡维, 周玉蓉, 蒋栋磊, 等. 多壁碳纳米管与金纳米粒子修饰纳米通道电化学传感器及其在粮食重金属检测中的应用[J]. 食品工业科技, 1-22. <https://link.cnki.net/urlid/11.1759.TS.20250115.1558.012>, 2025-01-16.
- [70] 王会鑫. 金属有机框架纳米酶的制备及其在重金属检测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
- [71] 傅亮. 新型碳纳米传感器及其在重金属检测中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [72] 王继阳, 胡敬芳, 宋钰, 等. 基于石墨烯的离子印迹电化学传感器在水质重金属检测中的研究进展[J]. 传感器世界, 2019, 25(12): 7-16.
- [73] 彭雪, 高彬, 高泽, 等. 石墨烯材料在水中重金属检测中的应用[J]. 化工进展, 2018, 37(5): 1868-1874.
- [74] 侯慧娜. 金修饰硅纳米线电极的制备及其重金属检测研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [75] 钟平胜. 三维石墨烯复合材料在食品中痕量镉快速测定中的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [76] 赵雯雯. 食品检测技术现状及未来发展趋势与挑战[J]. 食品安全导刊, 2024(34): 165-167.
- [77] 刘颖达. 基于纳米抗体七聚化融合检测乳制品中黄曲霉毒素 M1 的免疫分析方法构建[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- [78] 韩素平, 李晓红, 周水清, 等. 基于适配体的纳米金比色法检测中药材中黄曲霉毒素 B1 [J]. 山西化工, 2024, 44(3): 35-36+39.
- [79] 孟宪伟, 刘世铎, 张泽磊, 等. 不同维度的银微纳米材料研究进展[J]. 贵金属, 2020, 41(1): 77-84.
- [80] 彭勃, 夏帆, 刘日杰, 等. 纳米碳形貌对纳米碳/聚乙烯导电复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(9): 2379-2386.
- [81] 马维娟, 王芳冬, 耿明天, 等. 无机纳米导电材料在柔性印刷电子中的应用[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2024(2): 11-24.
- [82] 邢国慧, 刘丽红, 张俊辉, 等. 单颗粒电感耦合等离子体质谱技术用于生物基质中纳米银检测的研究进展[J]. 分析化学, 2024, 52(10): 1413-1423.
- [83] 罗红梅. 基于形貌和催化活性调控的凹形金银纳米颗粒检测食品中铜汞新方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [84] 马闪闪. 基于金纳米颗粒组装的纳米孔检测体系构建及应用[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [85] Che, Z., Lu, X., Cai, B., Xu, X., Bao, J. and Liu, Y. (2021) Ligand-Controlled Synthesis of High Density and Ultra-Small Ru Nanoparticles with Excellent Electrocatalytic Hydrogen Evolution Performance. *Nano Research*, **15**, 1269-1275. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3645-z>
- [86] Zhao, H., Yuan, Y., Zhang, D., Qin, Y., Han, Y., Li, H., *et al.* (2021) Ultrafast Generation of Nanostructured Noble Metal Aerogels by a Microwave Method for Electrocatalytic Hydrogen Evolution and Ethanol Oxidation. *ACS Applied Nano Materials*, **4**, 11221-11230. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c02746>
- [87] 胡海燕, 卫涛, 翟辉. 微波法制备氧化锌/石墨烯纳米复合材料用于电化学检测牛乳中的三聚氰胺[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 244-252.
- [88] 孙晓杰, 苗艳明, 吕金枝, 等. 基于锰掺杂硫化锌/铜(III)纳米复合材料检测环境水体中的氟离子[J]. 分析化学, 2019, 47(9): 1366-1372.
- [89] Zhao, H., Zhang, D., Yuan, Y., Wu, X., Li, S., Li, Z., *et al.* (2022) Rapid and Large-Scale Synthesis of Ultra-Small Immiscible Alloy Supported Catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, **304**, Article ID: 120916. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120916>
- [90] 邱涛. 贵金属/半导体氧化物异质结构的表面等离激元协同增强用于细菌基因高灵敏光学检测[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2023.
- [91] 庞建祥. 钴基异质结复合材料的制备及其电化学检测性能研究[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2023.
- [92] 黄兴歌. 基于二元金属硒化物/碳复合材料构建的传感器及在农药检测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [93] Wan, J., Yao, X., Gao, X., Xiao, X., Li, T., Wu, J., *et al.* (2016) Microwave Combustion for Modification of Transition Metal Oxides. *Advanced Functional Materials*, **26**, 7263-7270. <https://doi.org/10.1002/adfm.201603125>
- [94] Wu, X., Wang, Z., Zhang, D., Qin, Y., Wang, M., Han, Y., *et al.* (2021) Solvent-Free Microwave Synthesis of Ultra-

- Small Ru-Mo₂C@cnt with Strong Metal-Support Interaction for Industrial Hydrogen Evolution. *Nature Communications*, **12**, Article No. 4018. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24322-2>
- [95] 刘凡凡. 石墨烯材料自下而上的微波合成及其电化学性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [96] Chen, Y., Lai, Z., Zhang, X., Fan, Z., He, Q., Tan, C., *et al.* (2020) Phase Engineering of Nanomaterials. *Nature Reviews Chemistry*, **4**, 243-256. <https://doi.org/10.1038/s41570-020-0173-4>
- [97] 高端, 程丽红, 陈宝玖, 等. 微波辅助水热法反应参数对 NaYF₄:Dy³⁺ 晶相、形貌、发光性能的影响[J]. 无机化学学报, 2019, 35(9): 1623-1634.
- [98] 黄剑锋, 孟岩, 曹丽云, 等. 微波水热时间对 BiVO₄ 微晶相组成及显微结构的影响[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 38-40.
- [99] Zhang, Y., Zhang, D., Qin, Y., Xiong, J., Liu, J., Yu, W., *et al.* (2022) Ultra-Fast Phosphating Synthesis of Metastable Crystalline Phase-Controllable Ultra-Small MP/CNT (M = Pd, Pt, Ru) for Polyalcohol Electrooxidation. *Journal of Energy Chemistry*, **72**, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.05.001>
- [100] Li, Z., Chen, Y., Jian, Z., Jiang, H., Razink, J.J., Stickle, W.F., *et al.* (2018) Defective Hard Carbon Anode for Na-Ion Batteries. *Chemistry of Materials*, **30**, 4536-4542. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00645>
- [101] Wang, Z., Liu, J., Wu, X., Nie, N., Zhang, D., Li, H., *et al.* (2022) Engineering Ordered Vacancies and Atomic Arrangement over the Intermetallic PdM/CNT (M = Pb, Sn, In) Nanocatalysts for Synergistically Promoting Electrocatalysis N₂ Fixation. *Applied Catalysis B: Environmental*, **314**, Article ID: 121465. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121465>
- [102] 艾思敏. 缺陷型硫化铟和钨酸铋纳米材料的设计合成及其光电生物传感应用[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [103] 周文义. 缺陷型二维材料(TiO₂、MoS₂)的电化学传感机制研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.