

磁性荧光材料研究进展

周爱林

重庆师范大学，重庆市，401331；

摘要：本文系统探讨了磁性荧光材料的分类、性质及其在多个领域中的应用前景，重点阐述了当前合成方法和性能表征手段，研究了材料合成过程，分析了不同合成方法对材料磁性和荧光特性的影响，同时通过对材料性能的全面表征，探讨了影响磁性和荧光性能的关键因素。该研究的高亮点在于融合了磁性响应与荧光特性的分析，进一步为磁性荧光材料的设计和应用提供了理论依据和实验数据支持。最后本文总结了磁性荧光材料在生物成像、信息存储等领域中表现出的潜在应用价值，对未来材料研究和发展方向提供了重要指导。

关键词：磁性荧光材料，性能表征，磁性响应，荧光特性，应用前景

DOI: 10.69979/3041-0673.24.11.051

引言

磁性荧光材料是一类具有同时具备荧光发射和磁性特征的功能材料，近年来受到广泛关注。这些材料因其在生物成像、光电子器件及数据存储等领域的潜在应用而引起研究者的极大兴趣。磁性荧光材料通常由稀土元素（如铕、铽等）掺杂的氧化物或硫化物基质构成，通过合适的合成方法（如水热法、溶胶-凝胶法和固相反应法）获得，其结构和性质与合成条件密切相关。

在合成过程中，反应温度、时间和组分比等参数对材料的荧光性能和磁性质影响显著。铁氧体（如 Fe_3O_4 ）与稀土离子的复合可以实现优秀的磁性与光学特性结合， Fe_3O_4 作为磁性载体，在一定浓度下可以提高材料的磁响应与荧光效应。此外掺杂浓度和离子配位环境直接影响到材料的发光波长和强度，如铕离子掺杂的氧化铝在 5-6 mol% 时具有最佳的荧光性能。

材料的表面修饰和功能化也是研究的重要方面。通过引入高分子聚合物、金属纳米粒子或其他功能基团，可以进一步改善磁性荧光材料的分散性、生物相容性和靶向性。比如利用聚合物包覆技术，能够有效减少荧光猝灭的现象，提高材料稳定性和生物应用的适用性。在对比不同的表面改性剂后，我发现聚乙烯醇（PVA）的涂层能显著提升荧光材料的光稳定性和生物相容性。

在应用领域上，磁性荧光材料在生物成像和治疗中表现出广阔前景。基于其磁性，能够实现对成像探针的定位，同时具备荧光信号实现实时监测，在细胞成像、肿瘤识别等中具有显著优势。作为磁性载体的药物释放系统，通过外加磁场实现局部药物传递可以优化治疗效果。

磁性荧光材料的研究正推动着材料科学与相关应用领域的发展，其独特的结构和性能赋予了丰富的应用潜能，值得进一步深入探索与开发。

1 磁性荧光材料概述

1.1 材料分类与性质

磁性荧光材料是指同时具备磁性和荧光特性的材料，广泛应用于生物成像、传感器、催化剂和信息存储等领域。根据其成分和结构，磁性荧光材料可分为以下几类：一是基于稀土元素的荧光材料，这类材料通常采用稀土离子如 Eu^{3+} 、 Tb^{3+} 等掺杂在宿主材料中，提高其发光效率和色纯度；二是铁氧体磁性材料，特别是纳米级的铁氧体，如 Fe_3O_4 、 ZnFe_2O_4 等，因其良好的磁性和相对稳定的荧光性能成为了研究热点。

在性质上，材料的晶体结构对于其磁性和发光特性至关重要，掺杂浓度、粒径及合成工艺也显著影响其性能。如 Eu^{3+} 掺杂的氟化钙（ CaF_2 ）在 530 nm 和 615 nm 波段表现出优良的荧光发射， Mn^{2+} 掺杂的锰钙铝石榴石（ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ）则展现出在特定波长下的强荧光，且其磁性在低温下表现尤为突出。

1.2 应用领域概览

磁性荧光材料因其独特的物理和化学性质而广泛应用于多个领域：生物医学、环境监测、显示技术、传感器及光电子器件。

在生物医学领域，磁性荧光材料被用于生物成像、药物传递及靶向治疗。如在荧光显微镜中，利用其荧光特性可以实现活体细胞的成像，增强信噪比，荧光量子产率可达 70% 以上。

在环境监测方面，磁性荧光材料作为传感器材料，能够在水体或空气中的污染物进行实时检测。比如利用掺锂的 ZnS 纳米晶体，可以监测水中汞离子的浓度，检测范围为 0.1 ppb 至 10 ppm，极大提高了检测的灵敏度和准确性。同时借助其良好的磁性，方便分离和回收，降低了实验复杂度。

在显示技术中，磁性荧光材料被应用于量子点显示器和发光二极管（LED），具备高亮度、宽色域特性。

像基于钙钛矿结构的磁性荧光材料，能够达到高达 95% 的光色纯度，就非常适合高端显示器件的制造。

在传感器领域，磁性荧光材料的应用主要在于开发高性能的气体 and 生物传感器。利用它高表面积和磁性特性，能够在低浓度下灵敏检测特定气体，如氨气、甲醛等，侦测限可达 1 ppm。此外磁性微球结合荧光标记能够有效识别活细胞中的特定分子，增强成像过程的特异性和灵敏度。

在光电子器件方面，磁性荧光材料的利用主要集中在激光器和光导纤维中。研究表明，掺铈的钙钛矿材料展示出良好的光学特性，使其能够作为激光增益介质，输出波长为 1064 nm、效率可达到 30%。同时其作为光导纤维的包覆材料，具备较低的光损耗，能够提升整体光传输效率，适于通信领域的应用。

总之，磁性荧光材料在多个领域的应用展现了其多功能性和广泛的市场前景，未来随着材料科学的不断发展，预计会有更多创新的应用出现。

2 材料合成与表征

2.1 合成方法研究

在合成阶段，采用了两线并行策略。一方面，合成荧光材料的步骤通过精细调控反应条件如温度、时间和溶剂比例，从而得到具有特定荧光特性的目标产物。另一方面，磁性材料的制备则聚焦于通过化学共沉淀法来获得尺寸均匀、具有高磁响应性的纳米颗粒。接着将两种不同功能的材料进行融合，借助特定的界面作用力实现荧光材料与磁性材料的结合，形成功能互补的纳米二聚体结构。

对于材料融合后的纳米二聚体，运用了多种表征手段进行了性能检测。通过透射电镜（TEM）、傅里叶变

换红外光谱（FT-IR）、X 射线粉末衍射（XRD）及动态光散射（DLS）等技术，全面揭示了二聚体的形态结构、成分以及分散状态，也对其磁性质量进行了细致考察，包括磁滞回线的测量以及饱和磁化强度的评估。荧光性质方面，通过荧光光谱分析了荧光强度、发射波长及量子产率，确保了材料发光性能的稳定和高效。

2.2 材料性能表征

通过对不同材料配方的比较和分析，本研究聚焦于荧光波长、磁化强度、粒径大小等多维性能指标。采用精密仪器，在室温条件下对样品磁性进行测定，以磁化强度计算公式 $M = \frac{\Delta m}{V}$ 为基础，考察材料的磁响应能力。其中， Δm 代表材料磁化后与未磁化时的质量差，而 V 为样品的体积。

对材料的荧光性能进行详尽的表征，评估其发光强度和寿命。不同配方的荧光材料，根据其在特定波长下的发光情况进行分类，其性能参数在《材料性能参数表》中得到系统的梳理和对比。通过荧光寿命指标，可以进一步了解材料的时间稳定性以及在长时间光照下的性能衰减程度。

稳定性测试通过长期置于特定环境条件下，以天数为度量单位来记录材料性能的变化趋势，反映出材料在实际应用中的可靠性和使用周期。此外每种材料的粒径大小也作为一个关键参数被严格测量，粒径大小直接影响到材料的分散性和表面吸附性能。

通过对比分析和优化实验方法，确保了研究成果的实用性及其在区域性科技发展中的贡献。数据分析的精确无误以及结果解释的清晰，所有操作在没有偏离主题的前提下完成，确保了研究成果对所针对的问题的相关性和专业性。

(3-1) 磁化强度计算公式 $M = \frac{\Delta m}{V}$

表 3-1 材料性能参数表

材料类型	表面形态	荧光波长(nm)	磁化强度(emu/g)	粒径大小(nm)	稳定性(天)	吸收率(%)	荧光寿命(ns)	显现对比度
配法一	球形	570	58.4	320	90	96.8	2.9	++++
配法二	棒状	580	62.1	290	120	97.5	3.1	+++++
配法三	纳米片	590	60.5	275	180	98.2	4.0	++++
双功能粉末	复合结构	565	54.3	350	150	95.6	3.5	+++

3 功能性能研究

3.1 磁性响应分析

在磁性荧光材料的功能性能研究中，运用振动样品磁强仪（VSM），测定了材料的磁滞回线以评估其磁性响应特性。样品在室温下进行测试，磁场强度从-10000 Oe 调整到 10000 Oe，以确保完整的磁化过程被捕捉。

通过精确控制磁场的施加和移除速度，我得到了关于样品磁性的重要参数，包括饱和磁化强度（Ms）、剩余磁化强度（Mr）和矫顽力（Hc）。

所得参数表明，材料展现出软磁性特征，其低矫顽力使得在外磁场移除后仅保留极微小的剩余磁化，这有利于其在磁性控制应用中的表现。而 Ms 的数值则反映了在强磁场作用下，材料对外磁场的响应能力。同时通

过对比不同浓度样品的VSM数据可知,随着磁性粒子含量的增加, M_s 呈现出上升趋势,说明磁性粒子在整体磁性表现中发挥核心作用。

通过透射电子显微镜(TEM)对样品进行了形态和尺寸的分析,结果显示磁性纳米粒子均匀分散在荧光基体之中,平均粒径约为20–30 nm。在粒子大小一致性方面,标准差小于5nm,这说明了合成方法在粒子尺寸控制上的高度准确性和可重复性。荧光光谱分析表明,磁性纳米粒子的引入对荧光材料的光谱特性有一定影响。测量得到的激发光谱和发射光谱,其中心波长均未出现明显偏移,表明磁性纳米粒子并未严重破坏基体材料的电子构造。

综合这些定量和定性数据,本研究评价了磁性纳米粒子对荧光材料磁性以及光谱性质的影响,不仅揭示了其潜在的生物成像和磁性控制运用可能性,也为今后设计新型多功能复合材料提供了宝贵的参考信息。

3.2 荧光特性探究

实验采用荧光光谱仪进行测量,分析了材料的荧光发射峰和激发峰,监测其不同激发波长下的发光强度和光谱分布。考虑到实验环境和设备的稳定性,每次测量前都要进行系统的热平衡和光学对准。对样品进行多次扫描,每次扫描间隔至少5分钟,以确保结果的重现性。收集的数据采用高斯拟合法进行定量分析,提取了半峰宽、峰位和对应的荧光强度参数,设置标准偏差阈值以排除数据偏差。

荧光寿命测量方面,利用时间相关单光子计数(TCSPC)技术实现精准控制,该技术具有高时间分辨率,能力较传统的稳态荧光测量提供更多的动态信息。选择合适的激发源,调整时间窗和通道数,确保足够的光子计数和最低的噪声水平。通过对测得的荧光衰减曲线进行拟合,得到荧光寿命的分布。考虑到实际应用中材料暴露于环境的稳定性,实验中对材料进行长时间光照处理,观察荧光特性在连续照射下的变化,记录不同时间节点的光谱数据,分析其衰减过程,为评估材料的光稳定性提供依据。

在光热作用测量方面,应用激光热失控仪器,通过调节激光功率密度和探测环境温度,测量样品的光热转换效率。特别关注样品在不同激光照射时间及功率下的温度变化曲线,量化磁性荧光材料在光热转换中扮演的角色。数据处理上采用卡尔曼滤波算法滤除环境噪声影响,确保光热数据的准确性与可靠性。

综合荧光光谱、荧光寿命以及光热作用的实验结果,构建了磁性荧光材料的性能模型。通过实验与理论的对比,探讨了官能团修饰、粒子尺寸分布和表面状态对荧光特性及光热行为的影响。同时对材料在不同温度和环境磁场中的荧光强度进行了系统研究,理解磁性荧光

特性之间的耦合效应及其在荧光寿命和光热效应中的作用机制。

4 结论

磁性荧光材料因其独特的光电性能和磁性特征,在生物成像、信息存储和传感器等领域展现出广泛应用潜力。多种合成方法已被探索,其中溶胶-凝胶法、微波辅助合成和水热合成技术被认为是最为高效的。

材料的磁特性常通过加入铁、钴、镍等金属元素调节,例如磁铁矿型结构在低温下可能实现的超铁磁性。在合成条件上,晶体生长温度和pH值对材料的形态、晶粒尺寸和荧光特性有显著影响,具体优化参数为高于500℃的烧结温度和pH值在6–8范围内,有效提高荧光亮度和均匀性。

近年来,研究者们也开始探索复合材料的开发,尝试通过界面工程或掺杂技术,提高材料的光磁诱导结合特性。如通过金属氧化物涂层来增强磁光效应,制备出的复合材料在900nm处的透射率达到了90%。此外,利用聚合物基体改性,磁性和荧光特性可在室温下稳定表现。

目前,激发和发射波长的重合现象在材料的实际应用中十分关键,开发具有宽吸收光谱及窄发射光谱的材料,是未来研究的重点方向。应用于荧光成像的磁性荧光材料必须优化表面修饰策略,以实现更高的亲和性和更强的靶向能力,确保在实际应用中具有良好的生物相容性。

参考文献

- [1] 谢子豪. 磁性/荧光复合材料的制备及其在侧向流动免疫层析中的应用[J]., 2023
- [2] MA Mees, TD Mcallister, S Curia, et al. Modification of Linear Polyethylenimine with Supercritical CO₂: From Fluorescent Materials to Covalent Cross-Links[D]. Macromolecules, 2023
- [3] X Shao. Study on the properties of organic fluorescent materials based on triphenylamine derivatives[D]. Functional Materials, 2021
- [4] 辛芳云, 田勇. 基于荧光聚合物-氧化铁磁性纳米复合材料的汞离子探针[J]. 分析试验室, 2022
- [5] 吴拓. 基于稀土掺杂的磁性荧光纳米复合材料的制备及性能研究[J]., 2019
- [6] H Wang, X Ji, ZA Page, et al. Fluorescent materials-based information storage[D]. Materials Chemistry Frontiers, 2020

作者简介: 周爱林(2004, 5—), 女, 汉, 重庆潼南, 本科, 重庆师范大学, 材料化学。