

磁性纳米粒子的合成及其生物医学应用研究进展

祁雄威¹, 耿佳宏¹, 司方方¹, 张超¹, 王光硕^{1,2,3,*}

1. 河北工程大学材料科学与工程学院, 邯郸 056038;
2. 河北工程大学河北省改性塑料技术创新中心, 邯郸 056038;
3. 河北工程大学邯郸市新型无机非金属复合材料重点实验室, 邯郸 056038)

摘要: 磁性纳米粒子是一种发展迅速的新型功能材料, 在生物医学领域具有很高的应用价值, 由于其具有大的比表面积、强的磁响应性、良好的生物相容性和独特的超顺磁性, 被广泛应用于磁性分离、磁性转染、磁热疗、磁性药物靶向载体和纯化等方面。本文概括了磁性纳米粒子的制备方法和表面改性技术, 并论述了磁性纳米粒子在生物医学领域的应用与发展。

关键词: 磁性纳米粒子; 制备; 表面改性; 生物医学

DOI: 10.48014/pcms.20220401002

引用格式: 祁雄威, 耿佳宏, 司方方, 等. 磁性纳米粒子的合成及其生物医学应用研究进展[J]. 中国材料科学进展, 2022, 1(1): 11-17.

磁性纳米粒子是指尺寸为1~100nm的纳米级的粒子, 是纳米材料的一种, 具备磁导向性、尺寸效应、表面效应和一定的生物医学功能^[1]。磁性纳米粒子集多项功能为一体, 在磁共振成像^[2-5]、磁靶向药物载体^[6,7]、细胞分离技术^[8]、磁热疗^[9,10]、磁性转染^[11,12]等领域表现出重要的应用潜力。纳米粒子的尺寸、形貌和饱和磁化强度决定了磁性纳米粒子的特性, 所以近年来的研究重点是利用调节反应时间和温度、反应物的配合比和pH值来制备各种尺寸不同和形貌各异的磁性纳米粒子。

1 磁性纳米粒子的合成

磁性纳米粒子常见合成策略主要包括化学共沉淀法、水热合成法、微乳液法及其他合成方法(例如高温热分解法、微波法等), 其中共沉淀法、水热合成法和微乳液法最为常用。

1.1 共沉淀法

共沉淀法因其制备方法简单、操作方便和成本

低而被广泛应用于磁性纳米粒子的合成和应用。采用这种方法, 可以在室温或高温下合成磁性纳米粒子, 具有产量高、表面形貌和尺寸可控的特点。在共沉淀反应过程中可以通过改变反应温度、调整pH值、添加表面活性剂或者改变反应浓度来控制磁性纳米粒子的形貌和尺寸。Vigneswari等^[13]采用共沉淀法合成了超顺磁性铋取代镍铁氧体($\text{NiFe}_{2-x}\text{Bi}_x\text{O}_4$, $x=0.0\sim 1.0$)纳米粒子, 这种独特的超顺磁性是磁靶向药物载体成功应用的基本前提。Rahman等^[14]采用共沉淀法制备了纯NiO和掺杂不同浓度 Nd^{3+} 离子(0.01M、0.02M、0.02M和0.03M)的NiO纳米粒子。抗菌研究表明, NiO和Nd掺杂NiO纳米粒子比商业抗生素(红霉素)具有更大的抗菌作用。NiO和Nd掺杂NiO纳米粒子已用于治疗肺炎、血液感染、肾衰竭、伤口感染和尿路感染。在这种制备方法中, 纳米粒子具有更大的比表面积和更高的表面能导致纳米粒子的团聚现象。此外, 在合成和纯化步骤中, 保持纳米粒子的形貌均匀和单分散分布也是非常具有挑战性的

* 通讯作者 Corresponding author: 王光硕, wgs8136@163.com

收稿日期: 2022-04-01; 录用日期: 2022-04-21; 发表日期: 2022-06-28

课题。

1.2 水热合成法

水热合成法是一种常用的材料合成方法,在纳米材料制备中应用广泛^[15]。Irfan 等^[16]采用水热法合成覆柠檬酸(CA)和聚丙烯酸(PAA)的镍铁氧体(NiFe_2O_4)纳米粒子。与 Vivotrax 和 Piriciromod 这两种商业参考示踪剂相比, NiFe_2O_4 @PAA 的 MPS 结果显示出最小的弛豫时间和高分辨率(FWHM, MT)。结果表明,镍铁氧体具有成为 MPI 最佳示踪剂的巨大潜力。Thangamani 等^[17]采用经济高效的水热合成技术合成了铜氧化物(CuO)纳米粒子,并且利用合成的 CuO 纳米粒子制备了用于检测挥发性有机化合物的化学电阻传感器。结果表明,基于 CuO 纳米粒子的化学电阻传感器是定性检测 BTEX 化学蒸汽(即苯、甲苯、乙苯和二甲苯)的理想方法。Al-Nahrain^[18]采用水热法制备了氧化铁($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)纳米颗粒,制备的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒具有窄的粒径分布和均匀形貌,其平均直径在 90 nm 左右。他们测定了 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米颗粒对细菌、寄生虫、肿瘤细胞系和正常细胞的生物相容性,结果表明这类纳米粒子有望在生物医学领域获得重要的临床应用。水热法在试剂的反应过程中,产品的形貌控制更容易,结晶度更高。此外,在高温高压条件下,也可以形成亚稳态相和独特的凝聚相。

1.3 微乳液法

微乳化法利用两种液体的不混溶特性,经过一系列的乳化步骤生成磁性纳米粒子的一种两相合成法。Nayeem 等^[19]采用多步法利用 P(NIPAm-co-AMPTMA)对氧化铁纳米粒子进行表面修饰来提高其在水介质中的胶体稳定性以及药物-纳米颗粒的相互作用。Firoozeh 等^[20]研究开发了一步改性反微乳液法生产羟基磷灰石-镁铁氧体($\text{HA-Mg-Fe}_2\text{O}_4$)纳米复合材料的创新合成工艺,并研究了煅烧温度对生产样品给药行为的影响。Wang 等^[21]采用反向微乳液法制备了一种掺杂荧光染料的硅涂层的纳米金聚集体,这种复合纳米颗粒由 SERS 的 SERS 核心和荧光的染料掺杂的硅壳组成,结果显示制备的样品具有显著的荧光特性和强烈的表面增强拉曼散射(SERS)信号。Lin 等^[22]在可控条件

下通过微乳液法成功制备了电活性 LiFePO_4/C 复合粉末,通过不同盐浓度的热解、亲盐平衡(HLB)值和有机表面活性剂的结构,对制备的 LiFePO_4 材料表面的一系列残留碳进行了表征。研究发现,适当的乳液条件和表面活性剂结构有利于制备的样品具有良好的电化学性能。

1.4 其他控制合成方法

科学技术日新月异、发展迅速,现代新兴技术在控制合成纳米粒子方面备受重视,例如热分解法、微波法等。热分解法是连续合成各种纳米粒子的一种实用的方法,它还可以对产生的粒子的直径进行智能调控。实现热分解的两种最基本的方法是“加热”和“热注入”。Rathore 等^[23]利用含锌化合物的热分解获得氧化锌纳米颗粒的方法。实验以碱性醋酸锌热分解氧化锌为基础。用衍生学法分析碱性二水醋酸锌,然后在选定的温度下退火 3 小时。前驱体在空气中加热分解,形成具有六边形结构的氧化锌。前驱体沉淀通过热分解转化为氧化锌。虽然热分解法在合成磁性纳米粒子方面有着较大的优势,但是通过这种方法生产的纳米粒子在应用之前需要进行费力的纯化步骤。此外,纳米粒子的有机可溶性限制了其在生物医学中的实际应用。Sarvin 等^[24]利用麦芽糖、果糖、葡萄糖等绿色封盖剂,成功合成了磁性 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Pr}$ 纳米复合材料。研究了绿色封盖剂(如麦芽糖、果糖和葡萄糖)、超声照射时间和超声功率等各种参数对纳米复合材料的尺寸和形状的影响。结果显示,制备的磁性纳米复合材料具有高稳定性、高效率 and 回收率的特点。表 1 总结了磁性纳米粒子各种合成方法的优缺点。

表 1 磁性纳米粒子常用合成方法的优缺点

Table 1 The advantages and disadvantages of synthesis methods of magnetic nanoparticles

方法	优点	缺点
共沉淀法	反应快速、反应条件温和可大批量生产	低重现性、尺寸分布差、表面易氧化
水热合成法	磁可控性、生态友好、优良的结晶度、在尺寸、形状方面具有优越的控制	高温和压力、较长的合成时间、封盖剂的吸附

续表

方法	优点	缺点
微乳液法	可控的粒子生长、成核和团聚高磁化值	残留表面活性剂、难以扩大生产规模
热分解法	高产量、高重现性、优越尺寸分布	有毒性、高温和压力的安全问题、在有机溶剂中的易溶解
微波	快速、低成本、低能耗、均匀的形状和尺寸分布对生物医学成像特别有用	慢反应动力学、需要复杂设备(微波反应器)

2 磁性纳米粒子的表面改性

分子化学通常被认为决定了磁性纳米粒子的结构以及它们的固有特性。控制合成过程中的反应变量(pH、搅拌速度、反应时间和温度等)成为合成磁性纳米粒子的关键考虑因素。通过表面改性可以制备出具有特殊性能和新型功能的磁性纳米粒子,现有的表面改性方法包括:化学接枝、表面涂层、配体交换法等。经过合适表面改性的磁性纳米粒子具有优异的水溶液分散性、高的胶体稳定性和良好的生物相容性,在生物医学领域具有重要的应用前景。

Takahashi 等^[25]设计了一种由 4 个天冬酰胺和一个丝氨酸残基重复单元组成的 100 个氨基酸作为磁性纳米粒子的表面修饰分子。用丝氨酸多肽对磁性纳米粒子表面进行修饰,可以减少磁性纳米粒子之间的磁耦合相互作用,降低其团聚效应。重要的是,当丝氨酸多肽作为单融合蛋白的连接物在纳米颗粒上显示蛋白 G 时,纳米颗粒获得了特异性结合靶细胞的能力,避免了非靶细胞的非特异性吸附。Shahbazi 等^[26]制备了不同尺寸(200、100、20 和 10nm)的氧化铁磁性纳米粒子,并在温和的条件下采用不同类型的涂层(聚乙二醇、D-葡萄糖和二氧化硅)对其表面进行改性。实验进一步对不同种类的人肉瘤细胞系摄取的安全性进行了研究,发现合成的表面包覆磁性纳米粒子可以被滑膜肉瘤和脂肪肉瘤细胞系安全吸收,但是对纤维组织细胞瘤和纤维肉瘤具有高细胞毒性。因此,采用合适的表面改性剂对磁性纳米粒子表面进行改性,有目的地去改变磁性纳米粒子表面物理化学性质,赋予磁性纳米粒子新的功能,对于拓展磁性纳米粒子的应用具

有重要的意义。

3 磁性纳米粒子的生物医学应用

磁性纳米颗粒因其高表面积与体积比、低毒性、高靶向性等优点,是一种良好的纳米药物载体选择。磁性纳米颗粒正被用于磁热疗,以减少肿瘤体积和从目标区域根除癌细胞。细胞分离技术对于从不同分子库中分离特定的分子是有用的。磁性粒子具有成像特性,使这些粒子成为多模态治疗平台的绝佳选择,使我们能够同时进行诊断和治疗。磁共振成像就是利用粒子磁性特性的主要成像技术。本节我们简要讨论磁性粒子在生物医学领域中的不同用途。

3.1 磁共振成像

磁共振成像是一种无损技术,不需要样品制备或溶剂分离,具有快速、简单和仪器稳定性高的特点。Ahmed 等^[4]在排除了反应性、银屑病和肠炎相关的关节炎后,发现一组“未分化”的外周性椎关节炎(pSpA)仍然存在。这一组与反应性关节炎(ReA)有相同的遗传学、T 细胞库和细胞因子。于是,研究者们基于核磁共振的代谢组学提出了一种无假设的方法来研究和比较未分化 pSpA 和 ReA 的代谢途径。研究者们采用 ¹H 核磁共振对 19 个 ReA 和 13 个未分化 pSpA 的血清和滑膜液代谢组以及 18 例对照的血清代谢组进行分析。ReA/未分化 pSpA 的 10 种血清代谢物与对照组不同。这些患者的血清和滑膜液中有 6 种代谢物不同。通过代谢物集富集分析(MSEA)确定了改变的代谢途径。比较 ReA 和未分化 pSpA 的血清和滑膜液代谢组。MSEA 确定了患者和对照组之间不同的 5 种途径,以及患者血清和滑膜液之间不同的 5 种途径。最终的实验结果:相似的免疫代谢途径提示 ReA 和未分化的 pSpA 的发病机制相似,它们应该作为一个单一的疾病实体进行研究。

3.2 磁靶向药物载体

磁靶向药物载体是通过外部磁场操纵负载药物的纳米载体到达体内靶区的一种方法。该方法具有提高药物疗效、减少神经系统疾病、缩小药物

剂量和降低副作用等优点,在癌症、神经系统疾病、突发性感音神经性听力损失等疾病的诊断和治疗中具有潜在的应用前景。Ma 等^[7]制备合成了一种智能磁靶向药物载体(MCNC/PAA),包括一个大约 100 nm 大小的磁性胶体纳米晶簇核和一个 pH 响应交联聚丙烯酸壳。有意思的是,壳中丰富的羧基使生成的 MCNC/PAA 药物载体通过中性溶液中与羧基的强相互作用,容易装载大量的抗肿瘤药物阿霉素(高达 44.6%)。他们的研究表明,MCNC/PAA 纳米载体是一个很有前途的多功能诊疗平台,可以用于构建具有磁靶向、MRI 跟踪和 pH 刺激的智能药物传递系统。

3.3 细胞分离技术

从外周血中分离癌细胞、细菌和病毒在癌症诊断、治疗监测和药物开发方面具有重要的应用价值,由针对癌细胞受体的抗体功能化的磁性粒子已被证明可以通过磁场梯度分离出这些实体。Unni 等^[8]通过工程化的磁性纳米颗粒并将其与微流体集成以计数肿瘤细胞来提高捕获效率和特异性。在分子氧存在下,通过油酸铁的半分批热分解合成了磁性纳米颗粒。这些颗粒对表达 EpCAM 的肿瘤细胞表现出高亲和力,而 EpCAM 阴性细胞的非特异性摄取可忽略不计。检测结果表明,对磁性纳米颗粒表面连续处理的全面描述,为抗 EpCAM 附着提供官能团,将有助于开发具有改进的特异性细胞结合和有限的非特异性相互作用的纳米颗粒配方。可以预计,工程纳米颗粒和微流体的整合可以用于有效地捕获和表征罕见的肿瘤细胞群,并可在未来扩展到循环肿瘤细胞。

3.4 磁热疗

磁热疗是一种无创的癌症治疗方法。磁热疗的工作原理是将肿瘤微环境温度升高到 41~47℃ 来诱导细胞凋亡。Gupta 等^[9]报道了羧甲基甜菊糖苷(CMS)修饰的磁性纳米粒子可以作为有效的磁热疗剂用于胶质瘤的治疗,结果表明,表面改性的磁性纳米粒子具有良好的水稳定性,在 359 kHz 和 188 Oe 强度的交变磁场作用下获得显著的比吸收率可达 209.25W/g。磁性纳米粒子通过抑制基质金属蛋白酶-2 和-9 的基因表达,进一步证明了其对

胶质瘤 C6 细胞具有显著的抗迁移和抗侵袭作用。此外,研究者在反复暴露于热疗后从胶质瘤细胞活力、治疗对细胞形态、细胞周期分布和氧化应激产生的影响等方面,评估即时和长期热疗治疗的影响规律。研究结果表明,CMS 修饰的磁性纳米粒子在磁热疗介导的胶质瘤治疗中具有良好的应用潜力。Ren 等^[10]采用化学沉淀法将四氧化三铁纳米粒子锚定在氧化石墨烯纳米片表面,制备出二维 GO/Fe₃O₄ 纳米复合材料,并引入抗肿瘤药物盐酸阿霉素(GO/Fe₃O₄-DXR)。实验研究了适用于安全交变磁场(80kHz,30kA/m)下的磁热疗治疗效果。此外,利用紫外-可见光谱对交变磁场存在下 GO/Fe₃O₄-DXR 的 DXR 的药物负载和释放行为进行了系统研究。

3.5 磁性转染

在过去的几十年里,基因传递在治疗癌症、骨关节炎和囊性纤维化等疾病方面取得了巨大的进展,最近也在组织工程应用方面进行了疫苗接种。Chang 等^[12]合成了一系列不同钙掺杂水平的单分散二氧化硅,使其能够调节再吸收,研究了从这些生物玻璃纳米粒子中生长出来的电刷和它们的一些物理化学性质,通过它们的钙含量和表面侵蚀,演示了控制这些纳米材料的电刷的释放,最后,他们在 SIRNA 敲除模型中量化了它们的有效性。因此,这些系统证明了设计基于生物可吸收的刷状基因传递载体的可行性。

3.6 磁性纳米粒子毒性

磁性纳米粒子实际应用时通常包含一个具有生物相容性涂层或聚合物包覆层。安全性是生物医学应用需要正视的一个问题,而毒性研究提供了关于这一问题的信息并为药物配方的开发提供了重要参考。因此,对磁性纳米粒子的毒性作用的研究是一个关键的研究领域,尤其是生物医学工程领域中。研究表明,未改性的磁性纳米粒子对免疫系统、神经系统、循环系统、消化系统、泌尿系统和生殖系统均有毒副作用。表 2 讨论了不同磁性纳米粒子对不同生理系统的毒性作用^[27]。

表 2 不同种类纳米粒子的基本生理系统毒性
Table 2 Toxicity in the essential physiological system for different types of nanoparticles

磁性纳米颗粒的类型	受影响的生理系统
氧化铁	循环,消化,内分泌,免疫,生殖,泌尿系统
氧化锌	循环,泌尿系统
钴铁氧体	循环,泌尿系统
超顺磁	神经系统
二氧化钛	免疫系统
氧化锆	消化系统
氧化钴	免疫系统
氧化锰	生殖,消化系统
金属氧化物	生殖系统

4 展望

磁性纳米粒子被广泛应用于生物医学领域的各个方面。磁性纳米粒子的最新发展实现了磁性纳米粒子的粒径可控、形貌可调和表面功能化,一定程度上解决了与磁性纳米粒子临床使用相关的诸多挑战。然而,磁性纳米粒子的低饱和磁化强度、粒子团聚和生物相容性仍然是科研人员需要密切关注的重要课题。磁性纳米粒子在生物医学领域的实际应用需要对复杂生物系统中磁性纳米粒子实际行为展开深入研究,这也将继续推动着科学家对磁性纳米粒子的制备、改性和毒性有更深刻的了解。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] Lee H, Kim D I, Kwon S H, et al. Magnetically actuated drug delivery helical microrobot with magnetic nanoparticle retrieval ability[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(17):19633-19647.
<https://dx.doi.org/10.1021/acsami.1c01742>.
- [2] Awadh A A, Gresley A L, Forster-Wilkins G, et al. Determination of metabolic activity in planktonic and biofilm cells of *Mycoplasma fermentans* and *Mycoplasma pneumoniae* by nuclear magnetic resonance[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):5650.
<https://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-84326-2>.
- [3] Khramtsov P, Barkina I, Kropaneva M, et al. Magnetic nanoclusters coated with albumin, casein, and gelatin: size tuning, relaxivity, stability, protein corona, and application in nuclear magnetic resonance immunoassay[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(9):1345.
<https://dx.doi.org/10.3390/nano9091345>.
- [4] Ahmed S, Dubey D, Chowdhury A, et al. Nuclear magnetic resonance-based metabolomics reveals similar metabolomics profiles in undifferentiated peripheral spondyloarthritis and reactive arthritis[J]. *International Journal of Rheumatic Diseases*, 2019, 22(4):725-733.
<https://dx.doi.org/10.1111/1756-185X.13490>.
- [5] Romaniuk J A H, Cegelski L. Peptidoglycan and teichoic acid levels and alterations in staphylococcus aureus by cell-wall and whole-cell nuclear magnetic resonance[J]. *Biochemistry*, 2018, 57(26):3966-3975.
<https://dx.doi.org/10.1021/acs.biochem.8b00495>.
- [6] Liu Y L, Chen D, Shang P, et al. A review of magnet systems for targeted drug delivery[J]. *Journal of Controlled Release*, 2019, 302:90-104.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.03.031>.
- [7] Ma W F, Wu K Y, Tang J, et al. Magnetic drug carrier with a smart pH-responsive polymer network shell for controlled delivery of doxorubicin[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(30):15206-15214.
<https://dx.doi.org/10.1039/C2JM31721D>.
- [8] Unni M, Zhang J, George T J, et al. Engineering magnetic nanoparticles and their integration with microfluidics for cell isolation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 564:204-215.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.092>.
- [9] Gupta R, Sharma D. (Carboxymethyl-stevioside)-coated magnetic dots for enhanced magnetic hyperthermia and improved glioblastoma treatment[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 205:111870.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111870>.
- [10] Ren M X, Wang Y Q, Lei B Y, et al. Magnetite nanoparticles anchored on graphene oxide loaded with doxorubicin hydrochloride for magnetic hyperthermia therapy[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(14):20686-20692.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.080>.
- [11] Lee M C, Seonwoo H, Jang K J, et al. Development of novel gene carrier using modified nano hydroxyapatite derived from equine bone for osteogenic differentiation of dental pulp stem cells [J]. *Bioactive Materials*, 2021, 6(9):

- 2742-2751.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.01.020>.
- [12] Chang L, Yan H, Chang J, et al. Cationic polymer brush-coated bioglass nanoparticles for the design of bioresorbable RNA delivery vectors[J]. *European Polymer Journal*, 2021, 156: 110593.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110593>.
- [13] Vigneswari T, Raji P, Thiruramanathan P. Magnetic targeting carrier applications of bismuth-doped nickel ferrites nanoparticles by co-precipitation method[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2021, 74(9): 2255-2265.
<https://dx.doi.org/10.1007/s12666-021-02312-8>.
- [14] Rahman M A, Radhakrishnan R, Gopalakrishnan R. Structural, optical, magnetic and antibacterial properties of Nd doped NiO nanoparticles prepared by co-precipitation method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 742: 421-429.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.298>.
- [15] 刘焕东, 莫尊理, 郭瑞斌, 等. 磁性纳米材料的控制合成研究新进展[J]. *化工新型材料*, 2016, 44(12): 1-3, 6.
<https://dx.doi.org/10.7502/j.issn.1674-3962.2016.04.07>.
- [16] Irfan M, Dogan N, Bingolbali A, et al. Synthesis and characterization of NiFe₂O₄ magnetic nanoparticles with different coating materials for magnetic particle imaging (MPI) [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 537: 168150.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168150>.
- [17] Gounder T J, Pasha S K K. Hydrothermal synthesis of copper oxide-nanoparticles with highly enhanced BTEX gas sensing performance using chemiresistive sensor [J]. *Chemosphere*, 2021, 277: 130237.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130237>.
- [18] Lafta S H, Taha A A, Farhan M M, et al. Biocompatibility study of α -Fe₂O₃ nanoparticles prepared by hydrothermal method [J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 26(9): 1950058.
<https://dx.doi.org/10.1142/S0218625X19500586>.
- [19] Nayeem J, Bari M A A A, Mahiuddin M, et al. Rahman. Silica coating of iron oxide magnetic nanoparticles by reverse microemulsion method and their functionalization with cationic polymer P (NIPAm-co-AMPTMA) for antibacterial vancomycin immobilization [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 611: 125857.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125857>.
- [20] Foroughi F, Hassanzadeh-Tabrizi S A, Bigham A. In situ microemulsion synthesis of hydroxyapatite-Mg-Fe₂O₄ nanocomposite as a magnetic drug delivery system [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, 68: 774-779.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.028>.
- [21] Wang Z Y, Zong S F, Chen H, et al. Silica coated gold nanoaggregates prepared by reverse microemulsion method; Dual mode probes for multiplex immunoassay using SERS and fluorescence [J]. *Talanta*, 2011, 86: 170-177.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2011.08.054>.
- [22] Lin J H, Chen J S. Synthesis and electrochemical characterization of LiFePO₄/C composites prepared by the microemulsion method [J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 62: 461-467.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2011.12.072>.
- [23] Rathore R, Harinkhere D, Kaurav N. Synthesis and characterization of ZnO nanoparticles by thermal decomposition method [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2100(1): 020198.
<https://dx.doi.org/10.1063/1.5098752>.
- [24] Mohammadi-Aghdam S. Sonochemical method for the preparation of magnetic nanoparticles employing green precursors and its composite with praseodymium (III) nanoparticles for photocatalytic degradation of rhodamine b [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, 29(7): 5702-5709.
<https://dx.doi.org/10.1007/s10854-018-8540-3>.
- [25] Takahashi M, Yoshino T, Matsunaga T. Surface modification of magnetic nanoparticles using asparagines-serine polypeptide designed to control interactions with cell surfaces [J]. *Biomaterials*, 2010, 31(18): 4952-4957.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.02.048>.
- [26] Shahbazi S, Wang X, Yang J L, et al. Synthesis and surface modification of magnetic nanoparticles for potential applications in sarcomas [J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(6): 1-19.
<https://dx.doi.org/10.1007/s11051-015-3065-7>.
- [27] Markides H, Rotherham M, Haj A J E. Biocompatibility and toxicity of magnetic nanoparticles in regenerative medicine [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 2012: 614094.
<https://dx.doi.org/10.1155/2012/614094>.

Synthesis and Biomedical Applications of Magnetic Nanoparticles

QI Xiongwei¹, GENG Jiahong¹, SI Fangfang¹,
ZHANG Chao¹, WANG Guangshuo^{1,2,3,*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Technology Innovation Center of Modified Plastics of Hebei Province, Hebei University of
Engineering, Handan 056038, China; 3. Key Laboratory of New Inorganic Nonmetallic
Composite of Handan, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Magnetic nanoparticles are a new type of functional material that develops rapidly and has high application value. Because of their high specific surface area, strong magnetic responsiveness, excellent biocompatibility and typical superparamagnetism, they have been widely used in the field of biomedical applications including magnetic separation, magnetic transfection, magnetic hyperthermia, magnetic targeting drug carrier and purification. In this paper, the preparative methods and surface modification techniques of magnetic nanoparticles were summarized, and the application and development of magnetic nanoparticles in the field of biomedicine were discussed.

Keywords: Magnetic nanoparticles; preparation; surface modification; biomedicine

DOI: 10.48014/pcms.20220401002

Citation: QI Xiongwei, GENG Jiahong, SI Fangfang, et al. Synthesis and biomedical applications of magnetic nanoparticles [J]. Progress in Chinese Materials Sciences, 2022, 1(1): 11-17.

Copyright © 2022 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

