**项目名称：**新型杂化纳米生物功能材料应用基础研究

**主要完成人：**樊海明、经光银、马沛、彭明丽、骆艳娥、刘晓丽、张欢、余宝智、李嘎龙

**樊海明**，1，西北大学化材学院教授，本项目关键学术思想的提出者、研究思路和方案的制定者。在涡旋磁氧化铁磁热疗、超小锰铁氧体磁共振T1造影、肿瘤治疗多模式磁诊疗一体化、有机无机杂化界面调控、新型杂化功能纳米材料等领域的研究均取得了创新性成果。是本项目中第1、2、4-7、9-20等18篇论文的通讯作者及2件授权发明专利的发明人。

**经光银**，2，西北大学物理学院教授，项目的主要参与者。对本项目的重要科学发现2和3均有创造性贡献。成功完成二维石墨烯材料的制备以及机械性能研究方面、钴铁氧体/石墨烯杂化材料制备和性能研究。是代表性论著3的共同通讯作者、代表性论著7、9、15和16的共同作者。

**马沛**，3，西北大学化工学院副教授，项目主要参与者。对本项目重要科学发现1和3有创造性贡献。将氧化亚铜纳米线介观晶体应用于气体和生物传感领域。如以它为载体的固定化酶显示出高于游离酶10倍的酶活，并用于多酚类物质的降解研究。是本项目第7、12、16、17、19等5篇论文的共同作者及专利ZL201210584034.0的发明人。

**彭明丽**，4，西北大学化材学院教授，项目的主要参与者。对本项目的重要科学发现1有创造性贡献。采用共沉淀法制备出10nm的超顺磁性氧化铁纳米颗粒，通过表面修饰右旋糖酐以及负载化疗药物阿霉素，实现对肿瘤细胞的有效治疗。是代表性论著8的第一作者、代表性论著2的共同作者。

**骆艳娥**，5，西北大学化工学院教授，项目的主要参与者。对本项目的重要科学发现1和3有创造性贡献。对纳米颗粒在生物体内代谢、纳米颗粒进入生物体内后的入胞和出胞机制，以及生物酶催化方面均有深厚的研究功底。是代表性论著2、7和19的共同作者。

**刘晓丽**，6，西北大学化材学院，项目的主要参与者。对本项目的所有重要科学发现均有创造性贡献。是代表性论著1、11、13、15的第一作者，代表性论著7的共同第一作者，代表性论著2、10、 12、 18 、19、 20的共同作者，专利ZL201210584034.0的发明人。

**张欢**，7，西北大学化材学院，项目的主要参与者。对本项目的重要科学发现1和3有创造性贡献。采用动态同步热分解法制备了单分散超小锰铁氧体纳米颗粒，并对其磁共振成像性能进行研究。是代表性论著2、11和19的共同作者。

**余宝智**，8，西北大学物理学院，项目的主要参与者。对本项目的重要科学发现2和3有创造性的贡献。制备了碳包覆多孔性氧化铁纳米粒，并对其电化学性能进行考察。代表性论著7、16、17、18、20等4篇论文的共同作者及专利ZL201510030906.2的发明人。

**李嘎龙**，9，西北大学化材学院，项目的主要参与者。对本项目的重要科学发现3有创造性贡献。成功制备了氧化亚铜纳米线介观晶体，并将其作为载体，固定化漆酶。其固定化漆酶的活性较游离酶提高了10倍以上，解释了固定化酶活提高的原因。是代表性论著19的第一作者。

**完成人合作关系说明：**

完成人樊海明、经光银、马沛、彭明丽、骆艳娥均为西北大学教师及生物功能纳米材料研究团队核心成员，上述人员已进行了长期的合作。 刘晓丽、张欢、余宝智、李嘎龙均为项目负责人樊海明教授的博士研究生。刘晓丽、余宝智已毕业，张欢、李嘎龙在读。

樊海明为本项目负责人，是本项目20篇代表性论文中第1、2、4-7、9-20等18篇论文的通讯作者，是ZL201210584034.0及ZL201510030906.2的主要发明人，是2015年度陕西省高等学校科学技术奖一等奖“新型有机无机杂化纳米生物功能材料的应用基础研究”的第一完成人。

经光银、马沛、彭明丽、骆艳娥、刘晓丽、张欢、余宝智、李嘎龙均为本项目骨干，分别为本项目中多篇研究论文的作者、专利发明人及获奖成果完成人，为系列新型有机无机杂化纳米生物功能材料的应用基础研究做出了重要贡献。

经光银为本项目第3、7、9、15、16等5篇论文的共同作者；马沛为本项目第7、12、16、17、19等5篇论文的共同作者及专利ZL201210584034.0的发明人；彭明丽为本项目第2、8等2篇论文的共同作者；骆艳娥为本项目第2、7、19等3篇论文的共同作者；刘晓丽为本项目1、2、7、10-13、15、18-20等11篇论文的共同作者及专利ZL201210584034.0的发明人；张欢为本项目第2、11、19等3篇论文的共同作者；余宝智为本项目第7、16、17、18、20等4篇论文的共同作者及专利ZL201510030906.2的发明人；李嘎龙为本项目第19篇论文的共同作者。

此外，经光银，马沛，骆艳娥，刘晓丽是2015年度陕西省高等学校科学技术奖一等奖“新型有机无机杂化纳米生物功能材料的应用基础研究”的合作完成人。

**主要完成单位贡献：**

西北大学在该项目立项、项目管理、组织协调、实施过程中给予了指导，并在人力，物力方面给予了大力支持，建立了研发平台，保证了该项目各项研究的顺利进行。

**项目简介：**

该研究属于物理化学研究领域，对新型有机无机杂化生物功能纳米材料展开的应用基础研究。

有机无机杂化纳米材料广泛存在于自然界动植物体内，发挥着重要的生物功能。人工合成杂化纳米材料已成为市场份额增速最快的生物医用材料之一。然而，早期合成的有机无机杂化纳米材料的生物学效应及应用功能存在诸多不足，如生物安全性不高、诊疗性能不能满足临床需求，负载药物生物利用率低等。本课题组针对这些问题，聚焦于有机无机功能纳米材料的合成制备机理、物理化学性质表征、以及生物医学及其他相关领域的应用，取得如下研究成果：1.首次研发并定义全新的生物医用涡旋磁溶胶，其既具有超顺磁溶胶中颗粒间弱的磁相互作用，又具备多畴体相磁颗粒优异的磁学性能，临床前研究证实其磁共振影像增强和磁热疗性能比传统的超顺磁溶胶提高了2个数量级；2.构建了新型有机无机界面，实现对生物功能纳米材料应用性能的高效调控，使得纳米诊疗剂磁共振信号增强四倍、磁热性能（比吸收速率）提高了70%以上，显著提升其诊疗性能；3. 研究了氧化亚铜纳米线介观晶体、二维石墨烯材料、铁钴氧化物/石墨烯杂化材料等新型杂化纳米材料的制备工艺，并且对其功能进行了进一步的研究：首次发现了全新的有机无机杂化纳米线介观晶体体系，阐明了其仿生物矿化过程的复合制备机理，并将其成功应用于气体和生物传感领域（如以它为载体的固定化酶展现出高于游离酶10倍的酶活性）。该系列研究成果不仅获得了多种新型生物医用功能良好的有机无机杂化纳米材料，如医用造影对比剂、热疗剂、智能载药体系、传感器等，还可为制备高效诊疗体一体化智能纳米制剂提供新的思路，同时拓宽生物传感的应用；通过可控的转移石墨烯，探索出一种不同层数定点转移技术，确立了单层石墨烯中缺陷态对弹性模量的影响，并通过微拉伸实现模量增强；以一锅法合成了铁钴氧化物/石墨烯杂化材料，该材料微波吸收性能的显著提高，可用于制造轻质高效的微波吸收装置。

系列研究成果发表在JACS、ACS Nano、Adv. Mater. Adv. Mater. Interfaces等一流期刊上，共发表SCI学术论文45篇（1区13篇，20篇代表性论文SCI总他引732次），出版英文学术著作章节1节，获得授权发明专利2件。培养博士生4名，硕士生6名。

**主要论文专注目录：**

1. Magnetic vortex nanorings: a new class of hyperthermia agent for highly efficient in vivo regression of tumors[J]. ***Advanced Materials***, 2015, 27(11): 1939-1944. **(一区 IF:19.791)**
2. Ultrasmall Ferrite Nanoparticles Synthesized via Dynamic Simultaneous Thermal Decomposition for High-Performance and Multifunctional T 1 Magnetic Resonance Imaging Contrast Agent[J]. ***ACS nano***, 2017, 11(4): 3614-3631. **(一区 IF:13.942)**
3. Stretch-Induced Stiffness Enhancement of Graphene Grown by Chemical Vapor Deposition. ACS Nano 7(2): 1171-1177 (2013). (一区 IF:13.942)
4. Reduced graphene oxide conjugated Cu2O nanowire mesocrystals for high-performance NO2 gas sensor[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134(10): 4905-4917. (一区 IF:13.858)
5. Electrically adjustable, super adhesive force of a superhydrophobic aligned MnO2 nanotube membrane[J]. Advanced Functional Materials, 2011, 21(1): 184-190. (一区 IF:12.124)
6. One-pot synthesis of CoFe 2 O 4/graphene oxide hybrids and their conversion into FeCo/graphene hybrids for lightweight and highly efficient microwave absorber[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(10): 5535-5546. (一区 IF:8.867)
7. Fabrication and structural optimization of porous single-crystal α-Fe2O3microrices for high-performance lithium-ion battery anodes. J. Mater. Chem. A, 2015, 3(32): 16544-16550 (一区 IF:8.867)
8. Dextran-coated superparamagnetic nanoparticles as potential cancer drug carriers in vivo, **Nanoscale**, 2015, 7, 11155-11162. **(一区 IF:7.367)**
9. Amplified spontaneous emission from single CdS nanoribbon with low symmetric cross sections[J]. ***Nanoscale***, 2012, 4(18): 5665-5672. **(一区 IF:7.367)**
10. Optimization of surface coating on Fe 3 O 4 nanoparticles for high performance magnetic hyperthermia agents[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(17): 8235-8244. (一区 IF:6.626)
11. Synthesis of Ferromagnetic Fe0. 6Mn0. 4O Nanoflowers as a New Class of Magnetic Theranostic Platform for In Vivo T1‐T2 Dual‐Mode Magnetic Resonance Imaging and Magnetic Hyperthermia Therapy[J]. ***Advanced healthcare materials***, 2016, 5(16): 2092-2104. **(一区 IF:5.11)**
12. Controllable synthesis of tetrapod gold nanocrystals with precisely tunable near-infrared plasmon resonance towards highly efficient surface enhanced Raman spectroscopy bioimaging[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2015, 3(37): 7377-7385. (一区 IF:4.543)
13. Magnetic nanoparticle-loaded polymer nanospheres as magnetic hyperthermia agents[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2(1): 120-128. (一区 IF:4.543)
14. Controlled synthesis of tellurium nanostructures from nanotubes to nanorods and nanowires and their template applications[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115(14): 6375-6380. (一区 IF:4.536)
15. Coating engineering of MnFe2O4 nanoparticles with superhigh T2 relaxivity and efficient cellular uptake for highly sensitive magnetic resonance imaging[J]. Advanced Materials Interfaces, 2014, 1(2). (二区 IF:4.279)
16. Hierarchical α-MnO2 Tube-on-Tube Arrays with Superior, Structure-Dependent Pseudocapacitor Performance Synthesized via a Selective Dissolution and Coherent Growth Mechanism. Advanced Materials Interfaces 3(8): 1500761 (2016). (二区 IF:4.279)
17. Large-Scale, Facile Transfer of Oleic Acid-Stabilized Iron Oxide Nanoparticles to the Aqueous Phase for Biological Applications[J]. Langmuir, 2017, 33(7): 1662-1669. (二区 IF:3.833)
18. MnO2/Au hybrid nanowall film for high-performance surface-enhanced Raman scattering substrate[J]. Applied Surface Science, 2015, 333: 78-85. (二区 IF:3.387)
19. Synthesis of Cu 2 O nanowire mesocrystals using PTCDA as a modifier and their superior peroxidase-like activity[J]. Journal of materials science, 2016, 51(8): 3979-3988. (二区 IF:2.599)
20. Large-scale synthesis of porous graphene through nanoscale carbothermal reduction etching[J]. Journal of materials science, 2015, 50(24): 7875-7883. (二区 IF:2.599)

**主要知识产权目录：**

1. 发明专利：一种T2加权磁共振成像造影剂及其制备方法，ZL201210584034.0，樊海明，刘晓丽，马沛
2. 发明专利：一种二氧化锰树枝状纳米阵列电极材料及制备方法，ZL201510030906.2，樊海明，余宝智，任兆玉

**客观评价：**

一、客观评价

（1）国际知名教授引用：本项目的20篇代表性论著共被他人引用752次，其中SCI他引732次。引用者中包括多名国际知名教授，例如美国国立卫生研究院“Theranostics”杂志主编Xiaoyuan Chen教授，美国威斯康星大学蔡伟波教授，美国著名德克萨斯大学西南医学中心Xiankai Sun教授, 中国科学院上海硅酸盐研究所施剑林教授，捷克帕拉茨基大学著名磁性纳米材料化学家Radek Zbořil教授，韩国蔚山科学技术大学化学工程学院Hyeon Suk Shin教授，美国佐治亚大学Marcus D. Lay教授，中国科学技术大学俞书宏教授，国际著名光化学家日本大阪大学Tetsuro Majima教授等。

二、对重要科学发现的评述

（1）对重要科学发现一新型医用氧化铁纳米材料的研究的评述：有关本项目发展的关于新型医用氧化铁纳米材料得到了国内外有同行的关注和评述。

1.1医用涡旋磁氧化铁的磁热疗应用基础研究。课题组在医用涡旋磁氧化铁及其磁纳米诊疗应用方面的一系列贡献已被国内外相关领域的专家所公认，相关研究论文受到广泛关注和肯定评价, 著名磁性纳米材料化学家，R. Zboril 在其综述文章Targeted drug delivery with polymers and magnetic nanoparticles: covalent and noncovalent approaches, release control, and clinical studies. Chemical Reviews 2016, 116, 5338-5431中以图和文字对本工作进行评述，在水热法制备α-Fe2O3纳米环和纳米圆盘，随后还原成磁赤铁矿也被报道在磁热疗和体内癌症治疗中表现出改善的反应。 虽然磁性纳米环没有装载任何药物，但它们在基于MCF-7细胞的鼠乳腺癌模型中的肿瘤内注射引起完全的肿瘤抑制。课题组受邀在Nanomedicine and Cancer （Science Publisher, 2012）一书中撰写“Magnetic Nanorings and Nanotubes for Cancer Detection and Therapy”章节，同时在国内期刊上撰写中文综述一篇（涡旋磁纳米颗粒-崭新的生物医用磁性纳米平台，生物化学与生物物理进展进展，42 (7), 2015）；在一系列生物医学工程国际会议上做邀请报告。课题组目前正通过与东南大学、协和医学院、华西医院等密切合作，努力推进涡旋磁氧化铁进入临床试验。

1.2 基于超小铁氧体的高效、低毒磁共振T1造影剂体系。美国国立卫生研究院Xiaoyuan Chen教授，美国威斯康星大学蔡伟波教授分别在其文章Multifunctional Theranostic Nanoparticles Based on Exceedingly Small Magnetic Iron Oxide Nanoparticles for T1-Weighted Magnetic Resonance Imaging and Chemotherapy. ACS Nano 2017, 11, 10992-11004，和Engineering of inorganic nanoparticles as magnetic resonance imaging contrast agents. Chemical Society Reviews 2017，46，7438-7468引用我们文章并给予高度评价，同时美国著名德克萨斯大学西南医学中心，先进成像研究中心主任，X. Sun教授在其综述文章(Drug Discov. Today, 2017, https://doi.org/10.1016/j.drudis.2017.08.003)对我们的工作给予肯定。索菲亚大学M. Nedyalkova 在其综述文章(Adv. Colloid Interfac., 2017, https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.003) 大篇幅报道了本工作，并给出充分肯定。

1.3 肿瘤治疗的多模式磁诊疗一体化研究(Advanced Healthcare Materials, 2016, 5, 2092-2104.）。课题组采用FeO和MnO双组分在纳米尺度的复合，制备了具有磁共振T1-T2信号双模式特性的Fe0.6Mn0.4O纳米花，更重要的是这种结构克服了传统纳米氧化铁难于同时具备T1特性与高磁热效应的难点，实现了高效的磁感应热治疗。在乳腺癌动物模型中，该纳米诊疗剂展现了双模式磁共振影像介导下的磁热疗性能, 相关结果发表在Advanced Healthcare Mater并受到Theranostics, Nano Research , Biointerphase等知名杂志相关诊疗文章的关注

（2）对重要科学发现二有机无机杂化界面调控研究的评述。

在磁共振造影剂方面我们采用mPEG-g-PEI分子修饰6 nm锰铁氧体表面，其横向弛豫率r2值为331.8 mM-1s-1，是目前所报道同尺寸磁核的超顺磁铁氧体造影剂的最高值。相关结果发表在Adv. Mater. Interfaces，1, 130006（2014），授权发明专利1件（ZL 201210584034.0）。该研究成果发表后受到广泛关注，被Wiley China在线报道。

在磁热疗剂方面，课题组的研究结果表明有机包覆界面可以直接调控其磁热转换效率, 从杂化界面调控出发，对同一纳米磁性材料的比吸收速率提高了70%以上(J. Chem. Mater. 22，8235, 2012 他引53次）。以此为思路，我们设计开发了高分子/磁性颗粒团聚颗粒，改善了分散颗粒在组织中的磁热损失，实现了在活体组织高效磁热疗（J. Mater. Chem. B, 2, 120-128，2014, 他引27次)。该系列工作后续被ACS applied materials & interfaces，Nanoscale等国际知名杂志相关文章引用。

针对纳米氧化铁磁共振成像和磁热疗应用提出的表界面优化策略为开发高性能纳米氧化铁诊疗剂提供了新的思路，受纳米功能材料领域世界著名化学家，新加坡国立大学曾华淳教授邀请撰写相关领域重要进展的综述1篇（Curr. Opin. Chem. Eng.，2014，4, 38-46），且相关研究成果受到了国际同行专家正面评价。

（3）对重要科学发现三新型杂化功能纳米材料研究的评述。

3.1 纳米线介观晶体(Mesocrystal) 的发明，命名和固定化酶特性研究。研究成果全文发表在J. Am. Chem. Soc.134，4905（2012，他引354次）。该工作入选ESI高被引论文，受到了广泛的追踪研究。韩国蔚山科学技术大学化学工程学院Hyeon Suk Shin课题组在J. Am. Chem. Soc.，美国佐治亚大学Marcus D. Lay教授、南京工业大学刘晓琴教授、中国科学技术大学俞书宏教授在J. Am. Chem. Soc， Scientific Report发表的论文以及国际著名光化学家日本大阪大学Tetsuro Majima教授发表的Nature Communication论文中正面引用。该介观晶体被进一步拓展到了杂化固定化酶的应用，其固定化漆酶的活性较游离酶提高10倍以上，为有机无机杂化体系的应用研究提供了一个新的视角（J. Mater. Sci., 51, 3979-3988, 2016, 他引4次）。

3.2 二维石墨烯材料机械性能研究。课题组通过可控的转移石墨烯，探索出一种不同层数定点转移技术，确立了单层石墨烯中缺陷态对弹性模量的影响，并通过微拉伸实现模量增强。在对单层石墨烯弹性弯曲基础上，定点转移双层石墨烯，构建了层间无残留杂质的双层结构，并测定了机械强度，揭示了两层石墨烯间相互作用对机械强度的增强作用，首次测定了双层石墨烯极限机械强度。利用单层石墨烯包裹原子力探针。在实现原子级别形貌成像基础上并极大改善了当前导电原子力针尖的耐磨性，该结果为石墨烯作为导电包裹着高分辨生物成像上构建了可比拟金刚石针尖的高可靠性与高强度成像工具手段。相关成果发表在ACS Nano 7, 1171-1177, (2013，他引17次)，受到了包括Science，Nature Communications，Advanced Materials在内的国际顶级杂志的引用。

3.3 铁钴氧化物/石墨烯杂化材料及性能研究。课题组在H2/NH3混合气还原环境中，以一锅法合成了铁钴氧化物/石墨烯杂化材料，可作为一个理想制造轻质高效的微波吸收装置的材料。（J. Mate. Chem. A, 3, 5535-5546, 2015, 他引117次），该工作入选ESI高被引论文。

**知情同意证明：**

见附件。

**科学意义和价值：**

杂化纳米生物功能材料广泛存在于生物体内并且发挥着重要的功能。人工合成的、具有良好生物学相容性的有机无机杂化纳米材料，因其具有丰富的诊疗功能，且与生物大分子相匹配的尺寸，在医用造影剂、热疗剂、生物传感器等生物医学领域极具应用价值。目前，人工合成杂化纳米材料已成为市场份额增速最快的生物医用材料之一。然而，早期合成的有机无机杂化纳米材料的生物学效应及应用功能存在诸多不足，如生物安全性不高、诊疗性能不能满足临床需求、有机无机杂化界面作用机制不清楚、负载药物生物利用度较低，副作用大等。这些缺陷已阻碍了纳米生物功能材料的医疗转化，也是新一代生物医用纳米材料的开发和应用中亟待解决的难题。

针对临床磁共振影像诊断需求，发展高效、低毒的磁共振纳米造影剂是磁纳米医学和分子影像领域的热点方向。本课题组研发了医用涡旋磁氧化铁磁溶胶，既有超顺磁颗粒弱的磁相互作用，又具备多畴磁性颗粒优异的磁学性能，在磁共振影像增强和磁热疗性能比传统超顺磁磁流体显著提高一个数量级；同时其剂量由传统的5-10 mg/Kg降低到了0.5 mg/Kg，显著减少了大剂量带来的毒副作用。目前国内外临床使用T1 造影剂主要由钆和锰配合物构成，毒副作用较大。课题组发明了一种普适的动态同步热分解法制备单分散超小尺寸（小于4 nm）磁性铁氧体纳米颗粒的方法。该超小锰铁氧体纳米颗粒T1弛豫率高达8.43 mM-1s-1，是商用造影剂Omniscan的2倍，其血管与肝脏的成像性能可比肩商用造影剂Omniscan和Primovist。由于超小颗粒易被肾小球过滤、易降解等特点，可有效降低其毒性。此外，课题组复合纳米FeO和MnO双组分的成像性能，制备了磁共振T1-T2信号双模式特性的Fe0.6Mn0.4O纳米花；更重要的是这种结构克服了传统纳米氧化铁难于同时具备T1特性与高磁热效应的难点，可实现高效的磁感应热治疗。

表/界面对纳米材料生物安全性、代谢途径、诊疗应用性能发挥着不可忽略的影响。针对特定的诊疗应用设计并有效利用界面，是研发生物医用纳米材料的关键。从界面调控出发，针对磁性纳米颗粒在造影剂和热疗剂上的应用，课题组采用mPEG-g-PEI分子修饰表面，构建了崭新的杂化界面——多“纳米笼”的界面层，同时赋予颗粒表面正电性有利于细胞吞噬（提高2.4倍），实现了共振信号和磁热性能的直接调控及增强。这个多“纳米笼”界面可显著减弱受磁核诱导局域磁场影响的水分子扩散，从而有效增强磁共振信号（提高4倍），其中纵向弛豫率r2值（331.8 mM-1s-1）是目前所报道同尺寸磁核的超顺磁铁氧体造影剂的最高值。

石墨烯因其很大的弹性模量与强度，常用于开发新型杂化功能材料。课题组利用氧化还原石墨烯为改性剂，制备并命名了全新的有机无机杂化的氧化亚铜纳米线介观晶体。该介观晶体以一维氧化亚铜纳米线功能材料为基本单元，易于实现内部结构与外部形貌可调控生长，具有许多独特的物理化学性质、较好的机械强度及热稳定性，有望在光学、传感器、催化等多个领域应用。同时，利用高强度单层石墨烯包裹原子力探针，既实现原子级别高分辨生物成像又极大改善了当前导电原子力探针尖的耐磨性；在对单层石墨烯弹性弯曲基础上，定点转移双层石墨烯，构建了层间无残留杂质的双层结构。首次测定了双层石墨烯极限机械强度，揭示了两层石墨烯间相互作用对机械强度的增强作用机制。此外，课题组在H2/NH3混合气还原环境中，以一锅法合成了铁钴/石墨烯杂化材料，该杂化材料结合了对金属和石墨烯的高电导率以及FeCo高的磁晶各向异性，显著提高了其微波吸收性能。

该系列研究不仅极显著提高了生物纳米功能材料的安全性不高、诊疗性能、负载药物的生物利用度等，还阐明了有机无机杂化界面的作用机制，为功能生物纳米材料的特异化诊疗奠定了材料、理论与方法基础。