

## 项目公示信息（自然科学奖）

一、项目名称：柔性智能载体材料的设计与合成及其应用研究

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

提名意见：本项目从柔性智能载体材料的设计合成及其应用出发，开展了环境响应型嵌段共聚物载体材料、功能性聚合物-无机复合材料、纳米复合材料的相关研究。设计合成了环境响应型嵌段共聚物载体材料作为固定化酶的载体材料，建立了利用双亲嵌段共聚物可逆性构象变化调控酶活性的方法，构建了酶均相催化与异相分离固定化体系，为工业催化中提升生物酶稳定性与回收率提供了新的途径；建立了合成聚合物-无机复合材料的新方法，揭示了聚合物-无机复合载体药物定向可控释放机制，为难溶性药物、大分子药物给药体系的建立提供理论依据；建立了高效合成纳米复合材料的新方法，实现了纳米粒子的形态、尺寸和分布的有效控制，在纳米技术、生物、医药等领域有着广泛的应用前景和巨大的价值。

本项目研究成果在《J. Mater. Chem.A》、《Mater.Sci.Eng.C》、《Compos. Part B-Eng》、《J. Colloid Interface Sci》、《Surf. Coat. Tech.》等国际顶级刊杂志发表代表性研究论文 5 篇，WOS 核心合集引用 109 次，他引 99 次。项目成果在高分子化学、生物学、医学等重要领域具有巨大应用潜力，有望促进工业催化、生物医药和纳米材料等学科的发展。

推荐材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特推荐为陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

本项目属于化学化工领域高分子材料化学方向的应用基础研究。在国家自然科学基金（51373093）的资助下，从柔性智能载体材料的设计合成及其应用的研究角度出发，分别开展了环境响应型嵌段共聚

物载体材料、功能性聚合物-无机复合材料、纳米复合材料等多方面的研究。主要的研究内容如下：（1）环境响应型嵌段共聚物的设计与合成、自组装行为及固定化酶性能研究；（2）功能性聚合物-无机复合载体材料的设计与合成及药物控释体系性能研究；（3）纳米复合材料的设计、合成及性能研究。

该成果的科学发现点及科学价值如下：

（1）环境响应型嵌段共聚物的设计与合成、自组装行为及固定化酶性能研究：发现了合成主客体超分子体系的新方法，揭示了双亲链段在溶液中的动力学机理，提出了有效控制酶与载体结合位点的方法，揭示了双亲嵌段共聚物固体化酶底物传质新机理，建立了利用双亲嵌段共聚物可逆性构象变化调控酶活性的新方法，构建了酶均相催化与异相分离固定化体系，为工业催化中提升生物酶稳定性与回收率提供了新的思路。（*J. Mater. Chem. A.* 2015, 3: 17098-17105; *Surf. Coat. Tech.* 2015, 271: 2-7; *Biochem Eng.J.* 2017, 121:188-195; *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018, 57(2): 559-567.）

（2）功能性聚合物-无机复合载体材料的设计与合成及药物控释体系性能研究：建立了简易合成聚合物-无机复合材料的新方法，构建了高载药量、主动靶向给药纳米体系，揭示了药物的定向可控靶向释放的机制，该靶向给药体系为解决脂溶性药物、大分子药物水溶性差、生物利用率低等问题提供了新的途径，对于毒副作用较大的抗肿瘤药物的运载具有巨大的应用潜力。（*Compos. Part B-Eng.* 2013, 54: 194-199; *Mater. Sci. Eng. C.* 2018, 87: 1-9; *Appl. Surf. Sci.* 2012, 258: 5080-5085; *Surf. Coat. Tech.* 2015, 271:2-7.）

（3）纳米复合材料的设计、合成及性能研究：建立了高效简易合成纳米复合材料的新方法，实现了纳米粒子的形态、尺寸和分布的有效控制，该研究在纳米技术、电子技术、生物传感、生物医药等领域有着广泛的应用前景和巨大的应用价值。（*J. Colloid Interface Sci.* 2008, 324, 216-219; *Colloid. Surf. A.* 2008. 317: 705-710.）

本项目研究成果在《*J. Mater. Chem.A*》、《*Mater.Sci.Eng.C*》、《*Compos. Part B-Eng*》、《*J. Colloid Interface Sci*》、《*Surf. Coat. Tech.*》

等国际顶级期刊杂志上发表代表性研究论文 5 篇，WOS 核心合集引用 109 次，他引 99 次。本项目共发表研究论文 24 篇（含代表性研究论文 5 篇），WOS 核心合集引用 314 次，他引 291 次。受到了国内外学术界的较高关注，充分说明了本项目研究工作的影响度。

#### 四、客观评价

##### 1. 学术性评价意见

###### (1) 科学发现点 1 的代表性评价

国家杰出青年基金获得者、长江学者、浙江大学材料科学与工程学院的高长有教授等人指出项目组提出的方法可有效调节胶束的粒径 (Due to the existence of a pH-responsive guest polymer containing PMAAc, the size of the micelles changed from 1250 nm to 120 nm when the pH value was increased from 2.0 to 5.4 (at 20°C).[39]) , 其中[39]为代表性论文 1。

韩国先进科学技术研究所、化学与生物分子工程系 Bumjoon J. Kim 教授等人借鉴项目组的测试方法对所合成材料 pH 响应性聚合物所修饰的 MoS<sub>2</sub>纳米片进行了 DLS 表征。 (We note that the Hd of the F-MoS<sub>2</sub> at pH 6.0 from the DLS measurements might not reflect the actual size of the grafted polymers but is much overestimated one because of the expansion of the ionized polymer in the aqueous solution.[16,52]) , 其中[52]为代表性论文 1。

印度 Birla 技术与科学学院纳米医学研究实验室的 Swati Biswas 教授在一篇关于聚合物胶束用于癌症治疗的综述中指出我们的多重刺激响应聚合物胶束对于药物靶向治疗起到了重要的推动作用。

( Dual or multi-stimuli-responsive micelles were also prepared to improve cancer targeted drug delivery [171–175]. Dual stimuli, temperature and pH-responsive polymer was prepared by sequential grafting of pNIPAAm and 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) into polyglutamic acids (pGlu) backbone [176] ) , 其中[175]为代表性论文 2。

###### (2) 科学发现点 2 的代表性评价

香港理工大学的 P.L. Lam 教授和意大利费拉拉大学的 R. Gambari 教授等人的综述引用项目组对聚乳酸的结论 (However, the hydrophily of PLA is unsatisfactory, resulting in a slow decomposition rate.[211]) , 其中[211]为代表性论文 3。

哈尔滨工业大学 Quanfu Wang 教授借鉴了本项目组的实验方法成功设计并合成了可回收的磁性纳米颗粒，并用于嗜冷细菌 ANT206 的固定化并用于硝基芳香族化合物的低温生物降解。 (Due to the superparamagnetic properties of  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{DA}$ , these nanocarriers were easily separated and collected to the vessel wall in 30 s by means of the externally applied magnetic field .  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$  (Zhou et al. 2015),  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2@\text{CMC}$  (Lei et al. 2015) and  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{Cu}_2\text{O}-\text{Ag}$  (Ebrahimzadeh et al. 2019) also displayed the same characteristic.) , 其中(Lei et al. 2015)为代表性论文 4。

### (3) 科学发现点 3 的代表性评价

克里特国际研究中心、先进材料研究所 Georgios N. Karanikolos 教授等人以项目组所研究的用双亲嵌段聚合物作为模板的银纳米颗粒为借鉴研究了聚合物包裹银纳米粒子的抗菌行为。 (To this extent, a variety of BCs have been used as templates for growth of silver nanoparticles, such as polystyrene-*b*-poly-(acrylic acid),[24]) , 其中[24]为代表性论文 5。

德谟克利特国家研究中心，先进材料、物理化学过程、纳米技术和微系统研究所的 Georgios N. Karanikolos 教授肯定了项目组提出的用两亲嵌段共聚物一步法合成银纳米粒子的制备方法，并指出这种银纳米粒子具有结构稳定，性能良好。 ( Poly(ethylene oxide)-*b*-Poly(propylene oxide) Amphiphilic Block Copolymer-Mediated Growth of Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Behavior[24]) , 其中[24]为代表性论文 5。

## 2. 曾获科技奖励情况

2019 年获得陕西高等学校科学技术奖二等奖



五、代表性论文专著目录（不超过 8 篇，其中代表作论文不超过 5 篇）

序号	论文专著名称	刊名	作者	第一完成单位	年卷页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	SCI他引次数	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Synthesis of a smart Janus-like supramolecular polymer based on the host-guest chemistry and its self-assembly	Journal Material Chemistry A	Long Yang, Yinzhou Guo, Zhongli Lei	陕西师范大学	2015 年 3 卷 17098–17105 页	201507	雷忠利	杨龙	杨龙, 郭寅周, 雷忠利	7	12	是
2	Synthesis of temperature, pH, light and dual-redox quintuple-stimuli-responsive shell-crosslinked polymeric nanoparticles for controlled release	Materials Science and Engineering C	Kehu Zhang; Jiangtao Liu; Yinzhou Guo; Yan Li; Xiao Ma; Zhongli Lei	陕西师范大学	2018 年 87 卷 1-9 页	201804	雷忠利	张克虎	张克虎, 刘江涛, 郭寅周, 李燕, 马肖, 雷忠利	20	23	是

3	Preparation and characterization of hollow Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> @PEG-PLA nanoparticles for drug delivery	Composites Part B: Engineering	Haijuan Deng, Zhongli Lei.	陕西师范大学	2013 年 54 卷 194–199 页	201311	雷忠利	邓海娟	邓海娟,雷忠利	38	41	是
4	Preparation and characterization of hollow magnetic composite nanoparticles for immobilized pectinase	SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY	Ming Lei ; Dong Hu, Hong Yang, ZhongLi Lei	陕西师范大学	2015 年 271 卷 2-7 页	201506	雷忠利	雷鸣	雷鸣,胡东,杨红,雷忠利	10	11	是

5	One-step synthesis of silver nanoparticles by sonication or heating using amphiphilic block copolymer as templates.	Journal of Colloid and Interface Science	Zhongli Lei, Liang Zhang, Xiangyu Wei.	陕西师范大学	2008 年 324 卷 216-219 页	200809	雷忠利	雷忠利	雷忠利, 张亮, 魏向禹	17	17	是
---	---	--	--	--------	---------------------------	--------	-----	-----	--------------	----	----	---

## 六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
雷忠利	1	无	教授	陕西师范大学	陕西师范大学	环境响应型嵌段共聚物设计与合成及应用、聚合物-无机复合材料的设计与合成及应用、纳米复合材料设计与合成及性能研究，对科学发现点 1、2、3 做出创造性贡献。(见代表性论文 1-5)
刘江涛	2	无	讲师	陕西中医药大学	陕西中医药大学	环境响应型嵌段共聚物的合成及自组装行为研究、聚合物-无机复合材料的固定化酶性能研究，对科学发现点 1、2 做出创造性贡献。 (见代表性论文 2)
杨红	3	无	副教授	陕西师范大学	陕西师范大学	环境响应型嵌段共聚物固定化酶的活性研究、聚合物-无机复合材料的药物载体的缓释性能研究、纳米复合材料制备的条件优化等，对科学发现点 2 做出创造性贡献。 (见成果论文 4)

## 七、主要完成单位情况

### 1) 陕西师范大学

作为本项目的依托单位组织并完成了项目策划，专利申报、项目立项等工作。为项目的顺利实施提供了人力资源，共有 3 人参与了本课题的研究。提供了本项目研究所需的设备、能源、场地、时间及图书资料等。完成整个项目的研究成果。

### 2) 陕西中医药大学

协助完成了项目策划，专利申报、项目立项等工作。为

项目的顺利实施提供了人力资源，共有 1 人参与了本课题的研究。完成整个项目的一部分研究成果。

## 八、完成人合作关系说明

雷忠利与刘江涛合作完成了论文 1 篇： Synthesis of temperature, pH, light and dual-redox quintuple-stimuli-responsive shell-crosslinked polymeric nanoparticles for controlled release; 杨红为雷忠利老师的长期合作伙伴，为项目提供生物方面的实验技术支持，与雷忠利合作完成了论文 1 篇： Preparation and characterization of hollow magnetic composite nanoparticles for immobilized pectinase。