

2020 年度湖南省科学技术奖推荐公示内容

自然科学奖

项目名称：涂层/薄膜材料热力化耦合失效与调控机理

提名意见：

涂层/薄膜材料热力化耦合力学是固体力学、物理力学的挑战性前沿研究领域，同时也是航空航天装备领域面临的重大工程问题。该项目经过十多年深入研究，在涂层/薄膜材料热力化耦合力学领域取得了原创性的重要进展，建立了界面氧化、高黏性固体介质熔融物腐蚀、离子输运的热力化耦合理论，设计了高温-力-氧、高温-力-腐蚀、力-电-腐蚀等试验与失效过程定量表征方法，揭示了氧化局域化力化耦合等一系列基本规律，发现了一些新的物理现象，提出了材料到结构的性能调控方法，拓展了多场耦合力学与材料力学的基本理论和实验方法。

项目 8 篇代表作发表在 Int J Plasticity、Mech Mater 等力学领域著名期刊，他引 598 次，SCI 他引 556 次，获得方岱宁院士、国家特聘教授郑仰泽等力学和材料领域的积极评价和引用。成果取得突出的工程应用效果，提升涂层热循环性能 2 个数量级，服役寿命 1.6 倍；制备出功率密度相同重量仅为同类产品 1/10 的电池。项目培养了国家杰青（2 人）、国防卓青、青年长江学者、青年拔尖、青年千人、全国百篇优秀博士论文提名等人才队伍。

提名该项目为湖南省自然科学奖 一 等奖。

项目简介：

项目属于界面力学与表面力学，是固体力学和涂层/薄膜材料学的交叉领域。

涂层/薄膜材料已广泛应用于航空、航天、航海等领域，在高温、氧化、腐蚀、化学反应等极端环境下，对涂层/薄膜热力化耦合失效行为研究提出迫切需求。面临的挑战在于：新物质生长、界面演变、失效模式与驱动机制复杂多样，涉及大变形、强非线性等，演变物理量与模型尚未建立；缺乏热力化耦合实验方法，损伤过程表征极为困难；耦合机理未知，性能调控没有依据。项目在国家自然科学基金杰青（2项）、重点等资助下，致力于涂层/薄膜材料热力化耦合模型、实验方法与机理研究，并通过863（2项）、湖南省科技重大专项、国防以及重点型号任务，将成果应用于航空发动机热障涂层、航天储能电池薄膜领域，解决热力化耦合机理不清、性能调控依据匮乏的实际问题。主要科学发现点如下：

(1) **热力化耦合理论模型与机理**。建立了界面氧化、高黏性固体介质熔融物腐蚀、离子输运等空天典型环境的热力化耦合本构与断裂模型，提出了微结构与损伤演变的四维重构（三维空间+时间）方法。克服了强非线性、大变形、多重耦合损伤等难题，实现了温度场、氧化物生长、高黏性介质渗透腐蚀、离子输运与变形场的耦合求解，发现了氧化局域化、腐蚀相变、屈曲失稳、界面褶皱等系列新现象，揭示了其力学与化学因素（如渗透、扩散、电解）的耦合机制。

(2) **热力化耦合试验与表征方法**。设计了高温-力-氧、高温-力-固体熔融物、高温燃气-腐蚀-冲蚀、力-电-腐蚀等热力化耦合试验方法，建立了耦合环境下裂纹与变形场实时定量表征方法，发现了裂纹模式仅依赖应力波频率的重要新现象，掌握了裂纹形成准则与定量演变规律；提出了热力屈曲与微尺度压痕表征方法，克服唯一性、高温原位加载与测试、尺度效应等难题，获得薄膜涂层与界面关键力学性能及其分布与演变规律。

(3) **热力化耦合失效机制图与调控机理**。建立了界面氧化、高黏性固体介质熔融物腐蚀、离子输运失效与材料性能、结构尺寸、环境之间的无量纲函数关系，构建了典型热力化耦合失效的机制图。在此基础上，提出了多孔核/壳纳米颗粒、界面粗糙度、孔隙率等微结构调控方法，实现材料层级的性能调控。进一步提出了考虑环境、性能分散性的失效概率预测方法，提炼出脆性涂层力学性能分散度调控指标，实现了结构层次的性能与稳定性提升。

项目在力学领域顶级期刊《J. Mech. Phys. Solids》、《Int. J. Plasticity》、《Mech Mater》等刊物发表论文69篇，出版专著3部。8篇代表作他引598次，SCI他引556次。理论与方法获得方岱宁院士等力学专家积极评价和引用。并在航空发动机热障涂层、储能电池领域11个单位应用，提升涂层热循环性能2个数量级，服役寿命1.6倍；制备出功率密度相同重量仅为同类产品1/10的电池，为航天储能工程提供理论与产品支持。

项目培养第一完成人入选国防卓青、青年长江学者、青年拔尖；第二和第五完成人获国家杰青资助，第三完成人获青年千人、全国百篇优秀博士论文提名奖，第四和第六完成人获湖南省优秀博士论文、并分别获省杰青和省优青资助。

客观评价：

1.学术界引用与评价情况

针对科学发现1：

(1) 热障涂层领域知名专家：国家特聘教授肖平教授，宫声凯院士、郭洪波教授，美国金属学会热喷涂名人堂奖获得者李长久教授等，多次引用和评述项目在热力化耦合模型与机理方面的工作。如肖平教授在 *Corros. Sci.*, 2020, 167: 108478 指出：“According to a recent study, such splat separations should be caused by the large stresses and the thermal-mechanical-chemical coupling effect during CMAS corrosion (see Ref. [35] for detailed mechanisms of this phenomenon)”；宫声凯院士在 *Chinese J. Aeron.*, 2018, 31: 2306-2311 指出：“The damage mechanism under thermo-chemical and thermo-mechanical coupling effects between CMAS and TBCs has been investigated in detail¹¹.” 西安交通大学李长久教授在 *Ceram. Int.*, 2018, 44: 22556-22566 一文中，引用界面氧化与断裂耦合模型：“In this work, the crack behavior in TC and TGO is assumed to be dominated by mixed mode. A power law described below is used to control crack growth[65]”。其中，[44]为代表作 3，[54]、[65]、[35]、[11]为本项目其他论文。(见代表性引文 1)

(2) 中国科学院上海硅酸盐研究所 L. Wang 研究员(丁传贤院士团队)在热防护涂层失效机理的综述性论文(*J. Eur. Ceram. Soc.*, 2016, 36: 1313-1331)一文中引用该项目代表作 1、3 以及其他 5 篇文章，评述该项目在热防护涂层失效机理方面的模型、数值与实时定量表征方法。如“Zhu et al. [132] have investigated the interaction of surface cracking and interfacial delamination in TBCs under tension by using CZM”；“The failure behaviors of the coating when endured with three-point bending, four point bending and uniaxial axial tension have also been investigated using simulation and acoustic emission techniques[138-143]”。[132]为代表作 3，[133]为代表作 1]，[138-141、143]为本项目的其他文章。(见代表性引文 2)

(3) 国际著名力学专家、美国肯塔基大学郑仰泽教授（国家特聘教授），在研究电极材料失效机理的文章(*ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9: 3562–3569)，引用并以该项目离子输运耦合机理为论点，指出“锂电池电极的解体主要是由于电极材料的层裂分离而非活性材料颗粒的微裂纹所致”：Therefore, it is likely that disintegration of electrode, instead of cracking of silicon nanoparticle, is the main cause of degradation.³¹”。31 为代表作 4。(见代表性引文 3)

针对科学发现2：

(4) 德国亚琛工业大学的 S. Rezaei 教授在 *Int. J. Solids Struct.*, 2017, 121: 62-74 中评价：界面结合性能的先进屈曲表征方法。引文：“New methods, For example, Zhu et al. (2015) determined the adhesion energies of coatings by a compression test combined with a CZE.”。Zhu et al. 2015 为代表作 1。(见代表性引文 4)

(5) 中国科学院光电研究院 X. M. Chen、英国剑桥大学 C. Shaw 教授联合发表在 *Measurement*, 2019, 139: 387-402 关于涂层体系界面结合性能的文章中，引

用该项目 7 篇文章，指出屈曲、声发射对界面结合性能表征有突出贡献：“Zhu et al. [106] ...quantitatively analyzed the process of buckling-induced delamination using analytical modeling....Since 2010, numerous investigations into various aspects of coating technologies [151–156]”。[106]为代表作 1，[156]为代表作 2，151、152、157、158]为本项目声发射等方面的其他文章。(见代表性引文 5)

针对科学发现3：

(6) 美国 Texas A&M University 的 Ozkan 教授团队在 *Acta Physica Polonica A*, 2018, 134: 401 五次大篇幅引用本项目研究成果，正面论述从物理力学微观视角研究锂电池尺寸效应方面的重要性，同时借用我们的解析公式以及关键参数阐释临界尺寸(More recently, Ma et al. identified the necessary conditions for averting lithiation-induced fracture of Si anodes.... [5]. Ma et al. observed strong critical size.....[5])。[5] 为代表性论著 6。(见代表性引文 6)

(7) 中国科学院院士、北京理工大学方岱宁教授在材料微缺陷演化机理 *Journal of Power Sources*, 2018, 405: 101-105 的文章中，正面引用了代表性研究成果，用以说明硅纳米颗粒在锂化过程中临界尺寸研究的重要性：“Considerable efforts have been drawn to ascertain the critical size of various electrodes, including Si nanoparticles [16]”。[16]为代表性论文 4。(见代表性引文 7)

德克萨斯 A&M 大学 H. Liang 教授在综述 (*Adv. Energy Mater.* 2017, 7, 1602545) 中引用了项目 SEM 图，评价三维蛋黄壳微球结构容量衰减只有 0.7%：“Liu and co-workers prepared 3D uniform yolk-shell microspheres..... The Ostwald ripening process solid spherical yolks embedded by semitransparent shells of this sample. Owing to the better structure 0.7% as the capacity fading”。(见代表性引文 8)

2. 用户评价

项目是科学从国家重大需求的工程中来又回到工程中去典型案例，在11个单位应用，获得用户单位高度评价。举例如下：

(1) **北京金轮坤天特种机械有限公司**：在项目指导下，获得了热障涂层失效行为与综合性能的定量指标与优化方案，以此为依据研究出综合性能满足要求的热障涂层制备工艺与批生产技术，提供了关键技术支持。

(2) **中国航发170厂**：基于提出并获得的氧化层厚度、断裂韧性等评估指标，对涂层剥落机理进行了研究，为工艺方案改进提供了支持，支撑我公热障涂层热循环寿命迅速提升至2500多个循环，通过了用户和设计评审以及首件鉴定。

(3) **中国航发606所**：....获得了型号叶片热障涂层服役后的关键失效模式，揭示了涂层氧化局域化剥落、CMAS腐蚀相变以及热力屈曲剥落机制。

(4) **中国航发商用航空发动机有限责任公司**：为单晶涡轮叶片热障涂层研制起到重要支撑作用，列为我公司工艺研究中心的长期协作单位。

代表作及论文目录：

序号	代表作及论文名称/刊名/作者	影响因子	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年 月 日)	通讯作者 (含 共 同)	第一作者 (含 共 同)	国内作者	他引总次数	SCI 他引次数	知识产权是否归国内所有	是否代表作
1	Effects of growth stress in finite-deformation thermally grown oxide on failure mechanism of thermal barrier coatings/ Mechanics of Materials/ Qiang Shen, Li Yang, Yichun Zhou, Yueguang Wei, Wang Zhu	2.958	2017 年 114 卷 228 页	2017 年 11 月 06 日	杨丽, 周益春	申强	申强, 杨丽, 周益春, 魏悦广, 朱旺	16	16	是	是
2	Determination of interfacial adhesion energies of thermal barrier coatings by compression test combined with a cohesive zone finite element model/International of Journal of Plasticity/Wang Zhu, Li Yang, Jinwei Guo, Yichun Zhou, Chunsheng Zhou, C. Lu.	5.800	2015 年 64 卷 76 页	2015 年 01 月 12 日	杨丽 周益春	朱旺	朱旺, 杨丽, 郭进伟, 周益春	62	49	是	是

3	Critical silicon-anode size for averting lithiation-induced mechanical failure of lithium-ion batteries/ Rsc Advances/Zengsheng Ma Z, Tingting Li, Yongli Huang, J. Liu, Yichun Zhou, Dongfeng Xue	3.04 9	2013 年 20 卷 7398 页	2013 年 03 月 12 日	马增 胜, 周益 春	马增 胜	马增 胜, 李 婷婷, 黄勇 力, 刘 军, 周 益春, 薛冬 峰	60	58	是	是
4	Anisotropic Co3O4 porous nanocapsules toward high-capacity Li-ion batteries/ Journal of Materials Chemistry/ Jun Liu, Hui Xia, Li Lu, Dongfeng Xue	6.62 6	2010 年 20 卷 1506 页	2010 年 10 月 03 日	薛冬 峰	刘军	刘军, 夏慧, 薛冬 峰	152	148	是	是
5	Numerical study on interaction of surface cracking and interfacial delamination in thermal barrier coatings under tension/Applied Surface Science/Wang Zhu, Li Yang, Jinwei Guo, Yichun Zhou, Chunsheng Lu.	5.15 5	2014 年 315 卷 292 页	2014 年 10 月 26 日	杨 丽, 周益 春	朱旺	朱 旺, 杨 丽, 郭进 伟, 周益 春	37	33	是	是

6	Finite element simulation on thermal fatigue of a turbine blade with thermal barrier coatings/ Journal of Material Science and Technology, Li Yang, Qixing Liu, Yichun Zhou, Weiguo Mao, Chunsheng Lu	5.040	2014 年 30 卷 371 页	2014 年 05 月 23 日	周益春	杨丽	杨丽, 刘奇星, 周益春, 毛卫国	45	29	是	
7	Facile synthesis of NiCo ₂ O ₄ nanorod arrays on Cu conductive substrates as superior anode materials for high-rate Li-ion batteries/Crys- tengcomm /Jun Liu, Chunping Liu, Yanling Wan, Wei Liu, Zengsheng ma, Shaomin Ji, Yichun Zhou, Peter Hodgson. Yuncang Li	3.382	2013 年 15 期 1578 页	2013 年 06 月 12 日	刘军, 周益春	刘军	刘军, 刘春萍, 万艳玲, 刘伟, 马增胜, 籍少敏, 王金斌, 周益春	110	107	是	
8	Template-free solvothermal synthesis of yolk-shell V ₂ O ₅ microspheres as cathode materials for Li-ion batteries/ Chemical Communicati	6.164	2011 年 47 期 10380 页	2011 年 07 月 29 日	周益春, 薛冬峰	刘军	刘军, 周益春, 王金斌, 潘勇, 薛冬峰	116	116	是	是

	ons/ Jun Liu, Yichun Zhou,Jinbin Wang, Yong Pan, Dongfeng Xue										
合 计								598	556		

主要完成人情况：

姓名	排名	职务	职称	工作单位	完成单位	对项目技术创造性贡献
杨丽	1	副院长	教授	湘潭大学	湘潭大学	是该项目负责人和主要完成人，自 2002 年起，系统开展热防护涂层热力化耦合力学的理论、计算与实验研究，是 4 篇代表作的通讯作者，31 篇论文的第一或通信作者。对 3 个发现点做出了重要贡献，包括：(1)提出了界面氧化的热力化耦合理论模型与计算方法；(2)建立了热力化耦合环境下裂纹的声发射实时定量表征方法；(3)提出了基于考虑材料、结构、性能分散性的失效概率理论模型。该研究工作占本人工作量的 80%。
周益春	2	副书记	教授	湘潭大学	湘潭大学	是该项目主要学术思想提出者，针对热防护涂层、储能材料开展热力化耦合力学研究，是 6 篇代表作即 1~6 的通讯作者。对 3 个发现点做出了重要贡献，包括：(1)提出了高黏性固体熔融物介质的热力化耦合理论模型与计算方法；(2)设计了高温-氧-力、高温-固体介质-力等耦合实验方法；(3)提出破坏机制图与无量纲参数关联的学术思路。该研究工作占本人工作量的 80%。
刘军	3	无	教授	华南理工	湘潭大学 大连理工大学	是代表作 4、7、8 的主要学术思想提出者与完成人，对发现点 1、3 做出重要贡献，包括：(1)提出了离子输运的力学响应机制；(2)提出了多孔核/壳纳米颗粒设计方法，实现储能材料性能调控。该研究工作占本人工作量的 80%。
马增胜	4	无	教授	湘潭大学	湘潭大学	自 2005 年在湘潭大学攻读博士学位起参加该项目研究，是代表作 3 和 6 主要完成人，对科学发现 1、2、3 做出贡献。包括：(1)提出了离子输运的热力化耦合理论模型与计算方法；(2)建立了微尺度压痕表征；(3)建立了离子输运典型破坏模式的破坏机制图和无量纲关系。该研究工作占本人工作量的 60%。
薛冬峰	5	所长	教授	山东大学	中国科学	是该代表作 4、7、8 的通讯作者。对科学发现 3 做出贡献，通过掺杂、纳米化、构造中空结

					院 长 春 应 化 所	构、核壳结构，调控储能材料微结构。该研究工作占本人工作量的 60%。
朱旺	6	无	副 教 授	湘 潭 大 学	湘 潭 大 学	代表作 2 和 3 的第一作者。对科学发现 2 做出贡献，包括：(1)建立了热力化耦合环境下变形与损伤的数字散斑方法；(2)提出了热力屈曲表征方法。该研究工作占本人工作量的 80%。

主要完成人合作关系说明：

项目完成人周益春教授（湘潭大学）是本团队的学术带头人，是项目第一完成人杨丽教授、第四完成人马增胜教授、第六完成人朱旺副教授的博士生导师，是第三完成人刘军是周益春教授的博士后，与第五完成人薛冬峰教授（同时也是刘军的博士生导师），长期合作。

项目第一完成人杨丽是周益春团队的负责人，长期从事热障涂层热力化耦合失效机理的研究，是 69 篇文章中 31 篇文章的第一、通讯或主要作者，与周益春、朱旺共同发表 3 篇代表性论文，并均为通讯作者。

完成人刘军、马增胜是本项目的研究骨干，主要从事电池薄膜的热力化耦合与调控机理研究。其中，刘军与周益春教授共同发表代表性论文 3、7 和 8；完成人马增胜，与周益春教授共同发表代表性论文 3、7、8。

完成人朱旺，是杨丽、周益春教授共同指导的学生，共同发表代表性论文 1、2、5。

主要完成单位情况：

单位名称	湘潭大学				
排 名	1	法定代表人	李伯超	所 在 地	湖南
单位性质	学校	传 真	073158292003	邮政编码	411105
通讯地址	湖南省湘潭市湘潭大学				
联 系 人	刘文娟	单位电话	073158292063	移动电话	15200340210
电子邮箱	dsr@xtu.edu.cn				
对本项目科学发现的贡献：（限 600 字）					
从 2005 年开始致力于空天材料热力化耦合力学的研究，对三个科学发现均做出贡献。主要包括：(1)建立了空天典型环境的热力化耦合新理论与四维重构方法，发现了氧化局域化、腐蚀相变、屈曲失稳、界面褶皱等系列新现象，揭示了其力学与化学因素耦合机制。(2)设计了原位力-氧、力-腐蚀、力-电等热力化耦合试验方法，建立了热力化耦合失效过程的实时定量与关键性能表征方法，发现了裂纹模式仅依赖应力波频率的重要新现象，掌握了失效过程与关键数据。(3)建立典型破坏模式与材料、结构、环境之间的无量纲关联，构筑了典型空天材料热力化耦合失效机制图。在此基础上，实施了多孔核/壳纳米颗粒、界面粗糙度等材料调控，实现了结构部件的性能与稳定性提升。 是 8 篇代表作中 7 篇的第一完成单位，是成果应用于 11 个单位产生突出成效的实施单位，同时也为本项目国防卓青、国家杰青、省杰青、省优青等完成人的培养以及项目实施提供了条件。					
声明：本单位同意主要完成单位排名，遵守《湖南省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。 单位（盖章） 年 月 日					

单位名称	中国科学院长春应化所				
排 名	2	法定代表人	杨小牛	所 在 地	吉林
单位性质	非转制研究所	传 真	043185687300	邮政编码	130022
通讯地址	吉林省长春市人民大街 5625 号				
联 系 人	王晓明	单位电话	043185262193	移动电话	15843097233
电子邮箱	liujy@ciac.ac.cn				
对本项目科学发现的贡献：（限 600 字）					
在长期储能材料正极、负极材料的研究过程中，发现了离子输运诱导大变形、破坏的新现象，为离子输运-力耦合行为提供实验现象。基于离子输运-力耦合破坏机制图以及无量纲关系，提出了多孔核/壳纳米颗粒的微结构方法，揭示了小尺度单元减小离子扩散诱导应从而抑制电极材料开裂、粉化失效的机理，实现了储能材料电学、力学性能的协同优化，并制备出高性能正负极材料。					
声明：本单位同意主要完成单位排名，遵守《湖南省科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定，承诺遵守评审工作纪律，保证所提供的有关材料真实有效，且不存在任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵犯他人知识产权的情形。如有材料虚假或违纪行为，愿意承担相应责任并接受相应处理。如产生争议，保证积极配合调查处理工作。 单位（盖章） 年 月 日					