

# 2019年度湖南省科学技术奖提名项目公示

## 一、项目名称

关键金属运动部件表面强化与延寿基础研究

## 二、提名意见:

刘秀波教授带领的团队长期从事关键金属运动部件表面强化与延寿领域的基础研究，在此领域具有深厚的科研积累和工作基础。该项目在多个基金的资助下，对激光熔覆高温自润滑耐磨复合材料涂层、金属零部件表面高效精密光整强化技术相关的材料、工艺和机理进行了系统的基础研究。研究出了同时具备优异耐磨、减摩、抗氧化等综合性能的新型功能涂层，建立了相关耐磨减摩理论，取得了若干重要科学发现，为解决制约我国关键金属运动部件性能和生产效率的提升提供了理论参考。主要代表性论文发表在国际机械摩擦学与表面技术等领域顶级/主流期刊上，成果得到国内外相关领域的广泛认可和引用，其中激光原位合成高温自润滑耐磨复合涂层材料新体系及后续热处理对其微结构和力学性能影响机理的研究文章被高影响因子top期刊 *Energy and Environmental Science* (IF:30.067)、*International Materials Review* (IF: 12.703) 和 *Acta Materialia* (IF: 6.036) 的积极评价。项目研究特色鲜明，所获创新成果突出，具有重要的科学意义、学术价值以及工程应用前景，经学校审核，同意提名湖南省自然科学奖二等奖。

### 三、项目简介:

该项目属机械工程机械摩擦、磨损及润滑科学领域。

航空航天、石化冶金、能源动力等重大装备和工业生产中，大量关键运动副机械零部件，在高温高压、高速重载、腐蚀冲刷等严酷服役环境下磨损失效，严重制约装备性能和生产效率，甚至酿成重大事故。表面涂层与强化技术，是解决上述问题的最有效方法。研制出同时具备优异耐磨、减摩、耐高温氧化等综合性能的新型耐磨涂层技术，建立其耐磨减摩理论，意义重大。

针对关键金属运动部件表面强化与延寿的迫切需求，在国家自然科学基金等资助下，对激光熔覆高温自润滑耐磨复合涂层、金属零部件表面高效精密光整强化技术相关的材料、工艺和机理进行了系统深入的基础研究。在本领域顶级(Top)/主流期刊 *Materials & Design*、*Applied Surface Science*、*Surface & Coatings Technology*、*Wear* 等上发表论文 50 余篇，成果得到国内外同行的广泛认可和正面评价。8 篇代表性论文总他引 324 次，SCI 他引 245 次，其中被国际顶级(Top)期刊 *Energy & Environmental Science*(IF:30.067)、*International Materials Review* (IF:12.703)和 *Acta Materialia* (IF:6.036) 等学术论文高度评价。包括国内 3 位院士在内的三百余位学者正面引用，瑞典 Lulea 大学、中科院兰化所、清华大学等国内外多家团队沿用该成果学术思想跟踪研究，获中国商业联合会科技进步二等奖。重要科学发现如下：

## 1. 设计了激光原位合成高温自润滑耐磨复合涂层材料新体系

针对  $WS_2$ 、 $MoS_2$  等固体润滑相在激光熔覆过程中易分解、汽化的问题，基于“原位复合和多相混杂强韧配合”的涂层材料设计思想，设计出采用激光熔覆技术原位合成以二元、三元金属硫化物为自润滑相的金属基/陶瓷基自润滑耐磨复合涂层材料新体系。

## 2. 发现了碳化物增强金属基耐磨复合涂层磨损表面显微凹坑形成新机制

发现了激光熔覆碳化物增强金属基耐磨复合涂层的磨损表面除具有因“显微切削”作用而形成的划痕沟槽特征外，局部区域还出现了因“选择性磨损”而形成的显微凹坑，提出了显微凹坑形成的新机制，并建立了显微凹坑的形成模型。

## 3. 提出了通过后热处理改善自润滑耐磨复合涂层组织和力学性能的创新思路

激光熔覆是一个快速熔化和快速凝固的非平衡过程，由此造成所制备的涂层内有较大的残余应力，组织远离平衡态，导致激光熔覆涂层在实际工业应用上存在不稳定性，涂层内部产生裂纹等，限制了激光熔覆技术的应用和发展。本项目提出了通过后热处理改善自润滑耐磨复合涂层组织和力学性能的创新思路。

## 4. 揭示了基于磨料特性调控的金属表面光整强化新机制

建立了化学机械抛光(CMP)中抛光垫与磨粒的大变形接触数学模型，研究了抛光基体/磨料/抛光垫的三体微观接触

行为，掌握了磨粒形状、尺寸、浓度对材料去除速率和表面损伤的影响规律，实现了磨粒特性对金属表面加工寿命的可控调控。

#### 四、客观评价

##### （一）第 1 篇论文被影响因子为 12.703 的顶级期刊论文广泛引用和肯定

第一完成人刘秀波在专业 TOP 期刊 *Materials & Design* 55 (2014) 404-409 上发表的代表性论文 1：“Development and characterization of laser clad high temperature self-lubrication wear resistant composite coatings on Ti-Al-4V alloy” 率先提出了原位合成二元、三元金属硫化物自润滑复合涂层的学术思想，系统研究其室温、高温摩擦学性能，并被 SCI 影响因子为 12.703 的专业顶级期刊 *International Materials Reviews* 63(5)(2018)309-340 中论文“Hector Torres, et al. Tribological behavior of self-lubricating materials at high temperatures.”（代表性引文 1）评价该论文由于原位合成的自润滑相 CrS 有助于提高涂层材料的室温到高温摩擦学性能。

##### （二）第 2 篇论文被影响因子为 5.116 的顶级期刊论文引用和肯定

第一完成人刘秀波在专业 TOP 期刊 *Applied Surface Science* 258(2012)3757-3762 上发表的代表性论文 2 被 SCI 影响因子为 5.116 的专业顶级期刊 *Electrochimica Acta*

107(2013)379-387 论文“Kejing Huang, et al. Synthesis and electrochemical performances of layered tungsten sulfide-graphene nanocomposite as a sensing platform for catechol, resorcinol and hydroquinone.”（代表性引文 2）肯定并指出  $WS_2$  是现在固体润滑材料的研究热点。

（三）第 3 篇论文被影响因子为 **6.036** 的顶级期刊论文引用和肯定

第一完成人刘秀波在国际涂层主流期刊 *Surface & Coatings Technology* 200(2006)4462-4470 发表的代表性论文 3 被 SCI 影响因子为 6.036 的专业顶级期刊 *Acta Materialia* 61(2013)4861-4873 中论文“Y.K. Zhang, et al. Phase selection and microstructure formation in undercooled Co-61.8 at.% Si melts under various container-less processing conditions.”（代表性引文 3）评价指出该研究对相关工业领域的研究及涂层应用提供了“potential”方案。

（四）第 5 篇论文被影响因子为 **30.067** 的顶级期刊论文引用和肯定

完成人陆小龙在专业 TOP 期刊 *Applied Surface Science* 355 (2015)350-358 上发表的代表性论文 5: “Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ni60/h-BN self-lubricating anti-wear composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding”率先提出了激光熔覆涂层后续热处理改善涂层内部组织和力学性能的思想，深入研究了

热处理后的高温摩擦学性能，并被影响因子为30.067的专业顶级期刊 *Energy & Environmental Science* 12(2)(2019)684-692 中论文 “Feifan Guo, et al. High-performance oxygen evolution electrocatalysis by boronized metal sheets with self-functionalized surfaces.”(代表性引文5) 正面评价，指出硼化的NiFe薄膜稳定性提高是基于其耐腐蚀性能的改善。

#### (五) 第7篇论文被影响因子为 4.439 的顶级期刊论文广泛引用和肯定

完成人王永光、赵永武在专业权威期刊 *Journal of Materials Processing Technology*183(2007)374-379 上发表的代表性论文 7: “A new nonlinear-micro-contact model for single particle in the chemical mechanical polishing with soft pad”被影响因子为 4.439 的专业 Top 期刊 *Applied Surface Science*255(5)(2009)3090-3096 中论文“Coutinho, Cecil A, et al. Novel ceria-polymer micro composites for chemical mechanical polishing.” (代表性引文 7) 评价该论文建立了磨料/抛光垫的大变形模型，为 CMP 技术提供了 ‘*useful insights*’。

#### (六) 国内同行评议

1. 第一完成人刘秀波教授受邀在第九届全国青年表面工程学术会议担任分会场主席 (2017 年 5 月, 苏州), 受邀在第十一届全国青年表面工程学术会议担任分会场主持人并作口头报告 (2019 年 4 月, 北京)。Ti6Al4V 合金激光熔

覆  $\gamma$ -NiCrAlTi/TiC+TiWC<sub>2</sub>/CrS+Ti<sub>2</sub>CS 高温自润滑耐磨复合涂层研究, 中国激光 41(3)(2014)0303005:1-6 被中国科学技术信息研究所评为 2015 年度“精品期刊顶尖论文平台-领跑者 5000”的优秀论文, 激光熔覆 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> 自润滑耐磨涂层的高温摩擦学行为, 材料工程 11(2013)26-31, 37 被评为 2014、2015 年度核心高被引论文。 $\gamma$ -TiAl 金属间化合物合金激光表面改性被评为 2007 年“第四届中国科协期刊优秀学术论文”。(参见证明材料 图片附件 10、11、12)

2. 中科院兰化所刘维民院士团队, 在国际主流期刊发表的 SCI 论文中引用本项目成果。在 *Materials & Design* 122(2017)405-413 中引用本项目科学发现点一“发现原位自生的金属硫化物复合涂层具有较好的自润滑性能”, 说明金属硫化物在空气环境宽温域中具有较好的自润滑性能。(参见证明材料 图片附件 19)

3. 中科院兰化所刘维民院士团队, 在国际主流期刊发表的多篇 SCI 论文如 *Surface & Coatings Technology* 205(2011)4249-4253 和 *Tribology International* 48(2011)216-225 中引用本项目科学发现点二“揭示了碳化物增强金属基耐磨复合涂层磨损表面显微凹坑形成新机制”, 说明碳化物增强相和金属基体的强韧配合是金属基复合涂层具有较好耐磨性能的主要原因。(参见证明材料 图片附件 19)

4. 扬州大学张超教授、河北工业大学李国禄教授和天津大学申俊琦博士在本领域国际主流期刊发表的 3 篇 SCI 论文

*Surface & Coatings Technology* 325(25)(2017)548-554, *Vacuum* 155(2018)260-269 和 *Surface & Coatings Technology* 313(15)(2017)355-360 引用本项目科学发现点三“通过后热处理改善自润滑耐磨复合涂层显微组织和力学性能的创新思路”,为自润滑耐磨复合涂层在关键运动副零部件上的应用提供了理论依据。(参见证明材料图片附件 19、20)

5. 清华大学雒建斌院士团队,在国际期刊发表的 9 篇 SCI 论文中引用本项目成果。在 *Applied Surface Science* 257(2011) 3055-3062 和 *Wear* 273(2011)105-110 中引用本项目科学发现点四“抛光垫/磨粒大变形接触模型”计算 CMP 中单个纳米磨粒的受力。大连理工大学郭东明院士团队,在国际期刊 *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 120 (2017) 61-71 发表的论文中引用本项目科学发现点四“磨粒/基片接触参数”计算 CMP 中单个纳米磨粒的材料去除速率,为精确控制光整强化技术提供了理论依据。(参见证明材料图片附件 20)

## 五、代表性论文专著目录



序号	论文专著名称/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	SCI他引次数	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Development and characterization of laser clad high temperature selflubricating wear resistant composite coatings on Ti-6Al-4V alloy/Materials & Design/Xiu-Bo Liu, Xiang-Jun Meng, Hai-Qing Liu, Gao-Lian Shi, Shao-Hua Wu, Cheng-Feng Sun, Ming-Di Wang, Long-Hao Qi	4.525	2014年55卷404-409	2014年03月15日	刘秀波	刘秀波	刘秀波, 孟海莲, 石翠华, 吴少峰, 孙承娣, 王明娣, 齐龙浩	76	108	是
2	Microstructure and wear behaviors of laser clad NiCr/Cr3C2-WS2 high temperature selflubricating wearresistant composite coating/Applied Surface Science/Mao-Sheng Yang, Xiu-Bo Liu, Ji-Wei Fan, Xiang-Ming He, Shi-Hong Shi, Ge-Yan Fu, Ming-Di Wang, Shu-Fa Chen	4.439	2012年258卷3757-3762	2012年02月10日	刘秀波	杨茂盛	杨茂盛, 刘积明, 范积伟, 何祥宏, 石世宏, 傅文雁, 王明娣, 陈书法	53	73	是
3	Microstructure, wear and high temperature oxidation resistance of laser clad Ti5Si3/ $\gamma$ /TiSi composite coatings on $\gamma$ -TiAl intermetallic alloy/Surface & Coatings Technology/Xiu-Bo Liu, Hua-Ming Wang	2.906	2006年200卷4462-4470	2006年01月15日	刘秀波	刘秀波	刘秀波, 王华明	41	44	是
4	Microstructure and tribological properties of laser clad $\gamma$ /Cr7C3/TiC composite coatings on $\gamma$ -TiAl intermetallic alloy/Wear/Xiu-Bo Liu, Hua-Ming Wang	2.96	2007年262卷514-521	2007年01月15日	刘秀波	刘秀波	刘秀波, 王华明	17	22	是
5	Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ni60/h-BN self-lubricating anti-wear composite coatings on 304 stainless steel by laser cladding/Applied Surface Science/Xiao-Long Lu, Xiu-Bo Liu, Peng-Cheng Yu, Yong-Jie Zhai, Shi-Jie Qiao, Ming-Di Wang, Yong-Guang Wang, Yao Chen	4.439	2015年355卷350-358	2015年07月30日	刘秀波	陆小龙	陆小龙, 刘鹏杰, 刘程, 翟永杰, 乔世娣, 王明光, 王永光, 陈瑶	16	20	是
6	Effects of annealing on laser clad Ti2SC/CrS self-lubricating anti-wear composite coatings on Ti6Al4V alloy: Microstructure and tribology/Tribology International/Xiao-Long Lu, Xiu-Bo Liu, Peng-Cheng Yu, Ge-Yan Fu, Gang-Xian Zhu, Yong-Guang Wang, Yao Chen	3.246	2016年101卷356-363	2016年05月15日	刘秀波	陆小龙	陆小龙, 刘鹏雁, 傅戈雁, 朱刚贤, 王永光, 陈瑶	14	16	是
7	A new nonlinear micro-contact model for single particle in the chemical mechanical polishing with soft pad/Journal of Materials Processing Technology/Yongguang Wang, Yongwu Zhao, Gu Jian	3.647	2007年183卷374-379页	2007年03月23日	赵永武	王永光	王永光, 赵永武, 顾坚	19	25	是
8	Modeling the effects of abrasive size, surface oxidizer concentration and binding energy on chemical mechanical polishing at molecular scale/Tribology International/Yongguang Wang, Yongwu Zhao, Xufang Li	3.246	2008年41卷202-210	2008年01月30日	赵永武	王永光	王永光, 赵永武, 李旭芳	9	16	是
合计								245	324	

## 六、主要完成人情况

刘秀波，排名1，材料表面科学与技术湖南省重点实验室主任，中南林业科技大学教授，主要完成单位苏州大学，是本项目总体学术思想的提出者和总负责人；是《重要科学发现》中的第1-3项科学发现学术思想和理论的提出者，是代表性论文1-6的主要作者（第一作者或通讯作者）。投入本项目工作量占本人工作量的80%。

王永光，排名2，苏州大学副教授，是《重要科学发现》中的第4项学术思想和理论的提出者，是代表性论文7、8的第一作者。

刘海青，排名3，苏州大学讲师，针对WS<sub>2</sub>、MoS<sub>2</sub>等固体自润滑相在激光熔覆过程中易分解、汽化的问题，基于“原位复合和多相混杂强韧配合”的涂层材料设计思想，提出采用激光熔覆技术原位合成含有二元、三元金属硫化物为自润滑相的金属基自润滑耐磨复合涂层材料新体系。完成人对本项目《重要科学发现》一做出了创造性贡献，是代表性论文1的第二作者。

陆小龙，排名4，苏州大学在读博士研究生，对本项目《重要科学发现》一、三项做出了创造性贡献，提出了原位合成制备自润滑耐磨复合涂层材料新体系，以及通过热处理改善激光熔覆自润滑复合涂层组织和力学性能的创新思路，是代表论文5和6的第一作者。

赵永武，排名5，江南大学教授，是《重要科学发现》

四 学术思想和理论的提出者，是代表性论文7和8的通讯作者。

## 七、主要完成人合作关系说明

1. 项目：“关键金属运动部件表面强化与延寿基础研究”第一完成人刘秀波教授（中南林业科技大学）与本项目第二完成人王永光副教授（苏州大学），自 2014 年开始，依托国家自然科学基金（飞机钛合金运动件表面激光原位合成自润滑耐磨复合涂层的基础研究，U1533101）和江苏省自然科学基金（钛合金激光熔覆高温自润滑耐磨复合涂层研究，BK20141194），在金属表面强化技术与摩擦磨损机理方面开展合作研究，刘秀波教授负责机理分析与实验设计，王永光副教授负责实验研究与理论分析，共同发表了代表性论文 05、06，共同获得了中国商业联合会科技进步奖（2016/12/13，中国商业联合会科学技术奖，二等奖，金属高效多功能精密抛光技术及其应用。证书编号：2016251R01）。

2. 项目：“关键金属运动部件表面强化与延寿基础研究”第五完成人赵永武教授（江南大学）为第二完成人王永光副教授（苏州大学）的博士生导师，自 2004 年开始，指导王永光博士从事金属表面超精密光整技术研发，共同发表了代表性论文 07、08，共同获得中国商业联合会科技进步奖（2016/12/13，中国商业联合会科学技术奖，二等奖，金属高效多功能精密抛光技术及其应用。证书编号：

2016251R01)。

3. 项目：“关键金属运动部件表面强化与延寿基础研究”第三完成人刘海青（苏州大学）、第四完成人陆小龙（苏州大学）是第一完成人刘秀波教授任职苏州大学时的硕士研究生，其中刘秀波教授与刘海青共同发表了代表性论文 01,刘秀波教授与陆小龙共同发表了代表性论文 05、06。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	共同立项	刘秀波/1 王永光/2	2015.01- 2018.12	国家自然科学基金 (U1533101)	见图片附件 1	
2	共同立项	刘秀波/1 王永光/2	2014.07- 2017.06	江苏省自然科学基金 (BK20141194)	见图片附件 2	
3	论文合著	刘秀波/1 刘海青/3	2014	代表性论文 01	见 PDF 附件 1	扩展 ESI 高 被引 论文
4	论文合著	陆小龙/1 刘秀波/2 王永光/7	2015	代表性论文 05	见 PDF 附件 5	
5	论文合著	陆小龙/1 刘秀波/2 王永光/6	2016	代表性论文 06, 获中国商业联合会科技进步二等奖	见 PDF 附件 6 和图片附件 9	
6	论文合著	王永光/1	2007	代表性论文 07, 获中国商	见 PDF 附件 7 和图	

		赵永武/2		业联合会科技进步二等奖	片附件 9	
7	论文合著	王永光/1 赵永武/2	2008	代表性论文 08	见 PDF 附件 8	