

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

多主元合金的耐磨-润滑表面原位构筑与性能调控

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

针对极低温和超高温苛刻环境工况，该项目研究了多主元合金的耐磨-润滑表面原位构筑与性能调控中的关键科学问题，发现局域有序结构诱发非均匀位错形核的强化机制以及复杂化位错运动的韧化机制，提出了低温摩擦原位诱导塑性变形构筑高强韧-耐磨-润滑分层结构思路 and 高温摩擦诱导氧化反应原位构筑抗氧化-耐磨-润滑表面结构策略，实现了苛刻服役工况下高性能耐磨-润滑材料表面结构的原位构筑与优化。项目团队发表在 *Acta Mater*、*Int J Plasticity* 等期刊上的 5 篇代表性论文被 45 个国家/地区的 1974 名学者在 *Nat Commun*、*Adv Sci* 等 SCI 期刊上他引 473 次，代表性论文 1、2、4 和 5 连续入选 ESI 高被引论文；项目组迄今在该方向已发表论文 93 篇，其中热点论文 6 篇、高被引论文 17 篇；受邀作国内外会议主旨/特邀报告 42 次，受邀为 3 部国内外专著撰写与项目相关的独立章节，并在领域权威期刊 *J Alloys Compd* 和 *Tribol Int* 开设了专刊，培养国家级青年人才 2 名。与舞钢、南钢和航天八院等企业研究所合作解决了一系列极低温环境用耐磨材料屈服强度低和耐磨性差的难题；与湘钢、江西景航和金天钛业合作解决了超高温环境用耐磨材料抗氧化性和耐磨性差的难题。

该项目使我国在极端环境用耐磨材料相关领域达到国际领先水平，在高性能耐磨金属材料研发与应用方面引领了国际前沿发展。

提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

我国新一代大型低温高雷诺数风洞、重载液体火箭发动机、自适应变循环发动机等国家重大装备研发对运动及传动部件的服役性能提出了更苛刻要求，所用耐磨/润滑材料不仅要面临极低温（如液氢、液氦温度）或超高温（如 1000 °C 及以上）极端环境，而且要在室温到极低温或超高温这一宽温域内长期稳定服役。然而，当前工程用金属基低温耐磨/润滑材料由于存在大量异质界面而在低温下易断裂失效，陶瓷基高温耐磨/润滑材料由于存在大量陶瓷硬质相而在高温冲击下易引发灾难性失效。在此背景下，该项目在国家重点研发计划项目、国家自然科学基金面上、青年项目等资助下，针对极低温和超高温环境的苛刻服役工况、以性能优异的多主元合金为研究对象、以耐磨-润滑表面原位构筑为研究思路，深入研究了多主元合金耐磨-润滑表面原位构筑与性能调控中的关键科学问题，取得了如下重要科学发现：

（1）**发现局域有序结构诱发非均匀位错形核以及复杂化位错运动的强韧化新机制**（代表性论文 1）。首先，明确了多主元合金中局域化学有序结构通过促进非均匀位错形核和拖拽位错运动显著提升强韧性的作用机制，发现层错能和局域化学有序结构是调控合金宽温域强韧性协同的核心要素。其次，通过热机械加工调控了晶界“结构-成分”特征，促进了三维层错网络和分级孪晶的激活，显著提升了多主元合金宽温域下的强度和加工硬化能力。该发现提出了极端环境下通过独特非均匀位错形核机制调控合金强韧性的方法，被中国工程院院士涂善东，中国科学院外籍院士高华健，美国工程院院士 Robert O. Ritchie、Irene J. Beyerlein 和韩国科学技术翰林院院士 Hyoung Seop Kim 等正面评述，认为该项目揭示了多主元合金复杂且多样的变形机制，发现了一种独特的非均匀位错形核机制且量化分析了各种变形机制的作用等。

（2）**提出了低温摩擦原位诱导塑性变形构筑高强韧-耐磨-润滑分层结构新思路**（代表性论文 2 和 3）。首先，明确了非晶表面减摩耐磨的核心机制是界面黏着效应，并在 CoCrNi 多主元合金表面摩擦诱导原位生成了晶体-非晶（软-硬相）分层自适应结构。其次，通过引入 Cu、Mo 等元素调控层错能和局域化学结构，加速诱导形成了晶体-非晶摩擦层。该发现点解决了金属材料在极端低温环境下强韧性和耐磨润滑性难以兼顾的科学难题，使多主元合金在 113 K 下磨损率低至 $10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N m}$ ，相比低温奥氏体和马氏体不锈钢降低了 1 个数量级。被中国科学院院士任露泉、陈光，中国工程院院士何季麟，奥地利科学院院士 Jürgen Eckert 和美国金属协会主席 Peter K. Liaw 等正面评价，认为该项目证明了摩擦诱导非均匀结构可有效减轻磨损且在摩擦行为中起关键作用、所研发合金表现出优异的力学和自润滑效果等。

（3）**提出了高温摩擦诱导氧化反应原位构筑抗氧化-耐磨-润滑表面结构新策略**（代表性论文 4 和 5）。首先，发现了交变载荷-高温耦合条件下生成具有润滑作用复杂三元金属氧化物的新机制，揭示了间隙原子和置换原子激发磨损表面高温氧化物由空间非均匀分布二元氧化物转变为均匀分布三元复杂润滑氧化物

的演变规律，使高温抗氧化能力和耐磨/润滑性能提高了 1-2 个数量级。其次，通过在 Ti 基难熔合金中引入 C、N、B 等间隙原子以及 Al、Si 等置换原子，在保证合金力学性能不降低的前提下，使得合金在 1000 °C 下摩擦系数小于 0.3、磨损率低至 $10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N m}$ 。被中国科学院院士汪卫华、美国工程院院士刘锦川、澳大利亚技术科学与工程院院士 Anh Kiet Tieu 等正面评价，认为该项目通过在难熔合金中添加 Al 获得了多方面益处、为设计高耐磨性难熔多主元合金提供了一个设计思路等。

基于上述耐磨-润滑表面原位构筑与性能调控科学原理，该项目实现了苛刻服役工况下高性能耐磨-润滑材料表面结构的原位构筑与性能优化。局域有序结构诱发非均匀位错形核与复杂化位错运动的强韧化方法应用于上海机电工程研究所（航天八院）和南钢的低温马氏体时效钢研制：“低温性能满足低温风洞尾支杆部件力学性能需求……研发周期缩短至少 50%……有望突破国外技术及产品垄断，实现低温风洞用特种钢的进口替代和自主可控”；低温原位构筑高强韧-耐磨-润滑分层结构理念应用于舞钢低温高锰钢研制：“……屈服强度提升 200 MPa，耐磨性提升 70%……相关产品有望在液氢等领域进一步应用”；高温原位构筑抗氧化-耐磨-润滑结构策略应用于湘潭钢铁 NiRes400HT 高温耐磨钢新产品研发：“……550 °C 时的耐磨性能提高了 3 倍……，湘钢已经完全具备生产 NiRes400HT 钢板的能力，为公司创造良好的经济效益”。

该项目组是国际上开展苛刻环境下金属材料摩擦学研究的主要团队之一。5 篇代表性论文发表在 *Acta Mater*、*Int J Plasticity* 等期刊，其中 4 篇连续多次入选 ESI 高被引论文，迄今被领域同行在 *Nat Commun*、*Adv Sci* 等 SCI 期刊上他引 473 次。项目组在这一研究方向迄今共发表 SCI 论文 93 篇，其中热点论文 6 篇、高被引论文 17 篇，合作出版相关学术专著 3 部，授权国家发明专利 20 件；受邀作国内外会议主旨/特邀报告 42 次；承担了 2019 年度的中法摩擦学大会和 2025 年度的中欧摩擦学大会；项目第一完成人以客座主编身份受邀在本领域权威期刊 *J Alloys Compd* 和 *Tribol Int* 分别开设了高性能多主元合金和 2025 年中欧摩擦学会议专刊；获中国材料学会科学技术一等奖 1 项；在项目执行期间项目第一和第二完成人入选青年 CJ 学者，项目第二完成人获中国材料研究学会青年科技奖。

四、客观评价

项目组发表在 *Acta Mater*、*Int J Plasticity* 等期刊上的 5 篇代表性论文被 45 个国家/地区的 1974 名学者在 *Nat Commun*、*Adv Sci* 等 SCI 期刊上他引 473 次，代表性论文 1、2、4 和 5 入选 ESI 高被引论文；在该领域迄今已发表论文 93 篇，其中热点论文 6 篇、高被引论文 17 篇，并为 3 部国外学术专著撰写有关多主元合金摩擦磨损性能的独立章节；获中国材料学会科学技术一等奖，项目第一和第二完成人入选青年 CJ 学者，项目第二完成人获中国材料研究学会青年科技奖。

◆ 发现点 1 代表性评价

(1) 代表性论文 1 发现的局域化学有序结构通过诱导非均匀位错形核与复杂化位错运动提升强韧性的作用机制，被中国科学院外籍院士高华健等评述为：“不仅丰富了对高熵合金材料行为的理解，而且揭示了高熵合金复杂且多样的变形机制”——“..... not only enrich the understanding of material behavior of HEAs, but also reveal the complexity and diversity...deformation mechanism...of HEAs.”。

(2) 中国工程院院士涂善东等认为代表性论文 1 在局域化学有序结构中熵合金中发现了一种独特的非均匀位错形核机制——“Researchers found unique mechanisms in MEAs, such as.....the heterogeneous dislocation nucleation.....”。

(3) 美国工程院院士、*Acta Mater* 期刊编辑 Irene J. Beyerlein 等在 3 篇 *Int J Plasticity* 论文中正面引用代表性论文 1，如认为：“通过变形过程中不同缺陷结构和位错类型的数量、长度、面积或体积密度量化了各种变形机制的作用”——“.....have quantified the role of individual deformation mechanism based upon number, length, area, or volume densities of different defect structures or types of dislocations”。

(4) 美国工程院院士 Robert O. Ritchie，韩国科学技术翰林院院士 Hyoungh Seop Kim 等在 *Int J Plasticity* 论文中多次引用代表性论文 1，如认为：“发现了局域化学成分和短程有序可通过影响位错的运动，进而对变形孪晶产生调控作用”——“.....the motion of the partial dislocations, which mediate deformation twinning, is influenced by inherent local composition fluctuation as well as chemical short-range ordering”。

◆ 发现点 2 代表性评价

(1) 中国科学院院士任露泉等评价了代表性论文 2，认为该项目通过快速表面非晶化使得 $(\text{CoCrNi})_{88}\text{Mo}_{12}$ 在低温下磨损率降低 73%——“...rapid surface amorphization of $(\text{CoCrNi})_{88}\text{Mo}_{12}$ reduced its low-temperature wear performance by 73%”。

(2) 中国科学院院士陈光等评价代表性论文 3，认为该项目组：“开发了自润滑复合材料和合金，并表现出优异的力学和强劲的自我润滑效果”——“have developed self-lubricating composites and alloys....., which exhibit excellent mechanical and robust lubrication performance”。

(3) 中国工程院院士何季麟，国家杰青张哲峰、张海峰、王同敏、王慧远、陈瑞润，CJ 学者何卫锋，奥地利科学院院士 Jürgen Eckert，美国金属协会主席 Peter K. Liaw 等在 *Acta Mater*、*Int J Plasticity*、*JMST* 等论文中正面引用代表性论文 2 和 3，如认为该项目证明了摩擦诱导非均匀结构可有效减轻磨损，且在摩擦行为中起关键作用 — “demonstrated the effectiveness of friction-induced heterogeneous structures in mitigating wear.....plays a critical role in subsequent frictional behavior”。

◆ 发现点 3 代表性评价

(1) 美国工程院院士刘锦川等正面评价了代表论文 5，认为：“Al 的添加改进了组织并提高了耐磨性，为设计高耐磨性难熔高熵合金提供了一个设计思路” — “The addition of Al improved the microstructure and wear resistance.....give us a design idea for wear-resistant RHEAs”。

(2) 美国爱荷华州立大学杰出教授 Duane D. Johnson 等在 *Acta Mater* 上对代表性论文 5 给予了正面评价，认为该研究通过在难熔合金中添加 Al 获得了多方面好处 — “The addition of Al to refractory MPEAs...have multifaceted benefits...”。

(3) 澳大利亚技术科学与工程院院士 Anh Kiet Tieu 等对代表性论文 5 给予了正面评价，同样认为：“随着摩擦温度升高，聚集的氧化物会对摩擦磨损性能影响极大” — “As the oxides accumulate with increasing the wear temperatures, they can exert a considerable influence on the friction and wear properties.....”。

(4) 中国科学院院士汪卫华，国家杰青孙宝德、秦高梧、赵永好、王立平、王刚，CJ 学者陈辉等在 *Adv Sci*、*Acta Mater* 等引用了代表性论文 4 和 5，如引用了代表性论文 4 结论：“摩擦过程中发生非晶弛豫或晶化，进而造成高磨损率” — “the relaxation or crystallization of MGs upon wearing.....lead to high wear rate”，并通过稳定化非晶结构大幅提升耐磨性的思路，进一步佐证了该项目组提出的构筑具有高稳定性非晶氧化物表面提高材料耐磨性的策略。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Atomistic insights into the deformation mechanism of a CoCrNi medium entropy alloy under nanoindentation	International Journal of Plasticity	Dongpeng Hua, Qiaosheng Xia, Wan Wang, Qing Zhou, Shuo Li, Dan Qian, Junqin Shi, Haifeng Wang	2021 年 142 卷 102997 页	2021 年 4 月 18 日	Qing Zhou, Dan Qian, Haifeng Wang	Dongpeng Hua, Qiaosheng Xia	华东鹏, 夏桥生, 王婉, 周青, 李硕, 钱旦, 史俊勤, 王海丰	141	SCI	是
2	Friction-induced rapid amorphization in a wear-resistant (CoCrNi) ₈₈ Mo ₁₂ dual-phase medium-entropy alloy at cryogenic temperature	Composites Part B: Engineering	Yue Ren, Zhuobin Huang, Yucheng Wang, Qing Zhou, Tao Yang, Qikang Li, Qian Jia, Haifeng Wang	2023 年 263 卷 110833 页	2023 年 6 月 12 日	Qing Zhou, Haifeng Wang	Yue Ren	任越, 黄卓斌, 王雨琤, 周青, 杨涛, 李旗抗, 贾茜, 王海丰	56	SCI	是

3	Mechanical and tribological performance of CoCrNiHf eutectic medium-entropy alloys	Journal of Materials Science & Technology	Yin Du, Xuhui Pei, Zhaowu Tang, Fan Zhang, Qing Zhou, Haifeng Wang, Weimin Liu	2021 年 90 卷 194-204 页	2021 年 4 月 28 日	Qing Zhou, Haifeng Wang	Yin Du	杜银, 裴旭辉, 唐招武, 张帆, 周青, 王海丰, 刘维民	50	SCI	是
4	Effects of structure relaxation and surface oxidation on nanoscopic wear behaviors of metallic glass	Acta Materialia	Qian Jia, Wenhao He, Dongpeng Hua, Qing Zhou, Yin Du, Yue Ren, Zhibin Lu, Haifeng Wang, Feng Zhou, Jian Wang	2022 年 232 卷 117934 页	2022 年 4 月 11 日	Qing Zhou, Haifeng Wang	Qian Jia, Wenhao He	贾茜, 何文豪, 华东鹏, 周青, 杜银, 任越, 鲁志斌, 王海丰, 周峰	76	SCI	是
5	Effect of Al addition on the microstructure, mechanical and wear properties of TiZrNbHf refractory high entropy alloys	Tribology International	Vipul Bhardwaj, Qing Zhou, Fan Zhang, Weichao Han, Yin Du, Ke Hua, Haifeng Wang	2021 年 160 卷 107031 页	2021 年 3 月 31 日	Qing Zhou, Ke Hua, Haifeng Wang	Vipul Bhardwaj	周青, 张帆, 韩伟超, 杜银, 花珂, 王海丰	150	SCI	是
合 计									473		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
王海丰	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目负责人，提出了主要学术思想、制定并实施了总体研究方案，对主要发现点 1、2、3 做出了突出贡献。完成人在课题的顺利实施和任务的圆满完成以及产品应用转化方面，均起到了关键推动作用，是代表性论文 1-5 的共同通讯作者。
周青	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	本项目主要发现点 1、发现点 2 和发现点 3 的主要贡献者，发现点 1 和 2 的主要实施者和推动者，是代表性论文 1-5 的共同通讯作者。深度研究了耐磨材料在极端低温环境下强韧性与耐磨润滑性难以兼得的科学难题。
杜银	3	无	博士后	西北工业大学	西北工业大学	发现点 3 的主要实施者，发现点 2 和 3 成果应用的主要贡献者，代表性论文 3 的第一作者，代表性论文 4 和 5 的共同作者。深度研究了耐磨材料在极端高温环境下抗氧化、耐磨润滑性和工况适应性难以兼顾的科学难题。
花珂	4	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	发现点 3 成果应用的主要实施者和推动者，代表性论文 5 的共同通讯作者。深度参与了解决高温耐磨材料在抗氧化性、润滑性和工况适应性难以兼顾的科学难题
华东鹏	5	无	博士后	西北工业大学	西北工业大学	发现点 1 的主要实施者，代表性论文 1 的共同第一作者。对合金的塑性变形机制进行了系统性研究，为高性能耐磨金属材料的研发提供了借鉴。
刘维民	6	无	研究员	中国科学院兰州化学物理研究所	西北工业大学	本项目的学术指导，指导项目的总体研究方案，总体规划，对主要发现点 1、2、3 做出了前瞻性贡献。完成人在项目的顺利实施和任务的圆满完成均起到了推动作用，是

						代表性论文 3 的共同作者。
--	--	--	--	--	--	----------------

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	<p>本项目由西北工业大学完成，围绕极低温与超高温苛刻环境下金属材料的耐磨-润滑一体化服役性能调控关键科学问题，完成单位在项目中发挥了全方位的核心学术引领作用，主要贡献如下：</p> <p>1. 提出关键科学问题并构建研究体系。本单位针对极端工况下金属材料服役性能劣化难题，发现局域有序结构诱发非均匀位错形核的强化机制以及复杂化位错运动的韧化新机制，提出了低温摩擦原位诱导塑性变形构筑高强韧-耐磨-润滑分层结构新思路 and 高温摩擦诱导氧化反应原位构筑抗氧化-耐磨-润滑表面结构新策略，明确了极端环境下影响耐磨/润滑性能的关键结构因素，构建了材料服役性能一体化调控的理论框架与研究方法体系。</p> <p>2. 实现关键技术突破与材料创新。本单位研制出多类具备高耐磨润滑性能的新型金属材料，显著提升了其在极端温度下的综合性能，解决了低温条件下材料屈服强度与耐磨性差、高温环境下材料抗氧化性与耐磨性差等科学难题，推动了极端环境用耐磨材料从基础研究向工程应用的跨越。</p> <p>3. 高水平科研成果产出。本单位项目团队在 <i>Acta</i>、<i>Int J Plasticity</i> 等国际顶尖期刊发表代表性论文 5 篇，被 <i>Nat Commun</i>、<i>Adv Sci</i> 等 SCI 期刊引用 473 次，其中 4 篇连续入选 ESI 高被引论文。项目组在该方向累计发表论文 93 篇（含高被引论文 17 篇、热点论文 6 篇），研究成果获得国内外学术界广泛认可。</p> <p>4. 组织学术引领与人才培养。本单位负责编写 3 部国内外专著章节，开设 <i>J. Alloys Compd</i> 与 <i>Tribol Int</i> 高性能耐磨材料专刊，受邀在国内外学术会议作主旨/特邀报告超 42 次，培养国家级青年人才 2 名，在学术传播与领域引领方面成效显著。</p>

八、完成人合作关系说明

本人主要从事极端工况用高性能耐磨/润滑金属材料的研究工作。在本项目完成过程中，与其他完成人之间的合作关系如下：

本项目第二完成人周青教授于 2017 年博士毕业于西安交通大学，同年加入先进润滑与密封材料研究中心工作。从教以来一直与本人合作开展多主元合金的耐磨-润滑表面原位构筑工作，在本领域重要 SCI 期刊上合作发表论文 50 篇以上，其中在本项目代表性论文 1-5 中，本人与周青教授均为共同通讯者。此外，周青教授参与了本人 2019 年获批的自然基金面上项目（项目 2），本人参与了周青 2018 年获批的自然基金青年项目（项目 3）。

项目第三完成人杜银博士于 2016 年加入我们团队学习，本人为其硕士导师，其 2018 年转博后，刘维民院士为其博士生导师，本人作为副导师协助指导其工作。本人与其在 *Adv Funct Mater* 等期刊上合作发表论文超过 30 篇，如：本项目代表性论文 3、4、5。另外，杜银博士参与了本人 2019 年获批的自然基金面上项目（项目 2）和周青教授 2018 年获批的自然基金青年项目（项目 3）。

项目第四完成人花珂副教授于 2019 年博士毕业于法国洛林大学，同年加入先进润滑与密封材料研究中心工作。在项目组中承担了极端高温环境用抗氧化-耐磨/润滑金属材料的研制工作。与本人合作在本领域重要 SCI 期刊上发表论文超过 40 篇，其中在本项目代表性论文 5 中，本人与花珂老师均为共同通讯作者。

项目第五完成人华东鹏博士于 2018 年加入我们团队学习，本人为其硕士和博士导师。本人与其在 *Acta Mater*、*Int J Plasticity* 等权威期刊上发表论文超过 30 篇，如：本项目代表性论文 1、4。

项目第六完成人刘维民院士为西北工业大学先进润滑与密封材料研究中心首席科学家。本人于 2017 年加入该团队并协助刘维民院士开展了实验室、人才引进和团队建设工作，并在其指导下开始从事极端工况用高性能耐磨/润滑金属材料的研究工作。本人与刘维民院士建立了紧密合作关系，在本领域重要 SCI 期刊上合作发表论文超过 20 篇，如与其合作发表了代表性论文 4，并参与完成了其为项目负责人的国家重点研发计划（项目 1）。