

2026 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

纳米晶金属材料的热-动力学尺度效应

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省军民融合办

提名意见：我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效。按照要求，我单位和项目完成单位都已对该项目的拟提名情况进行了公示，目前公示无异议。该项目系统深入探索了纳米晶金属材料的尺度效应。重要科学发现包括：(1) 阐明了溶质偏析调控晶界迁移的热-动力学相关性本质，厘清了位错演化导致的再结晶晶界迁移迟滞机制，发现了相界对晶界迁移的热-动力学阻碍效应，解决了金属材料纳米晶粒尺寸的稳定与控制难题；(2) 发现了纳米晶材料相变的热-动力学尺度效应。阐明了纳米晶粒尺度晶界约束相变机制，揭示了晶粒尺寸对相变速率的非单调尺度效应，厘清了相变与晶粒长大共生过程中热-动力学耦合规律，实现了非平衡条件下相变组织的精确调控；(3) 阐明了纳米晶材料变形热-动力学机制的尺度依赖性。建立了贯通相变和变形的广义稳定性理论，提出了高性能金属材料大驱动力-大广义稳定性设计判据，发现了变形热力学和动力学互斥相关性的尺度依赖规律，通过调控界面迁移行为实现了纳米晶材料高热稳定性、强度和塑性的协同提升。该项目显著推动了纳米晶金属材料热-动力学理论发展，在金属学及金属加工科学领域产生重要影响，引起广泛引用和正面评价。

提名该项目为陕西省自然科学奖 二 等奖。

三、项目简介

该项目属于材料科学基础研究领域。晶粒纳米化是突破传统强化理论边界，制备高性能金属材料的重要途径。纳米晶材料的内部结构单元与传统粗晶材料存在本质差异，导致组织演化和形变行为不再遵循粗晶体系“尺度无关或弱尺度相关”的假设，而呈现出显著的尺度依赖行为。然而，传统理论主要针对粗晶体系，缺乏对特征尺度进入纳米区间后热-动力学转变机制的系统认识，制约了亚稳金属材料的精确定量设计。因此，深入阐明亚稳金属材料的尺度效应，不仅是材料科学的前沿问题，也是攻克高性能材料研发的核心挑战。

该项目在国家自然科学基金重大、重点及杰青等项目长期支持下，围绕纳米晶金属材料的尺度效应展开系统研究，揭示了晶界迁移主导的微观组织稳定性热-动力学机制，发现了相界迁移控制下纳米晶材料相变的热-动力学尺度效应，并提出了基于界面迁移行为设计高性能金属材料的热-动力学理论。主要发现点如下：

1. 揭示了纳米尺度组织稳定性的热-动力学调控机制。阐明了溶质偏析调控晶界迁移的热-动力学相关性本质，厘清了位错演化导致的再结晶晶界迁移迟滞机制，发现了相界对晶界迁移的热-动力学阻碍效应，解决了金属材料纳米晶粒尺寸的稳定与控制难题。该成果发现了晶界迁移驱动力和能垒本征“互斥”的热-动力学相关性效应，准确预测和控制溶质-晶界、位错-晶界以及相界-晶界的交互作用，成功用于高热稳定性纳米晶材料设计；被欧洲科学院院士马恩教授评价为“为理解偏析机理提供了深刻认识 (...providing a deep understanding of segregation.)”，被中国工程院院士张福成教授用于解释奥氏体不锈钢高温变形下再结晶过程出现启动延迟、晶界迁移受阻和组织演化不均匀的行为。

2. 发现了纳米晶材料相变的热-动力学尺度效应。阐明了纳米晶粒尺度晶界约束相变机制，揭示了晶粒尺寸对相变速率的非单调尺度效应，厘清了相变与晶粒长大共生过程中热-动力学耦合规律，实现了非平衡条件下相变组织的精确调控。该成果发现了相界迁移在纳米晶体系中的迟滞效应，突破了“晶界促进相变”的传统认识，为跨尺度通过晶粒尺寸调控相变提供了理论依据；被美国物理学会会士、美国佐治亚理工学院 Thadhani 教授在 Prog. Mater. Sci.中作为纳米晶材料热稳定性领域的最新进展予以大幅介绍，被美国工程院院士、美国麻省理工学院 Schuh 教授在 Phys. Rev. Lett.中用于解释高温相变致晶粒细化反常现象。

3. 阐明了纳米晶材料变形热-动力学机制的尺度依赖性。建立了贯通相变和变形的广义稳定性理论，提出了高性能金属材料大驱动力-大广义稳定性设计判据，发现了变形热力学和动力学互斥相关性的尺度依赖规律，通过调控界面迁移行为实现了纳米晶材料高热稳定性、强度和塑性的协同提升。该成果基于相变和变形可以统一描述为热力学控制的动力学过程这一物理本质，利用“热-动力学”贯通相变中“组织形成”和变形中“性能体现”，扩展了经典理论中热稳定性、相稳定性与机械稳定性等热力学概念，利用“相变与变形一体化处理”概念实现了面向目标性能的界面热-动力学定量设计；被德国科学院院士、马普钢铁研究所所长

Raabe 教授和中国工程院院士王国栋教授在 Science 论文中用以解释 2 GPa 级超
高强钢中细晶强化作用；被美国 TMS “Mechanical Metallurgy”分会主席、美国田
纳西大学 Liaw 教授等在 Int. J. Plast. 中用以构建高熵合金中相变与位错机制关联。

广义稳定性理论与界面动力学模型结合，形成基于界面迁移热-动力学设计的
相变调控技术，应用于油气开采和航空发动机等重大工程用关键材料：与宝钢
合作，控制相变路径，调控晶界/相界数量与分布，研发出 155Ksi 级高强韧套管
钢，零摄氏度横向冲击功突破 110J，性能优于全球知名的钢管生产商 V&M 公司
同类产品，应用于塔里木、中原等油气田；与湖南湘投金天钛业合作，控制相变
速度，调控宏微观偏析，将大规格 TC17 铸锭中 Fe/Cr 元素偏析度由 6000ppm 降
至 3000ppm，成功用于某型号航空发动机压气机盘。与中国航发西安动力控制科
技有限公司合作，基于“相变与变形一体化处理”概念，揭示了碳化物迟滞应变诱
导马氏体相变的大驱动力-大广义稳定性机制，查明该机制引起的异常应力累积
和组件尺寸变化是某型号飞机发动机服役中油泵计量开关和衬套卡滞的根本原
因。

项目完成人应邀在美国矿产金属及材料学会(TMS)年会、中国固态相变凝固
及应用学术会议、中国材料大会等重要学术会议作邀请报告 30 余次。项目团队
2012 年入选首届“陕西省重点科技创新团队”，2024 年入选陕西省创战略顶尖团
队。

该项目面向金属材料科学中重大基础性难题——界面迁移迟滞的热-动力学
本质及其调控机制。通过系统揭示界面迁移迟滞对微观组织稳定性和相变动力学的
决定性作用，建立了基于缺陷-界面互作用的迟滞调控方法，提出了广义稳定性理
论，开拓出“纳米晶金属材料热-动力学设计”的学科增长点。5 篇代表性论
文发表于金属材料顶级期刊 Acta Mater. (4 篇)、J. Mater. Sci. Technol., 被 Science、
Phys. Rev. Lett. 和 Acta Mater. 等权威期刊他引 178 次。引文作者来自包括中科院
金属研究所、西安交通大学、美国麻省理工学院、美国佐治亚理工学院、美国陆
军实验室、德国马普钢铁研究所、俄罗斯科学院等 20 多个国家的 230 余家研究
机构，获得中国科学院院士叶恒强、刘锦川、陈光，中国工程院院士王国栋、张
福成，美国工程院院士 Schuh，德国科学院院士 Raabe，欧洲科学院外籍院士马
恩，欧洲人文和自然科学院士文东升等本领域专家正面评价及引用，产生了重要
学术影响。

由孙军院士、蒋成保院士等专家组成的项目鉴定委员会一致评价，“丰富和
发展了金属材料热-动力学相变理论，在非平衡凝固与固态相变一体化、相变热-
动力学协同、相变/变形一体化调控理论等方面处于国际引领地位”。

四、客观评价

该项目在金属材料顶级刊物 *Acta Mater.* 发表论文 22 篇。5 篇代表性论文发表在金属材料顶级期刊 *Acta Mater.* (4 篇) 和 *J. Mater. Sci. Technol.*, 被 *Science* 和 *Phys. Rev. Lett.* 等权威期刊他引 178 次 (附件 2-2)。研究成果受到国内外知名学者广泛引用和正面评价, 包括中国科学院院士叶恒强、陈光, 中国工程院院士王国栋、张福成、刘日平, 中国工程院外籍院士刘锦川, 美国工程院院士 Schuh, 德国科学院院士 Raabe, 欧洲科学院外籍院士马恩, 欧洲人文和自然科学院士文东升等。在 TMS 等重要学术会议作邀请报告 30 余次 (附件 2-4)。由孙军院士、蒋成保院士等专家组成的项目鉴定委员会一致评价, “**丰富和发展了金属材料热-动力学相变理论, 在非平衡凝固与固态相变一体化、相变热-动力学协同、相变/变形一体化调控理论等方面处于国际引领地位**” (附件 2-2)。

(一) 针对发现点 1 的客观评价

- 该成果被欧洲科学院外籍院士、西安交通大学马恩教授在 *J. Mater. Sci. Technol.* 中评价为“为理解偏析机理提供了深刻认识 (...providing a deep understanding of segregation)” (附件 2-3-1)。

- 计算材料学知名学者、德国马普可持续材料研究所 Neugebauer 教授等在 *Acta Mater.* 中引用该成果, 建立了考虑溶质偏析效应的晶界能和结合能理论模型, 用于研究溶质偏析对晶界稳定性的影响机制 (附件 2-3-1)。

- 晶界偏析领域著名专家、捷克科学院 Lejček 教授等在 *J. Mater. Sci.* 中引用该成果, 阐述晶界偏析对纳米晶稳定化及界面迁移迟滞的作用 (附件 2-3-1)。

- 欧洲科学院院士、英国利物浦大学文东升教授在 *Acta Mater.* 中基于该成果, 揭示了 Mo 偏析通过降低晶界能、增强界面结合力, 导致退火硬化的热-动力学机制 (代表性引文 8)。

- 该成果提出的溶质偏析迟滞晶界迁移的热-动力学协同机制, 被中国科学院院士叶恒强教授团队和天津大学王祖敏教授等分别在 *Nano Lett.* 和 *J. Mater. Sci. Technol.* 中引用, 用于阐释纳米晶材料的热稳定性机制并指导高热稳定性纳米晶材料的设计 (附件 2-3-1)。

- 中国工程院院士张福成教授团队在多篇论文中引用该成果, 用于解释奥氏体不锈钢高温变形过程中再结晶启动延迟、晶界迁移受阻及组织演化不均匀等现象 (附件 2-3-2)。

- 该成果被日本东北大学 Toshihiro Omori 教授在 *Acta Mater.* 中用于解释 FeMnAlNi 形状记忆合金相变对再结晶晶界迁移的阻滞行为 (...the dispersed FCC and BCC phases exert reciprocal pinning forces, resulting in sluggish or arrested boundary migration behavior...) (附件 2-4-1)。

(二) 针对发现点 2 的客观评价

- 美国物理学会会士、美国佐治亚理工学院 Thadhani 教授等在权威综述期刊 *Prog. Mater. Sci.* 中, 将该成果作为纳米晶材料领域最新进展予以大篇幅论述

（代表性引文 3）。

- 基于该成果中晶界约束相变机制，俄罗斯科学院 Korzhenevskii 教授等在 Phys. Rev. E 中解释了缺陷抑制相界迁移所致的相变增韧现象（“The second mechanism is...these plastic defects can pin the daughter phase down...”）（附件 2-4-2）；中国工程院外籍院士刘锦川教授等在 Mater. Sci. Eng. A 中解释了马氏体界面对奥氏体相形成机制（附件 2-4-2）；北京工业大学郑坤教授等在 Adv. Mater. 中，厘清了晶界对 Cu₂Se 中 α -Cu₂Se/ β -Cu₂Se 相变的影响机制（代表性引文 4）。

- 中科院金属研究所李秀艳研究员等在 Acta Mater. 中，基于该成果中相变速率尺度相关性规律，揭示了纳米晶镍合金中富铬相缓慢析出的物理机制（代表性引文 6）。

- 美国工程院院士、Acta Mater. 时任主编、麻省理工学院 Schuh 教授等在 Phys. Rev. Lett. 中，大篇幅推介该成果晶界约束机制，并据此揭示了纳米晶高温相变导致晶粒反常细化现象（Huang et al. analyzed the transformation kinetics in nanocrystalline Fe₉₁Ni₈Zr alloys...grain boundaries, which played a “double-edged role”...）（代表性引文 1）。

- 美国麻省理工学院 Tasan 教授等在 J. Mater. Res. 中基于共生热-动力学模型及其激活能分析，澄清了 Fe 基高熵合金奥氏体逆相变的位移型控制机制（附件 2-3-3）。

（三）针对发现点 3 的客观评价

- 该成果被美国田纳西大学 Liaw 教授等在 Int. J. Plast. 中用于构建高熵合金中相变与位错机制关联（代表性引文 2）。

- 该成果提出的广义稳定理论被中国工程院院士刘日平团队用于低密度钢 B2 相析出调控，通过定量计算 B2 相的析出驱动力及广义稳定性，确定 B2 相析出与粗化的优化热处理窗口，实现了析出强化与塑性保持的协同调控。

- 德国科学院院士、马普钢铁研究所所长 Raabe 教授和中国工程院院士王国栋教授等，在 Science 中基于该成果设计的双相双峰组织中铁素体和奥氏体物性参数，定量计算了 2GPa 级超高强钢细晶强化贡献（代表性引文 5）。

- 该成果提出的大驱动力-大广义稳定性相变和变形机制成果被领域内多位知名学者用于金属材料相变和力学性能研究。中国工程院院士毛新平教授在 J. Mater. Res. Technol. 中引用该成果开展高性能金属材料研究；中国科学院院士陈光教授等在 Interdiscip. Mater. 中基于相变-变形关联思想研究 TiAl 合金变形机制（“Phase transformation is a specifical deformation behavior...”）。

- 该成果提出的广义稳定性理论在不同材料体系得到应用。借鉴相变与变形关联性思想，西安交通大学马天宇教授在 Acta Mater. 中探究了 Sm-Co 基功能材料中第二相析出热-动力学和磁性能关联性（代表性引文 7）；哈尔滨工业大学曹健教授在 Corros. Sci. 中分析了 316 不锈钢-WC 焊接接头第二相析出与腐蚀性能关联性。可见，广义稳定性理论不仅适用于结构材料强塑性协同调控，也可拓展至功能材料以及材料服役性能研究。

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）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

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	Exploring the concurrence of phase transition and grain growth in nanostructured alloy	Acta Materialia	L.K. Huang, W.T. Lin, B. Lin, F. Liu	2016 年 118 卷 306-316 页	2016 年 8 月 5 日	F. Liu	L. K. Huang	黄林科，林为彤，林博，刘峰	26	SCI	是

2	Grain boundary-constrained reverse austenite transformation in nanostructured Fe alloy: Model and application	Acta Materialia	L.K. Huang, W.T. Lin, K. Wang, S.J. Song, C. Guo, Y.Z. Chen, Y.J. Li, F. Liu	2018 年 154 卷 56-70 页	2018 年 5 月 12 日	F. Liu	L. K. Huang	黄林科，林为彤，王慷，宋韶杰，郭灿，陈豫增，刘峰	20	SCI	是
---	---	-----------------	--	----------------------	-----------------	--------	-------------	--------------------------	----	-----	---

3	Generalized stability criterion for exploiting optimized mechanical properties by a general correlation between phase transformations and plastic deformations	Acta Materialia	L.K. Huang, W.T. Lin, Y.B. Zhang, D. Feng, Y.J. Li, X. Chen, K. Niu, F. Liu	2020 年 201 卷 167-181 页	2020 年 10 月 7 日	F. Liu	L. K. Huang	黄林科，林为彤，张玉兵，冯丹，陈祥，牛凯，刘峰	46	SCI	是
---	--	-----------------	---	------------------------	-----------------	--------	-------------	-------------------------	----	-----	---

4	Correlation between stabilizing and strengthening effects due to grain boundary segregation in iron-based alloys: Theoretical models and first-principles calculations	Acta Materialia	H.R. Peng, W.T. Huo, W. Zhang, Y. Tang, S. Zhang, L.K. Huang, H.Y. Hou, Z.G. Ding, F. Liu	2023 年 251 卷 118899 页	2023 年 4 月 1 日	H. R. Peng, F. Liu	H. R. Peng	彭浩然，霍望图，张伟，唐岩，张霜，黄林科，侯怀宇，丁志刚，刘峰	28	SCI	是
			10								

5	Transition of dynamic recrystallization mechanism during hot deformation of Incoloy 028 alloy	Journal of Materials Science & Technology	X.T. Zhong, L. Wang, L.K. Huang, F. Liu	2020 年 42 卷 241-253 页	2019 年 11 月 16 日	L. K. Huang, F. Liu	X. T. Zhong	钟茜婷，王磊，黄林科，刘峰	58	SCI	是
6											
7											
8											
合 计									178		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对本项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。

填报时括号部分内容删除。）

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
黄林科	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	该项目的第一完成人。制定了总体研究方案，发现了缺陷(溶质、位错、相界)对晶界迁移的热-动力学阻碍效应，揭示了纳米材料相变热-动力学机制，提出了广义稳定性理论，解决了纳米结构材料热稳定性和高强高塑设计难题。对科学发现点 1、2、3 均做出重要贡献，是代表性论文 1、2、3 的第 1 作者，代表性论文 5 的通讯作者，代表性论文 4 的合作者；附件 1-1-1 至 1-1-5。

彭浩然	2	无	工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	该项目的主要完成人之一。阐明了溶质-晶界互作用的热-动力学相关性本质，为纳米晶材料选择稳定化元素提供了理论依据。对科学发现点 1 做出重要贡献，是代表性论文 4 的第 1 作者（附件 1-1-4）。
宋韶杰	3	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	该项目的主要完成人之一。研究了高密度晶界影响下的相变动力学迟缓机制。对科学发现点 2 做出重要贡献，是代表性论文 2 的合作者（附件 1-1-2）。
刘峰	4	主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	该项目的主要完成人之一。全面指导本项目的实验研究和理论分析工作，确保项目的顺利完成。研究了缺陷(溶质、位错、相界)与晶界迁移的热-动力学交互作用，揭示了纳米材料相变热-动力学机制，提出了贯通相变和变形的广义稳定性理论。对科学发现点 1、2、3 均做出贡献，是代表性论文 1、2、3、4 和 5 的通讯作者；附件 1-1-1 至 1-1-5。

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	西北工业大学作为该项目的第 1 完成单位，主导完成发现点 1, 2, 3 的主要理论和实验工作，是代表性论文 1, 2, 3, 5 的第 1 完成单位，是代表性论文 4 的第 3 完成单位。系统深入探索了纳米晶金属材料的热-动力学尺度效应，重要科学贡献包括：(1) 阐明了溶质偏析调控晶界迁移的热-动力学相关性本质，厘清了位错演化导致的再结晶晶界迁移迟滞机制，发现了相界对晶界迁移的热-动力学阻碍效应，解决了金属材料纳米晶粒尺寸的稳定与控制难题；(2) 发现了纳米晶材料相变的热-动力学尺度效应。阐明了纳米晶粒尺度晶界约束相变机制，揭示了晶粒尺寸对相变速率的非单调尺度效应，厘清了相变与晶粒长大共生过程中热-动力学耦合规律，实现了非平衡条件下相变组织的精确调控；(3) 阐明了纳米晶材料变形热-动力学机制的尺度依赖性。建立了贯通相变和变形的广义稳定性理论，提出了高性能金属材料大驱动力-大广义稳定性设计判据，发现了变形热力学和动力学互斥相关性的尺度依赖规律，通过调控界面迁移行为实现了纳米晶材料高热稳定性、强度和塑性的协同提升。
西北有色金属研究院	2	西北有色金属研究院作为该项目的第 2 完成单位，合作完成发现点 1 中部分理论和计算工作，是代表性论文 4 的第 1 完成单位。在发现点 1 中，与西北工业大学合作，共同阐明了溶质偏析调控晶界迁移的热-动力学相关性本质，厘清了位错演化导致的再结晶晶界迁移迟滞机制，发现了相界对晶界迁移的热-动力学阻碍效应，解决了金属材料纳米晶粒尺寸的稳定与控制难题。

八、完成人合作关系说明

黄林科（第一完成人）、宋韶杰（第三完成人）、刘峰（第四完成人）同属于西北工业大学快速凝固与亚稳材料研究团队。刘峰教授为研究团队负责人，黄林科和宋韶杰为团队主要成员。黄林科自 2011 年起致力于该项目的研究工作。2011 至 2018 年期间，黄林科在刘峰教授的指导下完成博士生阶段研究工作。自 2011 年以来，黄林科与刘峰合作发表 5 篇与该项目相关的代表性论文（代表性论文 1-5）。彭浩然（第二完成人）是西北有色金属研究院的高级工程师。2012 年至 2019 年期间，彭浩然在刘峰教授指导下完成博士生阶段研究工作，在此期间与黄林科开始展开合作。黄林科与彭浩然合作发表了 1 篇与该项目相关的代表性论文（代表性论文 4）。2008 年至 2014 年期间，宋韶杰在刘峰教授的指导下完成了博士生阶段研究工作。黄林科与宋韶杰合作发表了 1 篇与该项目相关的代表性论文（代表性论文 2）。