

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

镍基高温合金面棱隅再结晶理论及有序梯度组织创成机理

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果面向未来发动机对高温合金梯度功能部件的重大需求，提出了有序梯度结构设计与一体化制造新思路，在镍基高温合金面棱隅再结晶理论及有序梯度组织创成方面取得多项重要科学发现和理论成果。原创发展了受奥氏体“十四面体”堆垛影响的再结晶理论，厘清了晶面、晶棱、晶隅的再结晶形核优先性及竞争性，揭示了铸态枝晶、等轴粗晶、局部混晶、均匀细晶的遗传演变机理，明晰了低温区细化、高温区粗化、过渡区梯度化的有序梯度演变机制；发明了外高内低间歇式加热的梯度热处理新方法 with 关键装备，突破了盘件有序梯度多晶的精确控制技术，解决了国际公认“盘芯不细、盘缘不粗、过渡区形状和宽度不可控”瓶颈问题；研制“双性能涡轮盘有序梯度结构”达到世界先进水平，取得了一系列具有重要科学意义和学术影响的原创性成果，为我国新一代发动机研制提供了重要支撑。

提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、项目简介

航空发动机被誉为工业皇冠上的明珠，是以航空燃气涡轮发动机为基础的产业集群，对国民经济和科技发展有着巨大带动作用，集中体现国家综合国力、工业基础和科技水平，是国家安全和大国地位的重要战略保障。双性能涡轮盘涉及新设计、新材料和先进制造，是进一步提高飞机性能和效能的重要途径和手段。双性能涡轮盘是世界先进航空发动机的理想产品，其制造思想是优先控制盘芯盘毂部分等轴超细晶以充分优化 300~600℃抗拉强度和低周疲劳性能、然后充分优化盘缘部分弯曲粗晶以显著提高 600~1000℃持久强度和抗蠕变极限性能。围绕镍基高温合金面棱隅再结晶理论和双性能涡轮盘有序梯度结构调控机制开展了系统深入研究。实现了镍基高温合金晶粒和强化相有序梯度调控，指导研制了我国新一代航空发动机双性能涡轮盘（细晶 11 级、粗晶 5 级、锥环状过渡区宽度 5mm），突破了由盘芯盘毂至盘缘的有序梯度结构调控，解决了国际公认“盘芯不细、盘缘不粗、过渡区形状和宽度不可控”难题，相较于 NASA（细晶 9 级、粗晶 6 级、随意过渡）具有细晶更细、粗晶更粗、过渡区可控的优势，达到了涡轮盘有序梯度结构最好水平，推动我国航空发动机热制造技术跨入世界先进行列。取得具体科学发现与创新如下：

（1）创新发展了奥氏体十四面体空间堆垛晶面（两晶粒共面）、晶棱

（三晶粒共线）、晶隅（四晶粒共点）的再结晶形核理论，厘清了晶面、晶棱、晶隅再结晶形核优先性及竞争性，进一步丰富了动态再结晶理论。

（2）揭示了铸态枝晶、等轴粗晶、局部混晶、均匀细晶的遗传演变机理，提出了多火次降温变速开坯锻造方法，解决了高温合金铸锭易开裂、塑性差、不均匀难题，奠定了超细晶涡轮盘热制造基础。

（3）明晰了低温区细化、高温区粗化、过渡区梯度化的有序梯度微观演变机制，发明了梯度热处理新方法和新装备，突破了双性能涡轮盘有序梯度化精确控制技术，解决了国际公认“盘芯不细、盘缘不粗、过渡区形状和宽度不可控”难题。

完成国家自然科学基金、航空发动机重大专项、大飞机重大专项、装备发展部基础预研、工信部专用项目、陕西省自然科学基金、中国博士后科学基金 10 项，总经费 3000 余万元。在国内外重要期刊发表 SCI 论文 60 余篇；5 篇代表性论文 SCI 他引 357 次，2 篇入选高被引论文；出版编著 3 部；被 Prog Mater Sci (IF=40)、Int J Mach Tool Manu (IF=18.8)、Int J Plas (IF=12.8)等客观引用并正面评价。在航空工业安大、中国二重万航、中国航发涡轮院推广应用。获陕西高等学校科学技术研究优秀成果（一等）、中国产学研合作促进会创新成果奖（二等）、中国发明协会创业创新奖（二等）、中国大学生塑性工程创新创业大赛总决赛（一等）。入选“香江学者”计划，获中国产学研合作军民融合先进个人（全国 14 人）。

四、客观评价

1、面棱隅再结晶理论的客观评价

在 J. Mater. Sci. Technol.、Mater. Des.等发表 SCI 论文 20 篇。《Discontinuous dynamic recrystallization and nucleation mechanisms associated with 2-, 3- and 4-grain junctions of polycrystalline nickel-based superalloys（镍基高温合金面棱隅再结晶形核机制）》【附件 1-1-1】入选 ESI 高被引论文。该篇论文首次提出了考虑奥氏体十四面体空间堆垛的再结晶形核理论，厘清了晶面、晶棱、晶隅再结晶形核优先性及竞争性，阐明了面、棱、隅形核对晶粒均匀细化的贡献率。相关成果被 32 个国家包括哈工大、剑桥大学等知名院校引用评价。受邀 ICTP、Superalloy、中国高温合金年会、中国锻造技术大会等作邀请报告。

Mohammad 教授在 Progress in Materials Science (IF=40) 正面引用评价了该成果【附件 1-2-1】；哈工大万领军单德彬教授在 International Journal of Plasticity (IF=12.8) 上高度肯定了该成果【附件 1-2-2】；燕大国万领军彭艳教授在 International Journal of Mechanical Sciences (IF=9.4) 认为“...位错密度积累变形储存能超过临界形核功时无位错晶粒在位错梯度驱动下形核”【附件 1-2-3】；山大马宏教授在 International Journal of Machine Tools and Manufacture (IF=18.8) 上高度肯定了该成果，并直接采用“再结晶激活能成果数据”开展相关研究【附件 1-2-4】。另外，英国皇家工程院林建国院士借鉴相关成果建立了面棱隅位错密度变化粘塑性模型；剑桥大学 Catherine 教授评价“...晶棱再结晶形核具有原创性”。获陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等【附件 2-6】。

2、塑性成形全过程遗传演变机理的客观评价

在航空学报、J. Alloys Compd.、Mater. Des.等发表 SCI 论文 16 篇。

《Microstructural origin and control mechanism of the mixed grain structure in Ni-based superalloys (镍基高温合金混晶遗传演变调控机理)》【附件 1-1-3】入选 ESI 高被引论文。英国 Coyne-Grell 教授评价“考虑初始组织非均匀特性的热变形组织遗传演变研究具有前瞻性”【附件 1-2-5】；大连理工何祝斌教授大篇幅引用了该成果，利用遗传演变相关结果开展了“高温合金热变形组织演变全过程的 $\langle 111 \rangle$ //X1 弱织构研究”【附件 1-2-6】。另外，中南大学国万领军蔺永诚教授认为“...组织遗传演变研究系统地阐明了初始组织状态对高温合金热锻流变特性的影响”，并在此基础上开展了锻件失效行为的相关研究。获中国产学研合作促进会创新成果二等奖【附件 2-7】、“太平洋精锻杯”中国大学生塑性工程创新创业大赛总决赛一等奖【附件 2-8】。

3、有序梯度组织创成机理的客观评价

在金属学报、Aerospace Sci. Tech.、Mater. Sci. Eng. A 等发表 SCI 论文 12 篇；

《Structural-gradient-materials produced by gradient temperature heat treatment for dual-property turbine disc (基于梯度热处理法制备的双性能涡轮盘用梯度结构材料)》【附件 1-1-5】是发表较早关于有序梯度结构调控机制的学术论文。该篇论文报到了对超细晶轮盘进行梯度热处理制备有序梯度组织的研究成果，阐明了间接性“内高外低”梯度温度场作用下梯度组织形成机制，为我国双性能涡轮盘研制奠定了坚实的理论基础和技术保障。

南航校长宋迎东教授评价“To meet the site-specific properties of the turbine disc and to optimize the creep, low cycle fatigue and FCP performance, dual microstructure heat treatment (DMHT) was developed and employed to process the turbine disc by introducing a temperature gradient over the disc during solutioning heat treatment, yielding a fine grain structure at the disc bore, coarse grain structure at the disc rim, and a grain size transition zone across the disc web...为进一步同时提高抗蠕变和低周疲劳性能，采用梯度热处理制备有序梯度组织是行之有效的方法...”【附件 1-2-7】；美国内布拉斯加大学林肯分校王健讲席教授发表在 International Journal of Plasticity (IF=12.8) 的论文对该成果给与了高度评价【附件 1-2-8】。另外，美国 ASME 会士 Liu 教授认为“...approach to preventing plastic flow localization is to combine materials with distinct flow localization behaviors in gradient microstructures...有序梯度结构可防止局部塑性流动而进一步提高双性能”。持有双性能盘制造发明专利 6 件；指导研制了新一代航空发动机双性能涡轮盘（细晶 11 级、粗晶 5 级、锥环状过渡区宽度 5mm），相较于 NASA（细晶 9 级、粗晶 6 级、随意过渡）具有细晶更细、粗晶更粗、过渡区可控的优势；中国航发四川燃气涡轮研究院认为“...达到了涡轮盘有序梯度结构最好水平，解决了双性能涡轮盘制造国际难题，保障了某航空发动机型号研制任务”；获中国发明协会创业创新二等奖【附件 2-9】。

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	Discontinuous dynamic recrystallization and nucleation mechanisms associated with 2-, 3- and 4-grain junctions of polycrystalline nickel-based superalloys	Materials & Design	Bingchao Xie, Heng Li, Yongquan Ning, M.W. Fu	231: 112041	2023.7.1	Yongquan Ning	Bingchao Xie	谢炳超, 李恒, 宁永权	81	SCI	是
2	DDRX and CDRX of an as-cast nickel-based superalloy during hot compression at γ' sub-/super-solvus temperatures	Journal of Alloys and Compounds	Bingchao Xie, Baoyun Zhang, Yongquan Ning, M.W. Fu	803: 16- 29	2019.9.3 0	Yongquan Ning	Bingchao Xie	谢炳超, 余浩, 盛涛, 熊昱航, 宁永权	96	SCI	是

3	Microstructural origin and control mechanism of the mixed grain structure in Ni-based superalloys	Journal of Alloys and Compounds	Baoyun Zhang, Zhaotian Wang, Hao Yu, Yongquan Ning	900: 163515	2022.4.15	Yongquan Ning	Baoyun Zhang	张保云, 王兆天, 余浩, 宁永权	75	SCI	是
4	Microstructure evolution and underlying mechanisms during the hot deformation of 718Plus superalloy	Materials Science and Engineering: A	Bingchao Xie, Baoyun Zhang, Hao Yu, Hao Yang, Qi Liu, Yongquan Ning	784: 139334	2020.5.15	Yongquan Ning	Bingchao Xie	谢炳超, 张保云, 余浩, 杨昊, 刘琦, 宁永权	77	SCI	是
5	Structural-gradient-materials produced by gradient temperature heat treatment for dual-property turbine disc	Journal of Alloys and Compounds	Yongquan Ning, Zekun Yao, Hongzhen Guo, M.W. Fu	557: 27-33	2013.4.25	Yongquan Ning	Yongquan Ning	宁永权, 姚泽坤, 郭鸿镇	21	SCI	是

6	航空宇航金属材料塑性加工新技术	编著	宁永权, 姚泽坤	9787567775725	2016.8.1	宁永权	宁永权	宁永权, 姚泽坤	0		是
7	锻造工艺学与模具设计	编著	姚泽坤	9787561237274	2013.7.1	姚泽坤	姚泽坤	姚泽坤	0		是
8	合金钢与有色金属锻造	编著	郭鸿镇	9787561211342	2009.7.1	郭鸿镇	郭鸿镇	郭鸿镇	0		是
合 计									350		

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
宁永权	1	无	研究员	西北工业大学	西北工业大学	<p>（1）制定了总体研究计划，组织实施实验研究和理论分析。</p> <p>（2）发展了考虑奥氏体十四面体空间堆垛的再结晶形核理论，厘清了晶面、晶棱、晶隅再结晶形核优先性及竞争性；揭示了低温区细化、高温区粗化、过渡区梯度化的有序梯度微观演变机制；突破了双性能涡轮盘有序梯度化精确控制，解决了盘芯不细、盘缘不粗、过渡区形状和宽度不可控难题。</p> <p>（3）对科学发现点 1、2、3 做出实质性贡献，是代表性论文 5 的第一作者，是代表性论文 1、2、3、4、5 的通讯作者。支撑材料附件编号：1-1-1、1-1-2、1-1-3、1-1-4、1-1-5。</p>
谢炳超	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	<p>（1）主要负责高温合金多次渐进变形及组织演变规律研究。</p> <p>（2）发现了晶面、晶棱、晶隅临界形核功的显著差异，即晶面临界形核功是晶棱的 1.95 倍、晶隅的 3.1 倍，厘清了晶面、晶棱、晶隅再结晶形核优先性及竞争性。</p> <p>（3）对科学发现点 1、2 做出重要贡</p>

						献，是代表性论文 1、2、4 的第一作者。支撑材料附件编号：1-1-1、1-1-2、1-1-4。
王兆天	3	无	无	西北工业大学	西北工业大学	<p>(1) 主要负责高温超长时服役条件下的力学性能衰减及组织退化规律研究。</p> <p>(2) 揭示了 20000 小时热暴露条件下的强化相熟化机制及性能衰减机理，探明了有序梯度结构晶粒均匀过渡匹配细晶强化、弥散强化和弯曲晶界抗蠕变进而实现双性能的物理机制和科学本质，为探索双性能创成机理奠定了基础。</p> <p>(3) 对科学发现点 1、3 做出重要贡献。支撑材料附件编号：1-1-3。</p>
张保云	4	无	无	西北工业大学	西北工业大学	<p>(1) 主要负责遗传演变机理及均匀细化机制研究。</p> <p>(2) 揭示了铸态枝晶、等轴粗晶、局部混晶、均匀细晶的遗传演变机理，提出了面棱隅分布因子函数，阐明了面、棱、隅形核对晶粒均匀细化的贡献率，奠定了超细晶涡轮盘热制造的理论基础。</p> <p>(3) 对科学发现点 1、2 做出重要贡献，是代表性论文 3 的第一作者。支撑材料附件编号：1-1-3。</p>

姚泽坤	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	<p>(1) 主要负责有序梯度结构调控机制及双性能创成机理研究。</p> <p>(2) 研发了内外双系统间歇性加热的梯度热处理装置，实现了“外高内低”梯度温度场的精确控制，揭示了低温区促进形核细化、高温区加速晶界移动粗化、绝热区混晶梯度化的有序梯度演变机制，奠定了发动机双性能盘研制的基础。</p> <p>(3) 对科学发现点 3 做出重要贡献，是代表性论文 5 的作者，是编著 6 的作者，是编著 7 的唯一作者。支撑材料附件编号：1-1-5、1-1-6、1-1-7。</p>
郭鸿镇	6	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	<p>(1) 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。</p> <p>(2) 设计了针对镍基高温合金宏微观结构调控及精确塑性成形的研究方案。实现了高温合金荒坯在高凸台、长辐板、窄飞边盘形模腔内的稳定塑性流变，揭示了关联形状变化、表面渐变与缺陷控制的体表渐变精密成形原理，将这一成果应用于未来发动机梯度功能部件的设计与研制。</p> <p>(3) 对科学发现点 2、3 做出重要贡献，是代表性论文 5 的作者，是编著 8 的唯一作者。支撑材料附件编号：1-1-</p>

						5、1-1-8。
--	--	--	--	--	--	----------

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	西北工业大学为宁永权团队提供了优越的软硬件条件，建立了高温合金特种锻造和梯度热处理实验室，确保了项目的顺利进行。主要学术贡献包括：创新发展了奥氏体十四面体空间堆垛晶面、晶棱、晶隅的再结晶形核理论，厘清了晶面、晶棱、晶隅再结晶形核优先性及竞争性，进一步丰富了金属材料动态再结晶理论；明晰了低温区细化、高温区粗化、过渡区梯度化的有序梯度微观演变机制，发明了超细晶涡轮盘梯度热处理新方法和新装备，突破了双性能涡轮盘有序梯度化精确控制技术，解决了国际公认“盘芯不细、盘缘不粗、过渡区形状和宽度不可控”难题。该项目所有成果均在西北工业大学完成，其知识产权归西北工业大学所有。
	2	
	3	

八、完成人合作关系说明

该项目六位完成人工作单位均为西北工业大学，共同承担完成了国家自然科学基金、航空发动机重大专项、大飞机重大专项、装发基础预研等。第一完成人宁永权，是五个国家级项目的负责人，是五篇代表性论文的通讯作者。第二完成人谢炳超是第一完成人宁永权的博士后，主要负责高温合金多次渐进变形及组织演变规律研究，发现了晶面、晶棱、晶隅临界形核功的显著差异，厘清了晶面、晶棱、晶隅再结晶形核优先性及竞争性，合作发表代表性论文 1、2、4。第三完成人王兆天在第一完成人宁永权指导下进行完成硕士和博士学习，主要负责高温超长时服役条件下的力学性能衰减及组织退化规律研究，合作发表代表性论文 3。第四完成人张保云在第一完成人宁永权指导下进行完成硕士和博士学习，主要负责遗传演变机理及均匀细化机制研究，合作发表代表性论文 3。第五完成人姚泽坤是第一完成人宁永权的硕士和博士导师，一直参与项目研究，主要负责有序梯度结构调控机制及双性能创成机理研究，合作发表代表性论文 5 和编著 1。第六完成人郭鸿镇作为原课题组长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，是第一完成人宁永权的博士后合作导师，合作发表代表性论文 5。