

一、项目名称

单晶叶片高性能修复机理研究

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：该成果面向航空发动机单晶叶片修复这一关键技术难题，针对修复组织单晶完整度及性能调控的基础科学问题展开了相关研究。突破了常规利用激光熔覆参数改变杂晶形成的局限，提出了采用基体晶向旋转和晶面变化调控“柱状晶-等轴晶”转变的思路，揭示了基体晶向对单晶完整度的作用机理并确定了单晶修复最优晶向。建立了不同晶界属性条件下溶质原子扩散动力学的相场模型，发现会聚型晶界和发散型晶界溶质原子扩散浓度不同，澄清了晶界属性对凝固裂纹的作用机理。通过激光参数与基体取向耦合调控修复组织及性能，揭示了 γ' 相形貌、尺寸和 γ/γ' 两相元素分布对修复组织综合性能的调控机制。研究成果选题准确，发表的论著国内外引用率较高，受到国内外学术界的好评和认可，为单晶叶片维修过程中保障良好的单晶完整度、避免凝固裂纹和调控组织性能奠定了理论和应用基础，具有重要的学术价值和理论意义，对学科建设和经济社会发展有重要的指导作用。成果材料齐全、规范、无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

该项目属于材料科学领域。

航空发动机是飞机的核心，内部最重要的热端部件是单晶叶片，其可靠、安全、稳定服役是发动机提供动力的基础。单晶叶片的组成材料为镍基高温合金，具有优异的高温力学性能，但缺点是在高温、高载荷及腐蚀性气体环境中叶尖等部位易产生裂纹、点蚀和破损等损伤，导致发动机失效。直接更换新件的成本十分昂贵，采用修复的方法实现单晶叶片延寿具有重要的战略意义和经济价值。

实现单晶叶片修复必须满足以下三个条件：首先须获得单晶完整度良好的修复组织（获得单晶），其次修复过程中不能产生凝固裂纹（抑制裂纹），最后还应保证修复区组织性能不低于基体（提升性能），以实现单晶叶片的高性能修复。三个条件环环相扣，是单晶叶片高性能修复成功与否的决定性因素。解决与其相关的基础科学问题，阐明相关因素的作用规律并揭示其机制，实现高性能的修复，对奠定修复单晶叶片的基本理论和应用领域具有重要意义。本研究方向国内外虽有相关报道，但文献多通过调节激光参数来减少杂晶，未能发挥单晶基体在枝晶生长过程中各向异性特性的作用，难以保障修复组织的单晶完整度；同时，目前关于晶界对凝固裂纹作用的研究主要集中于晶界角增大时晶界能的作用，而对晶界类型（会聚/发散）如何影响凝固裂纹鲜有报道；再者，由于单晶修复难度极大，对于修复组织及性能调控的基础研究工作仍属空白。

该团队在国家计划、国家自然科学基金、航空科学基金等项目的支持下，针对单晶叶片高性能修复关键基础问题，打破了基于改变激光参数调控单晶完整度的局限，提出了利用基体取向调控修复组织单晶完整度的思路，保障了修复组织良好的单晶完整度；其次，考虑了晶界类型对溶质原子扩散动力学的作用，澄清了其凝固裂纹形成的内在机理，建立了裂纹敏感性与晶界属性的关系；最后，利用激光参数和基体取向协同调控的方法，提升了修复组织的抗电化学腐蚀、抗高温腐蚀及力学性能，揭示了高性能修复的相关机理。**主要研究内容包括：**1) 基体取向对修复组织单晶完整度的作用机制；2) 小角度晶界类型（会聚/发散）对修复过程中晶间液膜形成动力学及凝固裂纹敏感性的影响规律；3) 激光参数和基体取向对修复组织性能的协同调控机制。**取得的科学发现点如下：**

1) 基于单晶高温合金 fcc 结构在激光熔凝过程中枝晶生长各向异性的特性，提出了利用基体取向调控单晶完整度的思路：当基体绕[010]轴旋转 $\pm 45^\circ$ 及在(011)面上选择[01 $\bar{1}$]晶向时，枝晶生长“柱状晶-等轴晶”转变（CET）能力最小，即杂晶形成能力最小，可获得良好的单晶组织，揭示了特定晶面和特定晶向抑制杂晶的作用机制。

2) 澄清了晶界类型（会聚/发散）影响修复过程中凝固裂纹形成的机理：晶界角相同时，当晶界为会聚型晶界和发散型晶界时，溶质元素的扩散动力学差异导致液相长度不同，改变裂纹敏感度，建立了基于晶界类型预测凝固裂纹的模型；晶界类型固定时，晶界能和元素扩散耦合控制凝固裂纹敏感性；提出了改变晶界角或晶界种类抑制凝固裂纹的方法，在 DD6 单晶高温合金中得以验证。

3) 提出了采用修复参数与基体取向协同调控修复组织性能的思路，获得了综合性能优于单晶基体的修复组织：通过调控激光参数和基体晶向，改变了修复组织中 γ' 相的组织特征，获得了优于基体组织的抗电化学腐蚀、抗热腐蚀及力学性能，发现 γ' 相的形貌、尺寸及元素分布对强化修复组织性能的主导作用，提出了耦合激光参数和基体晶向调控高性能修复组织的方法，揭示了其作用机制。

该项目的科学价值在于：突破了常规利用激光熔覆参数改变杂晶形成的局限，提出了采用基体晶向旋转和晶面变化调控“柱状晶-等轴晶”转变的思路，揭示了基体晶向调控单晶完整度的机理，确定了单晶修复最优晶向。建立了不同晶界属性条件下溶质原子扩散动力学的相场模型，发现会聚型晶界和发散型晶界溶质原子扩散浓度不同，澄清了晶界属性对凝固裂纹的作用机理。阐明了激光参数与基体取向调控修复组织及性能的耦合规律，揭示了 γ' 相形貌、尺寸和 γ/γ' 两相元素分布对修复组织综合性能的调控机制。研究成果为我国单晶叶片维修过程中保障良好的单晶完整度、避免凝固裂纹和调控组织性能奠定了理论和应用基础。

项目研究期间，研究团队在该方向发表 SCI 论文 38 篇，主要包括 Acta Materialia 5 篇、Corrosion Science 3 篇、Applied Surface Science 2 篇、Journal of Alloys and Compounds 2 篇、Surface & Coatings Technology 2 篇、Materials Science and Engineering A 1 篇等。

项目 5 篇代表性论文发表于 Acta Materialia（一区 Top）5 篇，他引 265 次。

国际凝固领域权威 W. Kurz 教授在材料学顶刊 *International Materials Reviews* 期刊评价：“取得了有趣的发现：晶界通道内的元素偏析不仅取决于晶界角，还与晶界类型（会聚/发散）有关”；美国金属材料领域专家 T. DebRoy 教授在材料学顶刊 *Progress in Materials Science* 两度引用并评价：“论文定量预测了合金的柱状晶-等轴晶转变，对于单晶沉积层的质量十分关键”；中国工程院院士、北京航空航天大学王华明教授在其发表于 *Materials Science and Engineering: A* 期刊的论文中评述：“论文发现在单层沉积过程中，不同的基体取向导致了 CET 敏感性的差异”。

四、客观评价

● 发现点（1）客观评价：

- (1) 凝固领域国际著名专家、洛桑联邦理工学院 W. Kurz 教授在国际著名综述性期刊 *International Materials Reviews* 上发表论文[66 (2021) 36-76]认为：“在前期单晶熔覆基础上，CET 模型被分别成功地应用到了焊接、增材制造及在高温合金中控制晶体取向[244]”（*CET models were also applied with a certain success to welding, to additive manufacturing, or the control of crystallographic orientation in superalloys [244] that was based on previous research on SX deposition.*）
- (2) 美国金属学会(ASM)会士、北德克萨斯大学智能增材中心 N.B. Dahotre 教授在国际著名综述性期刊 *International Materials Reviews* 上发表论文[68 (2023) 943-1009]认为：“研究获得了合金的柱状晶-等轴晶转变（CET）条件”（*Various alloys such as Rene N5 ... are currently being examined to obtain their CET conditions [335-341].*）
- (3) 材料科学领域国际著名专家、美国宾夕法尼亚大学 T. DebRoy 教授在国际著名综述性期刊 *Progress in Materials Science* 发表两篇论文[92 (2018) 112-224; 116 (2021) 100703]引用了该项目成果并评价：“增材制造过程中晶粒结构的演变方面作了大量的努力”、“结合传输模型和晶体生长模型有效地预测了局域凝固组织的取向、形貌、尺寸等重要的微观组织特征”（*Significant effort has been made to study the evolution of grain structure during AM [4,25,34,300,315,324,325,329,352-380]; Combining a transport phenomena model...solidification structure can be effectively predicted [320-322].*）
- (4) 先进焊接与连接国家重点实验室主任、哈尔滨工业大学陈彦宾教授在增材制造领域顶级期刊 *Additive Manufacturing* 上发表论文[48 (2021) 102429]引用了该项目成果：“根据 Wang 等人的研究[29,31,32]，沿[010]方向旋转的基体能够抑制枝晶转向并减少交叉点数量”（*According to Wang et al. [29,31,32], substrate rotated around the [010] direction can prevent turning dendrites and reduce intersection points.*）

● 发现点（2）客观评价：

- （1）凝固领域国际著名专家、洛桑联邦理工学院 W. Kurz 教授在国际著名综述性期刊 International Materials Reviews 上发表论文[66 (2021) 36-76]认为：“基于相场模型，王等人[316]有一个有趣的发现：晶间液膜通道不仅取决于晶界角，而且取决于晶界的会聚/发散属性”(Based on PF modelling, Wang et al. [316] made an interesting observation: solute segregation at grain boundary channels depends not only on their misorientation angle, but also on the convergent/divergent nature of the boundary)，并引用了代表性论文 4 中的图作为他们论文的图 32。
- （2）法国国家科学研究中心著名学者 G. Martin 教授在 Acta Materialia 上发表论文[142 (2018) 82-94]认为：“在晶间区域，应变能够被枝晶二次臂碰撞搭桥所传递，由此避免裂纹形成。换句话说，这意味着随着晶界角变化，晶界行为会改变[52]”(In these regions, strains could be transmitted by the bridges existing between the dendrite secondary arms avoiding the formation of cracks. In other words it means that depending on the misorientation, the behavior of grain boundaries changes [52].)
- （3）荷兰代尔夫特理工大学 X. Liang 教授在 Acta Materialia 上发表论文[283 (2025) 120530]认为：“RDG 模型[19]和 Kou 模型[19-21]与相场模型耦合，用于详细地模拟糊状区的枝晶结构并提供更接近实际的凝固路径”(the RDG model [19] and Kou’s model [19-21] have been coupled with phase field models, to explicitly simulate the dendrite structure in the mushy zone and provide a more realistic solidification path...)

● 发现点（3）客观评价：

- （1）中国工程院院士、北京航空航天大学王华明教授在 Materials Science and Engineering: A 上发表论文[889 (2024) 145965]引用：“陈等人[32]发现在单层沉积过程中，不同的基体取向导致了 CET 敏感性的差异”(Chen et al. [32] found that distinct substrate orientations resulted in diverse sensitivities to the CET during the one-layer deposition.)
- （2）金属增材制造领域著名学者、印度理工大学 S. Roy 教授在 Materials Characterization 上发表论文[225 (2025) 115156]引用：“大多数晶粒沿构建方向柱状生长，尽管由于靠近上边缘区域的 $G \times R$ 参数较大，晶粒生长会受到一定程度的限制[85]”(Most of the grains here undergo columnar growth along the build direction although the grain growth is somewhat restricted due to high $G \times R$ parameter towards the top edge [85].)

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	Effect of substrate orientation on the columnar-to-equiaxed transition in laser surface remelted single crystal superalloys	Acta Materialia	L. Wang, N. Wang, W.J. Yao, Y.P. Zheng	2015 年 88 卷 283-292 页	2015 年 2 月 14 日	N. Wang	L. Wang	王雷, 王楠, 姚文静, 郑亚萍	88	Web of Science	是
2	Effect of substrate orientation on the formation of equiaxed stray grains in laser surface remelted single crystal superalloys: Experimental investigation	Acta Materialia	L. Wang, N. Wang	2016 年 104 卷 250-258 页	2015 年 12 月 17 日	N. Wang	L. Wang	王雷, 王楠	70	Web of Science	是

3	A comparable study on stray grain susceptibilities on different crystallographic planes in single crystal superalloys	Acta Materialia	J.C. Guo, P. Rong, L. Wang, W.J. Chen, S.X. Han, R.N. Yang, X.W. Lei, W.J. Yao, N. Wang	2021 年 205 卷 116558 页	2020 年 12 月 16 日	N. Wang	J.C. Guo, P. Rong	郭嘉琛, 荣鹏, 王雷, 陈文近, 韩三轩, 杨瑞宁, 雷晓维, 姚文静, 王楠	23	Web of Science	是
4	Liquid channel segregation and morphology and their relation with hot cracking susceptibility during columnar growth in binary alloys	Acta Materialia	L. Wang, N. Wang, N. Provatas	2017 年 126 卷 302-312 页	2017 年 1 月 10 日	N. Wang, N. Provatas	L. Wang	王雷, 王楠	75	Web of Science	是
5	Laser deposited superalloys with rotated substrate orientations: Microstructures and single-crystal formation	Acta Materialia	W.J. Chen, S.X. Han, J.C. Guo, R.N. Yang, X.W. Lei, W.J. Yao, N. Wang	2023 年 244 卷 118566 页	2022 年 11 月 28 日	N. Wang	W.J. Chen	陈文近, 韩三轩, 郭嘉琛, 杨瑞宁, 雷晓维, 姚文静, 王楠	9	Web of Science	是
合 计									265		

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
王楠	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2、3 做出了创新性贡献，是代表性论著 1、2、3、4、5 的通讯作者，具体包括：提出了利用基体晶向调控修复组织单晶完整度、建立裂纹敏感性与晶界属性的关系及采用基体取向和激光参数协同调控修复组织性能的思想，揭示了单晶叶片修复过程中保障单晶完整度、避免凝固裂纹及协同提升组织性能的机理。
雷晓维	2	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、3 做出了创新性贡献，是代表性论著 3、5 的共同作者，具体包括：设计了不同晶面对单晶完整度的实验方案，建立了晶体学取向与修复组织性能之间的关系，阐明了激光参数协同调控修复组织性能的规律，并揭示了机制。
王雷	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、2 做出了创新性贡献，是代表性论著 1、2、4 的第一作者，代表性论著 3 的共同作者，具体包括：阐明了不同旋转轴对单晶完整度的作用规律，揭示了其作用机制，建立了裂纹敏感性与晶界属性关系的相场模型。

姚文静	4	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对科学发现点 1、3 做出了创新性贡献，是代表性论著 1、3、5 的共同作者，具体包括：研究了不同旋转轴对修复组织单晶完整度的作用规律，进行了数值模拟计算，揭示了相关机制。
-----	---	---	-----	--------	--------	--

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	西北工业大学是本项目的唯一完成单位。西北工业大学为本项目组提供了良好的工作环境，从管理和服务上保证了项目的顺利完成。对本项目的贡献包括：提供了场地、水电、仪器设备等硬件条件；提供书籍、电子数据库、文献检索等条件；学校的科研管理部门、财务部门为项目的日常管理和服务提供了重要支撑。

八、完成人合作关系说明

本人（王楠）为项目的第一完成人，是本研究团队的负责人。第二完成人雷晓维、第四完成人姚文静是本团队的教师，一直以核心成员的身份参与该项目的研究工作；第三完成人王雷在完成该项目研究工作期间是本人的博士研究生，在本人指导下参与了该项目的研究工作。