

## 2025 年山西省科学技术奖提名公示内容

**项目名称：**抗起皱铁素体不锈钢组织织构与成形性调控理论及方法

**提名者：**中北大学

**提名意见：**

该项目针对中高铬铁素体不锈钢因不利织构遗传、晶粒簇粗化导致成形性差、易起皱的共性难题，建立了再结晶组织织构调控新理论与新方法，调控获得了均匀单一强  $\gamma$  纤维织构与均匀细小的再结晶组织，显著提高  $r$  值、降低  $\Delta r$  值、提高表面质量（抑制起皱），实现了抗起皱铁素体不锈钢组织与性能精准预测及高成形性制备。

该项目发展了剪切带诱导微晶形核与择优长大的再结晶织构形成理论，提出了适用中铬铁素体不锈钢的“低温热轧剪切带形核去害（初调）+大变形冷轧微晶辅助再结晶形核增益（终调）”的全流程组织织构调与成形性调控方法。提出了 Laves 相辅助剪切带微晶形核的再结晶织构协同调控理论，形成了高铬铁素体不锈钢“预析出亚微米 Laves 相+短时高温退火”全流程组织织构调与成形性调控方法。基于“微晶诱发形核与择优生长”与“Laves 相选择性钉扎”协同原理，建立了“初始热轧组织→大变形冷轧工艺→退火工艺→微观组织→成形性能”的铁素体不锈钢全流程介观尺度集成模型，定量揭示了再结晶形核与长大的三维空间非均匀性规律，实现了 80%以上冷轧压下量的三维全场晶体塑性和自动元胞机模拟，完成了  $r$  值、 $\Delta r$  值与表面粗糙度的统一精准预测。

项目五篇代表作他引 334 次，相关成果经中国金属学会鉴定达到国际领先水平，对推动我国高性能铁素体不锈钢开发具有重要科学意义。

本提名项目材料真实有效，知识产权无争议，所有栏目均符合填写要求。

提名该项目申报 2025 年度山西省自然科学奖二等奖。

**项目简介：**

本项目属于不锈钢轧制技术领域。

铁素体不锈钢是腐蚀环境应用的低成本关键基础材料，不锈钢产业也是山西省特色产业。然而，其平均塑性应变比  $r$  值偏低、平面各向异性指数  $\Delta r$  偏高、成形表面易起皱，是制约成形性能提升、阻碍更大规模应用的核心瓶颈。 $\gamma$  纤维织构强度不足导致  $r$  值偏低，有害 Goss 与  $\alpha$  取向残留导致  $\Delta r$  值偏高，晶粒簇粗

大且分布不均导致起皱。系统性调控理论与方法缺失是根本制约，获得单一均匀的强  $\gamma$  纤维织构与细晶组织是提升成形性能的关键。依托国家自然科学基金等项目，历经 10 余年系统研究，项目突破了铁素体不锈钢组织织构与成形性能调控理论与方法，并应用于抗起皱铁素体不锈钢系列产品研发。主要创新成果如下：

（1）剪切带诱发微晶辅助  $\gamma$  纤维织构形成机制与抗起皱调控方法：揭示了冷轧剪切带中“微晶继承形核+择优生长”协同主导再结晶  $\gamma$  纤维织构形成的新机制；建立了晶粒簇定量表征体系，阐明了  $\Delta r$  值随总压下率“先升后降”的非单调演变规律及其影响起皱的物理本质，提出“剪切带辅助微晶形核与长大”的调控思路，形成了“大压下率冷轧与中间退火”的抗起皱中铬铁素体不锈钢技术路线。

（2）Laves 相协同微晶调优  $\gamma$  纤维织构机理与高成形性协同调控方法：揭示了大冷变形诱导亚微米 Laves 相高温析出行为及其“Nb<sub>2</sub>C→Laves 转变”新机制；阐明了纳米 Laves 相选择性钉扎有害  $\alpha$  取向晶界及利用 {111}〈112〉择优生长消耗有害 Goss 组分发展  $\gamma$  纤维织构的新原理；创建了“大压下率冷轧+预析出 Laves 相+短时再结晶退火”技术方法，实现了高 Cr 超级铁素体不锈钢  $r$  值 3.0 的突破性进展。

（3）铁素体不锈钢冷轧-退火-成形全流程介观尺度集成模型与成形性能预测方法：发展了晶体塑性自适应大变形网格重划分技术，构建了耦合大压下量冷轧三维全场晶体塑性模型与再结晶退火三维元胞自动机模型的介观尺度集成模型，建立了“制备工艺-微观组织-成形性能”定量关系，实现了  $r$  值、 $\Delta r$  值等成形性能指标的精准预测，形成了工艺性能模拟预测方法。

#### 客观评价：

本项目在提供的 5 篇代表作他引 334 次，获得了国内外众多知名学者的正面评价。美国路易斯安那大学、Materials Technology 期刊主编 Devesh MISRA 教授团队在“ISIJ International, 2014, 54: p1406”中引用了关于将热轧终处理温度降至约 1020 K 可在稳定化 21%Cr 及 17%Cr 铁素体不锈钢中产生积极效果的结论。芬兰奥卢大学 S.V. Mehtonen、英国谢菲尔德大学 E.J. Palmiere 教授团队、美国路易斯安那大学拉法叶分校 R.D.K. Misra 教授联合在“Materials Science & Engineering A, 2014, 601: p7”中引用了关于热变形及后续退火过程中形成均匀  $\gamma$  纤维再结晶织构至关重要的研究结论。德国卡尔斯鲁厄理工学院 Jens Reiser 研究

员团队在“International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 85: p9”中指出, 高应变条件下取向密度峰值会向( $\{113\}<110>$ )取向偏移, 该特征对应晶粒沿轧制方向发生转动, 且旋转立方织构是铁素体钢这类冷轧体心立方薄板的典型织构类型, 为解析 BCC 金属轧制变形织构演化规律提供了共性试验依据。澳大利亚伍伦贡大学蒋正义教授团队在“Materials Science and Engineering A, 2017, 685: p359”中评价引用了团队工作: “张等研究了热轧剪切带对铁素体不锈钢成形性和起皱行为的影响, 发现剪切带可在晶粒内部和晶界处促进再结晶形核, 推动组织细化。含剪切带的晶粒内生成大量 $\{111\}$ //ND 取向的形核核心, 促成热轧退火板材中  $\gamma$  纤维织构形的成”。合肥工业大学吴玉成教授团队在“Materials Science and Engineering A, 2018, 738: p335”中评价: 均匀  $\gamma$  纤维再结晶织构可有效抑制铁素体不锈钢塑性变形阶段的表面起皱缺陷, 该织构调控思路为改善铁素体不锈钢板材表面成型质量、解决橘皮纹缺陷提供了关键理论支撑。中国科学院金属研究所孙明月研究员团队在“Materials & Design, 2026, 263: p11”中引用了关于强织构的形成对增强铌层间结合力起关键作用, 且 $\{110\}<110>$ 、 $\{112\}<110>$ 和 $\{110\}<112>$ 织构是高度轧制体心立方金属典型结构的结论, 为其研究通过调控界面反应层实现马氏体时效钢/高熵合金异种材料高强度连接提供了织构强化与界面调控方面的理论依据。印度霍米·巴巴国家研究所(巴巴原子研究中心)V. Singh G 团队发表在“Acta Materialia, 2026, 310: p1”中引用了团队发现的增加 Cr 元素含量可以稳定铁素体相, 同时增加 Cr 浓度也会促进有害  $\sigma$ -相形成, 为研究富 Cr 马氏体不锈钢抑制有害相形成提供了基础。德国于利希研究中心 Tarek Allam 教授团队在“Materials Science and Engineering A 2024, 908: p1”中引用了 Laves 对强度和塑性的积极作用, 为其研究 HiperFer 钢提供了理论依据。香港理工大学傅铭旺讲席教授团队在“International Journal of Plasticity, 2024, 181: p13”中引用团队此前“引入高铬元素以获得更优异耐腐蚀性能”的研究成果, 为其采用选区激光熔化(SLM)技术制备的、沿厚度方向呈现从富铬到低铬结构过渡的成分梯度板材研究提供了理论指导。

#### 代表性论文专著目录:

1. Lu Hui-Hu, Luo Yi, Guo Hong-Kui, Li Wen-Qi, Li Jian-Chun, Liang Wei\*. Microstructural evolution and mechanical properties of 27Cr-4Mo-2Ni ferritic stainless steel during isothermal aging. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-

STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING, 2018,725:31-39.

2. Lu Hui-Hu, Guo Hong-Kui, Luo Yi, Liu Zhen-Guang, Li Wen-Qi, Li Jian-Chun, Liang Wei\*. Microstructural evolution, precipitation and mechanical properties of hot rolled 27Cr-4Mo-2Ni ferritic steel during 800 °C aging. MATERIALS & DESIGN, 2018,160: 999-1009.

3. Lu Hui-Hu, Guo Hong-Kui, Liang Wei\*, Li Jian-Chun, Zhang, Gang-Wang, Li TaoTao\*\*. High-temperature Laves precipitation and its effects on recrystallisation behaviour and Lüders deformation in super ferritic stainless steels. MATERIALS & DESIGN, 2020,188:108477.

4. Zhang Chi, Liu Zhenyu\*, Wang Guodong. Effects of hot rolled shear bands on formability and surface ridging of an ultra purified 21%Cr ferritic stainless steel. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY,2011,211(6):1051-1059.

5. Gao Fei\*, Liu Zhenyu, Liu Haitao, Wang Guodong. Texture evolution and formability under different hot rolling conditions in ultra purified 17%Cr ferritic stainless steels. MATERIALS CHARACTERIZATION, 2013,75:93-100.

#### **主要完成人情况:**

第一完成人: 鲁辉虎, 中北大学教授; 代表性论文 1、2、3 的第一作者。

第二完成人: 梁伟, 太原理工大学教授, 代表性论文 1、2、3 的通讯作者。

第三完成人: 张驰, 大连理工大学副教授, 代表性论文 4 的第一作者。

第四完成人: 高飞, 东北大学副教授, 代表性论文 5 的第一作者和通讯作者。

#### **完成人合作关系说明:**

项目执行期间, 鲁辉虎教授、张驰副教授、高飞副教授均在东北大学刘振宇导师指导下开展项目研究工作, 并完成毕业论文, 其中鲁辉虎教授获得硕士学位, 高飞与张驰副教授获得博士学位。鲁辉虎教授在梁伟教授指导下开展项目研究工作, 并完成了博士论文, 获得博士学位。鲁辉虎教授、梁伟教授、高飞副教授、张驰副教授联合发表多篇学术论文。

#### **知情同意证明:**

刘振宇教授为代表性论文 4 的通讯作者,李涛涛副教授为代表性论文 3 的共同通讯作者,知情并同意将论文作为代表性论文申报 2025 年度山西省自然科学奖。