

项目情况简介（省自然科学奖）

1. 项目名称

非晶/晶体双相合金理论模型构建与强韧化机制研究

2. 主要完成人

宋海洋 安敏荣 邓 琼

3. 提名单位

陕西省教育厅

4. 提名意见

本项目历经十余年的系统研究，在“非晶/晶体”双相镁合金、双相铜铝合金变形机制和强化机理方面取得了以下理论创新和突破：1. 从理论上提出了可以有效提升镁合金力学性能的“非晶/晶体”双相纳米结构模型，该研究为提高密排六方结构金属材料的塑性开辟了一种新的途径；2. 从理论上发现了密排六方纳米多晶金属镁的反 Hall-Petch 关系，该研究充实和完善了镁合金尺寸效应这一领域的研究结果；3. 系统阐明了双相铜铝合金的强韧化机制，揭示了非晶相与晶体相协同作用在提升双相铜铝合金中的关键作用，提出通过调控微观结构设计实现高强高韧双相合金的优化设计准则；4. 从理论上发现了稀土元素诱导“非晶/晶体”双相镁合金的固态非晶化行为，该研究提供了一种可引入稀土元素来提升镁合金力学性能的新途径。该项目为制备高性能“非晶/晶体”双相合金材料具有重要的指导意义。

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奖二等。

5. 项目简介

本项目经过十余年系统深入的研究，在非晶/晶体双相镁合金、双相铜铝合金力学行为和强韧化机制方面取得了突破性进展，为设计和制备高性能双相金属材料提供了重要的理论依据，主要研究内容和科学发现点如下：

（1）提出并验证了可显著提升镁合金塑性的晶体/非晶双相纳米结构模型。本研究突破性地提出了“非晶/晶体”双相纳米结构合金设计策略，并以镁合金为例进行了验证。基于此，阐明了双相体系中非晶相/晶体相的最佳尺寸匹配关系，揭示了位错-非晶相的相互作用机制，首次从理论层面发现了密排六方纳米多晶金属镁的反Hall-Petch关系，并确立了高强度高塑性双相纳米结构镁合金的微观结构模型。

（2）系统揭示了双相铜铝合金与铜铝非晶合金的变形机制及强韧化规律。

为了阐明非晶/晶体双相纳米结构合金强韧化本质，本研究以典型铜锆非晶合金为模型体系，深入对比研究了双相铜锆合金与铜锆非晶合金的变形行为。发现了双相铜锆多层膜随层厚增加，其塑性变形机制由界面位错与剪切转变区协同作用主导的均匀变形，转变为多重剪切带相互作用主导的模式。基于上述机制研究，首次清晰揭示非晶相与晶体相协同变形是提升双相铜锆合金强韧性的核心机制，并据此创新性提出通过调控微观结构设计实现高强高韧双相合金的优化设计准则。

(3) 发现并阐明了稀土元素调控非晶/晶体双相镁合金固态非晶化的理论机制和关键规律。研究了稀土元素钇对“非晶/晶体”双相镁合金的微观结构调控作用，首次揭示了稀土元素可诱导镁合金发生固态非晶化转变,并明确了其发生的决定性因素，建立了固态非晶化的热力学-动力学协同模型。在此基础上，阐明了稀土元素对镁合金中孪晶界迁移行为的影响规律，揭示了非晶相尺寸和稀土元素含量对合金中位错与非晶相相互作用行为的影响。基于此，首次发现该固态非晶化行为对非晶相尺寸的独特依赖性，并系统阐明了非晶/晶体界面结构对此非晶化过程的核心调控规律。

6. 客观评价

针对科学发现点 1 的第三方评价：

1. 我国著名固体力学专家、国家杰出青年基金获得者康国政教授发表于金属材料领域顶级期刊《Journal of Materials Science & Technology》(234, 2025, 246) 的综述论文中，累计4次引用了本项目成果。山东大学蒋妍彦教授发表于《Surfaces and interfaces》(58, 2025, 105861) 上的论文引用了本项目2篇论文，并明确表示本项目提出了一个增强合金综合性能的晶体/非晶双相合金模型的新范式（“Song reported that a new paradigm for crystalline/amorphous (C/A) dual-phase alloys aimed at enhancing the comprehensive properties of alloys”）。

2. 世界著名材料科学家、加州大学圣地亚哥分校杰出教授Marc A. Meyers 在其发表于金属材料领域著名期刊《Materials Science and Engineering A》(646, 2015, 101) 上的特邀综述论文中，单独用一段对本项目工作给予高度评价，并将本项目一幅图作为论文中的插图进行描述。文中明确指出：“Song and Li were the first to explore……”，充分肯定了本项目的重要贡献。弗吉尼亚理工学院Farkas D教授发表在《Current Opinion in Solid State & Materials Science》(17, 2013, 284) 的论文对该成果进行了成段正面引用。

3. 著名材料学家、知名期刊《Current Opinion in Solid State & Materials

Science》主编、威斯康星大学 Izabela Szlufarska 教授发表于《Nature Communications》(10, 2019, 3587)上的论文对该成果进行了引用,并将此作为密排六方结构金属材料随着晶粒尺寸的减小呈现反Hall-Petch关系的代表性例子。美国科学院院士、世界著名理论化学和多尺度模拟专家、加州理工学院 William A. Goddard III教授发表于《Matter》(6, 2023, 3087)的研究论文中,引用了本项目3篇论文,并明确采用本项目所揭示的堆垛层错强化机制,证实了该机制在有效提升其他材料屈服强度方面的普适性。

4. 本项目发表在《Journal of Applied Physics》的2篇论文(127, 2020, 135105; 128, 2020, 165102)被期刊主编推荐为“Editor's Pick”特色文章。

针对科学发现点 2 的第三方评价:

1. 国家杰出青年基金获得者、深圳大学沈军教授与国家杰出青年基金获得者、德国洪堡学者、上海大学王刚教授合作发表在金属材料顶级期刊《Journal of Materials Science & Technology》(172, 2024, 113)上的综述论文中,对本项目关于双相铜铝多层膜变形机制的研究工作给予了重点评述,不仅累计7处引用了本项目2篇论文,更以长达19行的篇幅阐述本项目研究工作。同时,越南学者 Anh-Son Tran 发表在非晶权威期刊《Journal of Non-Crystalline Solids》(559, 2021, 120685)上的论文10处引用了本项目的6篇论文,大篇幅描述了本项目关于双相铜铝合金强韧化机制的研究工作。

2. 国际著名材料专家、美国田纳西大学 Peter K. Liaw 教授在其发表于金属材料顶级期刊《Journal of Materials Science & Technology》(54, 2020, 14)的研究论文中,对本项目成果展现出系统性关注,累计引用本项目4篇论文达11处之多,其中3处以上大篇幅介绍了本项目在揭示层厚度和模型尺寸等关键参数对双相铜铝合金塑性变形机制影响规律方面的研究工作。国家杰出青年基金获得者、清华大学教授陈常青教授发表于《Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering》(28, 2020, 085004)上的研究论文引用了本项目双相铜铝合金的2篇文章,并作为非晶/晶体双相纳米结构模型的代表性引文。

3. 材料领域知名专家、国家级领军人才、西北工业大学李金山教授发表于金属材料顶级期刊《Journal of Materials Science & Technology》(53, 2020, 192)的研究论文中,对本项目关于双相铜铝合金的研究成果给予重点引用,累计4处引用本项目1篇论文。同时,材料领域知名专家、澳大利亚皇家墨尔本理工大学杰出教授 Cuie Wen 教授在《Journal of Materials Science & Technology》(50, 2020, 215)发表的综述论文中,将本项目确立为双相铜铝合金变形机制研

究的代表性模拟工作。

4. 国家杰出青年基金获得者、中国科学院大学管鹏飞教授发表在金属材料顶级期刊《Acta Materialia》(292, 2025, 121046)的研究论文，重点引用了本项目关于铜锆非晶合金变形模式转变机制的研究成果。此外，本项目关于双相铜锆合金的相关研究成果获得第三届陕西省研究生创新成果展二等奖，关于铜锆非晶合金的相关研究成果获得第三届陕西省研究生创新成果展三等奖。

针对科学发现点 3 的第三方评价：

1. 国际著名材料专家、美国田纳西大学Peter K. Liaw教授发表在《Materials》(17, 2024, 3689)的论文中，对本项目成果进行了系统性引用与高度评价，不仅累计引用本项目6篇论文，更明确指出本项目提出的非晶/晶体双相模型是提升镁合金的“创新性举措”（对发现点1的客观评价），并证实该模型已成功拓展到高熵合金领域（“Following these successes with Mg alloys, A/C Mg alloys have been applied to……”）。同时，Liaw教授特别强调本项目关于稀土元素诱导固态非晶化内在机制的研究是一项“重要的发现”（“A significant discovery shows that the elemental diffusion from the amorphous phase……”）。

2. 湖南大学袁定旺教授发表于著名力学期刊《International Journal of Mechanical Sciences》(269, 2024, 109057)的研究中，将本成果确立为稀土元素诱导镁合金固态非晶化的代表性工作，并累计4处引用本项目成果。同时，贵州大学梁永超教授在著名力学期刊《International Journal of Mechanical Sciences》(288, 2025, 110020)发表的研究论文中，对本项目关于镁合金固态非晶化的形成机制与关键影响因素的研究成果进行了大篇幅描述，并将该成果拓展应用于NiTiAl合金体系。

7. 代表性论文专著目录

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	SCI 他引 次数	他引 总次 数	知识产 权是否 归国内 所有
1	Atomic simulations of effect of grain size on deformation behavior of nano-polycrystal magnesium	Journal of Applied Physics	H.Y. Song Y.L. Li	2012 年 111 卷 044322 页	2012	H.Y. Song Y.L. Li	H.Y. Song	宋海洋 李玉龙	28	28	是
2	Effect of rare earth element on amorphization and deformation behavior of crystalline/amorphous dual-phase Mg alloys	Materials & Design	J.J. Du H.Y. Song M.R. An Y.L. Li	2022 年 221 卷 110979 页	2022	H.Y. Song	J.J. Du	杜晶晶 宋海洋 安敏荣 李玉龙	7	7	是
3	Molecular dynamics study of deformation behavior of crystalline Cu/amorphous Cu ₅₀ Zr ₅₀ nanolaminates	Materials & Design	H.Y. Song J.J. Xu Y.G. Zhang S. Li D.H. Wang Y.L. Li	2017 年 127 卷 173-182 页	2017	H.Y. Song Y.L. Li	H.Y. Song	宋海洋 徐金瑾 张云光 李 珊 王党会 李玉龙	56	56	是

4	Atomic simulations of plastic deformation behavior of Cu ₅₀ Zr ₅₀ metallic glass	Journal of Non-Crystalline Solids	H.Y. Song S. Li Y.G. Zhang Q. Deng T.H. Xu Y.L. Li	2017 年 471 卷 312-321 页	2017	H.Y. Song Y.L. Li	H.Y. Song	宋海洋 李 珊 张云光 邓 琼 许天早 李玉龙	26	26	是
5	Deformation mode transitions in Cu ₅₀ Zr ₅₀ amorphous/Cu crystalline nanomultilayer: A molecular dynamics study	Journal of Non-Crystalline Solids	H.Y. Song M. Wang Q. Deng Y.L. Li	2018 年 490 卷 13-21 页	2018	H.Y. Song Q. Deng	H.Y. Song	宋海洋 王 明 邓 琼 李玉龙	24	24	是
6	《分子动力学方法在力学问题中的应用》	中国石化出版社	安敏荣 宋海洋	ISBN: 9787511460 554	2020	/	安敏荣	安敏荣 宋海洋	/	/	是
合 计									141	141	是

8. 主要完成人情况

排序	完成人	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	宋海洋	院长	教 授	西安石油大学	西安石油大学 西北工业大学	本项目负责人。 本项目主体学术思想的主要提出者，制定了项目总体研究方案。对发现点 1、2、3 做出重了要贡献，是代表性论文 1、2、3、4、5 的通讯作者，是代表性论文 1、2、3、4 的第一作者，

						是代表性专著 6 的第二作者。
2	安敏荣	无	副教授	西安石油大学	西安石油大学 西北工业大学	本项目第二完成人。 本项目的核心研究人员，对发现点 3 做出了重要贡献，是代表性专著 6 的第一作者。
3	邓 琼	无	教 授	西北工业大学	西安石油大学 西北工业大学	本项目第三完成人。 本项目的核心研究人员，对发现点 2 做出了重要贡献，是代表性论文 3 的通讯作者。

9. 主要完成单位情况

排序	完成单位	对本项目的贡献
1	西安石油大学	作为本项目的依托单位，西安石油大学为项目的顺利完成做出了主要贡献，具体表现为： (1) 组织完成了项目的策划和实施工作； (2) 为项目顺利实施提供了实验场所和工作环境，提供了本项目所需的计算设备、图书资料、动力等资源； (3) 完成了本项目 3 个发现点的主要工作。
2	西北工业大学	作为本项目的合作单位，西北工业大学为项目的顺利完成做出了主要贡献，具体表现为： (1) 协助完成了项目的实施工作； (2) 提供了本项目所需的数据库、计算设备等资源； (3) 作为参与单位协助完成了本项目 2 个发现点的工作。

10. 完成人合作关系说明

本项目完成人共3位，其中宋海洋/1、安敏荣/2隶属于第一完成单位西安石油大学，邓琼/3隶属于第二完成单位西北工业大学。

宋海洋、安敏荣是西安石油大学在职教师，合作发表高水平论文多篇。本项目主要参与人邓琼教授是西北工业大学在职教师，与宋海洋、安敏荣合作完成了包含国家自然科学基金在内的科研项目多项，合作发表了多篇高质量学术论文，并取得了创新性的研究成果。