

项目名称：稳定纳米结构金属及其优异性能

一、提名意见

提名意见：

针对金属材料中强度与塑性（或导电性等）不可兼得的重大科学难题，该项目创新性提出通过调控纳米金属材料中界面结构及空间分布来稳定纳米结构从而提升材料综合性能的新思路，在一系列典型金属材料中开展了制备技术、微观结构和综合性能的研究，取得了如下主要原创性研究成果：

1) 在金属中发现纳米孪晶结构和小角晶界纳米层片结构两种新型低能界面纳米结构，分别获得超高强度高导电性纳米孪晶铜和超高硬度高稳定性纳米层片镍；提出了材料的新强化机制—纳米孪晶强化。

2) 提出金属材料表面纳米化和梯度纳米结构新概念，通过调控界面空间分布消除应变局域化效应，提高了纳米结构在变形过程中的稳定性；发现梯度纳米结构的独特变形机制，获得兼具高强度和高塑性的梯度纳米金属，大幅度降低了铁的氮化温度，推动了纳米金属材料的发展和工业应用。

该项目开创和引领的关于纳米孪晶结构、小角晶界纳米层片结构以及梯度纳米结构等稳定纳米结构的研究已成为国际材料领域的热点研究方向，包括《Nature》、《Science》和《Nature Materials》等学术期刊以及有关学术网站对相关研究成果进行了跟踪报道、专题评述或引用评述，8篇代表性学术论文被SCI他引3702次，相关研究成果极大地推动了材料结构稳定化和金属综合强韧化机理方面的研究进展。

对照国家自然科学奖授奖条件,我院提名该项目为国家自然科学奖一等奖。

二、项目简介

金属材料以其优异的综合力学性能而广泛应用于几乎所有工业领域，其性能的少许提高都将对经济社会发展起到巨大作用。提高金属材料的强度一直是材料领域中最经典、最核心的科学技术问题之一。添加适当的合金元素或者细化晶粒可以使金属强化，但其塑性、韧性和导电性等将显著下降，使得材料的强度与塑性（或韧性、导电性）形成倒置关系。自上世纪八十年代纳米材料的出现，晶粒细化强化受到了广泛深入的研究，大量实验表明，当晶粒尺寸细化至纳米尺度时，金属的强度可以提高数倍至数十倍。然而，由于高能态界面密度高导致结构稳定性降低，高强度纳米金属还丧失了良好的塑性、韧性及导电性，限制了纳米金属的发展和工业应用。能否提高金属的强度而不损失其它良好性能，克服强度与塑性（或导电性等）“鱼与熊掌不可兼得”的矛盾？这是国际材料研究领域近几十年以来亟待解决的重大科学难题。

该项目开创性地提出稳定纳米结构的两个途径：1) 通过调控界面结构降低界面能和 2) 通过调控界面空间分布提高变形稳定性，以此提升纳米金属综合性能，先后在金属中发现了两类新型稳定纳米结构，即低能界面纳米结构和梯度纳米结构，在材料结构稳定化和金属综合强韧化机理研究方面取得了一系列重要突破。主要原创性研究成果包括：1) 发现纯铜中纳米孪晶的独特强化效应，获得超高强度高导电性纳米孪晶铜，突破了强度与导电性的倒置关系，进而提出材料的新强化机制—纳米孪晶强化；发现金属中的小角晶界纳米层片结构，突破了塑性变形细化金属晶粒尺寸的极限，获得超高硬度高稳定性纳米层片镍。2) 提出金属材料表面纳米化和梯度纳米结构新概念，发展了多种表面塑性变形制备技术，揭示了变形诱导的梯度纳米结构形成机制；发现梯度纳米结构独特的变形机制和力学响应，获得了兼具高强度和高塑性的梯度纳米金属；利用梯度纳米结构表层大幅度降低了铁的渗氮温度并推动了金属材料表面化学热处理技术的发展；发现表面梯度纳米结构可大幅度提高金属材料的力学、摩擦磨损和疲劳等性能，推动了纳米金属材料的发展和工业应用。

该项目开创和引领的关于纳米孪晶结构、小角晶界纳米层片结构以及梯度纳米结构等稳定纳米结构的研究目前已成为国际上纳米材料领域的热点研究方向。所取得主要研究成果在《Science》等国际著名权威学术刊物上发表，8 篇代表性学术论文被《Nature》、《Science》和

《Nature Materials》等学术期刊 SCI 他引 3702 次。项目主要完成人多
次应邀为《Science》和《Nature Materials》等国际权威期刊撰写综述或
专题评述，在戈登研究大会和国际材料强度大会等本领域重要国际学
术会议上做大会主旨报告或邀请报告 150 余次。

三、客观评价

该项研究成果在国际学术界产生了重要影响，近年来引领了国际纳米金属材料领域的发展。《Nature》、《Science》、《Nature Materials》和《Materials Today》等学术期刊以及有关学术网站对该项目研究成果进行了跟踪报道、专题评述或引用评述。

纳米孪晶铜的论文（代表性论文 1）2004 年在《Science》发表后，《Nature Materials》在“News and Features”中以“Strong and conductive copper”为题进行了报道，指出“作者发展了一种新的加工技术，使铜抗拉强度比传统铜高十倍，同时还保持了与未加工样品相当的导电性”。《Materials Today》做了题为“Strong Conductors”的亮点报导，认为“利用纳米孪晶界面颠覆了材料电导率和力学性能的倒置关系”。国际著名材料科学家、美国 MRS 学会前主席、加州大学洛杉矶分校 K.N. Tu 教授在其《Science》（2008）论文中引用了该论文并称“…高导电高导性纳米孪晶 Cu 是发展集成电路的理想材料…”。

纳米孪晶强化的论文（代表性论文 2）2009 年在《Science》发表后，德国马普钢铁研究所执行所长 D. Raabe 教授在其《Nature》（2016）论文中引用了该论文并指出“…这一机制对应变强化造成了深远的影响…”。美国工程院院士、中国工程院外籍院士 C.T. Liu 教授在其《Nature Materials》（2016）论文中引用了该论文并指出“纳米孪晶结构在铜中具有巨大优势，可大幅度提高强度而不损失塑性…”。

小角晶界纳米层片结构镍的论文（代表性论文 3）2013 年在《Science》发表后，《Science》同期发表了题为“**How to Be Both Strong and Thermally Stable**”的“观点”栏目文章，认为该“纳米层状结构非比寻常…它将为各类工业制造的基础研究与潜在技术应用打开新视野…”。美国工程院院士、加州大学伯克利分校 Robert Ritchie 教授在其综述性论文中引用了该论文并指出“纳米层片结构有利于形成一种具

有稳定、超硬表面层的延性材料，这种应变诱导的结构将在强度-塑性、磨损-抗疲劳性能协同的工业应用上大有可为”。Bob Yirka 在 Phys.org 撰文评论称此发现“意味着金属的制造将开启金属科学的一个全新时代”。

金属材料表面纳米化和梯度纳米结构的一系列研究工作（代表性论文 4-8）发表后，《Materials Today》做了题为“Low temperature nitriding”的研究新闻报导，认为利用表面纳米结构“可以对当前无法渗氮的合金和钢材料家族进行渗氮处理”。美国工程院院士、加州大学伯克利分校 Robert Ritchie 教授在其综述性论文中评述了该方面工作并指出“从表面直至基体的晶粒尺寸梯度分布能够使材料兼具强度和塑性，而这种性能在常规均匀材料中则难以获得”以及“SMGT 作为一种有效方法在金属及合金表面引入梯度结构，已成为仿生梯度结构的新型制备技术之一”。美国工程院院士、科学与艺术院院士、Rice 大学工学院院长 E. L. Thomas 教授在其《Science》（2016）论文中引用了该方面工作并评述“晶粒尺寸空间梯度的创新之处在于通过渐进变形有效减缓了突变失效”。此外，“金属材料表面纳米化技术”的工作 2003 年入选了两院院士评选的“中国十大科技进展新闻”，“揭示梯度纳米晶铜本征塑性变形机制”的工作 2011 年入选了“中国基础研究十大新闻”。

该项目 8 篇代表性论文近年来累计 SCI 他引 3702 次，其中有 3 篇入选 Web of Science 本领域高被引论文。由于该项研究成果在国际学术界产生的重要影响，主要完成人多次应邀为《Science》和《Nature Materials》等国际权威期刊撰写综述或专题评述；在戈登研究大会、国际材料强度大会、美国 TMS 及 MRS 等本领域重要国际学术会议上做大会主旨报告或邀请报告 150 余次。项目主要完成人卢柯研究员自 2014 年起连续 4 年入选材料领域“全球高被引科学家”，并获“汤森路透国际高引用科学家”。他现任《Science》评审编辑，曾任《Progress in Materials Science》和《Scripta Materialia》编辑，荣获了 TMS Fellow、MRS Fellow、AAAS Fellow 称号等多项国际奖励及荣誉，入选中组部“万人计划”第一批杰出人才和“科学家工作室”等。

四、代表性论文专著目录(不超过 8 篇)

序号	论文专著 名称/刊名 /作者	影响 因子	年卷页码	发表时 间(年 月 日)	通讯 作者 (含 共同)	第一作 者(含 共同)	国内 作者	SCI 他引 次数	他引 总次 数	论文 署名 单位 是否 包含 国外 单位
1	Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper / Science / Lei Lu, Yongfeng Shen, Xianhua Chen, Lihua Qian, K. Lu	37.205	2004 年 304 卷 422-426 页	2004 年 4 月 16 日	卢柯	卢磊	卢磊 申勇峰 陈先华 钱立华 卢柯	1179	1226	否
2	Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale / Science / K. Lu, L. Lu, S. Suresh	37.205	2009 年 324 卷 349-352 页	2009 年 4 月 17 日	卢柯 Subra Suresh	卢柯	卢柯 卢磊	650	676	是
3	Strain-induced ultrahard and ultrastable nanolaminated structure in nickel / Science / X.C. Liu, H.W. Zhang, K. Lu	37.205	2013 年 342 卷 337-340 页	2013 年 10 月 18 日	卢柯	刘小春 张洪旺	刘小春 张洪旺 卢柯	113	121	否
4	Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials--presentation of the concept behind a new approach / Journal of Materials Science & Technology / Ke Lu, Jian Lu	2.764	1999 年 15 卷 193-197 页	1999 年 5 月	卢柯	卢柯	卢柯	309	410	是
5	Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment / Materials Science & Engineering A / K. Lu, J. Lu	3.094	2004 年 375-377 卷 38-45 页	2004 年 7 月 15 日	卢柯	卢柯	卢柯	413	506	是

6	An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment / Acta Materialia / N.R Tao, Z.B. Wang, W.P. Tong, M.L. Sui, J. Lu, K. Lu	5.301	2002 年 50 卷 4603-4616 页	2002 年 10 月 28 日	卢柯	陶乃镛	陶乃镛 王镇波 佟伟平 隋曼龄 卢柯	440	529	是
7	Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper / Science / T.H. Fang, W.L. Li, N.R. Tao, K. Lu	37.205	2011 年 331 卷 1587-1590 页	2011 年 3 月 25 日	卢柯	方铁辉 李文利 陶乃镛	方铁辉 李文利 陶乃镛 卢柯	286	301	否
8	Nitriding iron at lower temperatures / Science / W.P. Tong, N.R. Tao, Z.B. Wang, J. Lu, K. Lu	37.205	2003 年 299 卷 686-688 页	2003 年 1 月 31 日	卢柯	佟伟平	佟伟平 陶乃镛 王镇波 卢柯	312	390	是
合 计								3702	4159	

五、主要完成人情况表

姓名	卢柯	排名	1
行政职务	沈阳材料科学 国家研究中心主任	技术职称	院士
工作单位	中国科学院金属研究所		
完成单位	中国科学院金属研究所		
对本项目主要学术贡献： 是本项目的学术带头人，提出了本项目的核心学术思想和研究思路，制定了研究方案。组织领导了研究团队，参与了全部研究工作，撰写了全部 8 篇代表性论文，在两项重要科学发现中均有重大贡献。是代表性论文【2, 4, 5】第一作者，全部 8 篇代表性论文通讯作者。			

姓名	陶乃镛	排名	2
行政职务	无	技术职称	研究员
工作单位	中国科学院金属研究所		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>率先开展表面纳米化和梯度纳米结构研究，在表面纳米化样品制备和结构表征方面做出了奠基性的工作。发展多种表面梯度纳米结构制备技术。提出铁、铜及其合金纳米结构的形成机制。是代表性论文【6, 7】第一作者和第一同等贡献作者，代表性论文【8】作者。参与了代表性论文【4, 5, 8】样品制备及结构表征。对于重要科学发现 2 具有重大贡献，对于重要科学发现 1 中层片纳米结构的制备技术有重要贡献。</p>			

姓名	佟伟平	排名	3
行政职务	无	技术职称	教授
工作单位	东北大学		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>开展了表面纳米化对钢铁表面气体渗氮行为影响的研究，实现了纯铁在 300 摄氏度的低温气体渗氮；研究了表面纳米化对渗氮热力学参数和动力学过程的影响，是代表性工作【8】的第一作者，代表性论文【6】作者。参与了代表性工作【5,6】的样品制备。对重要科学发现 2 有重要贡献。</p>			

姓名	王镇波	排名	4
行政职务	无	技术职称	研究员
工作单位	中国科学院金属研究所		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>参与了金属表面纳米化制备技术研究。开展了表面纳米化钢铁材料低温渗铬、低温渗铝和耐磨性研究工作。参与了代表性论文【5,6,8】的部分研究工作。是代表性论文【6,8】作者，对重要科学发现2有重要贡献。</p>			

姓名	李文利	排名	5
行政职务	无	技术职称	副教授
工作单位	苏州大学		
完成单位	中国科学院金属研究所		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>主要参与发展表面机械碾压处理技术（SMGT）。在纯铜表层成功制备出高质量梯度纳米结构，实验表明该梯度纳米结构拉伸塑性变形能力优于粗晶铜，其塑性变形能力源于梯度纳米结构独特的变形机制。是代表性论文【7】第一同等贡献作者。SMGT 技术的发展对于重要发现 2 具有重大贡献。对于重要科学发现 1 中层片纳米结构的制备技术有重要贡献。</p>			

六、完成人合作关系说明

第一完成人卢柯院士是本项目的学术带头人，提出了本项目的核心学术思想和研究思路，制定了研究方案。组织领导了研究团队，是所有 8 篇代表性论文的通讯作者。第二完成人陶乃镕、第三完成人佟伟平以及第四完成人王镇波均为卢柯指导毕业的博士研究生，第五完成人李文利为卢柯和陶乃镕共同指导毕业的博士研究生，陶乃镕和王镇波目前还是卢柯课题组的研究人员。

该项目中，卢柯和陶乃镕的合作时间为 1998 年 10 月至 2013 年 10 月，合著了该项目的代表性论文 6、7、8；卢柯和佟伟平的合作时间为 2000 年 3 月至 2004 年 5 月，合著了该项目的代表性论文 6、8；卢柯和王镇波的合作时间为 1999 年 9 月至 2013 年 10 月，合著了该项目的代表性论文 6、8；卢柯、陶乃镕和李文利的合作时间为 2005 年 9 月至 2010 年 6 月，合著了该项目的代表性论文 7。

知情同意证明

本人知悉并同意作为第一作者的论文“Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper, *Science*, 304 (2004) 422-426”作为如下项目的代表性论文申报2018年度国家自然科学基金，并已知晓“获奖项目所用论文专著不得再次用于申报国家科技奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用”等有关规定。特此说明。

项目名称：稳定纳米结构金属及其优异性能

项目完成人：卢柯，陶乃镭，佟伟平，王镇波，李文利

卢磊（中国科学院金属研究所）

2017 年 12 月 29 日

知情同意证明

本人知悉并同意作为共同第一作者的论文“Strain-induced ultrahard and ultrastable nanolaminated structure in nickel, *Science*, 342 (2013) 337-340”作为如下项目的代表性论文申报2018年度国家自然科学基金, 并已知晓“获奖项目所用论文专著不得再次用于申报国家科技奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用”等有关规定。特此说明。

项目名称: 稳定纳米结构金属及其优异性能

项目完成人: 卢柯, 陶乃镭, 佟伟平, 王镇波, 李文利

刘小春 (中国科学院金属研究所)

2017 年 12 月 29 日

知情同意证明

本人知悉并同意作为共同第一作者的论文“Strain-induced ultrahard and ultrastable nanolaminated structure in nickel, *Science*, 342 (2013) 337-340”作为如下项目的代表性论文申报2018年度国家自然科学基金, 并已知晓“获奖项目所用论文专著不得再次用于申报国家科技奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用”等有关规定。特此说明。

项目名称: 稳定纳米结构金属及其优异性能

项目完成人: 卢柯, 陶乃镭, 佟伟平, 王镇波, 李文利

张洪旺 (燕山大学)

2017 年 12 月 29 日

知情同意证明

本人知悉并同意作为共同第一作者的论文“Revealing extraordinary intrinsic tensile plasticity in gradient nano-grained copper, *Science*, 331 (2011) 1587-1590”作为如下项目的代表性论文申报2018年度国家自然科学基金，并已知晓“获奖项目所用论文专著不得再次用于申报国家科技奖、未获奖项目所用论文专著不得连续两年使用”等有关规定。特此说明。

项目名称：稳定纳米结构金属及其优异性能

项目完成人：卢柯，陶乃镭，佟伟平，王镇波，李文利

方铁辉（湖南大学）

2017 年 12 月 29 日

知情同意证明

本人知悉并同意我作为共同通讯作者的论文“Strengthening materials by engineering coherent internal boundaries at the nanoscale, *Science*, 324 (2009) 349-352”作为如下项目的代表性论文申报2018年度国家自然科学基金。卢柯研究员为该论文第一作者和共同通讯作者，中国科学院金属研究所为第一单位；我为该论文第三作者和共同通讯作者，麻省理工学院为第二单位。双方无知识产权争议。特此说明。

项目名称：稳定纳米结构金属及其优异性能

项目完成人：卢柯，陶乃镭，佟伟平，王镇波，李文利

Subra Suresh（美国麻省理工学院）

2017 年 12 月 29 日