**项目名称：**合金材料局域塑性失稳的多尺度实验技术和机理研究

**提名单位：**中国力学学会

**提名意见：**

合金在成型或服役等条件下会产生局域塑性失稳现象，在应力-应变曲线出现锯齿形屈服，将导致材料表面粗糙化、疲劳寿命缩短和延展性降低，大大限制了合金材料在汽车、航空、航天等工业上的应用。其微观机制被认为是动态应变时效，即位错和溶质原子间的相互作用，但微观机制和宏观变形的联系尚未明确。主要是因为局域塑性失稳变形复杂，应变梯度高，变形范围大，难以精确全场测量。在国家自然科学基金的支持下，该项目围绕锯齿形塑性失稳中的关键问题，开展了多年的研究工作，取得了开拓性的进展。

包括：1）发展动态数字散斑干涉法和数字图像相关法，解决局域大塑性全场测量难题，首次揭示局域细致复杂的动态变形特性；2）揭示锯齿形屈服临界行为的物理机制和材料组织的影响规律，为消除其负面影响和合金设计提供指导方向；3）建立两个动态应变时效力学模型，验证当前机制的合理性并加深对深层机制的认识。发表一批在国际上首次报道的实验和理论研究成果，得到国内外相关领域同行的应用和跟进研究。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

**项目简介：**

合金在成型或服役等条件下会产生局域塑性失稳现象，在应力-应变曲线出现锯齿形屈服，将导致材料表面粗糙化、疲劳寿命缩短和延展性降低，大大限制了合金材料在汽车、航空、航天等工业上的应用。其微观机制被认为是动态应变时效，即位错和溶质原子间的相互作用，但微观机制和宏观变形的联系尚未明确。主要是因为局域塑性失稳变形复杂，应变梯度高，变形范围大，难以精确全场测量。在国家自然科学基金的支持下，本项目开展了合金材料局域塑性失稳的多尺度实验技术和机理研究，实验观测到动态全场的精细变形以及一系列新现象，并阐明其内在物理机制，取得的重要科学发现包括：

1）发展光学测量方法和实验观测研究：发展动态数字散斑干涉法和数字图像相关法，解决局域大塑性全场动态测量难题，并将这些方法引入到锯齿形塑性失稳的研究中，首次实现动态变形过程中局域变形带的实时可视化，获得局域塑性失稳的位移场和应变场，以及局域化变形带的空间形貌、传播特性、形核过程等信息，其全场位移分布测量灵敏度高达100nm量级，空间应变梯度高达104μɛ/mm，并发现拉伸过程中带外部分发生弹性收缩这一关键的新现象。这些实验观测结果首次直观地展示局域变形带细致的动态变形特性，拓宽和加深了对锯齿形塑性失稳的认识。

2）针对微观物理机制的理论研究：通过不同温度实验，发现正常和反常两种临界应变对应着不同的锯齿形态，并给出对应的两种位错和溶质原子间相互作用状态的微观图像描述，揭示了正常和反常两种临界行为的物理机制，明确了锯齿形塑性失稳的产生条件。通过不同热处理方法调整合金微观组织，验证了溶质原子在锯齿形塑性失稳中的主导作用，发现析出相同样起着重要影响，并通过低温对比实验，明确析出相的辅助作用。这些理论研究成果明确了产生塑性失稳的条件和微观组织的作用，为抑制其负面影响提供指导方向和基础。

3）基于所提机制和动态应变时效理论的建模研究：基于动态应变时效热激活机制建立力学模型，反映了材料内部在微细观尺度作用下的宏观表现行为，第一次成功再现与实验一致的锯齿形加载曲线、局域变形带的产生和传播、带外弹性收缩等现象；加入功热转换机制，首次模拟了试件变形中局域变形带上的温度变化，再现局域变形带产生时伴随的局部温度陡升这一实验现象，是首个能同时模拟“应力-应变-温度”演化行为的锯齿形塑性失稳模型。由于现有实验技术还未能对动态应变时效机制进行验证，这些模型在一定程度验证了现有机制的合理性，同时也加深了对动态应变时效深层机制的认识和理解。

成果得到国内外著名学者的积极引用和评价。印度科学院院士Ananthakrishna肯定实验工作“确定了三种塑性变形带”；Prog Mater Sci和Acta Mater等国际期刊的多篇论文评价包括：“光测结果证实了变形带复杂演化的猜想”、“符等提出了正常和反常两种临界应变行为的机制”、“江等建立铝合金中PLC带的模型，展示了实验和模拟中的锯齿形流动现象”等。项目至今共发表SCI论文70余篇，其中JCR(Web of Sci)一区36篇(科学院JCR一区4篇，二区30余篇)。8篇代表论文SCI他引250余次，总他引350余次；国际学术大会特邀或邀请报告8次；获授权发明专利四项；获2014首届力学学会自然科学二等奖1项(一等奖空缺)。

**客观评价：**

**八篇代表引文**

德国B. Klusemann教授在Int J Plasticity (2015, 67:192)文章评价：张等结合“时-空”特性分析了铝合金PLC带（局域化变形带），获得带的时空特性、动力学、倾角等特征；代表作1。

德国W.P. Hu教授在Acta Mater (2014, 76:54)中评价：符等阐明了不同温度的塑性变形中正常和反常两种临界应变的机制；代表作2。

北京科大张勇教授在Prog Mater Sci(2017,90:358)中评价：江等发现随着应变率的降低，PLC效应有A型向B型再向C型转变；代表作3。直接引用代表作2中的实验数据图作为相关结论的支撑；代表作2。

印度科学院院士Ananthakrishna教授在Acta Mater (2015, 91:192)中多次评价：通过负应变率敏感性建立PLC效应模型、只有少数研究能建立带传播特性和锯齿特征之间的关系、江等揭示了在带传播期间大锯齿是小锯齿簇的边界、多次引用江的结果为模型验证；代表作3。确定了三种塑性变形带、通过激光干涉法建立了带类型和锯齿形貌的关系；代表作4。

土耳其A. Yilmaz教授在Sci Technol Adv Mat (2011, 12: 063001)中评价：张等发展了数字散斑干涉法实现了对PLC带的在线观察、揭示了带宽和厚度成比例关系，与应变率无关；代表作1。在一个应变率和温度下，只有一种带类型，除非温度改变；代表作3。蒋等通过数字图像相关法观测了铝铜合金在多种应变率下的变形信息和锯齿特征、蒋等首次通过实验手段揭示了合金中带类型的转化；代表作4；项等通过数字图像相关法详细展示B型带形核过程，指出每次应力跌落对应着一次带内雪崩式变形和带外的弹性收缩、A型带对应着更小的连续雪崩式变形，其传播距离小于带宽；代表作5。江等观察了铝铜合金在淬火后不同时效时间的局域化变形带、发现淬火状态锯齿屈服产生要早于退火状态；代表作6。

Portevin奖章获得者法国Lebyodkin教授在Acta Mater(2012,60:3729)中评价:蒋等提出光测方法并从实验上证实变形带是非均匀复杂演化的猜想；代表作4。

波兰B. Skoczeń教授在Int J Plasticity (2014, 55:198)中评价：胡等对室温下的锯齿形屈服现象进行了数值模拟，反映了流动应力瞬态响应和应变率突然增大的对应关系，属于应变时效材料的特性；代表作7。

东南大学何小元教授在Opt Express（2016, 24:30124）中评价：高等提出了二阶型函数结合IC-GN算法，比传统一阶型函数具有更高的投影变换的匹配适应性、并借助高的算法提高单透镜三维数字图像相关法的效率和精度；代表作8

【**发现点**1】法国H. Louche教授在Exp Mech(2008, 48:741)中评价：张等利用DIC技术测量了三种PLC带在成核和演化过程中的位移场和应变场、揭示了A带是以比带宽更小的步长间歇式传播；代表作1,5。法国N. Ranc教授在Mat Sci Eng A(2008, 474:188)中评价：蒋等通过数字图像相关法从散斑图案中获得了应变场，采样频率高达数十赫兹。代表作4。德国T. Niendorf教授在Scripta Mater (2013, 68:809)中评价：实时记录变形带在毫秒量级的形核和传播；代表作5。香港M.X.Huang教授在Acta Mater(2017,124:17)中评价：张等利用数字散斑干涉法研究了带传播的时空特性；代表作1。

【**发现点**2】Peter Liaw教授在Mater Chem Phys(2017, In Press)中评价：符等展示两种相反方向的应力应变锯齿、随着温度的升高锯齿由朝上变为朝下、并与当前实验结果做了详细比较；代表作2。中科院金属研究所陈荣石研究组在Mat Sci Eng A(2016,649:214)中评价：符等实验获得临界应变随温度先减小后增大的规律、符等揭示了反常临界应变的微观过程，即位错挣脱溶质原子的钉扎、并用该机制解释镁合金的临界行为；代表作2。中科院金属所杜奎研究员在Scripta Mater(2014,87:37)中引用代表作2对动态应变时效过程进行细致描述；代表作2。西北工业大学王永军课题组在Mat Sci Eng A (2014, 608:190)中评价：江等的结果表明，由于固溶处理增大了溶质原子浓度使动态应变时效得到加强、PLC效应的消失是由于在自然时效过程中形成析出相带来溶质原子浓度降低、先后解释了固溶处理对动态应变时效的加强和溶质原子浓度降低抑制了锯齿形屈服；代表作6。

【**发现点3**】韩国H.S. Kim教授在Mat Sci Eng A (2015, 633:136)中评价：江等建立了铝合金中PLC带的模型，揭示了实验和模拟中的锯齿形流动现象；代表作3。法国M.A. Lebyodkin教授在Metall Mater Trans A (2017,48:965)中评价：江等的结果展示了每个锯齿是由于一个（有时多个）局域带内短时高率的变形引发的；代表作3。Arch Civ Mech Eng(2017,18:94)中评价：模拟这些局域化现象是十分有趣的；代表作7。法国C. Bernard教授在Exp Mech (2013,53:1025)中评价：胡等给出了拉伸试件上三点处温度随应变的变化；代表作7。

**代表性论文专著目录**

1. On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: an experimental study with digital speckle pattern metrology. Qingchuan Zhang, Zhenyu Jiang, Huifeng Jiang, Zhongjia Chen, Xiaoping Wu. International Journal of Plasticity, 2005, 21:2150
2. Two mechanisms for the normal and inverse behaviors of the critical strain for the Portevin-Le Chatelier effect. Shihua Fu, Teng Cheng, Qingchuan Zhang, Qi Hu, Pengtao Cao. Acta Materialia, 2012, 60:6650
3. Three types of Portevin-Le Chatelier effects: experiment and modelling. Huifeng Jiang, Qingchuan Zhang, Xuedong Chen, Zhongjia Chen, Zhenyu Jiang, Xiaoping Wu, Jinghong Fan. Acta Materialia, 2007, 55:2219
4. Spatial characteristics of the Portevin-Le Chatelier deformation bands in Al-4 at%Cu polycrystals. Zhenyu Jiang, Qingchuan Zhang, Huifeng Jiang, Zhongjia Chen, Xiaoping Wu. Materials Science and Engineering A, 2005, 403:154
5. Time-resolved deformation measurements of the Portevin-Le Chatelier bands. Guofu Xiang, Qingchuan Zhang, Haowen Liu, Xiaoping Wu. Scripta Materialia, 2007, 56:721
6. Spatiotemporal aspects of the Portevin–Le Chatelier effect in annealed and solution-treated aluminum alloys. Huifeng Jiang, Qingchuan Zhang, Xiaoping Wu. Scripta Materialia, 2006, 54:2041
7. Thermal analyses and simulations of the type A and type B Portevin-Le Chatelier effects in an Al-Mg alloy. Qi Hu, Qingchuan Zhang, Pengtao Cao, Shihua Fu. Acta Materialia, 2012, 60:1647
8. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement. Yue Gao, Teng Cheng, Yong Su, Xiaohai Xu, Yong Zhang, Qingchuan Zhang. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:73

**主要完成人情况表**

张青川，排名1，教授，工作单位：中国科学技术大学，完成单位：中国科学技术大学，是该项目主要负责人，提出了本项目的核心思路，制定了项目的研究内容和方案，全面把控研究工作。对全部发现点有突出贡献，全部代表论文的通讯作者，代表论文1的第一作者。

符师桦，排名2，副教授，工作单位：海南大学，完成单位：中国科学技术大学，对发现点2有突出贡献，提出了正常和反常两种临界行为的物理机制，给出对应的两种位错和溶质原子间相互作用状态的微观图像描述，明确了锯齿形塑性失稳的产生条件，是代表论文2的第一作者，代表论文7的主要作者。

江慧丰，排名3，研究员，工作单位：合肥通用机械研究院有限公司，完成单位：合肥通用机械研究院有限公司，对发现点2，3有突出贡献，建立基于动态应变时效热激活机制力学模型，成功再现带外弹性收缩等关键实验现象，并发现热处理对锯齿形屈服的影响。是代表论文3，6的第一作者。

高越，排名4，工程师，工作单位：北京强度环境研究所，完成单位：中国科学技术大学，对发现点1有贡献，针对高应变梯度和三维立体图像匹配问题，提出了高精度二阶形函数和对应的高效率反向迭代亚像素相关匹配算法，提高了数字图像相关法在非均匀变形测量方面的精度和效率。是代表论文8的第一作者。

伍小平，排名5，教授，工作单位：中国科学技术大学，完成单位：中国科学技术大学，对项目整体有指导性贡献，包括发现局域化塑性失稳问题，指出光学测量方法的研究方向，提出用散斑干涉法测量大塑性变形，是代表文献1，3，4，5，6的主要作者。

**完成人合作关系说明**

在国家项目基金的支持下，中国科学技术大学近代力学系较早地考虑材料力学行为多尺度全场测量实验力学新技术与新方法的研究。在国家自然科学基金项目和中科院百人计划的资助下，本项目五位完成人密切合作，开展了申报项目“合金材料局域塑性失稳的多尺度实验技术和机理研究”的工作。

张青川在博士生导师伍小平院士的建议下于2001年回国开始实验力学新方法及其在交叉领域应用的研究，并拓展了该方向的研究。江慧丰、符师桦和高越是张青川的博士生，在博士学习期间，他们在导师张青川的指导下开展该项目研究，其中江慧丰毕业后到合肥通用机械研究院有限公司继续参与项目研究，符师桦毕业后还继续留在课题组从事研究工作。他们先后参与以张青川为负责人的国家自然科学基金项目研究，其中2项面上项目1项重点项目，并与张青川合作发表数十篇论文（含8篇代表性论文）。伍小平在项目研究中主要起指导性作用，如建议基于散斑干涉测量大塑性变形等，并以主要参与成员参加国家自然科学基金重点项目（11332010），并直接参与多篇代表性论文和其他相关论文的工作。

**承诺：**本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

**第一完成人签名：**

**完成人合作关系情况汇总表**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者 | 合作时间 | 合作成果 | 证明材料 | 备注 |
| 1 | 共同立项 | 张青川  江慧丰 | 2004/1-  2006/12 | 国家自然科学基金面上项目10372098 | 图片附件2 |  |
| 2 | 共同立项 | 张青川  符师桦 | 2009/1-  2011/12 | 国家自然科学基金面上项目10872189 | 图片附件3 |  |
| 3 | 共同立项 | 张青川  伍小平  符师桦  高越 | 2014/1-  现在 | 国家自然科学基金重点项目11332010 | 图片附件4 |  |
| 4 | 论文合著 | 张青川  符师桦  江慧丰  高越  伍小平 | 2004/1-  2014/6 | 8篇代表性论文 | 代表性论文专著的相关PDF附件 | 每篇论文均为部分完成人间的合作 |
| 5 | 论文合著 | 江慧丰  张青川  伍小平 | 2006/5/19 | Journal of Alloys and Compounds  2007,428:151 | 图片附件5 |  |
| 6 | 论文合著 | 符师桦  张青川 | 2011/4/20 | Science China-Technological Sciences  2011,54:1389 | 图片附件6 |  |
| 7 | 论文合著 | 符师桦  高越  张青川 | 2015/5/13 | Measurement  /2015,72:61 | 图片附件7 |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

**知情同意证明**







