

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；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。

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关内容符合国家科技奖的提名要求。

提名该项目为国家自然科学奖二等奖。

项目简介:

项目属于实验固体力学领域。

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，项目针对合金材料局域塑性失稳的多尺度实验技术和机理开展了十余年的研究，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，并应用到局域塑性失稳的研究中，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，及局域化变形带的空间形貌、传播特性、形核过程等信息，其全场位移测量灵敏度高达 100nm 量级，空间应变梯度高达 $10^4 \mu\epsilon/\text{mm}$ ，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，拓宽和加深了对局域塑性失稳的认识。

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，明确了局域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，验证了溶质原子在局域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，反映材料内部在微细观尺度作用下的宏观表现行为，首次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，将变形与温度变化相耦合，首次模拟获得局域塑性失稳伴随的试件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”演化行为的局域塑性失稳模型。现有实验技术尚未能观测微观动态过程，这些模型在一定程度上验证了现有机制的合理性，同时加深对微观机制的认识和理解。

成果得到国内外著名学者的积极引用和正面评价。印度科学院院士 Ananthakrishna 教授、Portevin 奖章获得者法国 Lebyodkin 教授等学者在 Prog Mater Sci、Acta Mater、Int J Plasticity 等国际期刊上都表示肯定和认可。项目共发表 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 300 余次，谷歌总他引 500 余次；国际学术大会特邀或邀请报告 8 次；获授权发明专利八项；获 2014 首届力学学会自然科学二等奖 1 项。

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。

高越，排名 3，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 4，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。