

文章编号: 0253-2239(2007)05-0898-5

# 数字散斑法在局域剪切带三维变形研究中的应用 \*

刘颢文 张青川 于少娟 项国富 卢俊勇 伍小平

(中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027)

**摘要:** 在适当的温度、应变率和预变形下, 合金材料的拉伸试验中, 将会出现伴随应力锯齿形跌落的雪崩式剪切变形带, 即波特文-勒夏特利埃(Portevin-Le Chatelier, PLC)效应。利用高速数字摄像系统(分辨力 1000 frames/s)并结合数字散斑干涉法(Digital speckle pattern interferometry, DSPI)和数字散斑相关法设计了一套光学变形测量系统, 实现了拉伸试验中对试件表面三维变形的实时、精确测量。利用该光学系统对铝铜合金试件在拉伸试验中产生的跳跃传播的局域剪切带瞬态成核过程进行捕捉。通过结合数字散斑相关法得到的面内变形定量结果和数字散斑干涉法得到的表现离面变形的条纹图, 再现了剪切变形带成核和传播瞬间的三维变形过程。

**关键词:** 光学测量; 剪切带; 数字散斑测量技术; 高速数字摄像; 三维变形

中图分类号: O348.1; O483 文献标识码: A

## Investigation on the Three-Dimensional Deformation of Local Shearing Band by Digital Speckle Metrology Technique

Liu Haowen Zhang Qingchuan Yu Shaojuan Xiang Guofu Lu Junyong Wu Xiaoping

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

**Abstract:** The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect associated with avalanching shearing deformation, will occur during a tensile test for many alloy materials. With the aid of the digital speckle metrology technique including digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital speckle correlation(DSC), an optical system was set up to measure the three-dimensional deformation on the specimen in real time during tensile test. The nucleation process of a shearing band in Al-Cu polycrystal was captured by using a high-speed digital photography (1000 frame/s). The quantitative results of the displacement field and axial strain field on the front and lateral surface are obtained by digital speckle correlation method and the propagation of the out-plane deformation of the band is vividly visualized by correlation fringes. By combining the in-plane and out-plane deformation results, a report of three-dimensional nucleation process for the shearing band is presented here.

**Key words:** optical measurement; shearing band; digital speckle metrology technique; high-speed digital photography; three-dimensional deformation

### 1 引 言

数字散斑干涉技术和数字散斑相关技术作为两种重要的数字散斑测量手段, 由于具有非接触、高精度和能显示全场信息等特点, 被广泛应用在各种变形的测量中。近年来, 运用数字散斑测量技术对铝铜合金试件在拉伸实验中产生并在试件试验段内反复传播的局域剪切变形带, 即波特文-勒夏特利埃

(Portevin-Le Chatelier, PLC)剪切带<sup>[1]</sup>, 进行了观察和研究<sup>[2~5]</sup>。数字散斑测量技术克服了一些早期对波特文-勒夏特利埃剪切带的直接观测方法, 如“镜面研磨法”<sup>[6]</sup>和“激光引伸计法”<sup>[7]</sup>在可重复性和测量精度等方面的不足, 成功地记录了剪切变形带在试件内反复传播的动态过程。由于波特文-勒夏特利埃剪切带成核瞬态过程对揭示其形成的本质原因具有重要

\* 国家自然科学基金(10232030, 10372098)资助课题。

作者简介: 刘颢文(1979—), 男, 满族, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事固体力学、实验力学方面的研究。  
E-mail: hwliu@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张青川(1962—), 男, 贵州贵阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事固体力学、实验力学等方面的研究。  
E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

收稿日期: 2006-06-07; 收到修改稿日期: 2006-09-06

的作用,因此对其成核过程的观测很早就受到关注<sup>[6]</sup>。但是由于受到实验设备和实验技术的限制,至今为止仍然没有得到波特文-勒夏特利埃剪切带空间成核演化的瞬态过程中的全场定量变形数据。而且对拉伸试验中波特文-勒夏特利埃剪切带的空域行为的研究还只局限于试件观察表面的二维变形。

本文利用高速数字图像采集系统,结合数字散斑干涉法和数字散斑相关法,设计了一套光学变形测量系统,对 Al-Cu 合金试件在拉伸试验中产生的间断传播的 B 型波特文-勒夏特利埃剪切带的瞬态成核过程进行捕捉,通过结合数字散斑相关法得到的面内变形定量结果和数字散斑干涉法得到的表现离面变形的条纹图,再现了剪切变形带成核和传播瞬间的三维变形过程。

## 2 实验原理和实验装置

### 2.1 数字散斑相关法原理

数字散斑相关法(DSC)是利用数字成像系统记录下不同时刻试件表面的精细结构,再根据图像相关分析技术得到的各点的位移分布,由此位移可以得到试件表面的应变分布<sup>[8]</sup>。本文中采用快速傅里叶变换互相关分析方法,通过计算连续两幅图像中相应位置的两个小区域的互相关函数得到图像中小区域的平均位移大小和方向。由于相关运算存在一定的误差,计算得到的位移场不光滑,不能直接由位移场得到应变场。将数字散斑相关法计算得到的位移场经过了移动最小二乘法(MLS)拟合处理<sup>[9]</sup>,微分得到应变场的空间分布。

### 2.2 数字散斑干涉法测量离面位移原理

数字散斑干涉法(DSPI)是利用干涉散斑场的相关条纹来检测双光束波前之间的位相变化。本文采用迈克耳孙干涉光路,其光路原理图如图 1 所示。从 He-Ne 激光器发出的激光,经过扩束镜、准直镜

后,成为平行光;经分光棱镜分成两束互相垂直的激光束,分别照在被测物体表面和参考面上;它们的漫反射光再次经过分光棱镜,在 CCD(配合连续变焦物镜 12.5~75 mm, f 数为 1.8)靶面上叠加成一个干涉散斑场;运用等间隔相减<sup>[2]</sup>,对采集的图像序列中间隔相等的干涉散斑图分别进行相减处理,得到试件表面剪切变形过程中离面变形随时间演化的条纹图。选用的 He-Ne 激光波长为 632.8 nm, 条纹灵敏度为  $\lambda/2=0.316 \mu\text{m}/\text{fringe}$ 。

### 2.3 实验过程

实验系统如图 1 所示,试件试验段长 55 mm, 宽 20 mm, 厚 3 mm, 材料为 A2017 铝合金, 拉伸前试件作退火再结晶处理。试件竖直放置,底部固定住,上端以恒定的速率牵引拉伸,载荷传感器的信号通过采集卡记录到计算机内。

实验前试件前表面(图 1 中左侧)和侧面用砂纸打磨成粗糙的漫反射表面,试件后表面(图 1 中右侧)用白漆喷涂形成漫反射面。试件前表面用非相干光照明,采用高速 CCD(配合连续变焦物镜 12.5~75 mm, f 数为 1.8)以 1000 frame/s 记录剪切带发生瞬间由试件表面漫反射形成的系列非相干光散斑图,进行后续数字散斑相关法处理得到试件表面位移矢量场和沿拉伸方向的应变场分布。设定 CCD1 采用后触发模式,以 30 frame/s 的频率记录试件后表面的激光散斑干涉图序列,每次纪录 600 幅。运用等间隔相减方法对采集的图像序列中间隔相等的干涉散斑图分别进行相减,得到试件表面剪切变形过程中离面变形随时间演化的条纹图。CCD2 和非相干光源放置于试件侧面,以 10 frame/s 频率全程记录非相干光散斑场,通过数字散斑相关法处理得到试件侧面的面内位移定量结果(即试件前、后表面在试件侧面边沿处的离面位移值)。

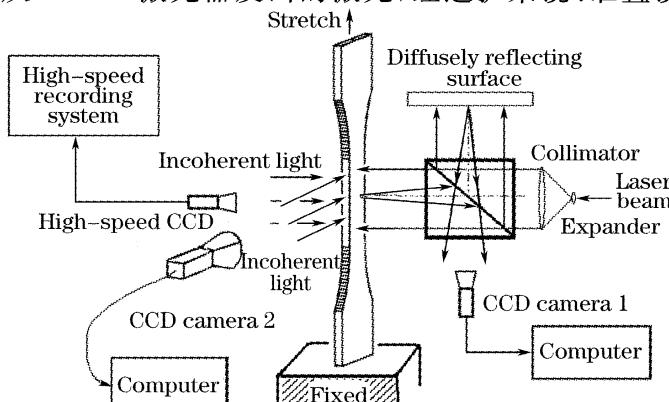


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematics of principle of experiment

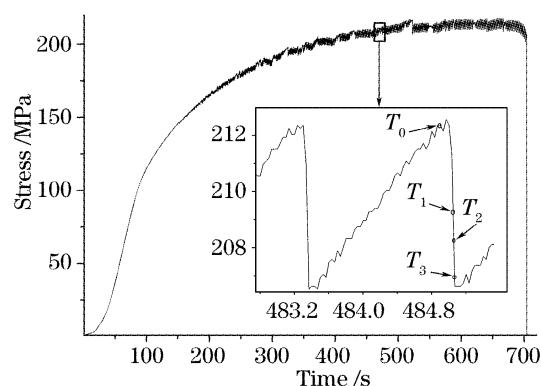


图 2 应力应变曲线

Fig. 2 Stress-time curve of Portevin-Le Chatelier band

### 3 实验结果

实验中对试件采用恒定名义应变率  $2 \times 10^{-4}/\text{s}$  进行加载, 试件中产生跳跃传播的 B 型波特文-勒夏特利埃剪切带, 对应的拉伸应力时间曲线如图 2 所示。曲线中每个锯齿形跌落对应一次剪切带的产生, 如插图所示, 实验中分别从试件的三个不同方向(即前表面、后表面和侧面)进行观测记录, 得到剪切变形带成核瞬间的三维变形过程。

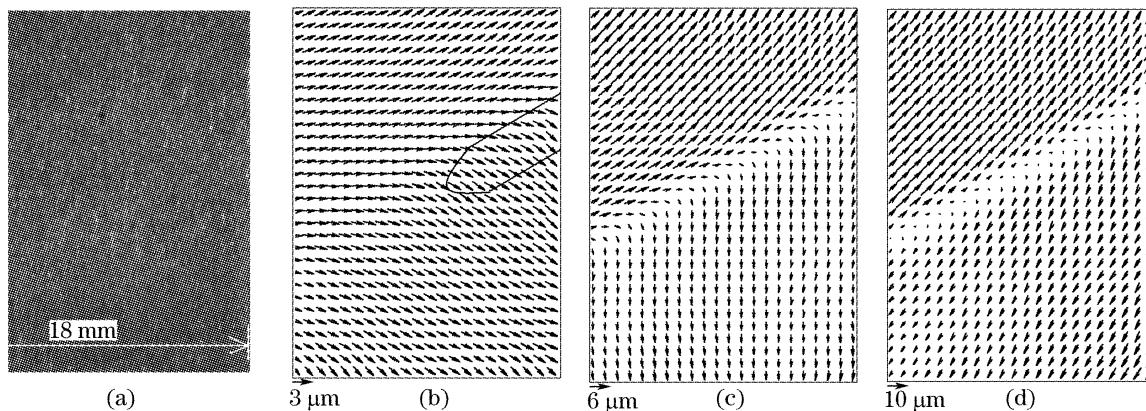


图 3 原始散斑图(a)和试件前表面的位移矢量场分布,(b)  $T_1=485.084\text{ s}$ , (c)  $T_2=485.088\text{ s}$ , (d)  $T_3=485.092\text{ s}$

Fig. 3 Original speckle pattern (a) and the displacement vector field distribution on the front surface, (b)  $T_1=485.084\text{ s}$ ,  
(c)  $T_2=485.088\text{ s}$ , (d)  $T_3=485.092\text{ s}$

选取在  $484.942\text{ s}$  发生在观察视场内的剪切带。对剪切带的成核过程进行研究, 对应锯齿形曲线如图 2 中插图所示。选定波特文-勒夏特利埃剪切带成核前  $T_0=484.870\text{ s}$  的散斑图作为参考帧, 随后的散斑图序列分别与参考帧进行相关运算, 得到剪切带成核过程中试件表面位移和沿轴向应变的累积空间分布演化, 如图 3 和图 4 所示。在剪切带成核初期, 由于试件表面位移太小而无法准确分辨带内和带外的边界, 直到  $T_1=485.084\text{ s}$ 。图 3 中  $T_1$  时刻的位移矢量场分布显示带核区域像是一个裂口, 试件沿着变形带被向两端拉伸(变形带区域用实线标出), 对应的应变分布图显示变形带从试件侧面产生, 横向生长入试件内, 应变值沿着剪切带的长度方向从一个侧面向另一个侧面递减。图 3 和图 4 中  $T_2$  时刻结果显示随着变形量增大,  $4\text{ ms}$  后带核贯穿试件横向, 发展成为一条完整的剪切带。试件被变形带分成上下两个区域, 位于变形带上方的部分沿着变形带向斜上方滑动, 位于变形带下面的部分向下收缩(因为试件下端固定)。再经过  $4\text{ ms}$ , 带外上下两部分发生相对剪切的雪崩式塑性变形, 带内应变达到峰值  $0.3\%$ , 如图 3 和图 4 中  $T_3$  时刻结果所示。

数字散斑相关法能够得到观察平面内面内位移

### 3.1 剪切带成核过程中试件表面的面内变形

使用高速 CCD 以  $1000\text{ frame/s}$  的频率捕捉到记录剪切带成核过程中试件表面的面内变形的非相干光散斑图序列。散斑图像所对应的实际物理尺寸为  $47\text{ μm/pixel}$ 。进行数字散斑相关运算前, 每幅散斑图裁剪成  $384\text{ pixel} \times 512\text{ pixel}$ , 对应的实际视场大小为  $18\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ , 裁减后的原始散斑图如图 3 所示。

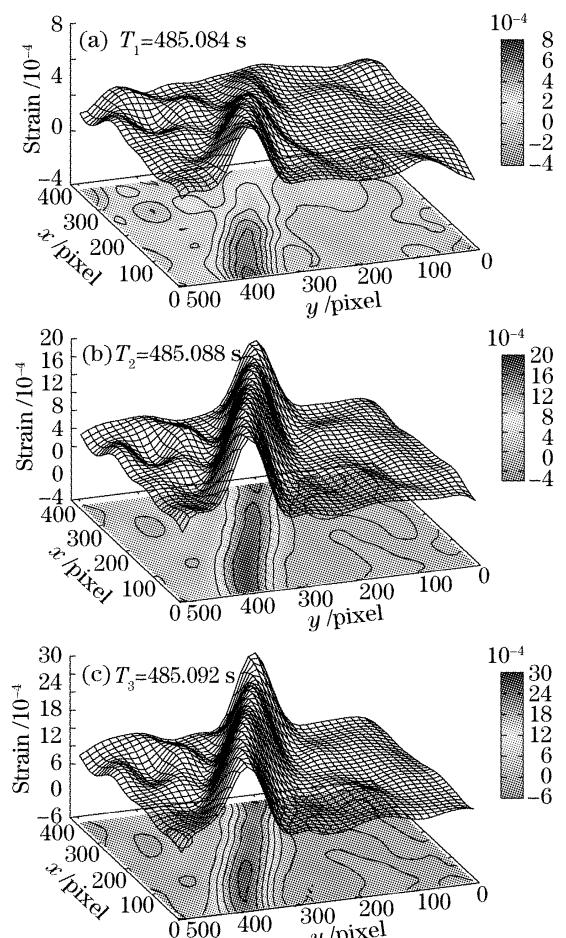


图 4 对应的轴向应变的空间分布

Fig. 4 Corresponding spatial distribution of axial strain

的定量结果,波特文-勒夏特利埃剪切带作为发生在三维空间的复杂现象,其在观察平面上必然还具有离面位移。为了对波特文-勒夏特利埃剪切带的空间特性进行更加全面地分析,还需要对剪切带成核过程中的离面位移进行研究。

### 3.2 波特文-勒夏特利埃剪切带成核过程中的离面变形

采用迈克耳孙光路和 CCD1 对试件后表面进行观察,得到剪切成核过程中表示试件表面的离面位移散斑条纹图序列,如图 5 所示,标示的时间显示距离记录数据中第一幅图像的时间间隔,相减间隔选择 5 帧。设定采集数据中第一幅图像的时刻为时间零点(CCD1 采用后触发模式,发现剪切带在视场中形成后,以 30 frame/s 的频率记录触发点之前的 600 帧图像),以 5 帧为相减间隔,运用等间隔相减方法处理迈克耳孙干涉光路数据,得到波特文-勒夏特利埃剪切带成核过程中表示离面位移随时间演化的散斑条纹图。其中,每幅散斑条纹图表示当前时刻相对 0.17 s 之前时刻之间的试件表面离面变形,即通过当前时刻记录的散斑干涉图和 0.17 s 之前时刻记录的散斑干涉图之间相减得到散斑条纹图。图 5 中从 2.10 s 到 2.28 s 时间段内的条纹图再现了剪切带从成核到贯穿试件的过程。在带的成核过程中,离面变形伴随着面内变形从试件的一侧传播到另一侧,之后剪切带开始沿自身宽度方向迅速膨胀。

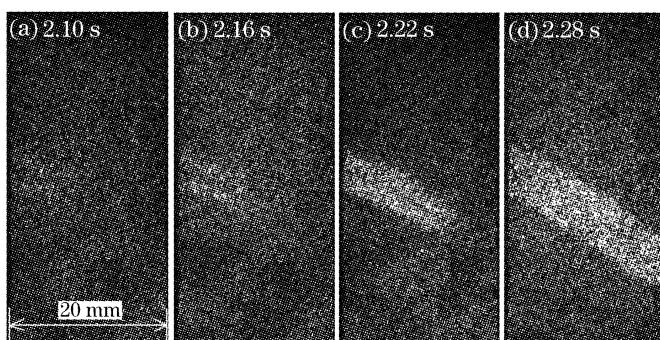


图 5 波特文-勒夏特利埃剪切带成核过程中试件表面离面位移的演化

Fig. 5 Fringe patterns of out-plane deformation evolution during nucleation process of PLC band

由于剪切带导致的离面变形过于剧烈,带内表现离面变形的条纹太密集无法分辨,表现为一条白带。为了得到带内离面变形的定量的结果,采用数字散斑相关法分析 CCD2(配合连续变焦物镜 12.5~75 mm, f 数为 1.8)以 10 frame/s 的频率全程记录试件侧面在变形过程中的非相干光散斑图。散斑图像素对

应的实际物体尺寸为  $16 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。每幅散斑图裁剪成  $185 \text{ pixel} \times 456 \text{ pixel}$ , 对应的实际视场大小为  $3 \text{ mm} \times 7.4 \text{ mm}$ , 裁减后的原始散斑图如图 6 所示, 剪切带的位置分别用黑色箭头标示, 标示的时间指示当前时间距离实验开始的时间间隔。分别选取剪切带发生前后相隔 0.2 s 的两幅散斑图作数字散斑相关运算, 得到试件侧面的变形, 即试件前后表面在试件侧面边沿的离面变形。图 6 显示了采用数字散斑相关法分析得到的 3 条相邻发生的波特文-勒夏特利埃带在试件侧面变形的矢量场图, 剪切带发生后, 试件在剪切带区域沿拉伸方向拉长, 沿厚度方向收缩。剪切带在试件前后表面引起的变形关于厚度方向对称。这种收缩变形与传统拉伸试验中发生在试件断裂前的颈缩变形非常相似。

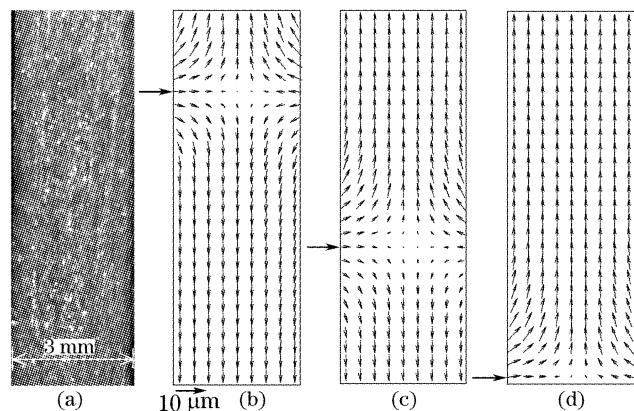


图 6 原始散斑图(a)和从试件侧面观察三条相继发生的波特文-勒夏特利埃剪切带的位移场分布。  
(b) 401.3 s, (c) 406.1 s, (d) 410.9 s

Fig. 6 Original speckle pattern (a) and the displacement vector fields of three Portevin-Le Chatelier bands happened in succession (b) 401.3 s, (c) 406.1 s, (d) 410.9 s

### 3.3 剪切带三维变形过程

根据面内变形(图 3 和图 4)和离面变形(图 5 和图 6)结果, 可以还原再现波特文-勒夏特利埃剪切带在成核过程中的三维变形, 如图 7 所示。成核过程分为两个连续阶段: 第一阶段, 波特文-勒夏特利埃剪切带在应力容易集中处(试件侧面)首先开始成核, 宏观表现为成核区域的材料沿拉伸方向被拉长, 沿厚度方向收缩, 如图 7(a) 所示。第二阶段, 随着屈服变形从试件一个侧面传递到达另一个侧面, 如图 7(b) 所示, 剪切带开始沿着自身长度方向发生剧烈的宏观雪崩式剪切变形, 如图 7(c) 所示。

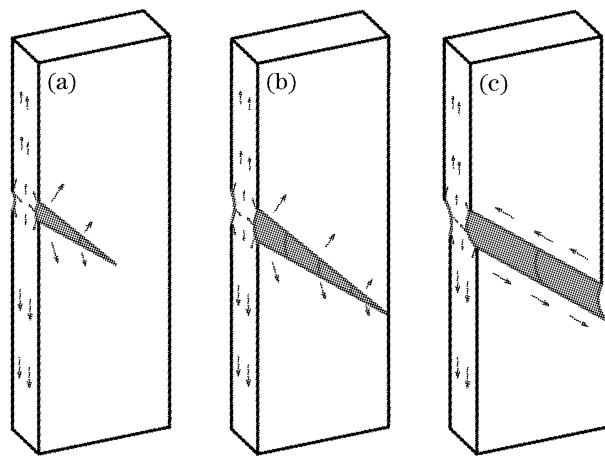


图7 波特文-勒夏特利埃剪切带三维成核过程示意图。

(a) 开始在试件侧面成核,(b) 带核的尖端到达试件另一个侧面,(c) 宏观雪崩式剪切变形沿剪切带发生

Fig. 7 A schematic three-dimensional nucleation process of Portevin-Le Chatelier band. (a) Begins to nucleated at the lateral of the specimen, (b) tip of the nucleus reached the other lateral side of the specimen, (c) macroscopic avalanching shearing deformation happened along the band

## 4 结 论

利用高速数字摄像系统以 1000 frame/s 的频率捕捉到 Al-Cu 合金试件在拉伸试验中产生的波特文-勒夏特利埃剪切带的瞬态成核过程。结合数字散斑干涉技术和数字散斑相关技术得到成核过程中试件表面的面内和离面变形结果,再现了波特文-勒夏特利埃剪切变形带成核和传播过程中三维变形过程。结果显示波特文-勒夏特利埃剪切带是一系列离散的,局域分布的颈缩现象。

设计的数字散斑测量系统具有非接触,高精度并能获得三维全场变形信息等特点,成功得到了剪切变形过程中试件三维变形的定量结果,为进一步分析剪切变形带提供了重要的定量数据。该系统还

可以被应用于拉伸、压缩等多种常规实验中试件的三维变形测量。

## 参 考 文 献

- 1 A. Portevin, F. Le Chatelier. A phenomenon observed during tension tests on alloys during transformation[J]. *Comput. Rend. Acad. Sci.*, 1923, **176**: 507~510
- 2 Qingchuan Zhang, Zhenyu Jiang, Huifeng Jiang et al.. On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: An experimental study with digital speckle pattern metrology[J]. *Int. J. Plast.*, 2005, **21**: 2150~2173
- 3 Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Xiang Guofu et al.. White-light digital speckle image correlation analysis of the Portevin-Le Chatelier shearing band in multiscale [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2005, **20**(4): 487~493 (in chinese)
- 4 Jiang Zhenyu, Zhang Qinshuan, Wu Xiaoping. An investigation on the Portevin-Le Chatelier band with dynamic DSPI and temporal phase analysis[J]. *J. Experimental Mechanics*, 2003, **18**(3): 289~294 (in Chinese)
- 蒋震宇,张青川,伍小平. 利用动态DSPI及其时域位相分析研究Portevin-Le Chatelier滑移带[J]. 实验力学, 2003, **18**(3): 289~294
- 5 Zhenyu Jiang, Qingchuan Zhang, Huifeng Jiang et al.. Spatial characteristics of the Portevin-Le Chatelier deformation bands in Al-4 at%Cu polycrystals[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, **403**: 154~164
- 6 K. Chihab, Y. Estrin, L. P. Kubin. The kinetics of the Portevin-Le Chatelier bands in an Al-5at% Mg alloy[J]. *Scr. Metall.*, 1987, **21**: 203~208
- 7 A. Ziegenbein, P. Hähner, H. Neuhäuser. Correlation of temporal instabilities and spatial localization during Portevin-Le Chatelier deformation of Cu-10 at. % Al and Cu-15 at. % Al[J]. *Comp. Mater. Sci.*, 2000, **19**: 27~34
- 8 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming et al.. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 197~201 (in Chinese)
- 杨勇,王琰蕾,李明等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 197~201
- 9 Zeng Qinghong, Lu Detang. Curve and surface fitting based on moving least-squares methods[J]. *J. Engineering Graphics*, 2004, **25**(1): 84~90 (in Chinese)
- 曾清红,卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004, **25**(1): 84~90