

数字剪切散斑干涉法研究铝合金中Portevin-Le Chatelier 带的离面变形行为*

高越 符师桦 蔡玉龙 程腾[†] 张青川[‡]

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

(2013年9月15日收到; 2013年12月9日收到修改稿)

作为Portevin-Le Chatelier (PLC) 带的重要特征之一, 其离面变形仍缺乏实验研究. 本文提出使用数字剪切散斑干涉法研究 GB6061 铝合金中 PLC 带的离面变形. 通过图像相减得到的条纹图, 实时观察了 PLC 带的几何形貌和传播过程, 并获得了 PLC 带离面位移分布. 在 1/15 s 内, PLC 带的最大离面位移为 245 nm, 位置偏向于 PLC 带传播的前沿. 在条纹图中, PLC 带传播前沿的亮条纹始终较窄. 此外, 实验还观察到 PLC 带位置变更和倾角转向的演化过程. 实验表明, 数字剪切散斑干涉法具有高灵敏度和防震性, 是研究 PLC 带离面变形简便有效的方法.

关键词: Portevin-Le Chatelier 效应, 数字剪切散斑干涉法, 离面变形

PACS: 62.20.F-, 42.25.Hz, 81.70.Fy

DOI: 10.7498/aps.63.066201

1 引言

在一定的温度、应变率及预变形等实验条件下, 许多合金材料在塑性变形阶段会出现反复的失稳现象, 称之为Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应^[1-7]. 其在时域上表现为应力应变曲线上反复发生的锯齿形屈服, 在空域上表现为变形集中在试件的局部区域, 通常为带状, 称为 PLC 带. PLC 效应的机制普遍认为是动态应变时效 (dynamic strain aging, DSA)^[8-11], 即溶质原子和可动位错之间相互作用. 宏观上, 塑性变形是连续的; 而在微观上, 塑性变形是由于位错的不连续滑移造成的. 当可动位错被障碍 (如林位错、晶界等) 所阻碍时, 溶质原子通过扩散向可动位错偏聚, 在其周围形成溶质原子团对可动位错产生钉扎. 在外加应力场的作用下, 可动位错通过热激活的方式克服溶质原子的钉扎从而实现脱钉. 这种反复的“钉扎-脱钉”过程形成了周期性锯齿形应力曲线和试件表面反复出现

的 PLC 带. 根据 PLC 带不同的空间传播特性, 可以将其划分为三种类型: 连续传播的 A 型、跳跃传播的 B 型以及随机形成的 C 型^[12]. 一般地, 随着应变率减小或温度升高, PLC 带由 A 型向 B 型再到 C 型转变^[13].

近几十年来, 研究者们通过各种实验方法观测了 PLC 带的形貌及空间特性. PLC 带形成时会使光滑的试件表面变粗糙, 利用这一特点, 阴影法通过观察抛光试件表面的粗糙痕迹, 获得了 PLC 带的空间特性^[14]. 但是, 当试件表面由于 PLC 带的出现而变得粗糙之后, 后续的 PLC 带就难以再通过该方法进行观测了. 激光扫描引伸计法使用扫描激光, 检测试件表面预先设置的黑白条纹的宽度变化, 获得了 PLC 带在试件表面反复传播的轨迹^[15]. 该方法的空间分辨率只能达到毫米量级, 难以获得 PLC 带内的变形信息. 数字散斑干涉法利用两束相干激光对称照射试件表面形成干涉散斑场, 通过数字相机记录试件变形前后的散斑场, 并对数字图像进行灰度相减, 实时显示 PLC 带的形貌和空间

* 国家自然科学基金 (批准号: 11332010, 51271174, 11372300) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB302105) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: chteng@ustc.edu.cn

[‡] 通讯作者. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

特性, 获得带内详细的变形信息^[16,17]. 由于该方法对振动非常敏感, 通常使用该方法时, 需要对拉伸装置和光学系统加以特殊的防震措施. 数字图像相关法对试件变形前后的数字图像进行相关计算, 获得了PLC带的形貌特征及带内的变形信息^[18]. 该方法抗干扰能力强, 且能全场测量, 但其结果是通过后期处理获得, 不能实时显示. 红外测温法通过测量试件表面温度场, 观测到了PLC带形貌特征和传播过程^[19,20].

PLC带引起的变形局域化, 会使试件局部颈缩, 影响随后的力学性能. 这种颈缩程度反映为PLC带内的离面变形大小. 而以上所述的测量变形方法仅局限于研究PLC带的面内变形行为, 很少有研究者关注PLC带的离面变形行为. 为此, 本文提出使用数字剪切散斑干涉法研究PLC带的离面变形行为. 实验得到试件全场离面位移梯度, 实时观测PLC带的几何形貌和传播特征, 并首次获取了PLC带的离面位移分布. 此外, 还观察到PLC带的位置变更和倾角转向这两种特殊行为的演化过程.

2 数字剪切散斑干涉法

数字剪切散斑干涉法是在传统剪切散斑干涉法的基础上使用数字相机采集散斑图像^[21], 其应用包括残余应力检测^[22], 材料缺陷检测^[23]及三维形状测量^[24]等方面.

剪切散斑干涉法的光路如图1所示. 在分光镜后放置两面反射镜, 分别称为参考镜和剪切镜, 参考镜与入射光线垂直, 剪切镜偏离一个小角度 θ . 采用激光照射物体, 在物体表面形成散斑场, 反射光通过分光镜后, 经参考镜和剪切镜反射, 在像平面形成两个错位的像, 分别称为参考像和剪切像, 二者在像平面形成干涉散斑场, 并由数字相机记录下来. 两个像错位的距离 δy 被称作剪切量.

假设参考像和剪切像的复振幅分别为

$$\psi_{10} = A_1 \exp(i\varphi_{10}), \quad (1a)$$

$$\psi_{20} = A_2 \exp(i\varphi_{20}), \quad (1b)$$

其中 A_1 和 A_2 分别为两个像的实振幅, φ_{10} 和 φ_{20} 为相应的初始位相. 试件发生变形后, 两个像的复振幅为

$$\psi_1 = A_1 \exp(i\varphi_{10} + \varphi_1), \quad (2a)$$

$$\psi_2 = A_2 \exp(i\varphi_{20} + \varphi_2), \quad (2b)$$

其中 φ_1 和 φ_2 为变形引起的位相变化. 则变形前后的光强差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta I &= ||\psi_{10} + \psi_{20}|^2 - |\psi_1 + \psi_2|^2| \\ &= 4A_1A_2 \left| \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. \times \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} + \frac{\varphi_{10} - \varphi_{20}}{2}\right) \right| \\ &= 4A_1A_2 |\sin(\Delta\varphi/2) \\ &\quad \times \sin(\Delta\varphi/2 + \Delta\varphi_0/2)|, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\sin(\Delta\varphi/2 + \Delta\varphi_0/2)$ 含有高频项 $\Delta\varphi_0/2$, 在空间上表现为无规则的斑点, $\sin(\Delta\varphi/2)$ 则表示了变形引起的位相变化对光强差的影响. 所以相减后图像中暗条纹的像点应满足(其中 n 为条纹级数)

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2n\pi \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4)$$

若激光照射方向与物体表面垂直, 则相减后得到的干涉条纹代表着物体上相距 δy 的两点离面位移差的等值线, 条纹灵敏度为半波长. 若剪切方向为 y 方向, 离面位移为 W , 激光波长为 λ , 其暗条纹像点代表

$$W(y) - W(y + \delta y) = \Delta W = n\lambda/2, \quad (5)$$

即代表 δy 间距内的平均应变为

$$\frac{\delta W}{\delta y} = \frac{n\lambda}{2\delta y}. \quad (6)$$

通过调整剪切量 δy , 可以获取不同间距的离面位移差和平均应变.

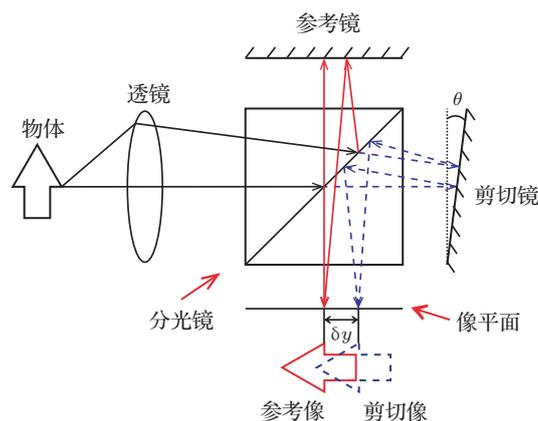


图1 剪切散斑干涉法光路示意图

3 实验设置

实验材料为GB 6061商业铝合金, 其化学成分为(wt%): Mg 0.8—1.2, Si 0.4—0.8, Mn

0.15, Fe 0.7, Zn 0.25, Ti 0.15, Cu 0.1—0.4, Cr 0.04—0.35, Al为基体. 拉伸试件标距段尺寸为 55 mm × 20 mm × 3 mm. 拉伸实验前, 首先对试件进行重结晶退火热处理, 具体做法为先将试件在 500 °C 保温 3 h, 然后炉冷至室温. 实验在室温下进行, 名义加载应变率为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. 拉伸的同时, 通过数字剪切散斑干涉仪记录试件表面的干涉散斑场, 剪切量分别设置为 15.4, 5.4 和 2.2 mm, 剪切方向与拉伸方向相同, 使用的激光器波长为 532 nm, 图像采集频率为 15 Hz. 采集的图像与上一幅图像相减, 并将得到干涉条纹图实时显示, 结果代表 1/15 s 内试件产生离面位移梯度分布.

4 实验结果

4.1 几何形貌

图 2 (a), (b), (c) 给出了示意剪切量的原始图, 图中标记的两条横线间的距离即为剪切量. 与之对应, 图 2 (d), (e), (f) 给出了三种剪切量下图像相减后获得的条纹图, 从中可以清晰地观察到 PLC 带. 三种剪切量下的 PLC 带均与拉伸轴呈约 60° 夹角, 既有 “/” 方向也有 “\” 方向, 其宽度分别为 21.7, 11.6 和 8.4 mm, 观察带宽随剪切量减小而减小. 其中, 在大剪切量下, PLC 带条纹由两组条纹构成, 如图 2 (d) 所示, 此时观察带宽为从上方条纹顶部到下方条纹底部的距离.

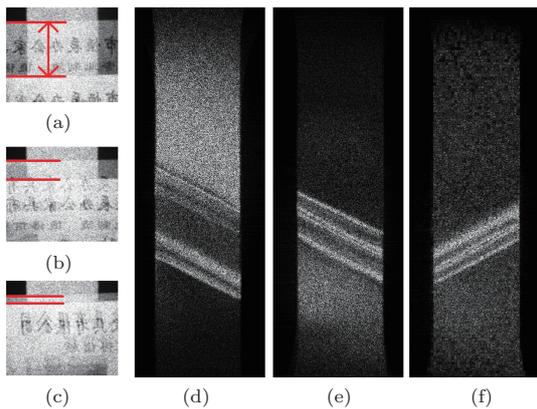


图 2 (a), (b), (c) 采集到的原始图, 剪切量为两横线间的距离; (d), (e), (f) 三种剪切量下的 PLC 带条纹图; 剪切量大小分别为 (a), (d) 15.4 mm; (b), (e) 5.4 mm; (c), (f) 2.2 mm

显然, 剪切量并不会影响试件变形, 故在实验条件相同时, PLC 带特征应是类似的. 数字剪切散斑干涉仪记录的是两个错位的像(参考像和剪

切像), 所得结果是二者之间的离面位移差. 根据 PLC 带的面内应变分布^[18], 假设离面位移在 PLC 带内是峰状分布的, 在带外为 0, 如图 3 所示, 实线代表参考像中 PLC 带内的离面位移, 虚线代表剪切像中 PLC 带内的离面位移, 条纹反映两条曲线的高度差. 所以, PLC 带的实际带宽应为观察带宽减去剪切量. 当剪切量大于实际带宽时(图 3 (b)), 在相减后图像中会得到两组条纹(图 2 (d)), 单组条纹宽度即为实际带宽, 两组条纹中间的部分代表试件 PLC 带上方区域和下方区域之间的离面位移差. 这样, 三种剪切量下所获得的 PLC 带实际宽度是一致的, 约 6.2 mm.

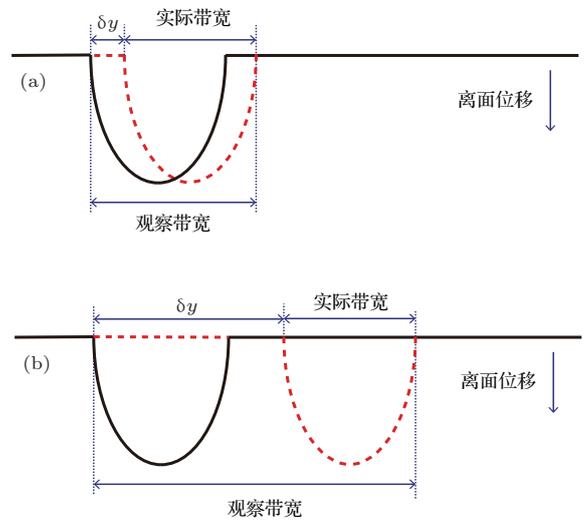


图 3 观察带宽、实际带宽及剪切量之间的关系 (a) 剪切量小于实际带宽; (b) 剪切量大于实际带宽

4.2 离面位移

当剪切量大于实际带宽时, 由上文可知, 单组条纹代表该 PLC 带内与带外区域之间离面位移差的分布. 由于带外离面位移接近于 0, 因此单组条纹亦代表着 PLC 带内离面位移的分布. 从图 4 (a)(图 2 (d) 的局部放大) 中的下方条纹可看到, 该组条纹由两条亮条纹和一条暗条纹组成. 提取 PLC 带中心线(图 4 (a) 中的竖线) 的灰度分布, 经滤波后由图 4 (b) 中双峰曲线表示. 滤波后, (3) 式中代表随机散斑的高频项 $\sin(\Delta\varphi/2 + \Delta\varphi_0/2)$ 被移除, 可得到:

$$\Delta I = 4A_1 A_2 |\sin(\Delta\varphi/2)| + I_0, \quad (7)$$

其中 I_0 为随机散斑的平均光强. 上式可用灰度表示为

$$G = a |\sin(n\pi)| + g_0, \quad (8)$$

其中 G 为滤波后灰度值; g_0 为带外区域 (0 级条纹) 的灰度值, 如图 4(a) 中横向点虚线所示; a 为转换系数. 带外区域条纹级数为 0, 离面位移也应为 0; 两个峰值 p_1 和 p_2 的条纹级数应为 0.5, 离面位移为 133 nm ($\lambda/4$). 两个峰以外的区域, 条纹级数应满足 $0 < n < 0.5$; 两个峰之间的区域, 条纹级数应满足 $0.5 < n \leq 1$. 则可得到

$$n = \begin{cases} \sin^{-1}((G - g_0)/a/\pi) & p_1, p_2 \text{ 之外} \\ 1 - \sin^{-1}((G - g_0)/a/\pi) & p_1, p_2 \text{ 之间} \end{cases} \quad (9)$$

通过 (5) 式可由条纹级数计算出 PLC 带内离面位移分布, 如图 4(b) 中单峰曲线所示, 其最大值约为 245 nm, 位于带内中间偏下位置. 从图 4(a) 还可看出, 该 PLC 带下方亮条纹比上方亮条纹更加狭窄. 在其他两种剪切量下也观察到 PLC 带两端条纹宽度不同 (图 2(e), (f)). 这种不对称性是 PLC 带传播相关的. 如图 5 所示, 三种剪切量下 PLC 带均为连续传播的 A 型, 在传播前沿, 亮条纹始终较窄. 此外, 图 5(a) 中上下两组条纹中间的部分在整个传播过程中并不一直是暗条纹, 这说明试件中 PLC 带上方区域和下方区域之间在离面方向上有微小的相对位移.

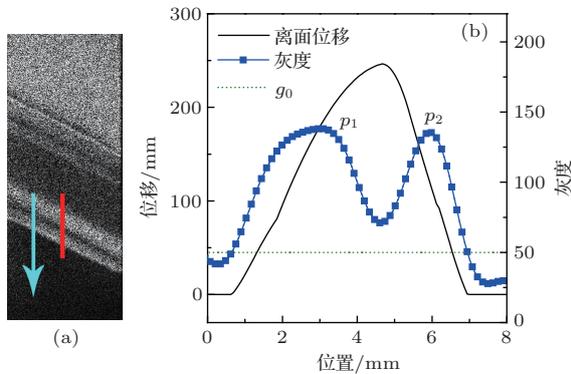


图 4 (a) PLC 带条纹图; (b) 滤波后灰度和离面位移分布, 横坐标方向如 (a) 中箭头所示

4.3 特殊行为

除了成功观察 PLC 带的形貌之外, 数字剪切散斑干涉法还捕获到了一些特殊行为. 图 6 给出了 PLC 带位置变更的散斑条纹变化, 即一个 PLC 带消失的同时另一个 PLC 带在试件的不同位置形成的过程. 如图所示, 一个已形成的 PLC 带停留在试件底部, 在试件顶部右侧, 一个新 PLC 带开始成核. 新 PLC 带逐渐向左侧扩展直至在宽度方向上贯穿试件, 原 PLC 带开始从右向左逐渐消失. 新

PLC 完全形成的同时, 原 PLC 带消失. 整个过程约 1.6 s.

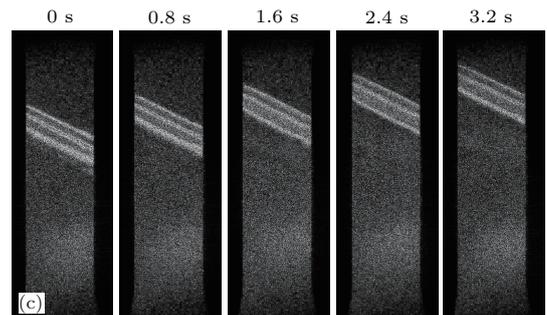
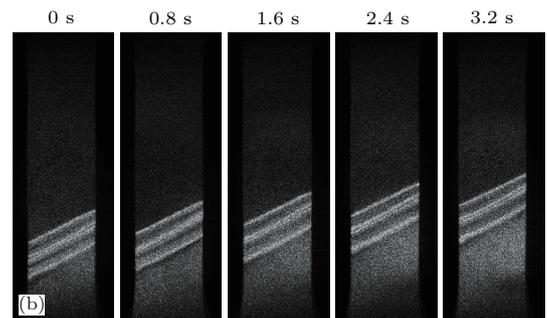
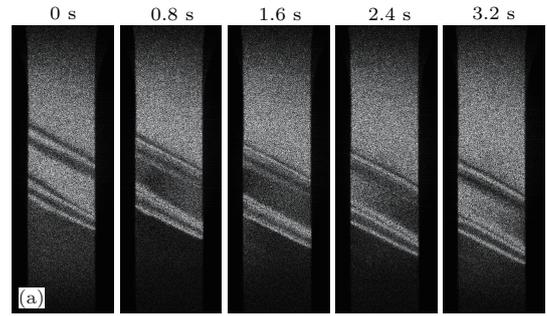


图 5 连续传播的 A 型 PLC 带 (a) 剪切量为 15.4 mm; (b) 剪切量为 5.4 mm; (c) 剪切量为 2.2 mm

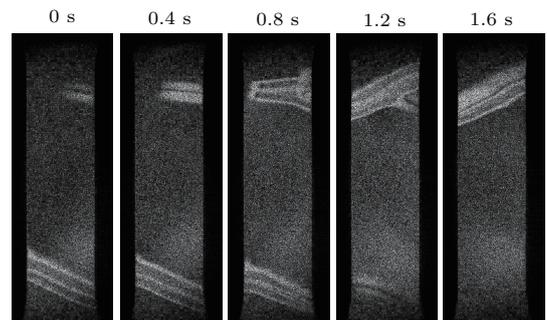


图 6 PLC 带的位置变更, 剪切量为 2.2 mm

实验还观察到了 PLC 带的倾角转向过程, 如图 7 所示. 一个已形成的 PLC 带以 “/” 的倾角在试件中部, 在相同位置的左侧, 一个新 PLC 带开始成核, 然后以 “\” 的倾角向右侧扩展, 直至与原 PLC 带形成交汇, 原 PLC 带逐渐消失, 新 PLC 带完全形

成, 整个过程约为1.1 s. 在此过程中, 新PLC带形成的特点与位置变更中较为相似, 均为新带由试件的一侧成核, 并在宽度方向上贯穿试件后完全形成, 故可将PLC带倾角转向看成位置变更的一个特例.

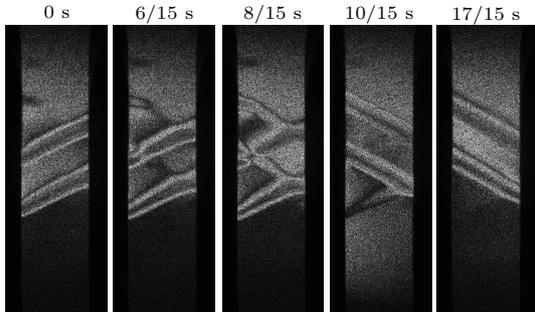


图7 PLC带的倾角转向, 剪切量为15.4 mm

5 结 论

本文运用数字剪切散斑干涉法研究了在拉伸实验中PLC带的离面变形行为, 实时获得了离面位移梯度场, 清晰地观测到PLC带的几何形貌和连续传播过程. 在三种剪切量下, PLC带均与拉伸轴呈 60° 夹角, 实际带宽约6.2 mm. 在大剪切量下, 提取条纹中线的灰度, 获得PLC带的离面位移. 在1/15 s内, 离面位移最大值约为245 nm, 且分布是不对称的. 这种不对称性与PLC带的传播有关, 反映为传播前沿的亮条纹始终较窄. 此外, 实验还观察到PLC带的位置变更和倾角转向的演化过程. 实验表明, 数字剪切散斑干涉法同时具有高灵敏度和防震性, 能够有效地测量PLC带的离面变形, 为PLC效应研究提供了一个新的方法和视角.

参考文献

[1] Jiang H F, Zhang Q C, Xu Y H, Wu X P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 409 (in Chinese)[江慧丰, 张青川, 徐毅豪, 伍小平 2006 物理学报 **55** 409]

[2] Peng K P, Chen W Z, Qian K W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3569 (in Chinese)[彭开萍, 陈文哲, 钱匡武 2006 物理学报 **55** 3569]

[3] Hu Q, Zhang Q C, Fu S H, Cao P T, Gong M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 096201 (in Chinese)[胡琦, 张青川, 符师桦, 曹鹏涛, 龚明 2011 物理学报 **60** 096201]

[4] Sun L, Zhang Q C, Cao P T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3500

[5] Halim H, Wilkinson D S, Niewczas M 2007 *Acta Mater.* **55** 4151

[6] Cui C Y, Jin T, Sun X F 2011 *J. Mater. Sci.* **46** 5546

[7] Liu L F, Cai Z P, Li H Q, Zhang G Y, Guo S B 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 036201

[8] McCormick P G 1972 *Acta Metall.* **20** 351

[9] Nortmann A, Schwink C 1997 *Acta Mater.* **45** 2043

[10] Nortmann A, Schwink C 1997 *Acta Mater.* **45** 2051

[11] Picu R C, Vincze G, Ozturk F, Gracio J J, Barlat F, Maniatty A M 2005 *Mater. Sci. Eng. A* **390** 334

[12] Lu J Y, Jiang Z Y, Zhang Q C, Jiang H F, Liu H W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3558 (in Chinese)[卢俊勇, 蒋震宇, 张青川, 江慧丰, 刘颖文 2006 物理学报 **55** 3558]

[13] Lebyodkin M, Dunin-Barkowski L, Bréchet Y, Estrin Y, Kubin L P 2000 *Acta Mater.* **48** 2529

[14] Chihab K, Estrin Y, Kubin L, Vergnol P J 1987 *Scripta Metall.* **21** 203

[15] Ziegenbein A, Hahner P, Neuhauser H 2000 *Comp. Mater. Sci.* **19** 27

[16] Zhang Q C, Jiang Z Y, Jiang H F, Chen Z J, Wu X P 2005 *Int. J. Plasticity* **21** 2150

[17] Jiang H F, Zhang Q C, Jiang Z Y, Chen Z J, Wu X P 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 99

[18] Xiang G F, Zhang Q C, Liu H W, Jiang H F, Wu X P 2006 *Chin. Phys.* **15** 2378

[19] Ranc N, Wagner D 2005 *Mater. Sci. Eng. A* **394** 87

[20] Cao P T, Zhang Q C, Xiao R, Xiong S M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5591 (in Chinese)[曹鹏涛, 张青川, 肖锐, 熊少敏 2009 物理学报 **58** 5591]

[21] Hung Y Y, Ho H P, He X Y 2006 *J. Exp. Mech.* **12** 667 (in Chinese)[洪友仁, 何浩培, 何小元 2006 实验力学 **12** 667]

[22] Hung Y Y, Long K W, Wang J Q 1997 *Opt. Lasers Eng.* **27** 61

[23] Shang H M, Tham L M, Chau F S 1995 *J. Eng. Mater. Tech.* **117** 322

[24] Tay C J, Chau F S, Shang H M, Shim V P W, Toh S L 1991 *Opt. Lasers Eng.* **14** 13

Digital shearography investigation on the out-plane deformation of the Portevin-Le Chatelier bands*

Gao Yue Fu Shi-Hua Cai Yu-Long Cheng Teng[†] Zhang Qing-Chuan[‡]

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

(Received 15 September 2013; revised manuscript received 9 December 2013)

Abstract

Digital shearography is proposed to study the out-plane deformation of the Portevin-Le Chatelier (PLC) band during tensile tests in an Al alloy. The geometrical shape and propagation of the PLC bands are visualized in real time through fringe pattern in subtracted images. In 1/15 s, the maximum out-plane displacement is 245 nm within the PLC band. The displacement distribution is asymmetric while in fringe pattern, the white fringe is narrower in the front of the PLC band than in the rear. In addition, the evolution processes of position shifting and inclination transition of the PLC bands are presented in detail.

Keywords: Portevin-Le Chatelier effect, digital shearography, out-plane deformation

PACS: 62.20.F-, 42.25.Hz, 81.70.Fy

DOI: [10.7498/aps.63.066201](https://doi.org/10.7498/aps.63.066201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11332010, 51271174, 11372300) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB302105).

[†] Corresponding author. E-mail: chteng@ustc.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn