

Al-Cu 合金中 PLC 剪切带成核过程 三维变形的实验研究 *

刘颢文 张青川 卢俊勇 项国富 伍小平

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

摘要 利用高速 (1000 Hz) 数字摄像系统, 对 Al-Cu 合金拉伸试件中跳跃式不连续传播的 B 类型 PLC 带的瞬态成核与演化过程进行连续捕捉, 运用数字散斑干涉法 (DSPI, digital speckle pattern interferometry) 得到 PLC 带成核和传播过程中由试件面内和离面位移条纹图表现的 B 类型带的成核和传播的三维变形过程. 实验结果显示了 B 类型 PLC 带的一种演化形式, 即带首先在试件的一侧成核产生并沿厚度方向发生剪切变形, 在观察平面上形成沿与拉伸轴方向呈 53° 角的窄带. 随着应力下落, 带的前沿开始向试件的另一侧面沿自身长度方向传播, 在传播过程中带逐渐沿自身宽度方向膨胀. 带的前沿贯穿试件后, 带开始高速膨胀, 导致雪崩式剪切变形发生. 根据离面位移结果得到相邻发生的 B 型带之间的跳跃传播间距, 即在带的传播方向上, 后一条带产生在前一条的前沿, 跳跃式传播过程中相邻两条带的中心线间距为带宽的一半.

关键词 Al-Cu 合金, PLC 剪切带, 数字散斑干涉法, 离面位移, 成核

中图分类号 O348.1, O483 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2006)09-0925-06

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE 3D DEFORMATION OF THE NUCLEATION PROCESS OF PLC SHEARING BAND IN Al-Cu ALLOY

LIU Haowen, ZHANG Qingchuan, LU Junyong, XIANG Guofu, WU Xiaoping

Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials of Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230027

Correspondent: ZHANG Qingchuan, professor, Tel: (0551)3601248, E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.10232030 and 10372098)

Manuscript received 2005-12-08, in revised form 2006-03-24

ABSTRACT The 3D deformation process of type-B PLC shearing band in Al-Cu alloy is captured by the help of a high speed digital photography with 1000 frames per second. A technique based on a novel high-speed digital speckle pattern metrology consisting of in-plane and out-of-plane deformation measurement methods is used for obtaining the playback of the 3D deformation process. The result shows one of the nucleation methods of type-B band: the shearing band initiates at a lateral specimen surface as a narrow band at an angle of 53° to the tensile axils and shears along the thickness direction. Subsequently the band front begins to propagate to the other lateral specimen surface along its length direction and expands in its width direction accompanying with the drop of the stress. When the front of the band reaches the other lateral surface, the band begins to expand in its width direction instantly and avalanche shearing deformation happens. Based on the out-of-plane data, the relationship to the nucleation positions of following bands is that the latter one initiates on the front edge of the former one and the spacing of their center lines is half of the band width.

KEY WORDS Al-Cu alloy, PLC shearing band, DSPI, out-of-plane deformation, nucleation

在适当的温度、应变率范围和预变形条件下, 稀合金材料在拉伸实验中将会出现不规则的塑性流动现象, 在时

域上表现为加载曲线上的“锯齿型”起伏和应变曲线上的“台阶型”变化, 在空间域表现为在试件实验段内反复传播的局部变形带, 这种塑性失稳现象称为 PLC (Portevin-Le Chatlier) 效应^[1].

* 国家自然科学基金项目 10232030 和 10372098 资助

收到初稿日期: 2005-12-08, 收到修改稿日期: 2006-03-24

作者简介: 刘颢文, 男, 1979 年生, 博士生

在理论研究上, PLC 效应归结为动态应变时效 (dynamic strain ageing) 作用^[2]; 合金中溶质原子趋向在位错线附近堆积, 塑性变形开始, 位错挣脱溶质原子开始移

动. 在应变率足够低或者温度足够高的情况下, 溶质原子的扩散速度与合金中位错的移动速度接近, 使得溶质原子能够赶上位错并将其“钉扎”住. 随着应力的上升, 位错再次挣脱溶质原子的束缚. 这种反复地“钉扎”和“脱钉”的过程引发应力的锯齿形变化.

PLC效应在时间和空间上都是一种复杂的现象, 早期实验研究方面主要集中在锯齿形应力-应变曲线的观测和定量统计^[3-6]. 由于PLC剪切变形带的产生和传播的宏观过程对实验以及理论分析的重要性, 对剪切变形过程中试件表面变形的直接观测一直是实验工作者努力的方向. 较早的直接观测的方法是将试件表面抛光, 当PLC剪切带掠过试件表面时, 使表面变得粗糙从而发生漫反射, 以此来记录剪切带前沿运动的轨迹^[7]. 但这种方法并不适用于观察反复发生的PLC效应和PLC带的动态结构演化. 最近, 激光引伸计作为一种新的测量手段也被应用到PLC剪切带的研究中^[8], 这种方法通过在试件表面用涂料做出1 mm宽的黑白相间的标记线, 通过激光束单线扫描, 观测每个区域的应变来研究带的空间传播特性. 但是这种方法只能观测到沿拉伸轴方向的一维应变分布, 而且空间分辨率较低. 近年来, 本实验室用动态数字散斑干涉法(DSPI)观察和研究PLC效应, 成功地对变形的全过程进行了直接的观察记录^[9-14], 并对LY10合金材料在室温下的拉伸实验, 根据PLC剪切带在不同应变率下的传播特性, 对剪切带进行了系统的分类^[15]: (1) 当加载应变率大于 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时, 出现连续传播的A型PLC剪切变形带; (2) 当加载应变率小于 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时, 产生在试件表面随机出现的C型PLC剪切变形带; (3) 当加载应变率位于 $3 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 之间时, 出现B型PLC剪切带, 它的特征是在试件表面跳跃式不连续传播. 最近Tong等^[16]运用高速摄影术和图像相关技术测量了PLC剪切带发生前后的全场应变, 提供了直接测量PLC剪切带应变场的另一种有效的方法. 迄今为止, 对一维拉伸实验中PLC剪切带的空域行为研究尚侧重于试件表面面内变形的二维测量, 对与试件表面垂直的空间离面变形未见报道, 对平面内的很多二维空间变形特性(特别是剪切带如何成核演化)亦缺乏了解.

本工作利用高速(1000 Hz)数字摄像系统, 对在试件表面跳跃式不连续传播的B型PLC剪切带的瞬态成核与演化过程进行连续捕捉, 运用数字散斑干涉法得到表现PLC剪切带成核和传播过程中试件面内和离面位移分布的散斑条纹图, 再现B型PLC剪切带的成核和传播过程的三维变形. 根据离面位移结果, 得到相邻发生的跳跃式传播的B类型带之间的跳跃传播间距.

1 实验方法

本工作所用实验材料为铝合金, 规格为A2017(对应国标LY10). 其化学成分(质量分数, %)为: Cu 3.5—

4.5, Fe 0.7, Mn 0.4—1.0, Mg 0.4—0.8, Si 0.2—0.8, Zn 0.25, Ti 0.15, Cr 0.1, 其它 0.05, Al 为基体. 板材的轧制方向与拉伸方向平行. 拉伸试件的实验段长55 mm, 宽20 mm, 厚3 mm. 拉伸前试件作退火再结晶处理, 先加热至500 °C, 保温3 h, 随炉自然冷却至室温. 热处理后晶粒的平均直径为40 μm , 如图1所示.

实验装置如图2所示. 在拉伸实验中, 试件竖直放置, 底部被固定住, 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. 选择高速CCD作为面内位移测量光路的图像记录系统, 采用后触发模式采集图像. 实验中高速CCD以1000 fps(frame per second)的频率向缓存中循环写入数据, 当判断剪切变形在其视场内发生后, 立刻触发记录, 触发点以前两秒时间段内的数字散斑图像被保存下来.

采用以下两套不同的光路系统:

(1) 双光束散斑干涉系统. 采用双光束散斑干涉光路结合高速摄像系统对观察平面内的面内位移进行测量. 试件前面(图2中右侧)一束准直的Nd-YAG激光以角度 θ 入射到试件表面, 试件底部水平放置一平反镜, 使入射激光对称照射在拉伸试件表面形成激光干涉散斑场, 采用高速CCD记录剪切带发生瞬间的系列干涉散斑图, 对采集的干涉散斑图序列进行顺序相减^[14](sequential sub-

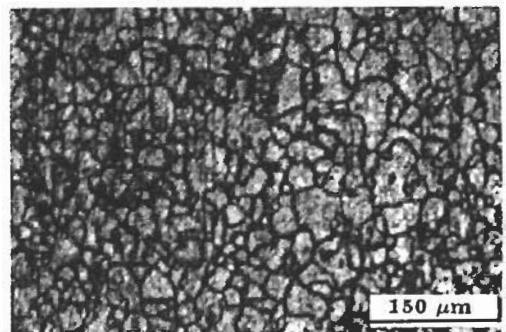


图1 试件微观结构组织形貌

Fig.1 Microstructure of the A2017 Al-Cu alloy plate treated at 500 °C, 3 h, F.C.

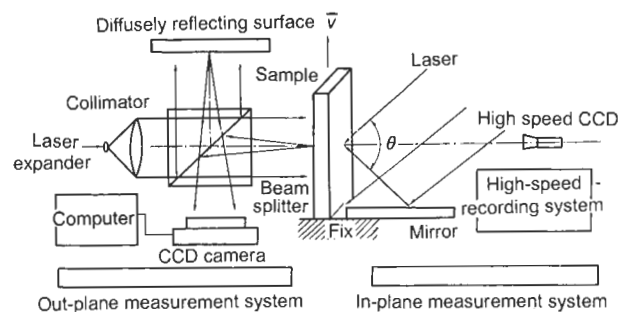


图2 实验装置图

Fig.2 Experiment equipments (left—Michelson interferometer, He-Ne laser; right—two beam speckle interferometer, Nd-YAG laser)

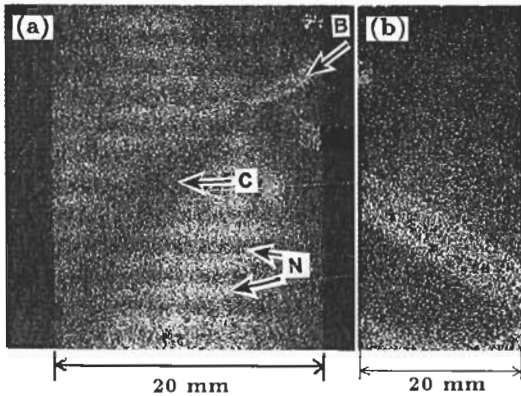


图 3 面内位移分布和离面位移分布的散斑条纹图

Fig.3 Speckle fringe patterns of the alloy A2017 during tensile deformation

- (a) in-plane deformation fringes (B—PLC band, C—correlation fringe, N—noise fringe)
 (b) out-of-plane deformation fringes

tracting), 将选定的参考图之后的干涉散斑图分别与参考图相减处理, 得到试件表面变形过程中沿拉伸方向位移随时间累积演化的条纹图, 如图 3a 所示. 本实验中, Nd-YAG 激光的波长为 532 nm, $\theta \approx 45^\circ$, 条纹灵敏度为 $0.378 \mu\text{m}/\text{fringe}$. 由于实验中激光器模态不稳定, 得到的散斑条纹图呈现出水平方向相互平行、等间距的背景噪声条纹 (见图 3a). 噪声条纹的方向、间距及灰度值稳定不变, 很容易与相关暗条纹区分, 对结果不会产生影响.

(2) Michelson 干涉光路系统. 采用 Michelson 干涉光路对试件的拉伸过程中的离面空间变形进行测量. 试件后面 (图 2 中左侧) 一束准直 He-Ne 激光经过分束镜后分别照在试件表面和漫反射参考面上, 两束反射光经过分束镜汇合形成的激光散斑干涉场用 CCD 摄像机以 30 fps 的频率记录下来. 设定 CCD 摄像机采用后触发模式记录触发点以前 10 s 内的干涉散斑图序列. 运用等间隔相减^[14] (equal subtracting), 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递增演化的条纹图, 如图 3b 所示. 本实验中, He-Ne 激光的波长为 632.8 nm, 条纹灵敏度为 $0.316 \mu\text{m}/\text{fringe}$.

2 实验结果

基于文献 [15] 的实验结果对 3 种类型 PLC 剪切带的划分, 本实验对厚度为 3 mm 的 Al-Cu 合金试件采用恒定名义应变率 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 进行加载, 对产生的 B 类型 PLC 剪切带进行研究.

2.1 高速双光束干涉法研究 B 型 PLC 剪切带的成核及演化过程

B 类型 PLC 剪切带对应的拉伸应力曲线如图 4 所示. 从图 4 中插图可见, B 型剪切带的锯齿过程 (从应

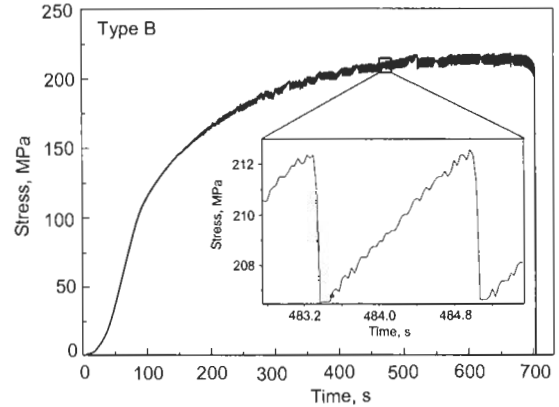


图 4 B 类型 PLC 剪切带对应的应力 - 时间曲线

Fig.4 Stress-time curve corresponding to type-B PLC band in the alloy A2017

力开始上升到跌落) 时间小于 2 s. 对双光束干涉数据进行顺序相减处理时固定应力刚开始上升时刻 t_0 的散斑图作为参考图, 以后的散斑图像分别与参考图进行相减处理, 得到记录沿拉伸轴方向的位移随时间累积演化的条纹图.

双光束激光散斑干涉方法得到的 B 型 PLC 剪切带成核过程的散斑条纹如图 5 所示. 选择 $t_0=483.498 \text{ s}$ 的图像为参考图, 其它时间标定见图 6a. $t_0-t_1(=484.942 \text{ s})$ 时间段内由于面内位移小于条纹的最小分辨率, 无法清晰显示剪切带的传播过程. 在 t_1 时刻 PLC 剪切带在试件左侧形成沿与拉伸轴方向呈 53° 角、长度约为最终长度一半的窄带 (见图 5 中 t_1). 窄带区域以外部分的试件变形仍保持协调统一, 相关条纹可以连续传播通过 PLC 剪切带未成形的区域, 如图 5 中 t_2-t_4 . 随着应力下落, 窄带的前沿开始向试件的另一侧面沿自身长度方向传播并且在传播过程中带内条纹变密集, 带逐渐沿自身宽度方向扩展, 如图 5 中 t_1-t_4 . 从图 5 中的 t_4 可以看到, 带外区域暗条纹从 1 条增加到 4 条, 表明变形越来越剧烈. 窄带的前沿经过 0.142 s 的传播, 在 t_5 时刻已经贯穿试件, 之后剪切带开始沿自身宽度方向急剧膨胀. 由于变形剧烈, 带内条纹密集不可分辨, 表现为一条白带, 雪崩式剪切变形过程在 t_5-t_6 的 0.004 s 内完成 (见图 5 中 t_6). 成核过程中试件表面面内变形示意图如图 6b (图中箭头表示试件表面面内位移方向), 窄带形成后带外部分沿拉伸轴方向的位移分量在带的两侧方向相反, 带内区域的变形在带的前沿传播过程中加剧, 带逐渐变宽. 带的前沿贯穿试件后, 带外上、下两部分开始形成整体相对错开滑动的雪崩式剪切变形.

双光束激光散斑干涉方法是针对观察平面内位移分量进行观察, PLC 剪切带作为发生在三维空间平面的复杂现象, 其在观察平面上必然还具有离面位移分量. 为了对 PLC 剪切带的空间特性进行更加全面地分析, 还

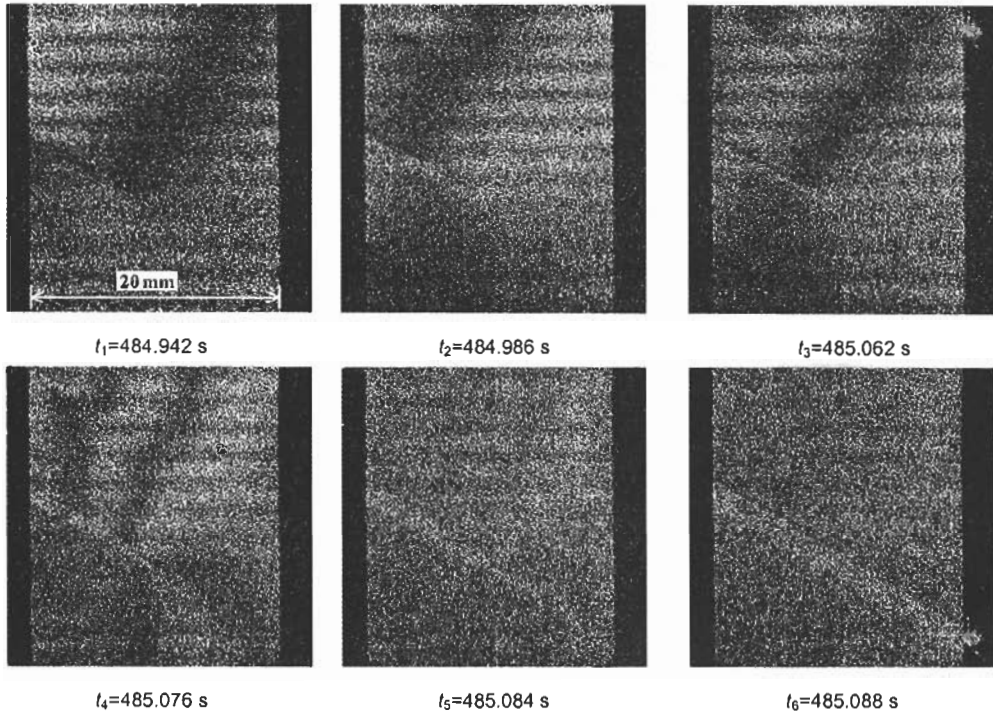


图 5 B 类型 PLC 剪切带成核演化过程条纹图

Fig.5 Speckle fringe patterns of in-plane deformation during tensile test, showing nucleation and development process of type-B PLC band (the positions of t_i in the tensile curve see Fig.6a)
 $(t_0-t_1$: nucleation, PLC band has a 53° angle to the tensile axis and its length is about a half of the end one;
 t_2-t_4 : fringe can propagate through the zone beside PLC band; t_5 : PLC band passed the sample;
 t_5-t_6 : PLC band rapidly widening)

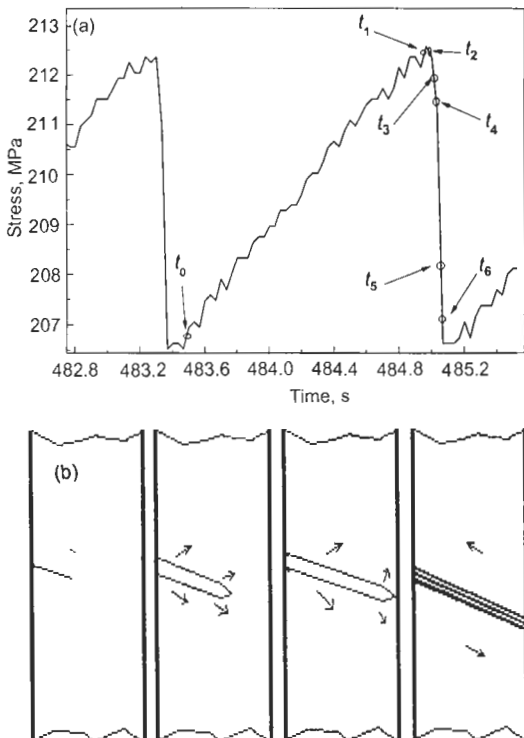


图 6 B 类型 PLC 剪切带应力 - 时间曲线和成核过程示意图
Fig.6 Stress-time curve (a) and scheme of nucleation process (b) of type-B PLC band

需要利用 Michelson 干涉光路对剪切带产生和传播过程中的离面位移进行测量.

2.2 Michelson 干涉光路研究 B 型 PLC 剪切带的成核及传播特性

设定保存数据中第 1 幅图像的时刻为零点, 以 5 幅为相减间隔, 运用等间隔相减方法处理 Michelson 干涉光路数据, 得到 B 类型 PLC 剪切带成核及传播过程中表示离面位移随着时间递增演化的散斑条纹图 (如图 7 所示). 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 7 中 2.16—2.25 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 (相当于图 5 中 t_1-t_6). 沿试件厚度方向的离面剪切变形首先在试件左侧面开始, 然后向试件右侧面逐渐扩展, 贯穿试件后发生剧烈变形, 表现为一条白带. 从图 7 中 2.40 s 时刻的条纹得出: 剪切变形后带外上、下两部分区域之间的离面位移差值大于 $0.632 \mu\text{m}$. 剪切变形结束后, 剪切造成的离面变形没有立即完全消失, 会在原位继续存在并表现为背景中时隐时现的低亮度条纹, 如图 7 中 4.56 s 时刻的条纹图所示. 当下一条带成核时, 新、旧两个变形区域将发生部分重叠.

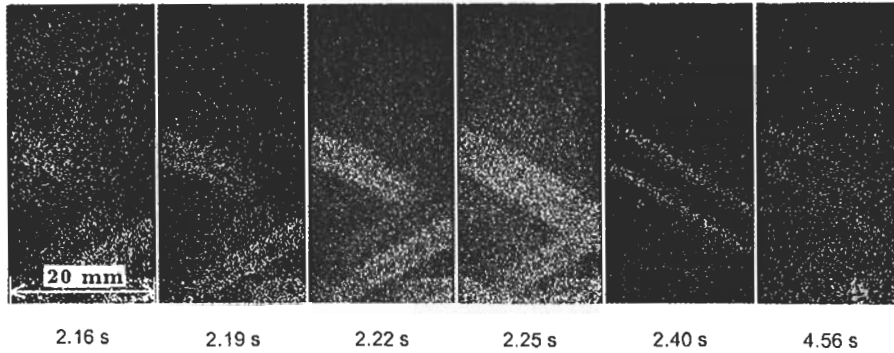


图 7 拉伸实验中离面变形散斑条纹图

Fig.7 Speckle fringe patterns of out-of-plane deformation during tensile test. The time under each pattern indicates the time from the beginning of the recording data
 (2.16—2.22 s: the out-of-plane deformation initiated on the left edge of the sample and propagated through the zone beside PLC band;
 2.22—2.25 s: PLC band rapidly widening;
 2.40 s: the fringes show that the out-of-plane deformation in PLC band is more than $0.632 \mu\text{m}$;
 4.56 s: the fringe will remain on the surface until next band happened)

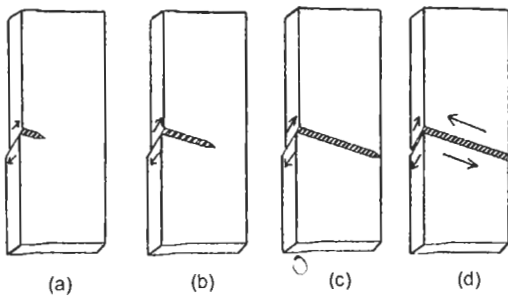


图 8 B 类型 PLC 剪切带三维变形过程示意图

Fig.8 Scheme of 3D deformation process of type-B PLC band
 (a) PLC band nucleated at the left edge of the specimen
 (b) nucleus grew along the length direction of itself
 (c) band ran through the specimen in transverse direction
 (d) avalanche shearing deformation happened along the PLC band

结合图 5 和图 7 中的面内和离面位移分布, 得到 B 型 PLC 剪切带成核过程的三维变形过程示意图 (如图 8 所示, 图中箭头标示位移方向). 由于加工造成的缺陷导致试件侧面产生应力集中, 使得空间剪切面内位于试件侧面的部分位错首先克服障碍开动, 沿着试件厚度方向发生剪切塑性变形, 剪切带开始成核 (如图 8a 所示). 剪切面内其它部分的位错仍然被障碍所阻拦, 限制了成核区域剪切塑性变形幅度. 随着应力上升, 剪切变形沿着剪切面向试件另一侧扩展最终贯穿试件横向 (如图 8b, c 所示). 此后, 剪切面内的剪切变形不再受到外部限制, 整体发生剧烈塑性变形, 导致雪崩式剪切变形发生和应力下落直到位错再次被障碍阻拦 (如图 8d 所示).

3 讨论

(1) 文献 [17] 采用双光束方法观测 B 类型 PLC 剪切带的传播规律为: B 类型带是试件的某一局部区域发生剪切变形以后, 间断地过渡到相邻区域. 由于雪崩式剪切变形后, 面内位移条纹很快消失, 无法建立起前、后发生的两条带之间的直接联系, 对带的跳跃间隔也很难作出准确的定量描述. 本工作 Michelson 干涉光路结果中, 前一条剪切带造成的离面变形不会立即完全消失, 其残余变形会在原位置存在并表现为背景中时隐时现的低亮度条纹, 如图 7 中 4.56 s 时刻的条纹所示. 当下一条带成核时, 新、旧两个变形区域发生部分重叠, 可以准确建立相邻发生的两条剪切带的位置关联. 提取相邻发生的 3 条剪切带各自成核和雪崩式剪切变形完成后的 2 幅数据图像 (水平位置严格对应) 组成图 9. 作 2.25 和 5.40 s 时刻的条纹图中剪切带沿传播方向前沿的平行线, 准确对应到 5.31 和 8.22 s 时刻的条纹图像中, 如图 9 所示. 可以看出, 沿剪切带的传播方向, 在 5.31 和 8.22 s 时刻成核的剪切带的成核位置分别位于在 2.25 和 5.40 s 时刻发生的前一条剪切带的前沿. 文献 [16] 中结果显示 B 类型带的空间分布沿拉伸轴方向具有对称性, 因此可以得出, 在本次实验中相邻发生的两条剪切带的中心线间距为带宽的一半.

(2) 从图 7 中 2.16—2.25 s 时间段内的条纹图可以看到, 视场中同时存在多条处于成核状态中的剪切带互相竞争. 最后视场中只有一条剪切带首先贯穿试件横向, 使得其它剪切带无法继续发展. 出现这种多条带竞争成核, 最终一条剪切带贯穿试件的情况可能是由于其所处的空间剪切平面中阻碍可动位错的障碍 (如析出物、林位错等) 较其它带所处的平面少, 剪切塑性变形在此空间平面内可以更快进行, 使得它的横向贯穿时间小于其它剪切带. 在

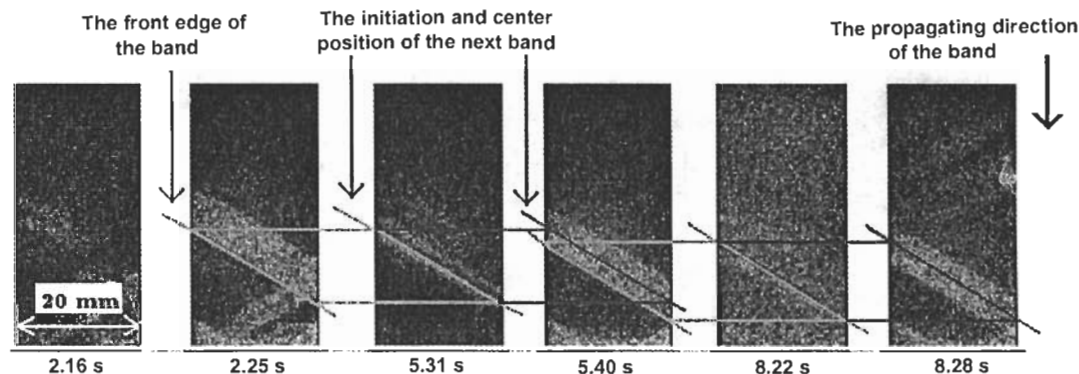


图9 相邻发生的 PLC 剪切带间的成核位置图

Fig.9 Relationship to the nucleation positions of three following PLC bands

横向贯穿试件后引起雪崩式剪切变形导致带外部分应力松弛,使得其它剪切带无法继续演化。

4 结论

对恒定加载应变率下 Al-Cu 合金中产生的 B 类型 PLC 剪切带的瞬态成核与演化过程进行连续捕捉,运用数字散斑干涉法再现了 B 型 PLC 剪切带成核和传播过程的三维变形。

(1) 实验结果显示 B 型 PLC 剪切带的一种演化形式,即剪切带首先在试件的一侧成核产生并沿厚度方向发生剪切变形,在观察平面上形成沿与拉伸轴方向呈 53° 角的窄带。随着应力下落,带的前沿开始向试件的另一侧面沿自身长度方向传播,在传播过程中带逐渐沿自身宽度方向膨胀。带的前沿贯穿试件后,带开始高速膨胀,导致雪崩式剪切变形发生。

(2) 根据剪切带传播过程三维变形数据,得出相邻发生的 B 型带之间的跳跃传播间距,即沿带的传播方向,后一条剪切带产生在前一条剪切带的前沿,相邻两条带的中心线间隔为带宽的一半。

参考文献

- [1] Potevin A, Le Chatelier F. *Compt Rend Acad Sci Paris*, 1923; 176: 507
- [2] Cottrell A H. *Dislocation and Plastic Flow in Crystals*. London: Oxford University Press, 1953
- [3] Lebyodkin M, Dunin-Barkowskii L, Brechet Y. *Acta Mater*, 2004; 8: 2529
- [4] Pink E, Weinhandl H. *Scr Mater*, 1998; 29: 1309
- [5] Tian B H, Zhang Y G, Chen C Q. *Acta Metall Sin*, 1996; 32: 249
(田宝辉, 张永刚, 陈昌麒. 金属学报, 1996; 32: 249)
- [6] Tian B H, Li H X, Zhang Y G, Chen C Q. *Acta Metall Sin*, 1998; 34: 603
(田宝辉, 李焕喜, 张永刚, 陈昌麒. 金属学报, 1998; 34: 603)
- [7] Chihab K, Estrin Y, Kubin L P. *Scr Metall*, 1987; 21: 203
- [8] Haehner P, Ziegenbein A, Rizzi E. *Phys Rev*, 2002; 65B: 134109
- [9] Wu X P, He S P, Li Z C. *Acta Phys Sin*, 1983; 32(8): 1
(伍小平, 何世平, 李志超. 物理学报, 1983; 32(8): 1)
- [10] Jiang H F, Zhang Q C, Xu Y H, Wu X P. *Acta Phys Sin*, 2006; 55: 409
(江慧丰, 张青川, 徐毅豪, 伍小平. 物理学报, 2006; 55: 409)
- [11] Zhang Q C, Toyooka S, Wu X P. *Proc SPIE*, 2002; 4537: 69
- [12] Jiang Z Y, Zhang Q C, Wu X P. *J Exp Mech*, 2003; 18: 289
(蒋震宇, 张青川, 伍小平. 实验力学, 2003; 18: 289)
- [13] Jiang Z Y, Zhang Q C, Jiang H F. *Mater Sci Eng*, 2005; A403: 154
- [14] Zhang Q C, Zhen Y J, Jiang H F. *Int J Plast*, 2005; 21: 2150
- [15] Jiang H F, Zhang Q C, Zhen Y J. *Chin Phys Lett*, 2005; 22(1): 99
- [16] Tong W, Tao H, Zhang N. *Scr Mater*, 2005; 53: 87
- [17] Jiang H F, Zhang Q C, Jiang Z Y, Wu X P. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 727
(江慧丰, 张青川, 蒋震宇, 伍小平. 金属学报, 2005; 41: 727)