

红外测温法研究 Al-Mg 合金中的 Portevin-Le Chatelier 效应*

曹鹏涛 张青川† 肖 锐 熊少敏

(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)

(2008 年 12 月 3 日收到,2008 年 12 月 24 日收到修改稿)

试件塑性变形过程伴随着机械能向热能的转化.利用红外测温法,通过分析红外热像仪采集的温度场图像,系统研究了 Al-Mg 合金中的 Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应.在不同应变率下,实验得到了三类锯齿形应力-应变曲线,分析了相应情况下试件温度变化曲线的异同及其原因,探讨了三种类型 PLC 变形带的空间传播特性.研究发现,试件表面的温升随着应变率的增加而增加,PLC 带的倾角转向发生在试件的两端或者带外的温度最高处.

关键词:Portevin-Le Chatelier 效应,红外测温,Al-Mg 合金

PACC:6220F,8170G

1. 引 言

在一定的温度、应变率或适当的预变形下,多种合金材料在拉伸实验中会出现特殊的塑性失稳现象,其表现为时域上的锯齿形应力流动和空域上的应变局域化,这种现象被称为 Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应^[1-3].

对产生该现象的理论解释,目前被广泛接受的是由 Cottrell 提出的“动态应变时效”(dynamic strain aging, DSA)理论,即可动位错与溶质原子之间的动态相互作用^[4].关于 DSA 的具体微观机制还存在争论^[5,6].基于各自的解释,一些经典的模型建立起来.比如考虑可动位错和邻位错密度动态演化过程的 Kubin-Estrin 模型^[7]、考虑三种类型位错(可动位错、不可动位错、钉扎有 Cottrell 气团的位错)相互转化过程的 Ananthakrishna 模型^[8]和考虑位错周围溶质原子浓度动态变化过程的 McCormick 模型^[9].以这些模型为基础,学者们进行了大量的数值模拟工作^[10-14].

对 PLC 效应的实验研究早期主要集中在其时域行为,即对应力-应变曲线的观察和特征量(比如

应力跌落幅值、等待时间、飞行时间等)的统计分析上^[15,16].随着实验技术的进步,关于 PLC 效应的空域行为的研究也逐渐开展开来. PLC 效应空域上的应变局域化现象通常以变形带的方式出现,根据 PLC 变形带的不同空间传播特性,可以将 PLC 效应分为三类^[17]:沿着试件表面连续传播的 A 类型带、沿着试件表面间断跳动传播的 B 类型带和在试件表面随机形成的 C 类型带.为了研究 PLC 变形带的空间特性,人们采用了各种观测方法,如阴影法^[18]、声发射法^[19]、激光引伸计法^[20]和数字散斑法^[21]等.相比其他方法,数字散斑法可以保持在较高精度下实时观察 PLC 带的反复传播.本课题组提出并运用这一方法观察到了与锯齿形应力流动相对应的 PLC 变形带的成核、空间演化等结果^[22-26].近年来,随着红外热成像技术在商业上的普及,红外测温法也被应用到对 PLC 效应空域行为的研究中^[27,28].它是通过测量试件表面温度场来分析 PLC 变形带的演化过程.试件在发生塑性变形时,由于位错的运动引起机械能向热能的转化,试件表面温度的变化表征着试件内部位错运动的剧烈程度.由于此法可能建立起宏观温度场与微观位错密度及其运动的联系,所以受到研究者的重视.最近 Ranc 等使用此法对

* 国家自然科学基金(批准号:10732080,10872189)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

Al-4%Cu 和 Al-3.2%Mg 合金中的 PLC 带进行了研究^[29,30],观察到伴随 A、B 两种类型带的产生试件表面温度场将呈现不同的分布.之前的应变场测量是瞬时状态的测量,而温度场有时间上的延续过程,前一刻的温度场分布可能影响后续剪切带的发生、演化和传播.这一特点是红外测温法所独有的,然而目前尚无这方面的研究.本文的工作由此展开,采用红外测温法系统地研究了 Al-Mg 合金中的三类 PLC 效应.针对不同应变率下 PLC 效应的时域空域对应关系、温升的变化规律以及 PLC 带传播过程中的倾角转向现象进行了深入的讨论.

2. 实验方法

实验材料是国标为 LF2 的 Al-Mg 合金,其具体的化学成分为(wt%):Mg 2—2.8,Fe 0.4,Si 0.4,Mn 0.15—0.4,Ti 0.15,Cu 0.1,Al 为基体.加工之后的拉伸试件实验段长为 55 mm,宽为 20 mm,厚为 2 mm,拉伸方向与材料压延方向一致.实验前,试件经过退火重结晶处理.退火的热处理工艺规范为试件从室温经过 50 min 加热到 400℃,保温 3 h,然后随炉冷却至室温.为了便于红外测量,试件表面喷了一层黑漆以增强红外辐射.

实验是在室温下(28.5℃)进行的,拉伸速率从 3 mm/min 到 60 mm/min,对应的名义应变率为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 至 $1.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.在拉伸过程中,拉伸机记录下了力信号和位移信号,其中力传感器的采样频率为 100 Hz.红外热像仪全程采集了试件表面温度场变化图像.仪器参数如下:温度分辨率为 0.08℃,图像采样率为 25 Hz,即相邻两幅图的间隔为 0.04 s.采集图像尺寸(像素数)为 320×240 .在实验采用的光路条件下,每个像素对应的实际物理尺寸为 0.64 mm.

3. 结果与讨论

在实验选取的拉伸速率范围内,三种类型的 PLC 效应将会依次出现.这里选取三个典型的应变率来分析,分别是 $1.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (对应 A 类型,拉伸时间为 20 s)、 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (对应 B 类型,拉伸时间为 82 s)和 $9.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (对应 C 类型,拉伸时间为 434 s).

红外热像仪采集的温度图像实时记录了 PLC

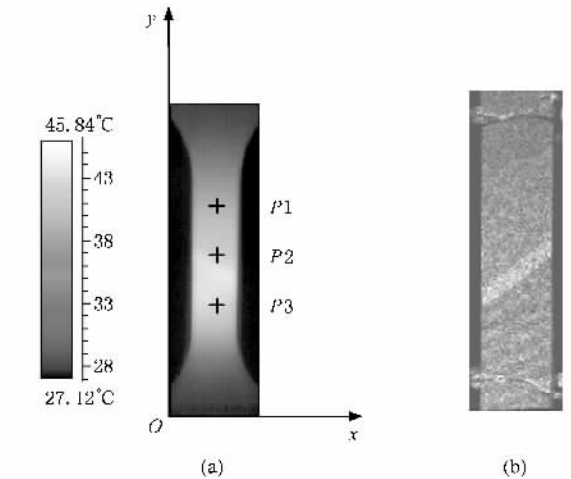


图 1 红外热像仪采集的温度图像与数字散斑干涉法采集的变形带相关条纹图的比较 (a)温度图像,显示的是倾角为“\”方向的带 (b)条纹图,显示的是倾角为“/”方向的带

带的空间传播行为.图 1(a)中坐标系里的图即为实验采集到的某一时刻试件表面温度图像,结合左边的温标可以看出,试件下部温度比上部高,这显示出变形带正自下而上地扫过试件,试件中部最亮的区域即为变形带的前沿.与图 1(b)中本课题组使用数字散斑干涉法采集的变形带相关条纹图相比,红外热像仪采集的温度图像不仅记录了此刻带的位置,而且显示出了此前带的传播对试件表面温度造成的影响.变形带与拉伸轴线的夹角称为带的倾角,图 1 显示了两种不同倾角的变形带.如图 1(a)建立坐标系,结合试件上选取的标记点(P_1, P_2, P_3 ,其间距为 20 mm)和每幅温度图像对应的温标,可以确定三种类型带的空间传播轨迹以及温度演化过程.

图 2 给出了分别对应 A、B 和 C 三种类型的应力-应变曲线与 PLC 带的位置的全程与局部对照图.图中实心点与空心点分别表示倾角相反的两种变形带.从图 2(a)(c)(e)中可以看出,随着应变的增加,三种类型应力-应变曲线的“锯齿形”应力跌落的幅度均逐渐增大.A 类型应力锯齿较为稀疏,跌落幅度较小,C 类型应力锯齿分布密集,跌落幅度较大.B 类型介于两者之间.从空间传播轨迹看,如图 2(a)所示,A 类型带连续地从试件的一端传向另一端,或者从试件中间的一处产生向两端传播,在变形的后期,变形带与拉伸轴线的夹角将会发生对称地迁移,也就是带的倾角发生转向.B 类型带可在试件中间的多处产生向两端跳跃传播,如图 2(c)所示,在变形的后期也会发生带的倾角转向.图 2(e)所示的 C 类型带

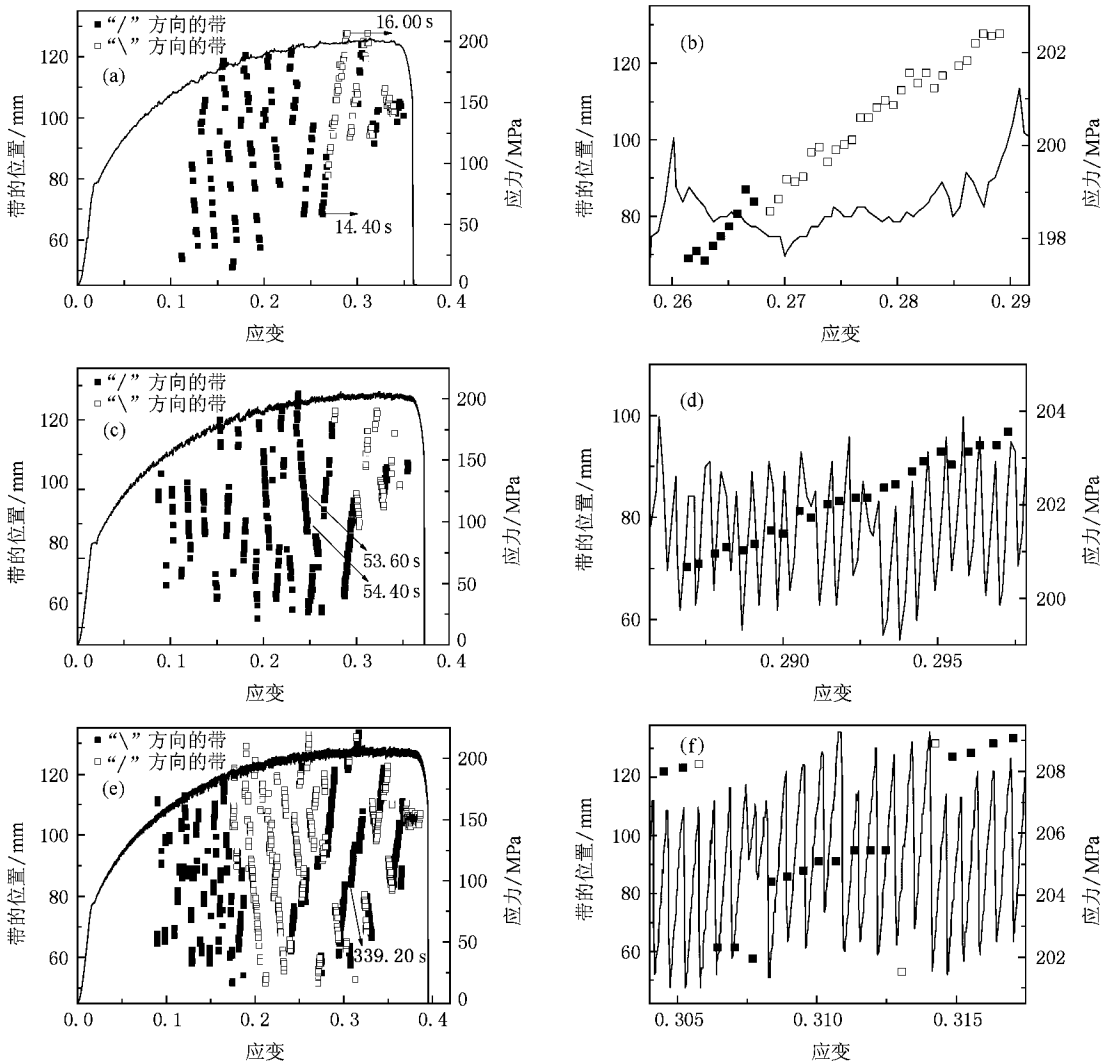


图2 三类 PLC 效应的应力-应变曲线及对应的带的位置 图中实心点与空心点分别表示倾角相反的两种变形带。(a) A 带, 应变率为 $1.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c) B 带, 应变率为 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (e) C 带, 应变率为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (b) (d) 和 (f) 分别是局部放大图

则是随机地在试件的表面形成, 带的倾角转向也随机地分布于整个变形过程中. 将 PLC 效应发生时的应力跌落和带的传播相对应可以发现 A 类型 PLC 效应发生时每两个大的“锯齿形”应力跌落之间包含一次完整的 A 类型带传播过程, 如图 2(b) 所示. 新的变形带的产生在宏观应力曲线上对应一个大的“锯齿形”应力跌落. 在变形带随后的连续传播过程中, 应力曲线上则呈现出微弱的波动, 直至本次传播结束. 而对于跳跃传播的 B 类型带和随机出现的 C 类型带, 由于每次带的出现都可以看成是一个全新带的形成, 从而在应力曲线上对应出现均匀的幅值较大的“锯齿形”应力跌落, 如图 2(d) 和 (f) 所示.

为分析试件在拉伸过程中温度变化趋势, 从所拍摄的系列红外热像中提取试件上的三个标记点 (如图 1(a) 所示) 的温度信息, 得到图 3 中的温度-应

变曲线. 从图 3 中可以看出, 在变形初期试件温度有所下降, 降温幅度约为 0.3°C , 对比应力曲线可以发现, 这一降温过程正好对应试件的弹性段. 这一结果在文献 [27] 中也有报道. 这是由固体材料的热弹性效应引起的 [31]. 经过降温段后, 变形进入塑性阶段, 试件温度逐渐升高. 如图 3(a) 所示, A 类型 PLC 效应温升很快, 最大温升达到了 17.44°C . 各标记点温度呈台阶状上升. 最后试件断裂时, P1 和 P2 两点温度急剧上升, 这是由于该试件断裂前变形带在位于这两点间的断裂处反复出现. 从图 3(b) 可以看出, B 类型 PLC 效应温升幅度稍低, 最大温升约为 10.2°C . 各标记点温度的上升趋势先是呈台阶状, 接着呈锯齿状. C 类型 PLC 效应温升幅度很低, 最大温升只有约 4.36°C , 如图 3(c) 所示. 其各标记点温度呈锯齿状上升. 试件表面温度的变化由热产生 (即机

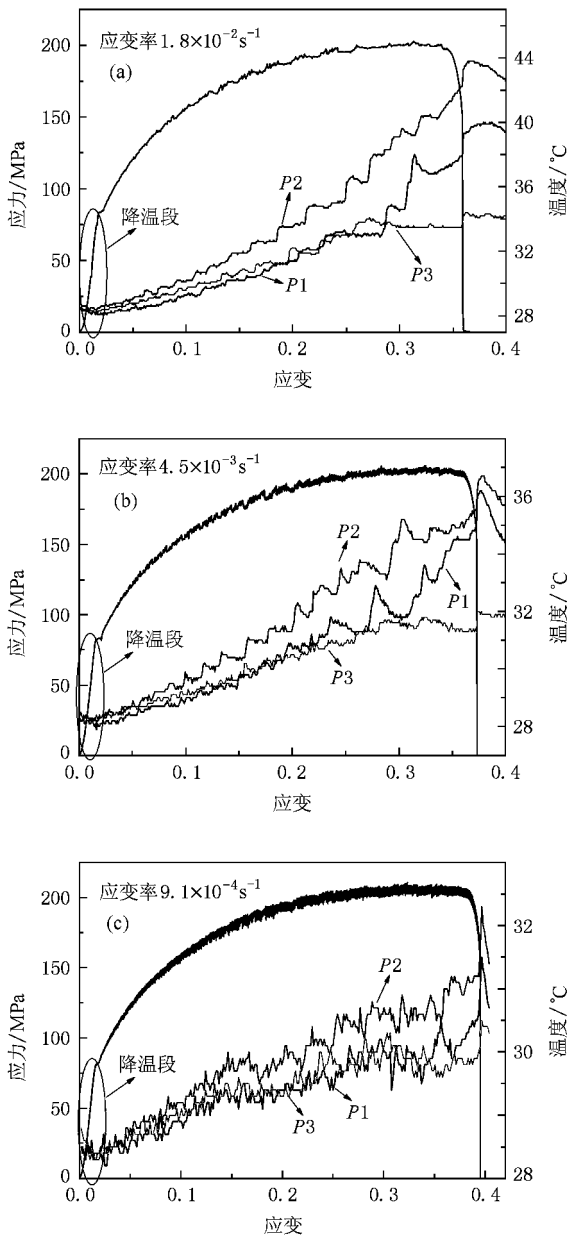


图3 三类 PLC 效应中试件上三个标记点的温度变化曲线 图中标出了降温段

械能转化为热能)和热耗散共同决定.变形带内的温度较高,当它经过标记点时,标记点温度将会产生一个阶跃,然后热量开始向变形带的两边扩散和通过试件表面向空中辐射.当带的传播速率较快时,这种热耗散的影响很小,标记点的温升就会呈台阶状;当带的传播速率较慢或者带随机出现时,热耗散将会造成标记点温度在带经过间隙有所降低,温升曲线就会表现为锯齿状.所以标记点温度变化趋势将会随着变形带传播速率的改变而改变.由于相同应变下 A 类型带的传播速率比 B 类型带的传播速率大,

且二者传播速率都随着应变的增加而减小^[29],故这一趋势改变在 B 类型 PLC 效应的中期表现较为明显,即在 A 类型 PLC 效应全段和 B 类型 PLC 效应的前期标记点温度变化趋势近似呈台阶状,而在 B 类型 PLC 效应的后期和 C 类型 PLC 效应全段近似呈锯齿状.

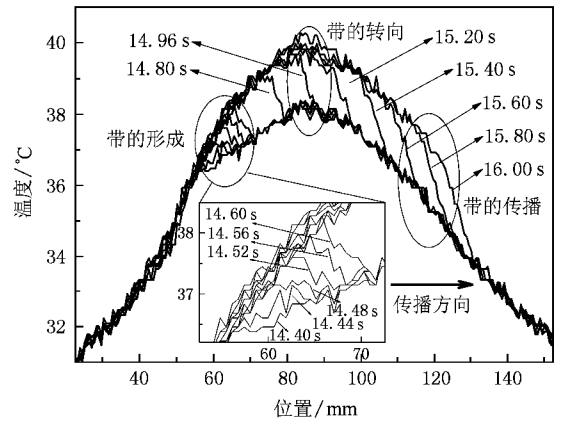


图4 A 类型带发生时试件沿拉伸轴方向温度分布随时间的演化 图中放大部分为带的形成过程.应变率为 $1.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

从所拍摄的系列红外热像中,提取试件拉伸轴方向中心线上不同时刻的温度数据,由此来探究三种带的传播特征.图4为采集的 A 类型带温度图像序列的轴向温度分布,完整地展示了一条变形带从试件一端产生连续传播到另一端的过程,其中还有带的倾角转向现象,对应图 2(a)所标示的区间.为了更清晰地展示这一过程, A 类型带的形成、倾角转向与传播这三种行为的温升演化和对应的温度图像被标示在图 5 中.从图 5(a)可以看出,在 14.40—14.48 s 之间,试件端部的温升急剧增加,而升温区宽度几乎不变,这对应着 A 类型带的形成过程,时间为 0.08 s,此后变形带开始沿着试件向前传播.图 5(b)中的温度图像对应这一过程.带在 14.96 s 发生倾角转向,这在图 5(d)中可以清晰地观察到,然而从图 5(c)的温升演化中却分辨不出这种差别.考察如图 4 所示的整个传播过程,可以发现发生倾角转向的位置正是试件上带外的温度峰值处.当带传过温度峰值处后,继续近似匀速向前传播,如图 5(f)所示.从图 5(e)中可以估算出此时 A 类型带的传播速率约为 43.16 mm/s.图 6 为 B 类型带的温升演化,对应图 2(c)中的标示区间,可以看出单位时间内带的步进距离没有 A 类型带均匀,此时其等效传播速率约为 10.84 mm/s. C 类型带不再传播,图 7 显示了一

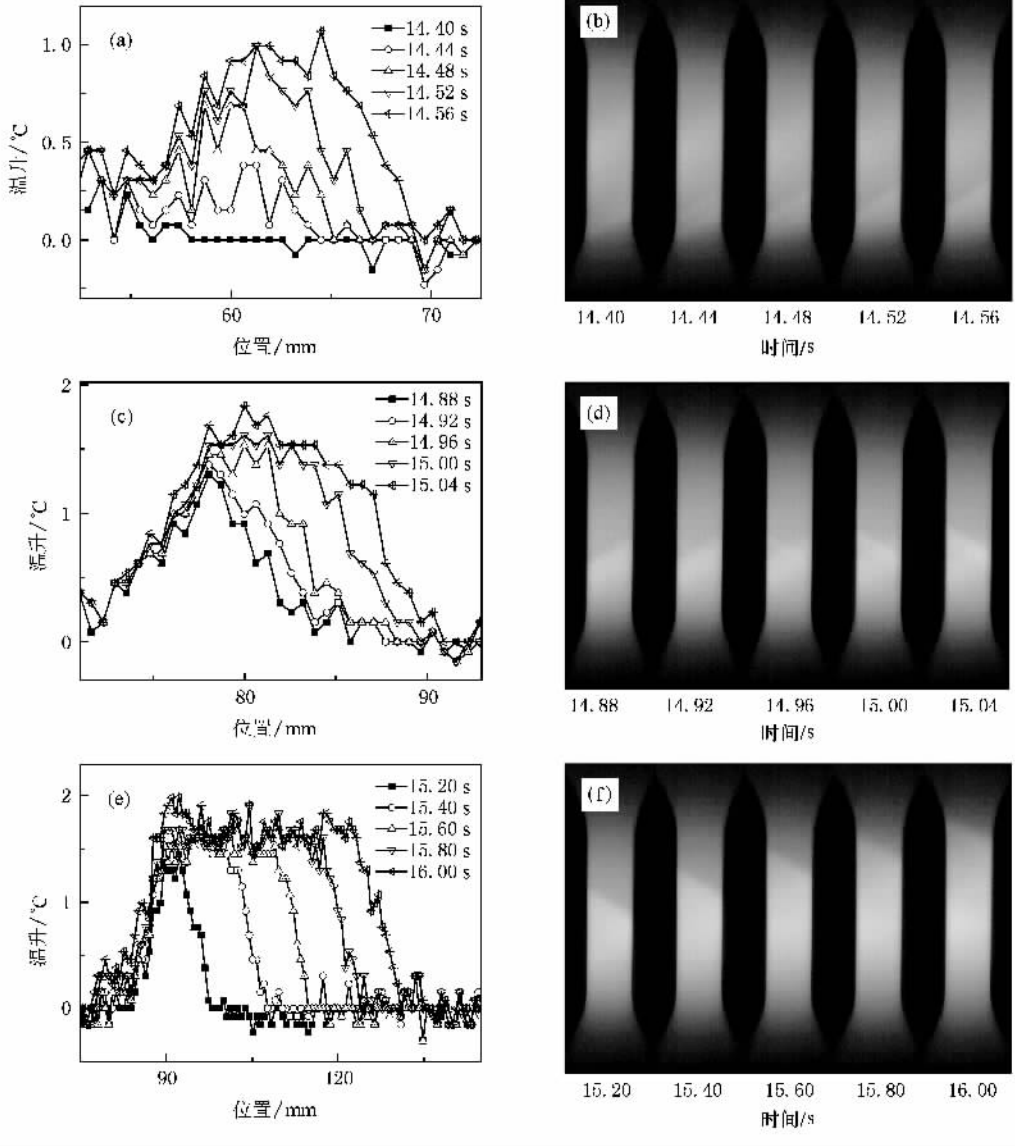


图5 A 类型带的形成、倾角转向与传播三种过程的温升演化及对应的温芳图像 (a)形成过程 (c)倾角转向过程 (e)传播过程 (b)(d)和(f)分别是对应的温度图像

条 C 类型带从产生到消逝的过程。由图可知,在 0.04 s 内(339.16—339.20 s)带已形成,其后热量向两方扩散,带内温度逐渐降低,直至趋于试件的平均温度。

关于带的倾角转向机制,我们认为是试件为了克服剪切变形时产生的倾斜、保持自身平衡而产生的,然而这种倾角转向究竟会发生在试件上何处,本文的研究给出了答案。从图 1 带的空间分布图可以看出,带的倾角转向除了发生在试件的两端(见图 2 (e)),更多的时候是发生在试件的中间某处(见图 2 (a)和(c))。通过以上对 A 类型带的分析可以发现,后一种情况将发生于试件上带外的温度最高处。由

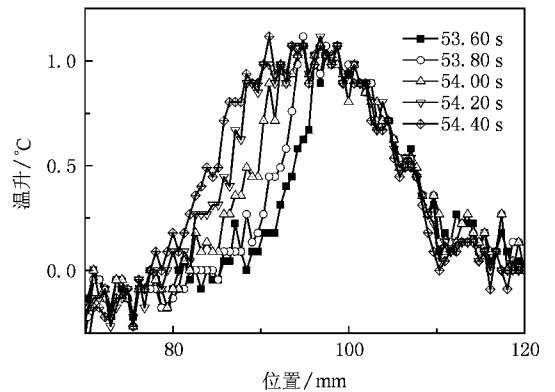


图6 B 类型带的传播过程 应变率为 $4.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

于试件端部应力集中较为明显,带在两端发生倾角转向易于理解.对于后一种情况,由于初始状态不尽相同,试件内部位错分布并不均匀,而发生塑性变形时试件中局域温度的升高是由于位错的运动引起的局域应变率突增造成的^[32].在位错分布较为密集的地方,位错运动较为剧烈,局域应变率突增较大,从

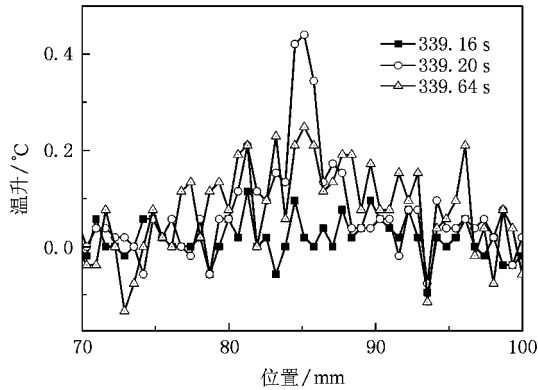


图7 C类型带的形成过程 应变率为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

而局域温度升高较快.在变形带每次完整传过试件之后,试件表面温度场的峰值将对应此时试件局域位错密度最大的地方.当大规模的位错聚集形成的变形带再次经过此处时,受较大的局域位错密度的影响,带内位错形态较易发生重新排布.宏观上的表现就是带的倾角发生转向.

4. 结 论

本文使用红外测温方法研究了国标为 LF2 的 Al-Mg 合金的 PLC 效应.实验得到了三种类型的应力应变曲线,分析了对应的三种 PLC 带的空间传播特征.实验发现,由于热弹性效应,在变形初期试件会有一个 0.3°C 的降温.随着应变率的增加,试件表面的温升会逐渐增加,其变化趋势也由锯齿状转化为台阶状.带的倾角转向在 A、B 和 C 三种类型带中都有发生,由于局域位错密度不均匀性的影响,这种倾角转向或者发生在试件两端,或者发生在试件上带外的温度峰值处.

- [1] Portevin A, Le Chatelier F 1923 *Comp. Rend Acad Sci. Paris* **176** 507
- [2] Munz D, Macherauch E 1966 *Z. Metallkd* **57** 552
- [3] Mulford R A, Kocks U F 1979 *Acta Metall.* **27** 1125
- [4] Cottrell A H 1953 *Dislocations and Plastic Flow in Crystals* (London: Oxford University Press)
- [5] McCormick P G 1972 *Acta Metall.* **20** 351
- [6] Picu R C 2004 *Acta Mater.* **52** 3447
- [7] Estrin Y, Kubin L P 1986 *Acta Metall.* **34** 2455
- [8] Ananthakrishna G, Sahoo D 1981 *J. Phys. D* **14** 2081
- [9] McCormick P G 1988 *Acta Metall.* **36** 3061
- [10] Lebyodkin M, Brechet Y, Estrin Y, Kubin L P 1996 *Acta Mater.* **44** 4531
- [11] Hahner P, Ziegenbein A, Rizzi E, Neuhauser H 2002 *Phys. Rev. B* **65** 134109
- [12] Chen Z J, Zhang Q C, Jiang Z Y, Jiang H F, Wu X P 2004 *J. Mater. Sci. Technol.* **20** 535
- [13] Jiang H F, Zhang Q C, Chen X D, Chen Z J, Jiang Z Y, Wu X P, Fan J H 2007 *Acta Mater.* **55** 2219
- [14] Jiang H F, Zhang Q C, Chen X D, Fan Z C, Chen Z J, Wu X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3388 (in Chinese) [江慧丰、张青川、陈学东、范志超、陈忠家、伍小平 2007 物理学报 **56** 3388]
- [15] Lebyodkin M, Dunin-Barkowskii L, Brechet Y, Estrin Y, Kubin L 2000 *Acta Mater.* **48** 2529
- [16] Pink E, Weinhandl H 1998 *Scripta Mater.* **39** 1309
- [17] Pink E, Grinberg A 1981 *Mater. Sci. Eng.* **51** 1
- [18] Chihab K, Estrin Y, Kubin L P 1987 *Scripta Metall.* **21** 203
- [19] Caceres C H, Rodriguez A H 1987 *Acta Metall.* **35** 2851
- [20] Ziegenbein A, Hahner P, Neuhauser H 2000 *Comput. Mater. Sci.* **19** 27
- [21] Zhang Q C, Toyooka S, Meng Z B 1999 *Proc. SPIE* **3585** 389
- [22] Zhang Q C, Jiang Z Y, Jiang H F, Chen Z J, Wu X P 2005 *Inter. J. Plast.* **21** 2150
- [23] Jiang H F, Zhang Q C, Jiang Z Y, Chen Z J, Wu X P 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 99
- [24] 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]
- [25] Xiang G F, Zhang Q C, Liu H W, Jiang H F, Wu X P 2006 *Chin. Phys. B* **15** 2378
- [26] Xiang G F, Zhang Q C, Liu H W, Wu X P 2007 *Scripta Metall.* **56** 721
- [27] Ranc N, Wagner D 2005 *Mater. Sci. Eng. A* **394** 87
- [28] Louche H, Vacher P, Arrieux R 2005 *Mater. Sci. Eng. A* **404** 188
- [29] Ranc N, Wagner D 2008 *Mater. Sci. Eng. A* **474** 188
- [30] Ait-Amokhtar H, Fressengeas C, Boudrahem S 2008 *Mater. Sci. Eng. A* **488** 540
- [31] Thomson W 1853 *Trans. Roy. Soc.* **20** 261
- [32] Taylor G I, Quiney H 1934 *Proc. Roy. Soc.* **143** 307

The Portevin-Le Chatelier effect in Al-Mg alloy investigated by infrared pyrometry^{*}

Cao Peng-Tao Zhang Qing-Chuan[†] Xiao Rui Xiong Shao-Min

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

(Received 3 December 2008 ; revised manuscript received 24 December 2008)

Abstract

Plastic deformation is accompanied by the conversion of mechanical energy into heat. The deformation heterogeneity related to the Portevin-Le Chatelier effect (PLC) in Al-Mg alloy during a tensile test at ambient temperature is investigated through temperature field measurement by infrared pyrometry. Under different applied strain rates , three types of stress-strain curves (types A—C) are obtained respectively. Correspondingly , the similarities and differences of temperature-strain curves are compared and interpreted qualitatively. And the spatial propagating characteristics of the three types of PLC deformation bands are observed and analyzed. The temperature rise on the surface of the specimen increases with the increase of strain rate. And the obliquity of PLC band changes either at the ends of the specimen or at the highest temperature area outside the band.

Keywords : Portevin-Le Chatelier effect , infrared pyrometry , Al-Mg alloy

PACC : 6220F , 8170G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10732080 , 10872189).

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