

基于数字图像相关法的 Mg 含量对 Al 合金 Portevin-Le Chatelier 效应影响的实验研究

杨素丽 符师桦 蔡玉龙 张迪 张青川

Experimental investigation on the influence of Mg content on Portevin-Le Chatelier effect in Al-based alloys by using digital image correlation

Yang Su-Li Fu Shi-Hua Cai Yu-Long Zhang Di Zhang Qing-Chuan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 086201 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.086201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.086201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

物理学报.2014, 63(6): 066201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.066201>

多晶银纳米线拉伸变形的分子动力学模拟研究

Molecular dynamics simulation of polycrystal silver nanowires under tensile deformation

物理学报.2014, 63(1): 016201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.016201>

时效时间对 FeNiAlTa 形状记忆合金组织结构和性能的影响

Influence of aging time on mechanical properties and microstructures of FeNiAlTa shape memory alloy

物理学报.2013, 62(15): 158106 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.158106>

基于数字图像相关法的Mg含量对Al合金 Portevin-Le Chatelier效应影响的实验研究*

杨素丽¹⁾ 符师桦^{1)†} 蔡玉龙¹⁾ 张迪²⁾ 张青川^{1)‡}

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

2) (北京科技大学, 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

(2016年12月5日收到; 2017年1月17日收到修改稿)

利用数字图像相关法研究了常温与恒定应变率 ($5.00 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 下 Mg 含量 (质量分数) 分别为 2.30%, 4.57%, 6.10% 及 6.91% 四种 Al-Mg 合金 Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应的宏观变形行为. 实验发现, Mg 含量的增加导致强化效果的增强; 低 Mg 含量 (2.30%) 合金中锯齿跌落幅值基本保持不变, 而在高 Mg 含量 (4.57%, 6.10%, 6.91%) 合金中随应变增加而增加. 锯齿跌落幅值随 Mg 含量增加而逐渐增大, 在高 Mg 含量合金中趋于饱和. 宏观局域变形带的观察结果表明 PLC 带宽不随 Mg 含量或者应变改变而变化, 带内变形量随着 Mg 含量或者应变的增加而逐渐增大. 此外, 在低 Mg 含量合金的加载曲线后段 (应变约为 0.3 时) 观测到了特殊的周期性的衰减锯齿, 相应的时域 PLC 带演化表明加载曲线的周期性转变大锯齿对应着空间上 PLC 带的转向, 幅度逐渐减小的振荡对应着 PLC 带的传播, 且在转向前后 PLC 带均向上连续传播.

关键词: Portevin-Le Chatelier 效应, 数字图像相关法, Mg 含量, 动态应变时效

PACS: 62.20.F-, 81.40.Cd

DOI: 10.7498/aps.66.086201

1 引言

Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应是铝合金^[1-3]、钢^[4,5]以及镍基高温合金等^[6,7]合金材料在一定温度或加载应变率下出现的一种塑性失稳现象. 它在时域上表现为应力-时间曲线的锯齿形和空域上的局部应变-时间曲线的阶梯状现象, 同时会在试件表面形成局域变形带, 称为 PLC 带^[8,9]. 根据锯齿形状的不同, 一般将锯齿类型划分为三类^[10-12]: A 类锯齿位于应力曲线包络上方且应力跌落幅值小, 锯齿稀疏, 对应着连续传播的 A 类 PLC 带, 通常发生在高应变率或低温下; C 类锯齿位于应力曲线包络下方且应力跌落幅值大, 锯齿较密, 对应着随机出现 C 类 PLC 带, 通常发生在

低应变率或高温下; B 类锯齿在应力上下包络曲线之间振荡, 应力跌落幅值以及锯齿疏密介于 A 类与 C 类之间, 对应跳跃传播的 B 类 PLC 带, 通常发生在中间应变率或温度下. PLC 效应最为认可的微观机制是动态应变时效, 即溶质原子和可动位错的动态相互作用. 可动位错在运动过程中被一些障碍 (林位错, 析出相等) 阻拦, 在等待时间内溶质原子通过扩散的方式向可动位错偏聚, 达到一定数量后对可动位错实施钉扎. 在外加应力场的作用下, 可动位错跨过障碍实现脱钉, 直至下一次被钉扎, 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^[13-18].

Al-Mg 合金由于良好的力学性能及优异的耐腐蚀性能在汽车制造业以及航空、航天等领域都

* 国家自然科学基金 (批准号: 11332010, 11627803, 11472266, 11428206, 51571013) 和中国科学院战略性研究计划 (批准号: DB22040502) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fushihua@ustc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

有着广泛应用, 但其在服役过程中出现的锯齿流变现象不仅会造成材料表面的粗糙化, 影响材料的外观, 还会影响材料的力学性能^[19]. 近年来研究者针对 Al-Mg 合金 PLC 效应进行了研究. 曹鹏涛等^[20]利用红外测温法观察了 Al-2.5%Mg 合金三种 PLC 带局部和全场的温度演化特征, 发现随着应变率的增加, 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. Bernard 等^[21]研究了 5754 Al-2.6%Mg 合金变形过程中局域变形与温升之间的关联, 发现局域应变增量以及相应的温度增量峰值随施加应变呈同一线性增长趋势. Fu 等^[22,23]提出 Al-Mg 合金中 PLC 效应的正反常两种临界应变机制, 在高应变率或低温下, 观察到具有正常的临界应变行为的向上锯齿; 在低应变率或高温下, 观察到具有反常的临界应变行为的向下的锯齿; Zhemchuzhnikova 等^[24]分析了 Al-6%Mg 合金中析出相对锯齿类型以及变形带的影响, 发现合金在整个应变率范围内三种 PLC 带传播模式均存在; Cai 等^[25]给出了 Al-4.5%Mg 合金 PLC 带的三维变形特征, 并发现应力跌落幅值与带内最大应变呈现正比例关系, 且与试件厚度无关; Mg 作为 Al-Mg 合金中的主要溶质原子, 其含量对 Al-Mg 合金中 PLC 效应产生直接的影响. Ma 等^[26]发现了 Mg 含量 4.57%—6.1% 的 Al-Mg 合金中, 应力跌落幅值以及重加载时间均随应变线性增加, 此外还发现加工硬化率随 Mg 含量增加逐渐增强; Ait-Amokhta 等^[27,28]给出了正常反常两种临界应变的分界应变率随 Mg 含量的变化; Kang 等^[29]研究了五组 Mg 含量为 1.8%—4.5% 的 5xxx 商业铝合金, 发现锯齿跌落幅值随整体应变增加而增加, 且所测量的各个 Mg 含量合金的 B 型 PLC 带内应变与整体应变呈同一线性关系. 目前关于 Mg 含量对 Al-Mg 合金 PLC 效应宏观局域变形带以及锯齿类型影响的研究较少, 且很少给出整个试件精细的应变分布图.

同其他光学测量方法相比, 数字图像相关法实验装置简单, 无需特殊的防震措施, 抗干扰能力较强, 且可获得较高的测量精度, 因此得到了广泛应用^[30-32]. 本文借助数字图像相关法研究了四种不同 Mg 含量的 Al-Mg 合金在室温常应变率下的宏观局域变形, 观察了 Mg 含量对 Al-Mg 合金锯齿形态, PLC 带宽以及 PLC 带内最大应变等的影响, 给出了四种合金带的部分传播示意图, 此外在低 Mg 含

量合金试件拉伸过程中发现了特殊现象.

2 材料与实验方法

研究材料为 Mg 含量(质量分数)从 2.30%—6.91% 的四种在研新型冷铸 Al-Mg 合金, 具体材料组分见表 1. 为方便表示, 根据 Mg 含量由低至高依次命名为 1 号合金(2.30%), 2 号合金(4.57%), 3 号合金(6.10%) 以及 4 号合金(6.91%). 实验试件由如下步骤获得: 第一步将铝锭分别在 450 和 540 °C 时效(均匀化处理) 5 和 10 h, 然后热轧至 6 mm 厚的板, 使其厚度至少减少 90%; 第二步冷轧至 4 mm, 随后在 450 °C 下退火 1 h; 第三步冷轧至 1 mm, 接着在 450 °C 退火处理 1 h, 然后空气冷却至室温; 最后从 1 mm 厚铝板沿轧制方向线切割获得拉伸试件, 实验段区域为 50 mm × 12.5 mm.

实验在室温下进行, 拉伸速率为 15 mm/min, 对应的名义加载应变率为 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. 实验开始前, 在试件表面均匀喷制散斑点以用于试件表面变形计算, 如图 1(a) 所示. 拉伸过程中采用自主研发的数字图像相关系统(PMLAB 2D-DIC system)实时记录试件在变形过程中的散斑图像, 现场图如图 1(b) 所示, 相机到试件表面的距离约 300 mm, 透镜焦距为 23 mm, 相机采样频率均为 8 fps, 图像阵列为 2048 pixel × 2048 pixel, 空间分辨率约 15.6 pixel/mm. 加载曲线采集数据频率为 100 Hz. 拉伸结束借助数字图像相关法软件后处理分析以获取试件表面的二维变形场分布和演化信息. 本文中所有应变分布图像均采用等间隔、相邻采集图像相关法计算所得. 软件计算参数如下: 计算网格间隔 2 pixel, 相关计算窗口大小 29 pixel × 29 pixel, 应变计算窗口大小 9 point × 9 point, 并定义试件表面拉伸方向为 Y 轴, 横向为 X 轴, 试件表面法向为 Z 轴.

表 1 材料组分 (wt.%)

Table 1. Chemical components of the four alloys (wt.%).

	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Cu	Cr	Al
Alloy 1	2.30	0.22	0.24	0.10	0.02	0.17	0.05	Bal.
Alloy 2	4.57	0.22	0.20	0.10	0.02	0.16	0.05	Bal.
Alloy 3	6.10	0.20	0.30	0.10	0.02	0.15	0.05	Bal.
Alloy 4	6.91	0.22	0.24	0.10	0.02	0.17	0.05	Bal.

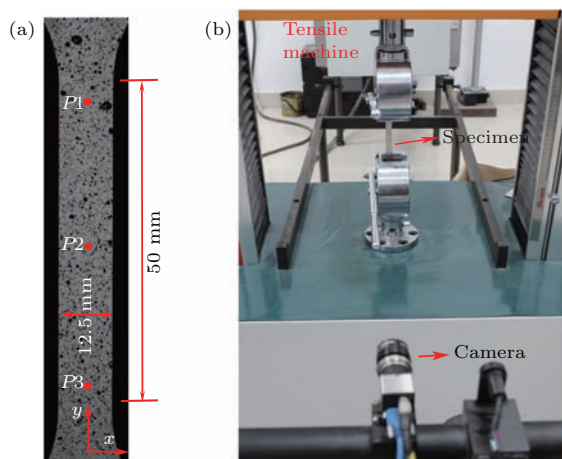


图1 (网刊彩色) (a) 实验使用喷斑试件; (b) 实验现场图
Fig. 1. (color online) (a) Specimen with random speckles; (b) experimental set-up.

3 实验结果与分析讨论

3.1 加载曲线与锯齿跌落幅值

四种合金的名义应力应变曲线如图2所示。可以明显看出,合金的拉伸强度和屈服强度随Mg含量增加逐渐增大,这是由于Mg是固溶强化元素,通常Mg含量越高,合金强化作用越大。对于锯齿的整体形貌,1号合金与其他三种合金有些许区别。从局部放大图可看出,1号合金锯齿位于应力曲线包络上方,较稀疏,锯齿幅值较小,应为A类锯齿;2—4号三种合金锯齿特征相似,锯齿在应力上下包络曲线之间振荡,较密集,锯齿幅值较大,应为B类锯齿。表明在该应变率和温度下,随着合金中Mg含量的增加,锯齿类型由A类向B类转化。

进一步对四种合金的锯齿跌落幅值进行统计分析,如图3所示。1号合金锯齿幅值随应变增大的变化很小,基本保持在1 MPa;2—4号三种合金锯齿幅值均呈现出随应变增大而近似线性增大。在相同应变下比较,锯齿幅值随Mg含量增加而增大,且这种趋势随应变增大而更加明显。此外,对比1和2号、2和4号合金,其Mg含量变化近似相同,但锯齿幅值变化却差异明显。

锯齿跌落幅值主要取决于溶质原子对可动位错的钉扎强度,聚集在可动位错周围的溶质原子浓度越高,钉扎强度就越强,脱钉引起的锯齿跌落幅值就越大。同一应变下对比四种合金,一方面基体浓度的增加使可动位错周围的溶质原子浓度提高,另一方面可动位错周围的溶质原子浓度提高,使得

可动位错脱钉难度增加,等待时间增大,延长了溶质原子向位错扩散的时间,导致位错周围偏聚的溶质原子浓度增加,因此对可动位错的钉扎强度增强,锯齿跌落幅值增大。此外,对同一种合金,在加载过程中,应变较小时等待时间随应变增加而逐渐增大,应变较大时等待时间趋于稳定值[33],因此导致位错周围偏聚的溶质原子浓度逐渐增加,对可动位错的钉扎强度增强,锯齿跌落幅值逐渐增大;而1号合金可能由于等待时间变化不大,导致位错周围偏聚的溶质原子浓度变化不大,因此锯齿跌落幅值基本保持不变。

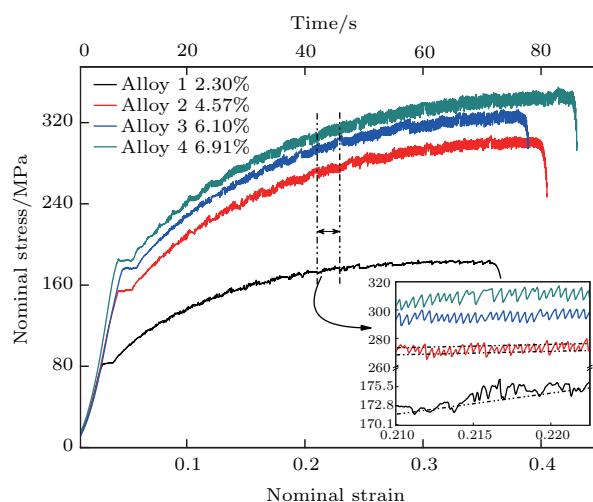


图2 (网刊彩色) 名义应力应变曲线,名义应变率为 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Fig. 2. (color online) Nominal stress-nominal strain curves at a constant strain rate of $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

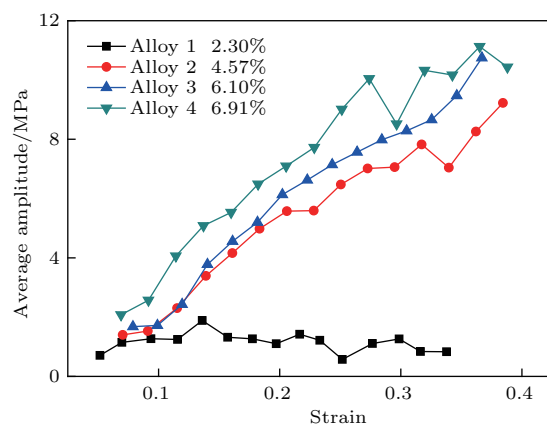


图3 锯齿跌落幅值随应变的变化

Fig. 3. Variations of serration amplitude with strain.

3.2 PLC带的空间变形行为及特征

借助数字图像相关法软件进行后处理可获得各个时刻的应变场分布,选取四种合金在应变为

0.1, 0.2 以及 0.3 三个时刻出现 PLC 带时对应的应变增量场进行分析, 如图 4(a), 图 4(c) 和图 4(e) 所示, 并将四种合金沿拉伸轴方向中心线上的应变增量进行对比, 如图 4(b), 图 4(d) 和图 4(f) 所示. 同一应变下, 随着 Mg 含量的增加, 带内最大应变增

量逐渐增大; 对于同一种合金, 带内最大应变增量随应变增加而增加. 应变较小时, PLC 带的边界较为模糊, 随着应变增大 PLC 带边界逐渐清晰. 带外部分应变呈现出在零应变值上下振荡, 但其振荡幅度 (如图 4(b) 中两条虚线间隔) 在不同合金中基本

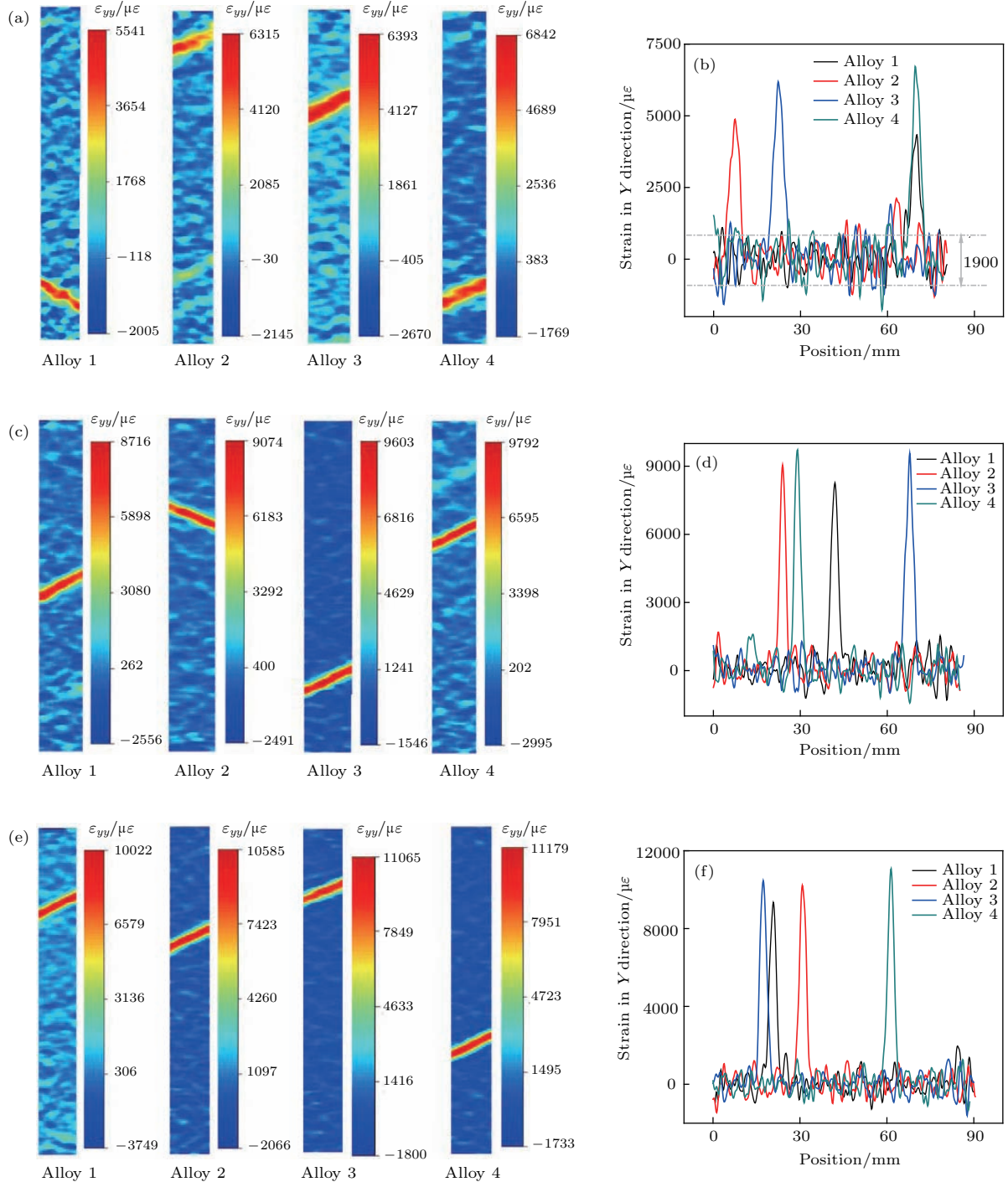


图 4 (网刊彩色) 四种合金在三种应变下的相邻相关应变增量云图 (a), (c), (e) 分别是应变为 0.1, 0.2, 0.3 时对应的应变增量图; (b), (d), (f) 分别是应变为 0.1, 0.2, 0.3 时沿拉伸轴方向的应变增量曲线

Fig. 4. (color online) Strain increment mappings of four alloys in three strains: strain increment mappings of four alloys at strain (a) 0.1; (c) 0.2; (e) 0.3; strain increment curves of four alloys at strain (b) 0.1; (d) 0.2; (f) 0.3.

一致, 且随应变增加逐渐减小 (分别约为1900, 1700和1400 $\mu\epsilon$). 振荡的大小代表了试件PLC带外变形的均匀程度, 振荡值越大说明带外变形越不均匀. 表明随着应变的增加, 试件带外变形逐渐均匀.

进一步地, 对四种合金分别选取6处应变, 在每个应变下取出5个对应的PLC带统计其带内最大应变增量以及带宽的平均值和均方差. 图5给出了带内最大应变统计的演化, 可以看到, 带内最大应变增量随应变增大明显增大, 随Mg含量增加也逐渐增大, 但在较高Mg含量的三种合金中增大趋势缓慢. 图6给出了PLC带宽的平均值和标准差. 这里, PLC带的宽度定义为中心线应变峰的半高宽(如图5(f)所示), 计算出其平均值以及均方差, 如图6所示. 可以看出PLC带的宽度基本保持在3 mm左右, 不随应变或Mg含量的改变而变化.

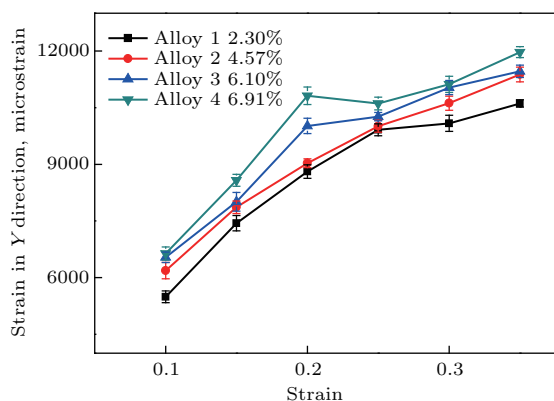


图5 (网刊彩色) 四种合金在不同应变下的带内最大应变增量

Fig. 5. (color online) The average maximum strain increment of four alloys in different strains.

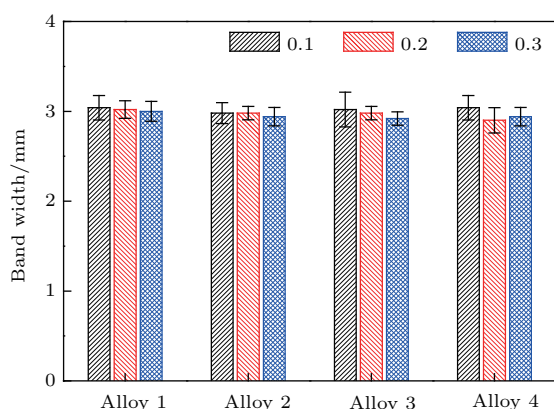


图6 (网刊彩色) 不同Mg含量的四种合金的带宽

Fig. 6. (color online) Variation of band width with Mg content. The band width is calculated from the equal-interval correlation results.

3.3 变形时域分析

通过观察每种合金相邻相关应变增量场可获得整个拉伸过程中PLC带的传播特征. 1号合金中, PLC带为连续传播, 一般从试件一端连续传播至另一端; 2号合金PLC带每次连续传播的时间比1号合金短, 距离也相对变短, 从试件一端传播至另一端过程中带的位置会突然跳跃; 3号合金PLC带每次连续传播的时间进一步变短, 距离也进一步变短, 少部分带从试件一端连续传播至另一端, 大部分带分段传播, 带在试件上的位置经常突然跳跃; 4号合金PLC带每次连续传播的时间更短, 距离也更短, 极少数带从试件一端连续传播至另一端, 基本上分段传播后带的位置突然跳跃. 即随着Mg含量的增加, 合金中带连续传播的时间变短, 传播过程中带位置的突然跳跃增多. 三种高Mg含量合金B类锯齿对应的带都具有一定的连续性, 与我们常观察到的B类锯齿对应的跳跃传播的带有一些不同. 对四种合金各选取其中几幅应变增量图, 如图7所示. 1号合金带自上向下连续传播; 2号合金带自下向上连续传播(图7(b)中前四幅), 随后带的位置向上发生跳跃(图7(b)中第四幅), 然后继续向上连续传播(图7(b)中后五幅); 3号合金带自下向上连续传播(图7(c)中前三幅), 随后向下发生跳跃(图7(c)中第四幅), 然后向下连续传播(图7(c)中四五幅), 随后向上跳跃(图7(c)中第六幅)后向下连续传播(图7(c)中后三幅); 4号合金带自上向下连续传播(图7(d)中前三幅), 随后带的位置向下发生跳跃(图7(d)中第三幅), 然后继续向下连续传播(图7(b)中后三四幅), 随后跳跃向下传播(图7(d)中后五幅).

在四种合金试件的上中下部位各取一点, 如图1(a)中P1, P2, P3所示, 通过时序分析, 获取各点随拉伸过程应变率演化行为. 如图8所示, 其中红色, 蓝色以及黑色分别代表P1, P2以及P3点的应变率曲线, 为了便于观察, 将相邻应变率曲线均错开 $6.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 间隔. 曲线上第一个峰值对应着Luders平台阶段, 表示有Luder带在该点处出现, 随后的峰值表明相应时刻有PLC带在该点处出现. 以四种合金P3点的时间-应变率曲线来进行比较, 可以看出随着Mg含量的增加, 试件局部应变率整体上呈增长趋势, 且四种合金都有双峰现象的产生, 说明相邻时刻在P3点附近先后有两个带

产生. 此外观察1号合金的应变率曲线可知, 在试件拉伸的最后一段时间内 PLC 带只在试件上中段

部位产生直至断裂, 这与实验中试件在靠近上部断裂是相一致的.

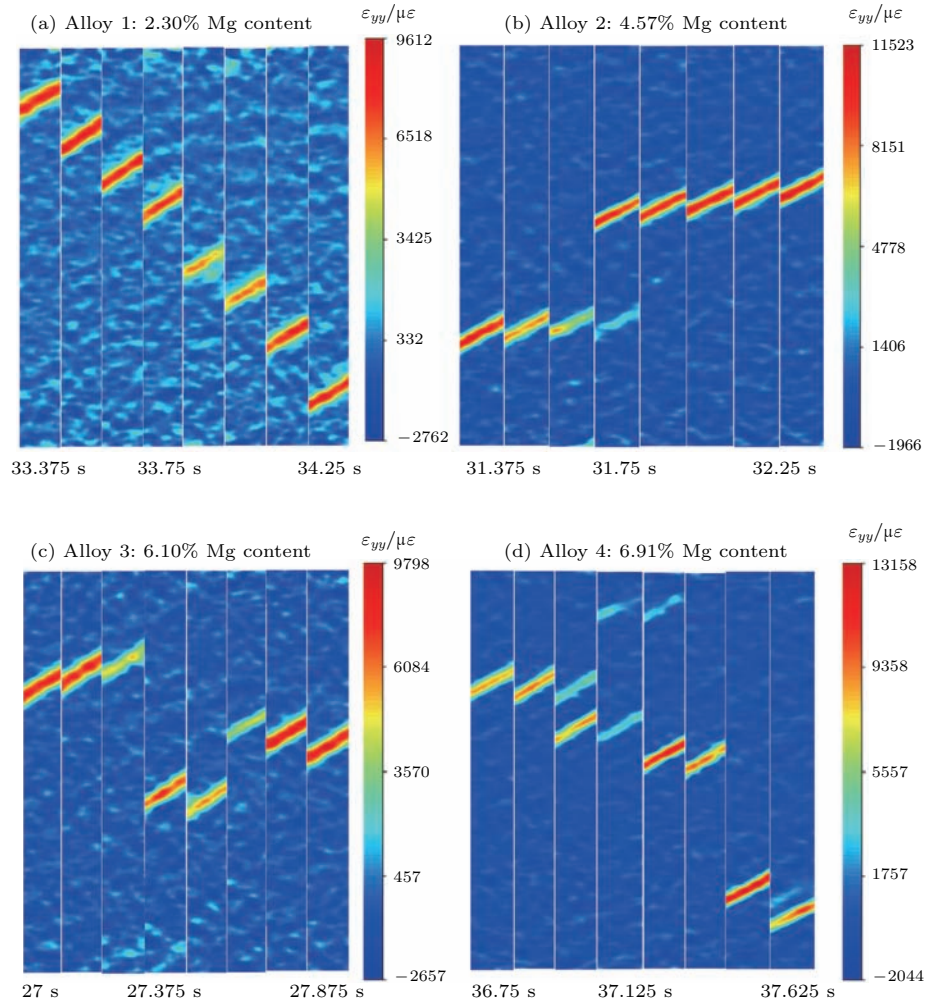


图7 (网刊彩色) 四种合金应变增量云图, 四幅图所取参考图分别是 33.25, 31.25, 26.875 以及 36.575 s 时所对应的图像 (a)—(d) 分别是 1—4 号合金应变增量云图

Fig. 7. (color online) Propagative characteristics of PLC bands. The reference images are the 33.25 s frame, the 31.25 s frame, the 26.875 s frame and the 36.575 s frame for alloy 1, 2, 3 and 4, respectively. Strain mappings of (a) alloy 1; (b) alloy 2; (c) alloy 3; (d) alloy 4.

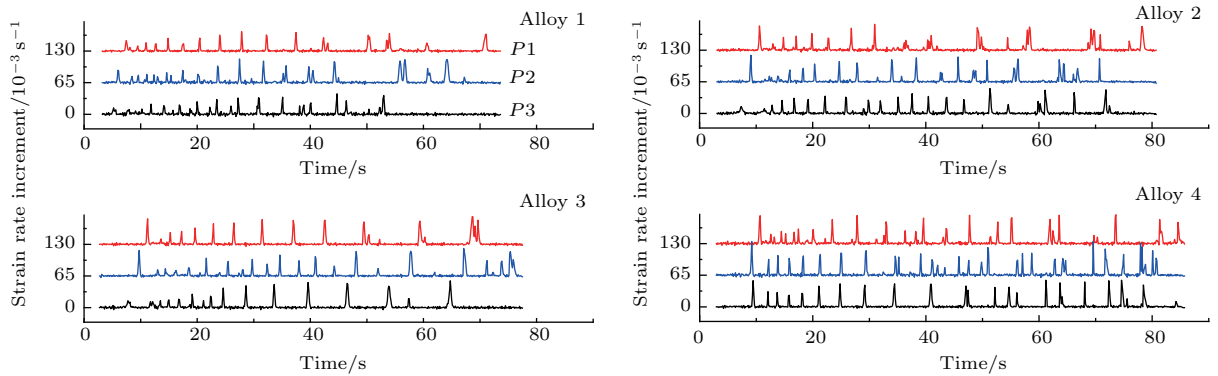


图8 (网刊彩色) 不同 Mg 含量合金上中下三点的时间-应变率

Fig. 8. (color online) Strain rate curves of four alloys in three points.

3.4 特殊现象

对于1号合金,我们还观察到一个有趣的现象.在拉伸后期的应力曲线上,如图9所示,从65.7 s左右开始(红色箭头所示)应力自峰值经过一个大的跌落迅速减小到谷底,随后经过一系列幅度逐渐减小的振荡上升到峰值,之后重复这一过程,直至最后失效.插图显示一个周期附近的细节,以此段为例,其对应的相邻相关应变场分布如图10所示,每幅应变云图与图9中红点的时刻一一对应. PLC带先发生一次倾角转向,即倾角由“\”转变为“/”(矩形框),而后继续传播一段时间后再次发生倾角转向(矩形框),倾角转向前后的传播方向保持一致(箭头标示).对应到应力曲线可知,每次倾角转向都对应着一个大的应力跌落,PLC带的传播过程则对于逐渐趋于平稳的小振荡.观察这种现象可能和断裂相关,但是对于其发生的深层原因有待进一步发掘.

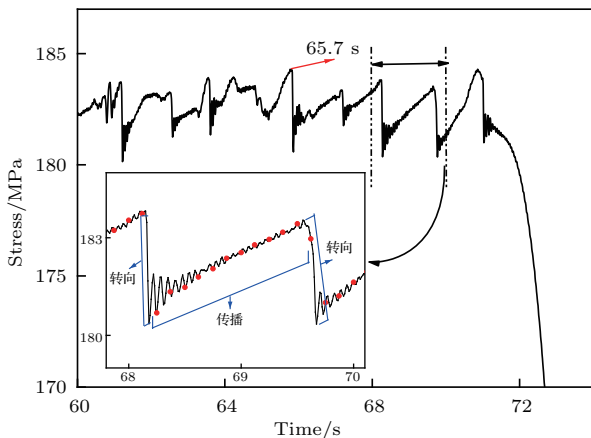


图9 (网刊彩色) 1号试件60—74 s的时间-应力曲线,插图为67.8—70.1 s的局部放大图

Fig. 9. (color online) The stress-time curve of alloy 1 from 60 s to 74 s. Illustration is an enlarged from 67.8 s to the 70.1 s.

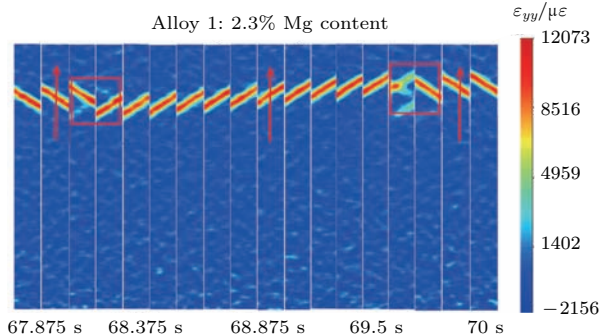


图10 (网刊彩色) 局部应变分布图

Fig. 10. (color online) The local strain mappings.

4 结 论

本文利用数字图像相关法研究了四种不同Mg含量的Al-Mg合金在常温与应变率为 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时PLC带的宏观变形特征,得到以下结论.

1) 随着Mg含量的增加,合金锯齿类型由A类转为B类.合金应力跌落幅值随Mg含量增加逐渐增大,且在低Mg含量(2.30%)合金中不随应变变化,在高Mg含量(4.57%, 6.10%, 6.91%)合金中随应变增加呈线性增大.

2) 随着Mg含量的增加,合金中PLC带连续传播的时间变短,传播过程中带位置的突然跳跃增多.在小应变时,合金带外变形不均匀性明显,随着应变的增加,带外变形不均匀性逐渐减小.

3) 合金的带宽不随Mg含量或应变的改变而变化.带内最大应变增量随Mg含量或应变增加逐渐增大.

4) 低Mg含量(2.30%)合金应力曲线后段(应变0.3左右)应力自峰值迅速以大的跌落减小到谷底,随后经一系列幅度逐渐减小的振荡上升到下一个峰值,并反复出现.对应的宏观变形表明其中锯齿的大跌落对应着PLC带的转向,幅度逐渐减小的振荡对应着PLC带的传播,且在转向前后PLC带均向上连续传播.

参考文献

- [1] Klose F B, Hagemann F, Hähner P, Neuhäuser H 2004 *Mater. Sci. Eng. A* **387–389** 93
- [2] 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
- [3] Zhang Q C, Jiang Z Y, Jiang H F, Chen Z J, Wu X P 2005 *Int. J. Plasticity* **21** 2150
- [4] Min J Y, Lin J P, Sun B 2014 *Mech Mater.* **68** 164
- [5] Min J Y, Hector Jr L G, Zhang L, Sun L, Carsley J E, Lin J P 2016 *Mater. Design* **95** 370
- [6] Cai Y L, Tian C G, Zhang G L, Han G M, Yang S L, Fu S H, Cui C Y, Zhang Q C 2017 *J. Alloys Compd.* **690** 707
- [7] Wang X G, Han G M, Cui C Y, Guan S, Jin T, Sun X F, Hu Z Q 2016 *Metall Mater. Trans. A* **47** 5994
- [8] Tong W, Tao H, Zhang N, Hector Jr L G 2005 *Scr. Mater.* **53** 87
- [9] Jiang Z Y, Zhang Q C, Jiang H F, Chen Z J, Wu X P 2005 *Mater. Sci. Eng. A* **403** 154
- [10] Ranc N, Wagner D 2008 *Mater. Sci. Eng. A* **474** 188
- [11] Pink E, Grinberg A 1981 *Mater. Sci. Eng.* **51** 1

- [12] Xiang G F, Zhang Q C, Liu H W, Wu X P, Ju X Y 2007 *Scr. Mater.* **56** 721
- [13] Picu R C, Zhang D 2004 *Acta Mater.* **52** 161
- [14] Tabata T, Fujita H, Nakajima Y 1980 *Acta Metall.* **28** 795
- [15] Penning P 1972 *Acta Metall.* **20** 1169
- [16] Cottrell A H 1953 *The London, Edinburgh, and Dublin Philos. Mag. J. Sci.* **44** 829
- [17] Xiong S M, Zhang Q C, Cao P T, Xiao R 2009 *Acta Metall. Sin.* **45** 892 (in Chinese) [熊少敏, 张青川, 曹鹏涛, 肖锐 2009 金属学报 **45** 892]
- [18] Hu Q, Zhang Q C, Fu S H, Cao P T, Gong M 2011 *Theor. Appl. Mech. Lett.* **1** 011007
- [19] Kang J, Wilkinson D S, Jain M, Embury J D, Beaudoin A J, Kim S, Mishra R, Sachdev A K 2006 *Acta Mater.* **54** 209
- [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] Bernard C, Coër J, Laurent H, Chauvelon P, Manach P Y 2013 *Exp. Mech.* **53** 1025
- [22] Fu S H, Cai Y L, Yang S L, Zhang Q C, Wu X P 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 026201
- [23] Fu S H, Cheng T, Zhang Q C, Hu Q, Cao P T 2012 *Acta Mater.* **60** 6650
- [24] Zhemchuzhnikova D A, Lebyodkin M A, Lebedkina T A, Kaibyshev R O 2015 *Mater. Sci. Eng. A* **639** 37
- [25] Cai Y L, Fu S H, Wang Y H, Tian C G, Gao Y, Cheng T, Zhang Q C 2014 *Acta Metall. Sin.* **50** 1491
- [26] Ma P C, Zhang D, Zhuang L Z, Zhang J S 2015 *Int. J. Min. Met. Mater.* **22** 175
- [27] Ait-Amokhtar H, Fressengeas C, Bouabdallah K 2015 *Mater. Sci. Eng. A* **631** 209
- [28] Ait-Amokhtar H, Fressengeas C, Boudrahem S 2008 *Mater. Sci. Eng. A* **488** 540
- [29] Kang J D, Mishra R K, Wilkinson D S, Hopperstad O S 2012 *Philos. Mag. Lett.* **92** 647
- [30] Cai Y L, Yang S L, Wang Y H, Fu S H, Zhang Q C 2016 *Mater. Sci. Eng. A* **664** 155
- [31] McCormick P G, Ling C P 1995 *Acta Metall. Mater.* **43** 1969
- [32] Pan B 2011 *Exp. Mech.* **51** 1223
- [33] Kubin L P, Estrin Y 1990 *Acta Metall. Mater.* **38** 697

Experimental investigation on the influence of Mg content on Portevin-Le Chatelier effect in Al-based alloys by using digital image correlation*

Yang Su-Li¹⁾ Fu Shi-Hua^{1)†} Cai Yu-Long¹⁾ Zhang Di²⁾ Zhang Qing-Chuan^{1)‡}

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

2) (State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(Received 5 December 2016; revised manuscript received 17 January 2017)

Abstract

The Portevin-Le Chatelier (PLC) effects are investigated by using digital image correlation at a constant applied strain rate of $5.00 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ and room temperature in Al-Mg alloys with Mg content values (wt.%) of 2.30, 4.57, 6.10 and 6.91 respectively in this study. Both the yield strength and the ultimate strength increase with increasing Mg content, which is generally called solution strengthening. Type of PLC band changes from A to B with increasing Mg content. In low Mg content (2.30%) alloy, the serration amplitude almost remains 1 MPa, while in each of high Mg content (4.57%, 6.10%, 6.91%) alloys it linearly increases with the strain increasing. The serration amplitude is found to increase with increasing Mg content and gradually reaches a saturated state. With the increase of Mg content, the period of PLC band for continuous propagation gradually reduces and the time when the PLC band location sudden jumps increases in the process of propagation. When the strain is small, the out-of-band deformation of alloy is inhomogeneous obviously. And the deformation inhomogeneity slightly decreases with increasing Mg content. DIC results indicate that the PLC bandwidth does not change with Mg content, while the maximum strain increment in the PLC band increases with increasing both Mg content and strain. Additionally, special periodic damped serrations are observed in the stress-time curve of the low Mg content (2.30%), the corresponding PLC band shows that the periodic changed serrations in the stress-time curve correspond to the transformation of the PLC band orientation. Besides, the PLC band propagates upward continuously both before and after the shift.

Keywords: Portevin-Le Chatelier, digital image correlation, Mg content, dynamic strain ageing

PACS: 62.20.F-, 81.40.Cd

DOI: 10.7498/aps.66.086201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11332010, 11627803, 11472266, 11428206, 51571013) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. DB22040502).

† Corresponding author. E-mail: fushihua@ustc.edu.cn

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