



# 自然时效对 AA7075 板材 锯齿形屈服行为的影响

董国疆<sup>1</sup>, 孙宇飞<sup>2</sup>, 樊博成<sup>1</sup>, 王贵开<sup>1</sup>, 赵长财<sup>2</sup>

- (1. 河北省特种运载装备重点实验室(燕山大学), 秦皇岛 066004;
2. 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室(燕山大学), 秦皇岛 066004)

**摘要:** 基于高强铝合金低温形变热处理工艺, 研究了自然时效对 AA7075 铝合金力学性能的影响并使用透射电镜(TEM)对热处理后的组织形貌进行了观察。将板材试样单向拉伸与三维数字图像相关(3D-DIC)技术相结合, 研究了自然时效对板材拉伸变形锯齿形屈服行为(Portevin-Le Chatelier, PLC 效应)的影响, 对 B 型、C 型 PLC 效应时域和空域行为的相关性进行了研究; 应用轮廓扫描与 3D-DIC 等技术手段, 研究了 PLC 效应为对变形试样表面质量的影响机制。研究表明: 随自然时效时间延长, PLC 效应产生的应力锯齿和 PLC 变形带特征均由 C 型向 B 型转变, 直至消失; 变形试样表面波纹度减弱。对于 PLC 变形带的带静态行为, 变形带作用位置随机, 产生周期短, 对试件表面质量的影响最大; 带动态行为, PLC 变形带传播引发板材表面质点产生连续、均匀的厚向位移, 对表面质量影响小。

**关键词:** AA7075 铝合金; Portevin-Le Chatelier (PLC)效应; 时空演变; 表面质量

文章编号: 1004-0609(2021)-03-0578-12

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

**引文格式:** 董国疆, 孙宇飞, 樊博成, 等. 自然时效对 AA7075 板材锯齿形屈服行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 578-589. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36500

DONG Guo-jiang, SUN Yu-fei, FAN Bo-cheng, et al. Effect of natural aging on Portevin-Le chatelier effect of AA7075 sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(3): 578-589. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36500

轻量化作为实现节能减排目标的重要途径, 近年来备受各个领域的关注。AA7075 是 Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金, 具有密度小、比强度高、韧性强等特点, 在航空、航天、汽车、船舶等领域已大量应用<sup>[1-2]</sup>。AA7075 属于可热处理强化型合金, 其固溶处理后对自然时效敏感, 板材性能变化较大<sup>[3]</sup>。商用 AA7075-T6 板材强度高、塑性差, 难以在室温条件下成形复杂型面零件, 生产中常采用低温形变热处理方式进行加工。低温形变热处理工艺, 即对铝合金板材进行固溶处理提高板材的成形性能, 随后进行冷成形, 最后通过人工时效处理恢复材料原有力学性能, 这使 AA7075 板材在室温条件下

成形复杂零件成为可能<sup>[4-5]</sup>。然而, 低温形变热处理工艺虽然可以有效提高板材的成形性能, 但室温成形 AA7075 板材仍然存在问题, 即在塑性变形期间表现出的 Portevin-Le Chatelier (PLC)效应。PLC 效应的典型特征是应力-应变曲线的锯齿形屈服和试样表面出现条带状的局部变形, 也称为 PLC 变形带。由于 PLC 效应导致板材的不均匀变形, 变形带位置处的局部应变远高于其他位置, 因此, 通过应变云图可以准确观测变形带的变化情况。PLC 效应归因于溶质原子和可动位错间的动态的钉扎和脱钉作用, 即动态应变时效(DSA)<sup>[6-7]</sup>。PLC 效应使板材不均匀变形加剧, 降低板材的延展性, 在板面形

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51775481); 河北省自然科学基金资助项目(E2019203418); 河北省教育厅高等学校科技计划重点项目(ZD2017078)

**收稿日期:** 2019-11-04; **修订日期:** 2020-12-20

**通信作者:** 董国疆, 教授, 博士; 电话: 13780479660; E-mail: dgi@ysu.edu.cn

成带状痕迹, 严重影响板件表面质量。

PLC 效应制约了铝合金板材在工程上的应用, 其形成与预防机制理论研究现已成为行业内的热点问题。CAI 等<sup>[8]</sup>使用两个相互正交数字图像相关系统观测了 5456 铝基合金中的 PLC 效应的时空特征, 在宽度方向和厚度方向上同时观察到 PLC 效应。NAKAMURA 等<sup>[9]</sup>使用电子散斑干涉法研究了 AA5052 合金在拉伸试验中的 PLC 现象, 系统的研究了塑性变形过程中 PLC 变形带的形核和传播过程, 将应变变化与载荷中的锯齿曲线对比研究表明, 高应变速率下的 A 型和 B 型 PLC 效应的差异源于 PLC 变形带中的局部应变, 低应变速率下 PLC 变形带形核、传播过程的响应更为复杂。MEHENNI 等<sup>[10]</sup>使用红外热成像技术研究了 B 型、C 型 PLC 效应过渡期间 PLC 变形带形核与应力锯齿之间的相关性, 单向拉伸应变速率为  $2.38 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的试样变形过程中 PLC 效应由从 B 型转变为 C 型, 应力跌幅统计分布向钟形的高斯分布转变, PLC 变形带表现出较强的不相关性。ZDUNEK 等<sup>[11]</sup>使用三维数字图像相关(3D-DIC)研究了 Al-4.5Mg-0.7Mn 合金的 PLC 效应, 结果表明, 应力-应变曲线上的应力下降、应变带成核与后继应变调节直接相关; CHENG 等<sup>[12]</sup>利用 3D-DIC 观察了试样表面全场变形时空演变, 并获得了加载过程中的厚向位移的分布情况。

PLC 效应产生的主要弊端在于其存在将导致板材成形性能和试件表面质量降低这一工程问题。目前, 对 PLC 效应的研究主要集中于产生机理和时空行为的研究, 并已取得许多优秀成果<sup>[13-15]</sup>。但是, 对于 PLC 变形带对试件表面的作用机理却鲜有报道。目前, 对于 PLC 效应工程上还没有真正行之有

效的解决方法。自然时效会引起组织内部原子浓度、沉淀相等分布的显著变化, 进而对合金的 PLC 效应产生影响<sup>[16]</sup>。自然时效作为低温形变热处理工艺过程中的重要一环, 研究其工艺参数对 PLC 效应的影响对 AA7075 板材零件的设计开发和生产实践有重要意义。

## 1 实验

本文选用南南铝业 AA7075-T6 轧制板材, 厚度 2 mm, 其化学成分见表 1。试验流程图如图 1 所示。

表 1 AA7075 板材化学成分

Table 1 Chemical composition of AA7075 sheet (mass fraction, %)

Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Si	Mn	Ti	Al
5.72	2.36	1.65	0.24	0.31	0.23	0.22	0.10	Bal.

根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法》要求制备板材单向拉伸试样, 用电火花切割机在 AA7075-T6 板材上切取试样。首先, 测试获取 AA7075-T6 板材力学性能参数: 屈服强度  $\sigma_s=456 \text{ MPa}$ , 抗拉强度  $\sigma_b=549 \text{ MPa}$ , 最大力伸长率  $A_{gt}=10\%$ , 断裂伸长率  $A_t=11.7\%$ 。随后, 对板材试样进行固溶水淬, 即(480 °C, 0.5 h)固溶且 20 °C 水淬, 固溶处理采用 SX-G123 型节能箱式电炉(炉温波动  $<1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 当炉温达到设定固溶温度后放入试样, 固溶达到保温时间后放置于 20 °C 流动水中淬火(转移时间  $<5 \text{ s}$ )。自然时效, 即试样经固溶水淬后在室温环境放置, 自然时效时间  $t_{NA}$  分别控制为 0 h 至 168 h 不等, 而后通过单拉试样测定试

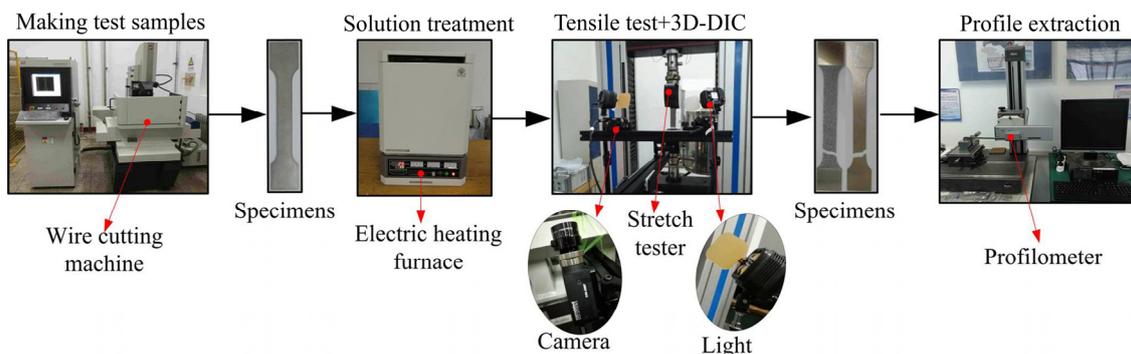


图 1 试验流程图

Fig. 1 Test flow chart

样力学性能参数。

板材材料力学性能试验采用微机控制电子万能材料试验机, 每种方案重复测试 5 组, 并选 3 组数据取均值, 拉伸方向与板材轧制方向一致, 平均应变速率控制为  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 。单向拉伸试验的同时利用三维数字图像相关(3D-DIC)对变形过程中三维空间内全视野的形状、位移和应变数据进行采集。试验过程中, 相机拍摄频率为 10 Hz, 拉伸机数据提取频率为 100 Hz。拉伸变形结束后, 用超声波酒精清洗试件, 利用 MarSurf XC20 轮廓测量仪对试件表面波纹理进行测量, 扫描长度为 25 mm。

## 2 结果与分析

### 2.1 自然时效对固溶后板材力学性能的影响

试验选取固溶参数为  $\theta_s=480 \text{ }^\circ\text{C}$  且  $t_s=0.5 \text{ h}$ , 将试样固溶水淬后分别进行不同时间的自然时效, 通过拉伸试验获取力学性能参数曲线, 如图 2 所示。板材固溶水淬后最大力伸长率  $A_{gt}=22.3\%$ , 屈服强度  $\sigma_s=130 \text{ MPa}$  和抗拉强度  $\sigma_b=336.7 \text{ MPa}$ , 强度最低, 伸长率最高, 从板材力学性能指标看易于塑性成形。

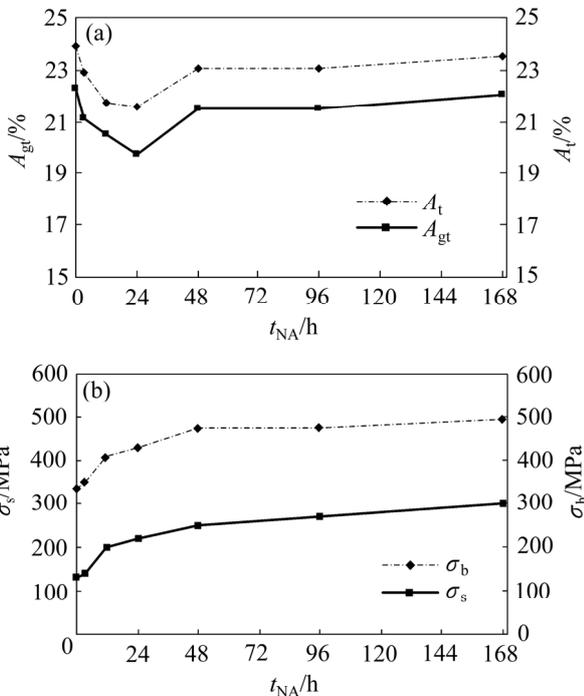


图 2 不同自然时效时间试件的力学性能参数曲线  
Fig. 2 Mechanical properties of specimens with different natural aging time: (a) Effect of natural aging time on  $A_{gt}$  and  $A_t$ ; (b) Effect of natural aging time on  $\sigma_s$  and  $\sigma_b$

试样固溶后经自然时效, 时效时间  $t_{NA}$  在  $[0, 48] \text{ h}$  内, 板材强度随  $t_{NA}$  回升迅速, 伸长率随  $t_{NA}$  的延长呈先降后升的趋势, 当  $t_{NA}=24 \text{ h}$  时,  $A_{gt}$  将低至 20%, 当  $t_{NA}=48 \text{ h}$  时,  $A_{gt}$  回升至 21.5%。当  $t_{NA} \geq 48 \text{ h}$  时, 板材力学性能受自然时效作用的影响明显减弱, 伸长率和强度均有提升, 但变化不大。直至  $t_{NA}=168 \text{ h}$  时, 板材屈服强度回升至原材的 65%, 抗拉强度回升至原材的 90%; 而最大力伸长率  $A_{gt}=22\%$ , 较原材提高了 2 倍, 屈强比和伸长率的提高使 AA7075 板材成形性能较原材大幅改善。

图 3(a)、(b)所示为 AA7075-T6 板材的透射电镜明场像, 可见, 在晶粒内部存在大量球状和杆状的析出相, 其析出相尺寸在 100~300 nm 之间。T6 态板材组织为峰值时效组织, 其强化性能优异, 这与观察到的组织相一致。图 3(c)、(d)分别为  $t_{NA}=0 \text{ h}$  和  $t_{NA}=24 \text{ h}$  时 AA7075 板材的透射电镜明场像。可见, 固溶处理后, 析出相逐渐溶解入基体中, 析出相数量大量减少, 使板材的强度降低, 塑性成形性能大幅提高。当自然时效 24 h 后, 组织中的强化相数量明显增多。可见, 自然时效的作用将导致强化相从过饱和固溶体中析出, 材料强度得到回复。

### 2.2 自然时效对 PLC 效应时域行为的影响

PLC 效应一般可分为 3 种类型: A 型带连续传播, 应力锯齿在包络线上方, 不易分辨; B 型带跳跃传播, 应力锯齿呈“簇状”悬挂于包络线下方; C 型带随机产生, 应力锯齿沿包络线均匀震荡<sup>[17]</sup>。图 4(a)显示, 自然时效时间对固溶水淬后 AA7075 板材工程应力应变曲线的锯齿形屈服行为(PLC 效应)具有显著影响。总体看, 随  $t_{NA}$  延长, 板材的 PLC 效应减弱。当  $t_{NA}=0 \sim 48 \text{ h}$ , 锯齿类型随  $t_{NA}$  延长从沿应力包络线震荡起伏的 C 型锯齿逐渐向“簇状”悬挂的 B 型锯齿转化; 当  $t_{NA} \geq 96 \text{ h}$  时锯齿形屈服行为消失。图 4(b)显示, 在 PLC 效应的产生的阶段, 不同自然时效条件下的应力锯齿之间均存在幅值较小的应力波动。PLC 效应一般采用四个宏观特征量来表征(见图 4(c)), 即临界应变  $\varepsilon_c$ 、应力跌幅  $\Delta\sigma$ 、再加载时间  $t_r$ 、跌落时间  $t_d$ 。

#### 2.2.1 临界应变

临界应变表征的是被钉扎的大量可动位错在热激活辅助下第一次脱钉所需要的应变, 此时如

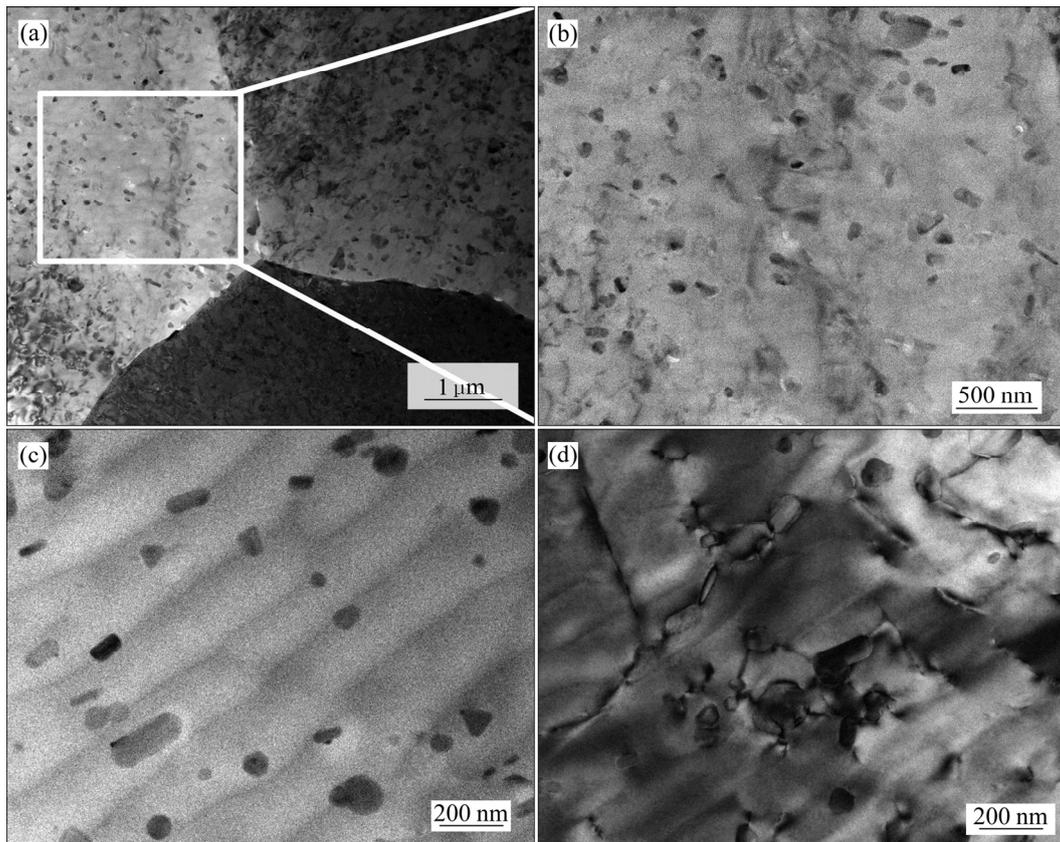


图 3 AA7075 板材透射电镜(TEM)明场像

Fig. 3 TEM images of AA7075 sheet: (a), (b) AA7075-T6; (c)  $\theta_s=480\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_s=0.5\text{ h}\rightarrow t_{NA}=0\text{ h}$ ; (d)  $\theta_s=480\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_s=0.5\text{ h}\rightarrow t_{NA}=24\text{ h}$

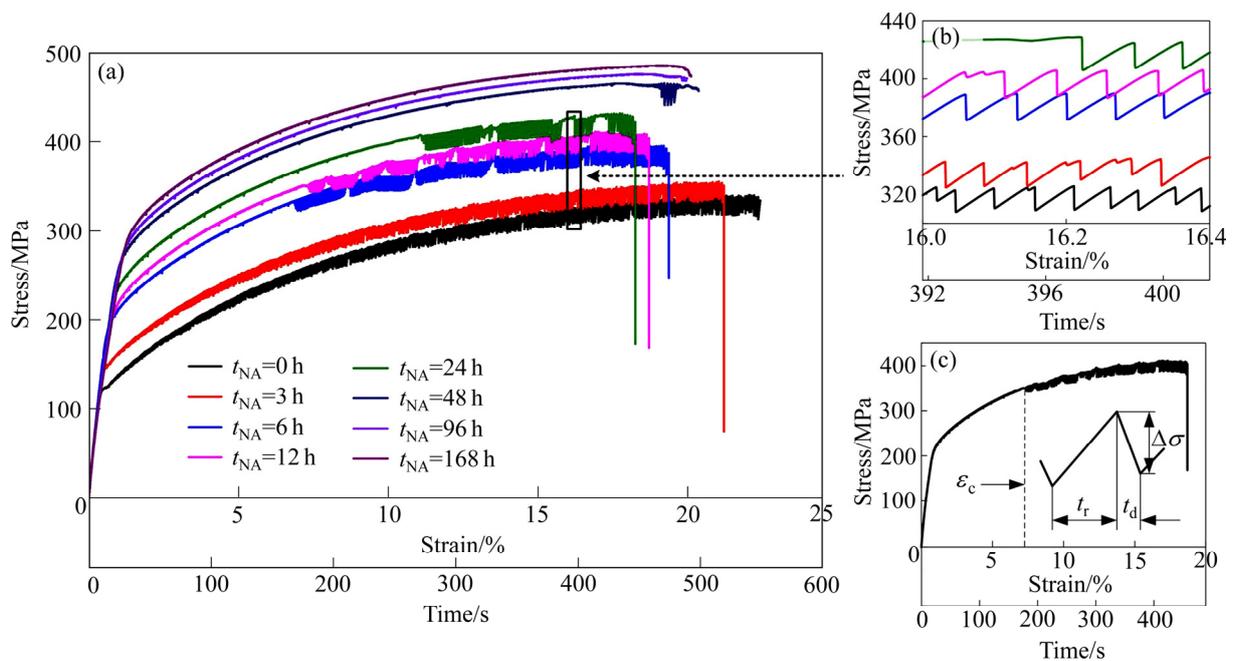


图 4 自然时效对板材工程应力-应变曲线 PLC 效应的影响

Fig. 4 Effects of natural aging on PLC effect of engineering stress-strain curves( $\sigma-\epsilon$ ) and engineering stress-time curves( $\sigma-t$ ): (a) Engineering stress-strain curves( $\sigma-\epsilon$ ) and engineering stress-time curves( $\sigma-t$ ); (b) Partial enlargement of serrations in stress-strain curves; (c) Schematic diagram of characteristic parameters

林位错等的阻碍能力、溶质原子气团的钉扎能力、可动位错的脱钉能力三者处于一种相对平衡状态<sup>[18]</sup>。AA7075 板材拉伸试验表明,  $t_{NA}$  对应力应变曲线的变化趋势, 以及对 PLC 效应均有显著影响。当  $t_{NA} \leq 3$  h 时, 板材进入塑性变形即产生应力锯齿, 临界应变  $\varepsilon_c$  等于初始塑性应变  $\varepsilon_0$ , 而后随  $t_{NA}$  延长临界应变逐渐增大, 产生应力锯齿的临界点后移。随  $t_{NA}$  延长, 板材微观组织表现为固溶原子密度降低, GP 区不断形成。GP 区析出阻碍可动位错运动, 使可动位错平均运动速率减慢, 更容易被溶质原子钉扎。此时, 将有更多的溶质原子在等待时间内向位错偏聚, 从而钉扎强度增大。要克服由于自然时效  $t_{NA}$  增加而变强的障碍, 必须增大塑性应变以增强作用在可动位错上的背应力<sup>[19]</sup>。因此, 随着自然时效时长增加, PLC 效应的临界应变逐渐后移, 如图 5 所示。

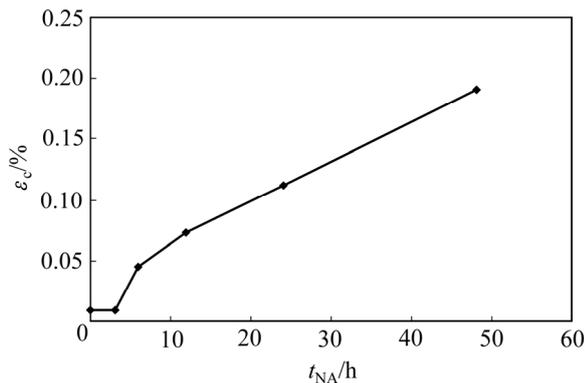


图 5 临界应变随自然时效时间的演变曲线

Fig. 5 Variation of critical strain with natural aging time

### 2.2.2 应力跌幅

应力跌幅  $\Delta\sigma$  反映了溶质原子气团对位错的钉扎强度。表 2 显示, 随自然时效时长增加, 平均应力跌幅升高。当  $t_{NA} \geq 6$  h,  $\Delta\sigma$  呈峰形分布。根据已有对应变速率与 PLC 效应的相关性研究<sup>[18]</sup>, 本文获取的  $t_{NA}=0$  h 的幅值分布与幂律分布向峰形分布转化的过渡阶段的某一时期相同。由于应变速率的限制,  $t_{NA}=0$  h 的试件并未呈现出理想的幂律分布规律。由于其幅值分布处于幂律分布向峰形分布转化的过渡阶段, 因此  $t_{NA}=0$  h 幅值分布规律兼具幂律分布与峰值分布的双重特征。根据非线性动力学原理, 幂率分布符合自组织临界性特征, 而峰形分布则具有典型的混沌特征<sup>[20]</sup>。因此, 随  $t_{NA}$  的增加, PLC 效应从自组织临界性转变为混沌。

### 2.2.3 再加载时间与跌落时间

再加载时间  $t_r$  表征可动位错被溶质原子气团钉扎, 在外力作用下脱钉前的一段时间, 即在微观上被称作“等待时间”, 与林位错密度、溶质原子扩散速度、可动位错运动速度有密切联系。跌落时间  $t_d$  表征可动位错挣脱溶质原子气团钉扎后快速运动, 直到再次被溶质原子气团钉扎这段时间。由于可动位错运动速度非常快, 这一时间在微观上也被称作“飞行时间”, 它取决于可动位错的运动速度和林位错密度<sup>[21]</sup>。表 2 显示, 再加载时间和跌落时间均随  $t_{NA}$  的延长而增大, 其中  $t_r$  增大明显, 而  $t_d$  的变化量非常小, 其变化可以忽略。

当  $t_{NA}$  较短时, 虽然溶质原子浓度大, 但溶质原子的扩散速度远小于可动位错的移动速度, 难以对可动位错形成有效钉扎, 因此钉扎强度较弱, 可动位错挣脱溶质原子气团钉扎较容易,  $\Delta\sigma$  和  $t_r$  均较小。随  $t_{NA}$  的延长, 一方面, 固溶体中溶质原子浓度逐渐减少, 溶质原子和可动位错之间作用的减弱,  $\Delta\sigma$  和  $t_r$  有减小趋势; 另一方面, GP 区的析出将阻碍可动位错的运动, 使可动位错运动速度减慢, 更容易被溶质原子钉扎, 钉扎强度较强大, 在相同的应变速率条件下, 需要更长的变形时间以增大作用在可动位错上的背应力,  $\Delta\sigma$  和  $t_r$  有增大趋势。试验结果显示, 随  $t_{NA}$  延长,  $\Delta\sigma$  和  $t_r$  均增大。可见, GP 区和位错的相互作用对 PLC 效应的影响要强于溶质原子和位错的相互作用的影响。

### 2.3 自然时效对 PLC 效应空域行为的影响

本文研究发现, 由于应变速率的原因,  $t_{NA}=0$  h 时, 应力曲线并非从开始产生 PLC 效应时便表现出应力锯齿均匀震荡特征<sup>[10]</sup>。应力曲线局部放大图显示, 塑性变形初期的应力锯齿形貌呈“簇状”悬挂于应力包络线下方, 呈现出典型的 B 型锯齿形貌。由 3D-DIC 获取的 PLC 变形带行为显示, 塑性变形初期, PLC 变形带以跳跃传播方式在试件表面传播。随变形的继续, PLC 类型逐渐转变, 应力锯齿呈现均匀分布的 C 类锯齿形貌, PLC 变形带在试件表面随机产生, 无传播特征。同时, C 型 PLC 效应阶段存在明显的多带共存现象。该现象通常认为是由于单条 PLC 变形带所承载的塑性应变率无法满足加载应变率而导致的。如图 6 所示, 无论在塑性变形初期还是末期, 均可清晰地观测到两个方向的

表 2 不同自然时效条件 PLC 特征量分布情况统计表

Table 2 Statistics on distribution of PLC effect characteristics in different natural aging time

	Statistical analysis of stress drop amplitude	Statistical analysis of reloading time	Statistical analysis of reloading time
$t_{NA}=0\text{ h}$			
$t_{NA}=6\text{ h}$			
$t_{NA}=24\text{ h}$			

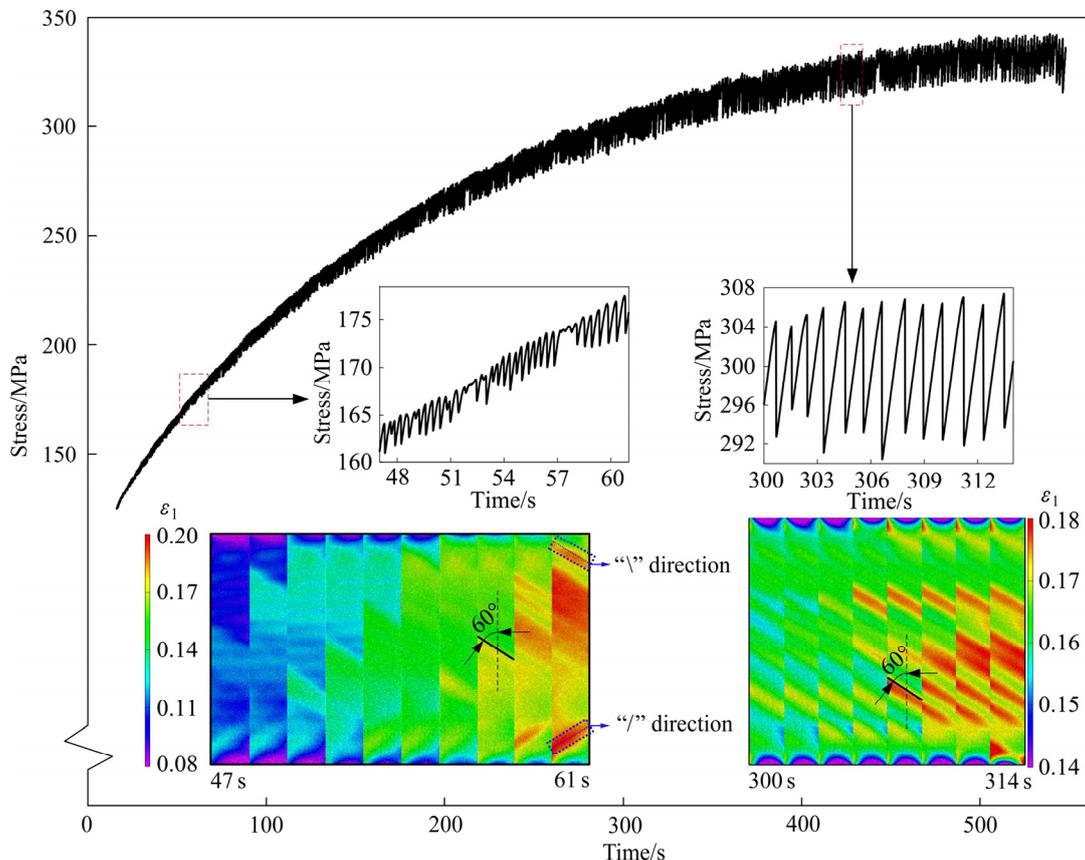


图 6 AA7075 板材试样 PLC 效应时空变换实测图( $t_{NA}=0\text{ h}$ )

Fig. 6 Temporal and spatial evolutions of deformation of PLC effect of AA7075 sheet ( $t_{NA}=0\text{ h}$ )

PLC 变形带，即右上方向“/”和右下方向“\”，且“/”方向和“\”方向的 PLC 变形带均与拉伸轴成约  $60^\circ$  的夹角。PLC 变形带与拉伸轴间的夹角不随 PLC 变形带的产生和传播而改变。

随  $t_{NA}$  延长，板材试样 PLC 效应逐渐由 C 型转变为 B 型，图 7(a) 所示为自然时效  $t_{NA}=24$  h 的板材试样拉伸曲线与 3D-DIC 测定 PLC 效应第一主应变云图对比。由云图可见，“/”和“\”两个方向的 PLC 变形带均与拉伸轴成约  $60^\circ$  的夹角，这与无自然时效试样表现一致，可见自然时效时间对 PLC 变形带与拉伸轴间的夹角值并无明显影响。塑性变形前期试样 PLC 变形带主要为“/”方向传播，而后产生了 PLC 变形带转向行为，直至试样断裂。应力锯齿簇阶段 PLC 变形带表现出明显的传播特征，锯齿簇间的过渡方式多样，对应的空域行为各不相同。可将拉伸曲线划分为 5 个应力锯齿簇  $C_i$

和 5 个过渡段  $T_i$ ，如图 7(b) 所示。其中， $T_1$  为第一次出现 PLC 效应时拉伸曲线平滑段与第一个锯齿簇间的过渡区，从此刻起，拉伸曲线波动幅值逐渐增大，波动形式趋于复杂；并从此时刻起，PLC 变形带从试件一端形核，逐渐贯穿试件表面。过渡区  $T_2$  存在大量应力波动，且应力波动幅值较大，此时，在试件的端部形成了新的 PLC 变形带，并在短时间内发生了自上而下的反向传播行为。 $T_2$  阶段有完整的 PLC 变形带形核、传播过程，因此也可以认为该处形成了小的锯齿簇；但由于其出现时间极短，本文在分析中将其归类为过渡区的特殊空域行为。 $T_3$  阶段无明显的过渡，在  $C_2$  结束瞬间产生远大于  $C_2$  平均幅值的应力跌落，并在之后的变形过程中以此跌落的谷值为基形成锯齿簇  $C_3$ ，此时在试件上端形成了新的 PLC 变形带并在随后变形中于  $C_3$  阶段沿试件反向传播。过

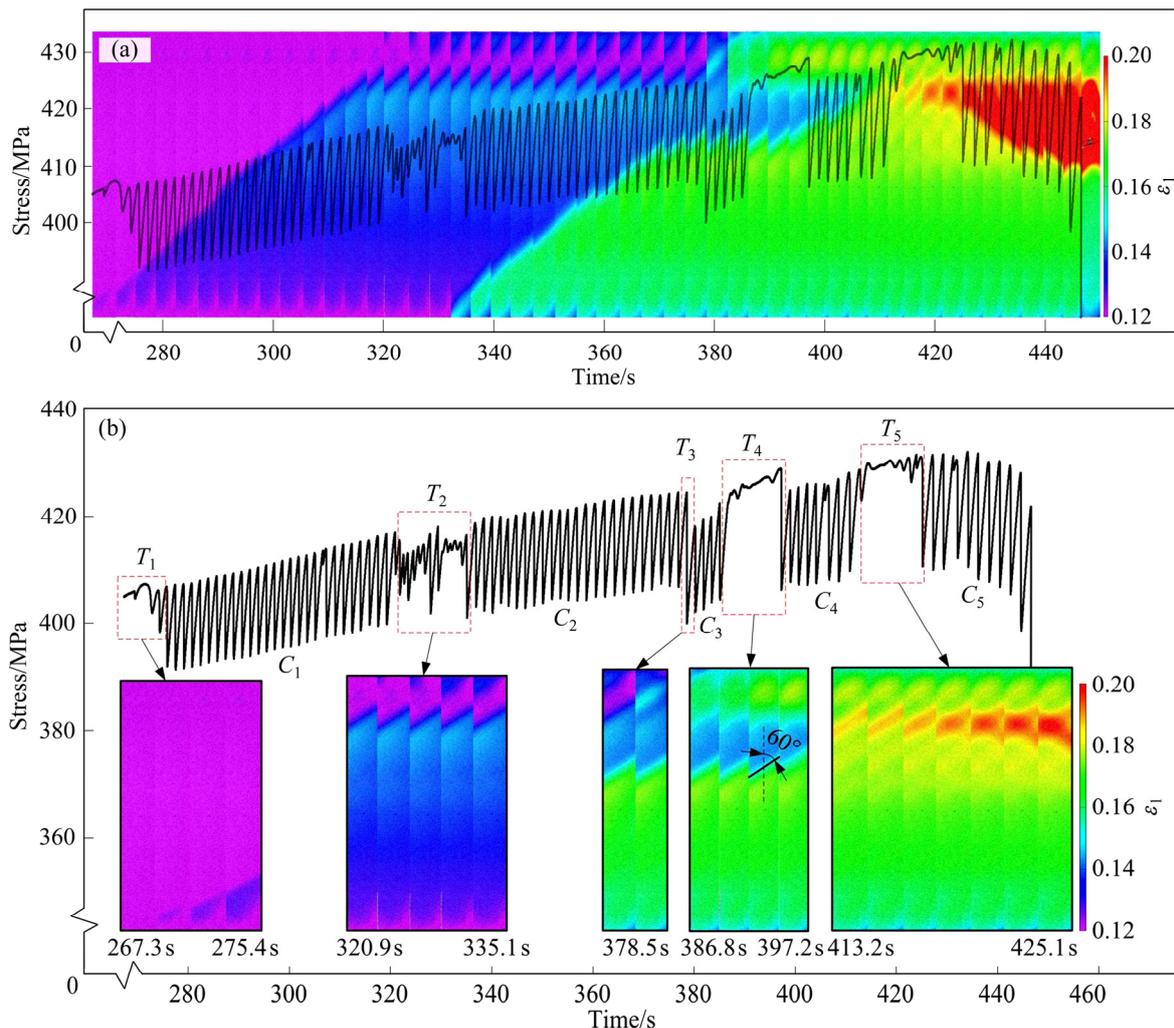


图 7 AA7075 板材试样 PLC 效应时空变换实测图( $t_{NA}=24$  h)

Fig. 7 Temporal and spatial evolutions of deformation of PLC effect of AA7075 sheet ( $t_{NA}=24$  h): (a) Stress serrated and PLC bands position; (b) Special PLC bands behavior of transition section of stress serrated

渡区  $T_4$  应力曲线较光滑, 此时 PLC 变形带基本未发生变化, 无异常空域行为。过渡区  $T_5$  应力跳动幅值逐渐递增, 此阶段 PLC 变形带发生转向行为, PLC 变形带方向由 “/” 方向转变为 “\” 方向。由图 7(b) 可见, PLC 变形带转向时, 转向变形带首先在旧 PLC 变形带中心位置形核, 导致旧 PLC 变形带中心位置的宽度逐渐增大, 随后转向带由形核位置沿与旧带交叉方向扩展, 直至贯穿试样表面, 变形带转向完成。PLC 变形带的转向行为通常认为是为了补偿由于单一方向 PLC 变形带而带来的额外弯矩<sup>[22-23]</sup>。

### 3 自然时效对 PLC 效应形成的板面质量影响

PLC 效应会显著增加板材塑性变形的不均匀

性, 在试样表面形成局域化变形带, 使试件表面变得粗糙, 严重影响工件的表面质量。本文通过 3D-DIC 观测并提取板面厚度方向位移, 以及变形试样表面轮廓测量, 分析自然时效参数变化对 PLC 效应形成的板面不平度的影响, 优选工艺参数, 从而解决 PLC 效应形成的板面质量问题。

#### 3.1 拉伸试样表面波度

通常按相邻两波峰或波谷的波距划分为: 波距大于 10 mm 属于形状误差; 波距小于 1 mm 属于表面粗糙度; 波距介于 1~10 mm 之间属于表面波度。可见, PLC 效应使拉伸试样产生的表面缺陷为波纹。如图 8 所示, 引入 W 轮廓波度的算术平均偏差 ( $W_a$ )、轮廓总高度 ( $W_z$ ) 作为表征参数。

由图 8 可见, PLC 效应导致板材表面波度的峰、谷分布无明显规律。当  $t_{NA}=0$  h 时, 试件表面波度

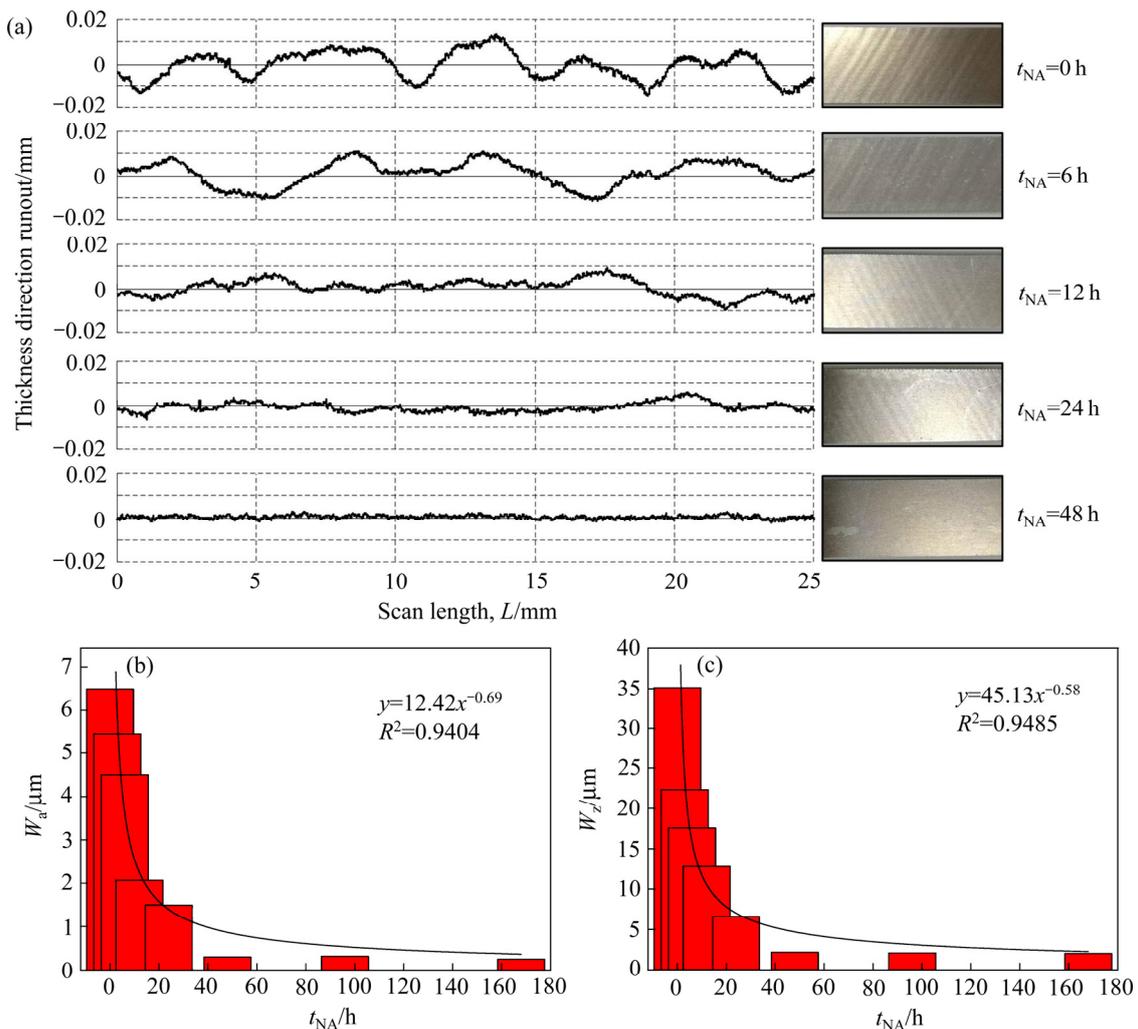


图 8 不同自然时效时间的试样表面波度

Fig. 8 Surface waviness of sample at different natural aging time: (a) Scanning curves of contour and macroscopic appearance of sheet surface; (b), (c) Parameter statistics of surface waviness with different natural aging time

波动最大, 纹路密集, 呈现明显的带状痕迹, 即  $W_a=6.5 \mu\text{m}$  且  $W_z=29.3 \mu\text{m}$ ; 随  $t_{\text{NA}}$  延长, 波度幅度减弱, 纹路密度减小, 直至  $t_{\text{NA}}=24 \text{ h}$  时, 仍有微弱波纹; 当  $t_{\text{NA}}=48 \text{ h}$  时, 试样表面扫描曲线无波动起伏现象, 宏观视野观测表面光滑, 无带状痕迹。  $W_a$  和  $W_z$  均随  $t_{\text{NA}}$  的延长呈幂指数函数规律下降, 当  $t_{\text{NA}} \geq 48 \text{ h}$  时,  $W_a=0.3 \mu\text{m}$  且  $W_z=2 \mu\text{m}$ , 并随  $t_{\text{NA}}$  延长而趋于稳定, 拉伸试样表面质量大幅提高。

### 3.2 PLC效应对试件表面的影响机理分析

根据 PLC 带变化形态, 可以将其归纳为两种类型: 带静态行为, 即 PLC 变形带产生后不传播, 包含不具有传播性质的 C 型带; 带动态行为, 即 PLC 变形带产生随变形沿试件表面传播, 包含连续传播的 A 型带和跳跃传播的 B 型带。试验通过 3D-DIC 提取了试样标记段长度方向中心线处的厚向位移时间历程, 可分别表述为以下两部分。

#### 3.2.1 带静态行为对板材表面的影响

当  $t_{\text{NA}}=0 \text{ h}$  时, 为 C 类型 PLC 效应, 属于带静态行为。图 9(a) 为  $t_{\text{NA}}=0 \text{ h}$  试件等时间间隔(1 s)的应变时序云图。以  $t_0=200 \text{ s}$  时的厚向位移状态作为参考, 图中白色箭头所示位置为新 PLC 变形带的出现位置。可见, 在 PLC 变形带产生瞬间, 其对应位置处的质点产生厚向位移, 在区域表面以“凹

陷”方式产生带状沟壑。PLC 变形带作用位置随机, 产生周期短对试件表面质量的影响最大。因此, 带静态行为对表面质量的影响最大。

#### 3.2.2 带动态行为对板材表面的影响

当  $t_{\text{NA}}=24 \text{ h}$  时, 为 B 类型 PLC 效应, 属于带动态行为。图 9(b) 为  $t_{\text{NA}}=24 \text{ h}$  试件等时间间隔(8 s)的应变时序变化。以  $t_0=270 \text{ s}$  时的厚向位移状态作为参考。PLC 变形带在试件表面掠过时, 在 PLC 变形带对应的局部区域形成“坍塌”区, 并随着变形发展“坍塌”区连续扩张, 直至传播过程结束。由标记段的厚向位移时序曲线可见, PLC 变形带沿试件表面传播后的表面形貌与掠过前的参考形貌基本没有变化。可见, 传播行为引发板材表面质点产生连续、均匀的厚向位移, 对表面形貌影响较弱。由此可见, 带动态行为对表面质量的影响较小。

因此, AA7075 板材固溶水淬后的 PLC 效应随自然时效时间延长而减弱, 甚至消失的原因包含两个方面: 一方面是由于  $t_{\text{NA}}$  延长 PLC 类型由 C 类转化为 B 类, PLC 变形带类型由带静态行为转变为带动态行为, 对表面形貌影响减弱。另一方面, 随  $t_{\text{NA}}$  延长临界应变不断后移, PLC 效应作用时间逐渐减少, 对板面作用效果减弱。因此, 自然时效时间的延长可以减弱或消除拉伸板面的 PLC 效应。

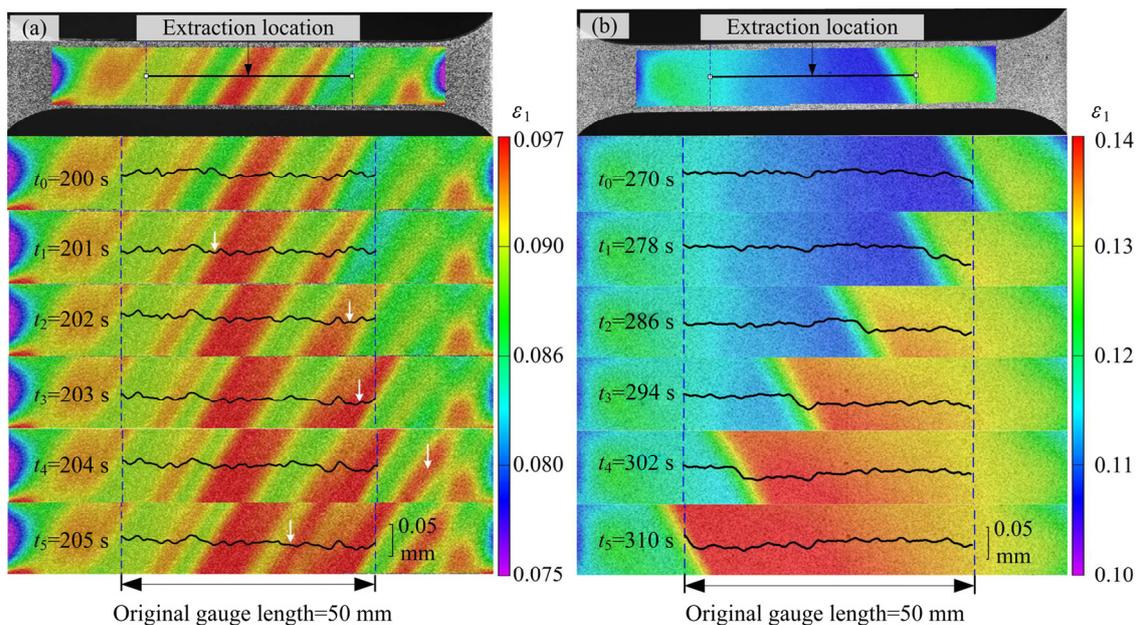


图 9 不同 PLC 变形带行为的厚向位移变化

Fig. 9 Variation of displacement in thickness direction corresponding to behavior of different PLC bands: (a) Static behavior of PLC bands; (b) Dynamic behavior of PLC bands

综上所述, 通过合理的控制板材固溶水淬后自然时效时间能够有效避免 PLC 效应形成的板面成形缺陷。对于 AA7075 板材固溶水淬后( $\theta_S=480\text{ }^\circ\text{C}$  且  $t_S=0.5\text{ h}$ ), 当  $t_{NA}>48\text{ h}$  时, 板材最大力伸长率为 21.5%, 较原材提高了 2 倍, 可满足一般板件室温冲压成形需求, 且有效避免了 PLC 效应, 板材变形后表面无波纹缺陷。因此, 自然时效处理作为高强铝合金板材低温形变热处理工艺中的重要工艺环节, 可以有效避免 PLC 效应的产生, 在生产中应予以重视。

## 4 结论

1) AA7075-T6 板材经固溶水淬处理( $\theta_S=480\text{ }^\circ\text{C}$  且  $t_S=0.5\text{ h}$ ), 随自然时效时间延长, 板材强度呈幂指数规律向原材性能回复, 板材伸长率以先减后增的数值变化最终稳定在 22% 左右, 板材力学性能可满足一般板件的室温成形需求。

2) AA7075-T6 板材经固溶水淬( $\theta_S=480\text{ }^\circ\text{C}$  且  $t_S=0.5\text{ h}$ )处理后直接拉伸变形, 板面会因 PLC 效应而形成表面波度, 呈现明显的带状痕迹; 然而, 经过自然时效处理可减弱或消除( $t_{NA}\geq 48\text{ h}$ ) PLC 效应形成的表面波度缺陷, 且表面波度轮廓的算术平均偏差和轮廓总高度随自然时效时间延长呈幂指数规律下降, 并趋于稳定值  $W_a=0.3\text{ }\mu\text{m}$  且  $W_z=2\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 对于 PLC 变形带无传播性质的带静态行为, PLC 变形带产生周期短, 作用位置随机, 对试件表面的影响最大; 对于 PLC 变形带有明显传播特征的带动态行为, PLC 变形带传播引发板材表面质点产生连续、均匀的厚向位移, 对表面质量影响小。

## REFERENCES

- [1] 袁丁玲, 陈送义, 周亮, 等. 高 Zn 超强 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的铸态及均匀化态组织[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(12): 2393-2403.  
YUAN Ding-ling, CHEN Song-yi, ZHOU Liang, et al. Microstructures in as-cast and as-homogenized Al-Zn-Mg-Cu alloys with high zinc ultra-high strength[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(12): 2393-2403.
- [2] 钱鹏伟, 邓运来, 张臻, 等. 自然时效对 Al-Zn-Mg 合金型材抗应力腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1542-1550.  
QIAN Peng-wei, DENG Yun-lai, ZHANG Zhen, et al. Effect of natural aging time on stress corrosion cracking of aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(8): 1542-1550.
- [3] AOBA T, KOBAYASHI M, MIURA H. Effects of aging on mechanical properties and microstructure of multi-directionally forged 7075 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 700: 220-225.
- [4] DONG Guo-jiang, BI Jiang, DU Bing, et al. Research on AA6061 tubular components prepared by combined technology of heat treatment and internal high pressure forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 126-138.
- [5] DONG Guo-jiang, ZHAO Chang-cai, ZHAO Jian-pei, et al. Research on technological parameters of pressure forming with hot granule medium on AA7075 sheet[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(4): 765-777.
- [6] COTTRELL A H. Dislocations and plastic flow in crystals[J]. American Journal of Physics, 1954, 22(4): 242.
- [7] JIANG H, ZHANG Q, CHEN X, et al. Three types of Portevin-Le Chatelier effects: Experiment and modelling[J]. Acta Materialia, 2007, 55(7): 2219-2228.
- [8] CAI Y L, YANG S L, WANG Y H, et al. Characterization of the deformation behaviors associated with the serrated flow of a 5456 Al-based alloy using two orthogonal digital image correlation systems[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 664: 155-164.
- [9] NAKAMURA T, SASAKI T, YOSHIDA S. Analysis of Portevin-Le Chatelier Effect of Al-Mg Alloy by Electronic Speckle Pattern Interferometry[M]. Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics, Volume 3. Springer International Publishing, 2014: 109-117.
- [10] MEHENNI M, AIT-AMOKHTAR H, FRESSENGEAS C. Spatiotemporal correlations in the Portevin-Le Chatelier band dynamics during the type B-type C transition[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 756: 313-318.
- [11] ZDUNEK J, BRYNK T, MIZERA J, et al. Digital image correlation investigation of Portevin-Le Chatelier effect in an aluminium alloy[J]. Materials Characterization, 2008,

- 59(10): 1429–1433.
- [12] CHENG T, XU X, CAI Y, et al. Investigation of Portevin-Le Chatelier effect in 5456 Al-based alloy using digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 89–92.
- [13] BERNARD C, COËR J, LAURENT H, et al. Relationship between local strain jumps and temperature bursts due to the Portevin-Le Chatelier effect in an Al-Mg alloy[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(6): 1025–1032.
- [14] CAI Y, ZHANG Q, YANG S, et al. Experimental study on three-dimensional deformation field of Portevin-Le Chatelier effect using digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(7): 1243–1255.
- [15] BENALLAL A, BERSTAD T, BØRVIK T, et al. An experimental and numerical investigation of the behaviour of AA5083 aluminium alloy in presence of the Portevin-Le Chatelier effect[J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(10): 1916–1945.
- [16] 符师桦, 蔡玉龙, 张青川, 等. 自然时效对 6061 铝合金锯齿形屈服的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(12): 3728–3732.
- FU Shi-hua, CAI Yu-long, ZHANG Qing-chuan, et al. Influence of nature aging on serrated yielding of 6061 Al-based alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(12): 3728–3732.
- [17] 江慧丰. Al 合金中塑性失稳现象(Portevin-Le Chatelier 效应)的实验和机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 39–47.
- JIANG Hui-feng. On the plastic instabilities phenomenon (Portevin-Le Chatelier effect) in Al alloys: Experiments and theoretical investigations[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 39–47.
- [18] 曹鹏涛. 铝合金中 Portevin-Le Chatelier 效应的多尺度实验和机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 28–47.
- CAO Peng-tao. Multi-scale experimental and theoretical investigations on the Portevin-Le Chatelier effect in Al alloys[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 28–47.
- [19] MENG X C, LIU B, LUO L, et al. The Portevin-Le Chatelier effect of gradient nanostructured 5182 aluminum alloy by surface mechanical attrition treatment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(12): 2307–2315.
- [20] ANANTHAKRISHNA G. Negative strain rate sensitivity and the critical nature of type A bands in the Portevin-Le Chatelier effect[J]. *Journal of Computer-Aided Materials Design*, 2007, 14(1): 5–14.
- [21] TIAN Ni, WANG Guang-dong, ZHOU Yi-ran, et al. Study of the Portevin-Le Chatelier (PLC) characteristics of a 5083 aluminum alloy sheet in two heat treatment states[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2018, 11(9): 1533.
- [22] ZHEMCHUZHNIKOVA D, LEBYODKIN M, YUZBEKOVA D, et al. Interrelation between the Portevin Le-Chatelier effect and necking in AlMg alloys[J]. *International Journal of Plasticity*, 2018, 110: 95–109.
- [23] KAHRIMANIDIS A, WORTBERG D, MERKLEIN M. Investigation of the Portevin-Le Chatelier effect in AlMgSi-tailored heat treated blanks[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 639(8): 123–130.

## Effect of natural aging on Portevin-Le Chatelier effect of AA7075 sheet

DONG Guo-jiang<sup>1</sup>, SUN Yu-fei<sup>2</sup>, FAN Bo-cheng<sup>1</sup>, WANG Gui-kai<sup>1</sup>, ZHAO Chang-cai<sup>2</sup>

- (1. Hebei Key Laboratory of Special Delivery Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;  
2. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of Education of China,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Based on the low temperature thermo-mechanical treatment process of high-strength aluminum alloy, the uniaxial tensile test was combined with three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) to study the effect of natural aging on the Portevin-Le Chatelier (PLC) effect of AA7075 sheet. The temporal and spatial evolutions of deformation in the full field of specimen surface of type B and type C were observed. Contour scanning and 3D-DIC were used to study the effect of PLC effect on the surface quality of deformed samples. The results show that with the extension of natural aging time, the serrations in the stress-strain curves and PLC bands characteristics generated by PLC effect change from type C to type B until disappear; at the same time, the surface waviness of the deformed sample weakens. For the static behavior of the PLC bands, the PLC bands has a random position and short production cycle, which has a great influence on the surface quality of the specimen. For the dynamic behavior of the PLC bands, the propagation of the PLC bands causes a continuous and uniform thick displacement of the sheet surface, which has little effect on the surface quality.

**Key words:** 7075 aluminum alloy; Portevin-Le Chatelier (PLC) effect; temporal and spatial evolutions; surface quality

---

**Foundation item:** Project(51775481) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (E2019203418) supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China; Project(ZD2017078) supported by the Key Project of Science and Technology Plan of Hebei Higher School of Education Department, China

**Received date:** 2019-11-04; **Accepted date:** 2020-12-20

**Corresponding author:** DONG Guo-jiang; Tel: +86-13780479660; E-mail: dgj@ysu.edu.cn

(编辑 何学锋)