

文章编号: 1001-4888(2021)03-0340-10

快速傅里叶变换分析 6061 铝合金 在不同自然时效时间下的 PLC 效应^{*}

许建飞, 符师桦, 黄锋, 秦培成

(海南大学 土木工程学院, 海南海口 570228)

摘要: 快速傅里叶变换对复杂波形曲线的频率组成分析具有高效性和独特性。利用该方法对不同自然时效时间的 6061 铝合金在恒定应变率下的拉伸应力曲线, 进行了整体及局部的频谱分析, 实验发现, 随自然时效时间延长, 材料的屈服强度和抗拉强度逐渐增大, 应力跌落幅值逐渐减小, 应力锯齿类型由 B 型向 A 型过渡。整体频谱分析中, 自然时效 0~2h 在 1.9Hz 处呈峰状分布, 峰频和峰值随自然时效时间延长而减小; 自然时效 3~7h 频谱上无峰状。局部频谱分析中, 自然时效 0~1h 的峰值先逐渐增大后趋于平稳, 二者的峰频先逐渐减小后趋于平稳; 自然时效 2h 的峰值和峰频保持平稳。此外, 本文提出一种简化频谱分析方法, 获得了最优简化频谱曲线, 更好地呈现了应力锯齿的频谱特征。结合动态应变时效微观机制, 从溶质原子浓度与可动位错之间“钉扎-脱钉”的相互作用角度, 对应力锯齿的频谱特征进行了解释。

关键词: Portevin-Le Chatelier 效应; 自然时效; 动态应变时效; 快速傅里叶变换

中图分类号: O348; O17 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-20-150

0 引言

铝合金拥有优良的力学性能, 在诸多工业领域得到了广泛应用。许多铝合金材料在服役过程中会发生 Portevin-Le Chatelier (PLC) 效应, 给材料带来表面粗糙化和延性降低等负面影响, 限制了材料的应用。PLC 效应是一种塑性失稳现象, 在应力-应变曲线上表现为重复的应力锯齿^[1-3], 伴随着应力锯齿, 试件会形成局域化的塑性变形带, 称为 PLC 带^[4,5]。普遍认为引起 PLC 效应的微观机制是动态应变时效 (Dynamic Strain Aging, DSA)^[6-8], 即溶质原子与可动位错的相互作用。微观上可动位错的运动是不连续的。可动位错在滑移过程中会被林位错、晶界等所阻碍。在此过程中, 溶质原子以“管扩散”的方式向可动位错偏聚并对其进行额外的钉扎, 宏观上引起应力上升。可动位错在外加应力场的作用下, 以热激活的方式克服溶质原子的钉扎从而实现脱钉并继续向前运动。这种可动位错与溶质原子间的反复“钉扎-脱钉”过程, 在宏观上表现为锯齿形屈服现象。

不同实验条件下, 应力曲线上通常表现为三种不同的应力锯齿类型^[9,10]: A 型锯齿, 在高应变率或低温下, 应力锯齿稀疏通常位于应力曲线包络上方; C 型锯齿, 在低应变率或高温下, 应力锯齿密集且通常位于应力曲线包络下方; B 型锯齿, 在中等应变率或温度下, 应力锯齿在上下应力包络线之间振荡, 锯齿密度介于 A 类与 C 类之间。对应着这三种锯齿形态, 通过电子散斑干涉法^[11,12]、数字剪切散斑干涉法^[13]、数字图像相关法^[14]等方法可观测到试件表面出现的三种典型 PLC 带运动特征: A 类 PLC 带, 连

^{*} 收稿日期: 2020-07-29; 修回日期: 2020-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(11802080)和海南省自然科学基金(118QN182 和 520CXTD433)资助

通信作者: 符师桦(1985-), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 金属材料力学行为。Email: fushihua@hainanu.edu.cn

续沿拉伸方向传播;C类 PLC 带,在试件表面随机成核;B类 PLC 带,沿拉伸方向跳跃传播。

应力-应变曲线是材料微观作用的宏观表现,对其分析一直是 PLC 效应的研究重点。学者们基于应力-应变(时间)曲线提取出应力跌落的幅值和时间等特征参数,并对这些特征参数进行了大量的统计分析。在 Al-Cu 和 Al-Mg 合金中,应力跌落幅值、跌落时间和重加载时间均随加载过程逐渐增大且随应变率增大而减小^[15,16]。在对 Al-Cu 合金和 718 铬镍铁合金应力跌落幅值的统计分布研究中发现,在较高应变率时应力跌落幅值呈幂律分布,而在中等或较低应变率时呈高斯分布^[17,18]。在不同应变率下应力曲线的多重分形研究中,发现 PLC 效应具有多重分形特征,这表明材料的内在动力系统随应变率减小是由自组织临界向混沌过渡的^[19]。

大量研究发现,析出相对 PLC 效应有着重要影响。在 Al-Cu 合金中的析出相含量对 PLC 效应的研究中,发现应力跌落幅值随析出相含量的增大先增大后减小^[20]。在对 Ni 基高温合金的研究中,发现随着析出相含量的增大,应力锯齿的类型会从 A+B 型转为 C 型,临界应变先增大后减小^[21]。在 Ni-Co 基高温合金的宏观变形行为研究中,发现高 γ' 相含量试件的局部变形比低 γ' 相含量的更严重,并且其 PLC 带的带宽要更大^[22]。本课题组前期研究了不同自然时效时间对 6061 铝合金 PLC 效应的影响,结果表明溶质原子浓度随自然时效时间延长而降低,并在自然时效 2h 后达到饱和^[23]。

PLC 效应的研究通常集中在时域和空域两个方面,其频域特征并未受到关注,研究工作十分匮乏。Yuan 等在 5052 铝合金的频谱研究中发现了不同应变率下应力曲线的频谱分布迥异,该结果从频域方面为本领域带来了新的认识^[24];然而,该工作并未考虑不同应变率下时间尺度和应变尺度的对应关系,即当应力-应变曲线对应变率不敏感时,不同应变率下所得到频谱存在比例缩放关系。此外,频谱特征与动态应变时效之间的联系仍需进一步研究。

为此,本实验采用 6061 铝合金,通过固溶处理并调整自然时效时间,以形成不同的析出相和溶质原子浓度。通过快速傅里叶变换分析不同自然时效时间下试件的拉伸曲线,提取频谱峰值、峰频等特征,分析频谱特征随自然时效时间的演化规律。在上述研究的基础上,对拉伸曲线进行窗口傅里叶分析,获取每个窗口中应力曲线的各频谱特征量,分析这些特征量随变形过程的演化规律。最后,将对拉伸曲线分析得到的整体和局部频谱特征量与动态应变时效机制相结合,分析讨论各频谱特征量所代表的物理意义。

1 实验和快速傅里叶变换

1.1 实验

实验材料为 6061 铝合金,化学成分为(质量分数,%): Si 0.4~0.8, Mg 0.8~1.2, Fe 0.7, Cu 0.1~0.4, Mn 0.15, Cr 0.04~0.35, Zn 0.25, Ti 0.15, Al 为基体。拉伸实验试件标记段尺寸为 55mm×20mm×3mm。拉伸方向与压延方向一致。实验前,试件均经过 500℃保温 3h,通过水淬冷却到室温。根据自然时效淬火后试件的时间差异分成不同的组,再进行拉伸实验。自然时效时间分别为:0(淬火后不经自然时效,直接进行拉伸实验)、1h、2h、3h、5h 和 7h。实验恒定应变率为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。拉伸的同时,同步记录载荷和时间信号。为保证实验数据的可靠性,对每一自然时效时间下的实验次数不少于 3 次。

1.2 快速傅里叶变换

傅里叶变换是从复杂信号中提取各种特征信息的常用方法,广泛应用于数字通信、信号分析、密码学、图像处理等领域^[25-28]。在信号处理中,傅里叶变换将时域信号转换到频域信号进行分析,从而观察频率和振幅的变化,对研究时域信号的振动特性具有重要意义。从数学的角度上去看,傅里叶变换是将任意函数 $f(t)$ 分解成正弦基函数的线性组合,其方程为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 是时域信号的函数; $F(\omega)$ 是频域信号的函数; ω 是频率。

快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)是计算离散傅里叶变换的高效算法,其作用是将

离散的时域信号转换为离散的频谱信号。对于包含 N 个数据的离散信号,经 FFT 处理后,得到 N 个复数,包含 N 个频率下对应振幅和相位信息。在频谱中,横轴为频率,纵轴为振幅。由于 FFT 结果具有对称性,通常只取前一半结果。

2 实验结果

不同自然时效时间下拉伸实验得到的应力-时间曲线如图 1 所示。由图可以观察到,不同自然时效时间下应力-时间曲线弹性阶段的斜率基本保持一致,表明自然时效时间不影响材料的弹性模量。随着自然时效时间延长,材料的屈服强度和抗拉强度逐渐增大。从局部放大图(如图 1 左插图)可以看出,在塑性起始阶段,自然时效 0~2h 试件的应力-时间曲线上应力锯齿较密,应力跌落幅值较小;自然时效 3~7h 的试件应力-时间曲线出现少量锯齿。在塑性中后期,如图 1 右插图,自然时效 0~2h 试件的应力-时间曲线上锯齿较密,大部分表现为有规则的锯齿波动;自然时效 3~7h 试件的应力-时间曲线上锯齿很疏。此外,还发现自然时效 0~2h 的试件应力-时间曲线的锯齿波动性比自然时效 3~7h 的都要大。依据锯齿类型的分类,自然时效时间 0~1h 的试件应力-时间曲线在上下包络之间振荡,属 B 型锯齿;自然时效 3~7h 的试件应力曲线位于下包络线上方,属于 A 型锯齿;自然时效 2h 的试件应力曲线在塑性前期位于下包络线上方,进入塑性中期后,应力曲线在上下包络之间振荡,属 A+B 型锯齿。

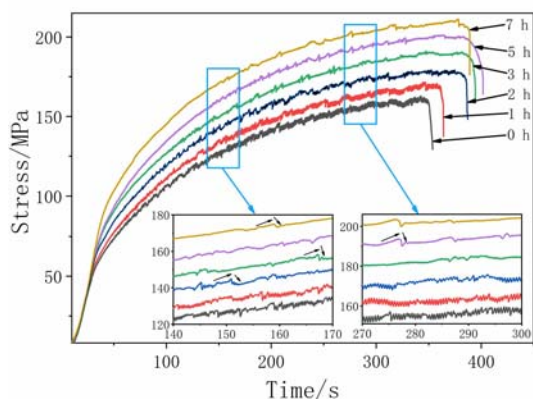


图 1 不同自然时效时间的应力-时间曲线

Fig. 1 Stress-time curves at different nature aging time

有曲线均选取 50~350s 区间进行分析,一方面略去一致的弹性阶段及应力锯齿发生之前的光滑段,另一方面消除颈缩附近材料断裂行为的影响。

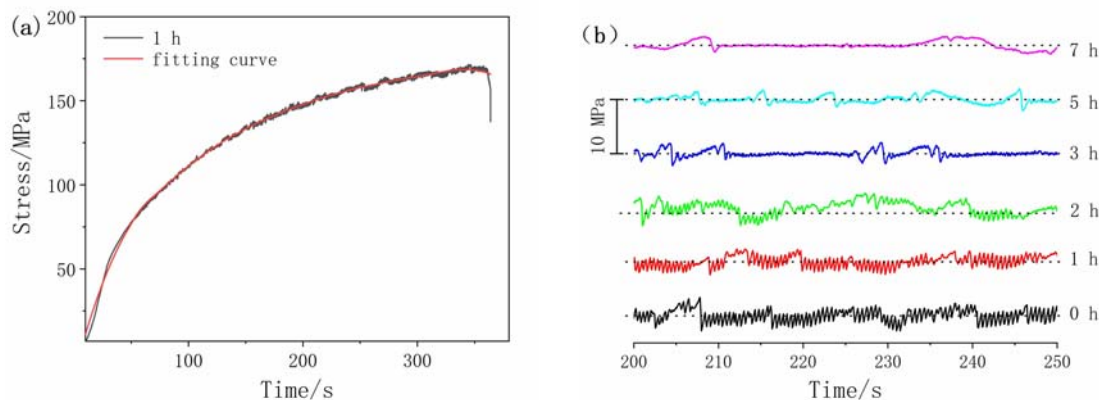


图 2 (a)移动平均拟合曲线示意图;(b)移动平均相减得到的应力-时间曲线

Fig. 2 (a) comparison of original stress-time curve and fitting curve by moving average;

(b) stress-time curves by subtracting moving average

3 分析与讨论

3.1 整体频谱分析

对不同自然时效时间下拟合相减数据作 FFT 得到振幅-频率曲线,结果如图 3 所示。由图可以观察到,自然时效 0~7h 的频谱曲线类似于幂律分布。有趣的是,在中等频率处,自然时效 0h、1h 和 2h 的频谱曲线上出现峰状,且峰值随自然时效时间延长逐渐减小。在频谱分布曲线中,高频部分往往与外源噪声有关,低频部分与相减后残留的外部趋势有关。这里我们关注的是在低频和高频之间,能够表征 PLC 效应的峰状分布。自然时效 0~2h 频谱上有峰状,说明自然时效 0~2h 的应力锯齿具有较好的周期性;而自然时效 3~7h 的频谱曲线上没有出现峰状,说明自然时效 3~7h 的应力锯齿没有稳定的周期性。

通常周期性越好的信号,其频谱峰宽就越窄,类似于 δ 函数。实际上,由图 1 的局部放大图,可发现锯齿周期随拉伸过程不是固定的;另外,由于外部因素的扰动,周期会在峰值附近波动,其峰处分布大致满足高斯统计分布。为进一步研究峰值特征随自然时效时间的演化特征,采用高斯函数对各自然时效时间下多组数据的频谱峰值进行拟合,并提取峰值和峰频,结果如图 4 所示。由图可观察到,自然时效 0h 与 1h 试件的多组数据的平均峰频基本保持一致,峰频约为 1.9Hz;在自然时效 2h 时,峰频稍有减小,约为 1.8Hz。随自然时效时间延长,各自然时效的多组数据的平均峰值逐渐减小。由图 3 可观察到,峰附近的振幅波动剧烈,造成拟合峰值要小于最大值,但这种拟合可以排除个别较大峰值的影响,且并不影响峰值随自然时效的演化趋势。

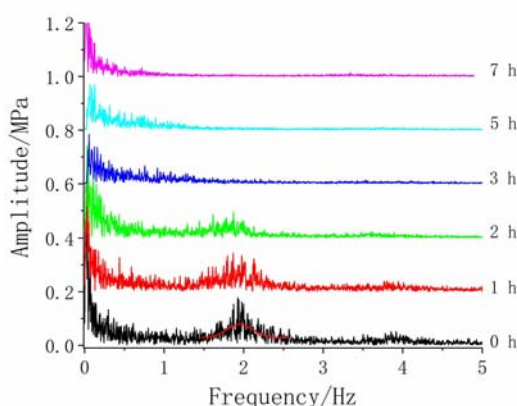


图3 不同自然时效时间下整体 FFT 结果
(为便于观察,依次上移 0.2MPa)

Fig. 3 FFT results of whole range at different nature aging time (shifted by 0.2 MPa for a better view)

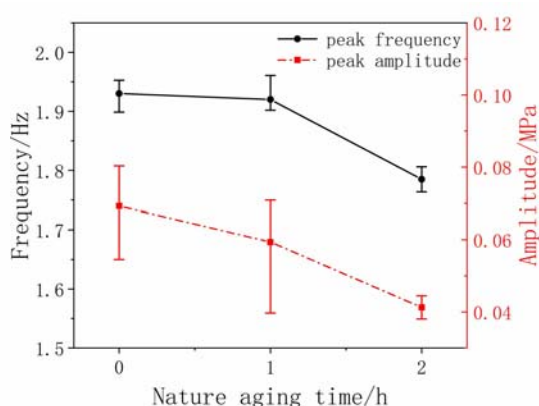


图4 不同自然时效时间下峰频和峰值

Fig. 4 The peak frequency and the peak amplitude at different nature aging time

峰频对应锯齿周期,表征溶质原子对可动位错钉扎的频繁程度。自然时效 0~2h 应力曲线的平均锯齿周期为 0.5~0.6s (图 2(b)),与其峰频 1.9Hz 相对应,这说明 PLC 效应的中心频率约为 1.9Hz。峰值对应着应力跌落幅值,表征溶质原子气团对可动位错的钉扎强度,但峰值和应力跌落幅值并不相等。对于理想的正弦周期信号,其频谱分布类似 δ 函数,峰值即为信号振幅。本实验中,应力锯齿的频谱近似呈高斯分布,其高斯峰具有一定的频率宽度。也就是说,应力锯齿是由此宽度范围内的多个频率分量共同叠加所得,峰值必然明显小于应力跌落幅值(约 2MPa)。

Al-Mg-Si 系合金的时效析出阶段依次为:高饱和固溶体、GP 区、针状 β'' 相、棒状 β' 相和片状 β 相^[29,30]。其中 GP 区的形成为基体溶质原子的主要析出阶段; β'' 相具有最好的强化效果,其含量最大时对应着峰值时效^[31]; β' 相强化效果较弱,其析出阶段材料强度逐渐降低; β 相为稳定相,强化效果更弱。本实验中,时效温度为室温远低于完全时效温度 180℃,自然时效时间(0~7h)也低于峰值时效时间(8h)^[32],且材料强度单调递增,可推断自然时效 0~7h 处于 GP 区和 β'' 相的析出阶段,并未进入到 β' 相

的析出阶段。

自然时效 0h, 溶质原子浓度高, 其峰值和峰频均较大; 自然时效 1h, 溶质原子浓度降低但还处于较高水平, 仍容易满足钉扎条件, 故其峰值减小而峰频变化微弱。自然时效 2h, 溶质原子浓度已处于较低水平, 使得钉扎所需的时间延长, 故其峰频和峰值均明显减小。自然时效 3~7h, 溶质原子浓度继续降低, 已接近饱和值, 其钉扎所需时间较长且钉扎强度较弱, 其 PLC 效应引起的峰频和峰值均很小, 已无法和其他原因的频谱区分, 故频谱无峰状特征。

3.2 局部频谱分布特征

整体 FFT 能够很好地描绘信号的整体频谱分布特征, 但存在局限性, 易忽略局部变化特征, 没能体现在频谱上随时间的变化。为此, 我们对整体曲线进行等区间划分, 整体曲线范围为 50~350s, 每个区间长度为 10s, 相邻区间的间隔时间为 5s (即半重叠), 对每个区间都进行 FFT 处理, 得到局部频谱特征及其随拉伸时间的变化, 如图 5 所示。

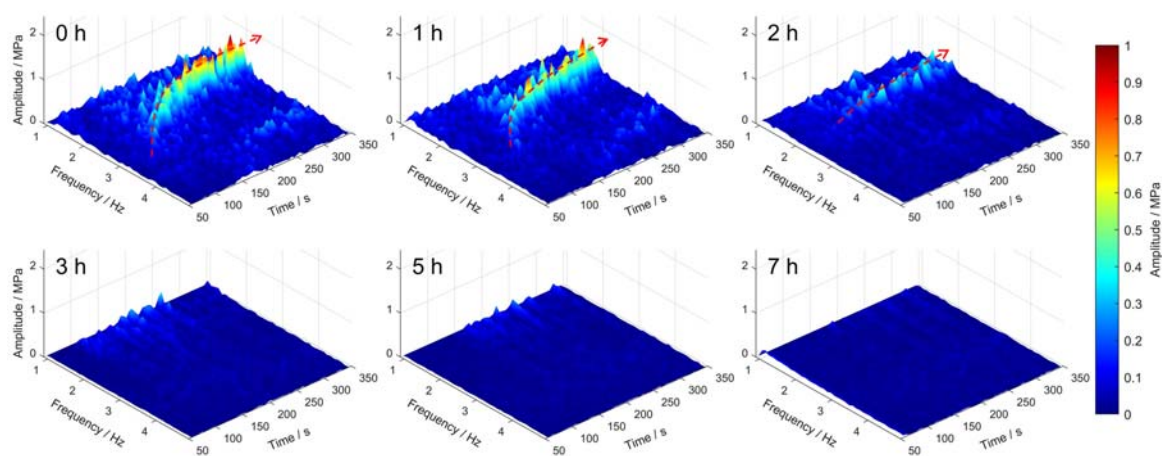


图 5 不同自然时效下分段 FFT 结果

Fig. 5 FFT results of subsections at different nature aging time

从图 5 中可观察到, 在塑性过程中, 自然时效 0~2h 的频谱上有峰状; 自然时效 3~7h 的频谱上没有出现峰状。通过比较自然时效 0~2h 频谱的峰状演化, 发现自然时效 0h 和 1h 的频谱分布随塑性过程的变化基本相同。二者在塑性起始阶段, 频谱上没有峰状, 随着塑性过程的继续, 频谱上开始出现峰状, 随后峰值有逐渐增大的趋势, 其峰频有逐渐减小的趋势。自然时效 2h 的频谱峰随塑性过程的变化, 与前者有明显的区别, 其塑性过程中出现峰状的时间偏后, 峰值明显小于前者, 且峰值及峰频在塑性过程中没有明显的变化趋势。

为了定量分析峰状的演化, 我们提取了自然时效 0~2h 包含各时段频谱峰的频率区间 (1.0~3.0Hz) 内的最大幅值及其对应的频率, 结果如图 6 所示。为了将反映 PLC 效应的峰状分布和外部干扰所引起的幅值波动区分开来, 以 0.25MPa 为阈值, 小于 0.25MPa 的峰值不予考虑。由图 6 可观察到, 自然时效 0h 和 1h 的峰值的变化趋势相同, 二者的峰值均在塑性过程中先增大后趋于平稳, 自然时效 1h 的峰值在塑性后期略低于 0h, 而自然时效 2h 的峰值明显低于自然时效 0h 和 1h, 其峰值变化趋势不明显, 在其均值附近做波动。在出现峰值之后, 自然时效 0h 和 1h 的峰频及变化趋势相同, 二者的峰频均逐渐减小并趋于稳定, 而自然时效 2h 峰频无明显的趋势变化, 仅在较小的频率区间波动。塑性前期, 峰值小于阈值, 其峰频变化杂乱不规则且波动范围大; 塑性中后期, 峰值大于阈值, 其峰频具有较稳定的变化趋势, 说明了此处阈值设置的合理性。

在加载过程中, 当可动位错拥有足够的能量越过障碍并挣脱溶质原子的钉扎时, 应力曲线上开始出现锯齿形振动。塑性起始阶段, 可动位错的密度较小, 溶质原子可以对可动位错迅速钉扎。此时, 溶质原子对可动位错形成钉扎较容易, 应力锯齿频率较大; 由于可动位错的密度小, 溶质原子对可动位错的

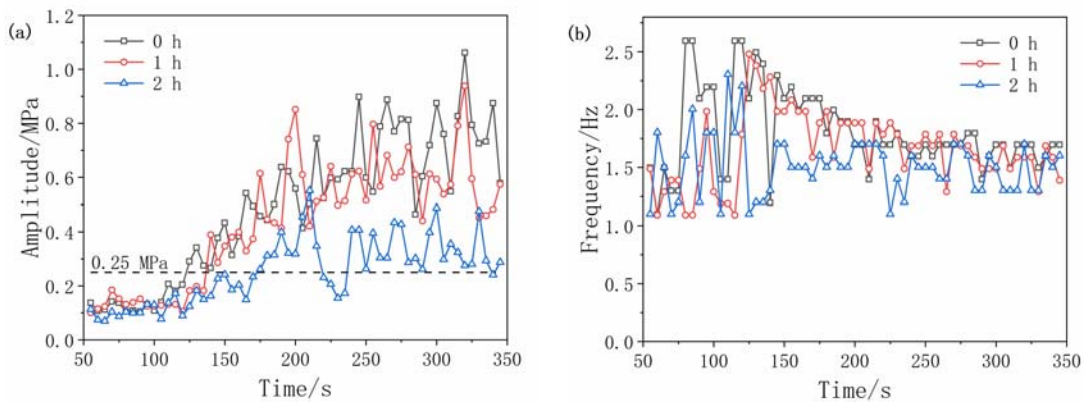


图6 自然时效0~2h峰值和峰频的演化

Fig. 6 Evolutions of peak amplitude and peak frequency at nature aging time of 0~2h

钉扎强度小,从而引起的应力跌落幅值较小。自然时效0~1h的试件在塑性前期,频谱上表现为从没有峰状到有峰状,其峰值较小,峰频较大。在塑性中期,可动位错的密度逐渐增大,使得溶质原子对可动位错的钉扎强度增大。此时,可动位错若要挣脱溶质原子的钉扎,就需要等待更长的时间,以获得足够的能量,从而导致溶质原子对可动位错钉扎的频繁程度降低。在频谱上表现为峰频逐渐减小,峰值逐渐增大。当塑性阶段进入后期,位错密度相对稳定,使溶质原子与可动位错动态的交互趋于稳定。在频谱上表现为峰值的增加趋势变缓,峰频的减小趋势变缓,最终均趋于稳定。对于自然时效2h,因溶质原子浓度减小,在某一时刻后,溶质原子对可动位错的钉扎强度不随可动位错密度的增加而发生变化,因此,自然时效2h在频谱上表现为从没峰状到有峰状,之后并一直保持,且峰值和峰频无明显趋势变化。在自然时效2h之后,溶质原子浓度的大幅度减小,使试件中溶质原子无法对可动位错形成有效的钉扎,因此,需要等待较长时间,才能完成对可动位错的钉扎,在频谱上表现为无明显峰状分布。

3.3 基于功率守恒的简化频谱分析

前述整体频谱分析中,自然时效0~2h下,应力锯齿频谱的峰状具有一定频率宽度,在此频率宽度范围以外的部分主要是由应力整体趋势和噪声所引起的。为了更好地表征频谱峰值与应力锯齿之间的对应关系,以及获取 PLC 效应在频谱上的简化分布特征,我们基于功率守恒提出了一种简化频谱分析方法。该方法的基本思想为:保证总功率在一定频率范围内恒定,并将其施加在该频率范围的中心处,再根据总功率求得简化振幅。其具体表达式为

$$G(\theta) = \left(\sum_{\theta - \frac{s}{2}}^{\theta + \frac{s}{2}} A^2(\omega) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \theta = \frac{s}{2} + ns, \quad n = 0, 1, 2, \dots, [\omega_{\max}/s] \quad (2)$$

式中: A 为振幅; ω 为频率; s 为频率宽度; θ 为中心频率; G 为简化振幅。比较不同频率宽度 s 时所获得的简化频谱曲线,可以寻找出将 PLC 效应在频谱上表征的最优简化结果。

自然时效0~7h的FFT结果和在不同频率宽度 s 下的简化分布曲线,如图7所示。以自然时效0h的结果为例(图7(a)),当频率宽度 s 过小时(0.02Hz),简化频谱曲线描绘得过于详细,接近原始FFT分布,没能起到有效的简化作用。当频率宽度 s 过大时(1.0Hz),简化振幅会夹杂反映 PLC 效应频率宽度外的高低频成分,使简化频谱的结果不够准确,甚至会把反映 PLC 效应的频谱峰淹没。只有简化频谱分布曲线在反映 PLC 的峰处有明显的峰,并且峰的宽度较窄时,才可以认为所选取的 s 是最优简化频率宽度。通过比较不同频率宽度 s 的简化频谱曲线,发现在 $s=0.20\text{Hz}$ 时为自然时效0h的最优简化频率宽度,其简化频谱曲线在1.9Hz处的峰很尖,可将 PLC 效应在频谱上简单明了地表示出来。同样地,通过比较不同频率宽度 s 时自然时效1h和2h的简化频谱分析结果(对应图7(b)(c)),发现对于自然时效1h, $s=0.25\text{Hz}$ 时以及自然时效2h, $s=0.30\text{Hz}$ 时为最优简化频率宽度。另外,还比较了自然时效3h、5h和7h在多个频率宽度 s 时的简化频谱,除了在较小的频率宽度时,其简化频谱均类似于幂律分布,因简化分布曲线特征相似,这里只给出了自然时效5h的结果,如图7(d)所示。

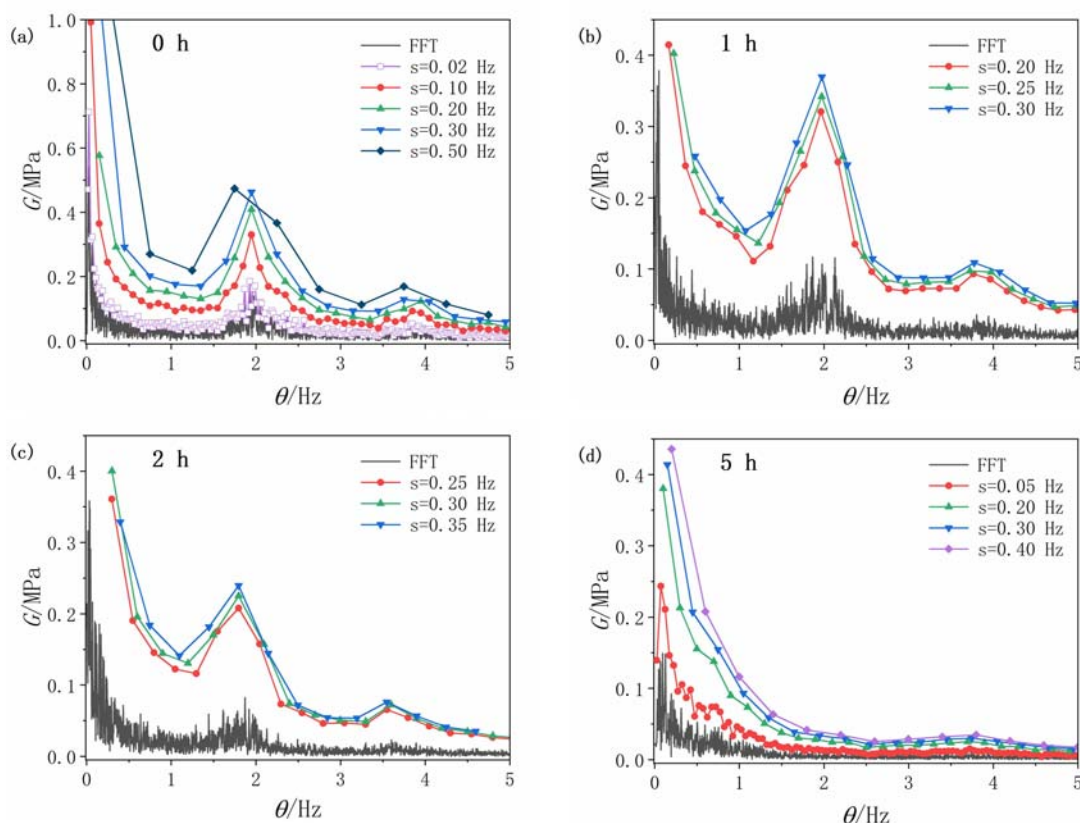


图 7 不同自然时效时间下的简化频谱

Fig. 7 Simplified spectrums at different nature aging time

应力锯齿类似于锯齿波,对于理想的锯齿波信号,其频谱峰值为原始信号幅度的 $1/\pi$ 。通过上述简化分析方法,得到的最优简化振幅约为平均应力跌落幅值的 $1/4$ 。最优简化振幅与原始 FFT 结果相比,更加接近理论值。其与理论值之间存在的微小差异,主要是外部干扰始终伴随着应力锯齿信号的始末,在转换到频域之后,其干扰影响充满整个频域,导致其频谱曲线与理想的频谱曲线之间,存在微小的幅值差异。因此,一定频率宽度内基于功率守恒方法得到的简化振幅,可与应力锯齿在该频率宽度内的平均应力跌落幅值相对应,表征了在该频率宽度溶质原子对可动位错的平均钉扎强度。观察最优简化分布曲线,可以发现自然时效 0~2h 在各自峰状分布的 2 倍中心频率处,有一个较小的峰状分布,其为应力锯齿信号的谐波。通过此方法得到的简化频谱分布曲线,可将频谱上易忽略的峰状分布信息突显出来,从而避免重要峰状信息的遗漏。

最优简化频率宽度反映了应力锯齿周期的一致性。同等实验条件下,外部因素对动态应变时效干扰的绝对量可视为相同。自然时效时间较短时,材料中溶质原子浓度较大,溶质原子对可动位错钉扎较强。此时,外部干扰相对量较小,溶质原子与可动位错之间的“钉扎-脱钉”规律性较强,产生的应力锯齿具有良好的周期性,因而在频谱上的峰较窄。随自然时效时间延长,溶质原子浓度逐渐减小,致使溶质原子对可动位错形成的钉扎强度减弱。此时,外部干扰相对量较大,其影响效果突显,减弱了应力锯齿周期性,造成频谱上的峰较宽。当溶质原子对可动位错的钉扎强度与外部干扰因素相当,甚至低于外部干扰因素时,应力锯齿被噪声淹没,故在自然时效 3~7h 的频谱上无峰状特征。

4 结论

本文利用快速傅里叶变换分析了不同自然时效时间下 6061 铝合金中 PLC 效应的整体和局部塑性过程,并提出了一种简化频谱分析方法。实验发现,随自然时效时间延长,材料的屈服强度和抗拉强度逐渐增大,应力跌落幅值逐渐减小,应力锯齿类型由 B 型向 A 型过渡。整体频谱分析中,自然时效 0~2h 在 1.9Hz 处呈峰状分布,峰频和峰值随自然时效时间延长而减小;自然时效 3~7h 没有峰状;局部频

谱分析中,自然时效 0h 和 1h 的频谱峰值随加载过程逐渐增大后趋于平稳,其峰频随加载过程逐渐减小后趋于平稳,而自然时效 2h 的峰值和峰频保持稳定。快速傅里叶变换对应力锯齿的频谱曲线描述过于详细,不能体现频谱峰值与应力锯齿之间的联系,而简化频谱能够更好地反映其与应力跌落幅值之间的对应关系。结合动态应变时效微观机制,从溶质原子浓度与可动位错之间“钉扎-脱钉”的相互作用角度,对应力锯齿的频谱特征进行了解释。快速傅里叶变换可以将离散时域信号转换到频域,对包含丰富力学行为的应力锯齿的分析具有高效性和独特性。

参考文献:

- [1] Wang Y, Xia L, Cao Y, et al. Imposition of electric current to promote the Portevin-Le Chatelier effect of CoCrFeNiMn high-entropy alloy at low temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 793: 139893.
- [2] Wang X G, Wang L, Huang M X. Kinematic and thermal characteristics of Lüders and Portevin-Le Chatelier bands in a medium Mn transformation-induced plasticity steel[J]. *Acta Materialia*, 2017, 124:17–29.
- [3] Luo S, Castany P, Thuillier S. Microstructure, thermo-mechanical properties and Portevin-Le Chatelier effect in metastable β Ti-xMo alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 756:61–70.
- [4] Feng X, Fischer G, Zielke R, et al. Investigation of PLC band nucleation in AA5754[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 539:205–210.
- [5] Zhemchuzhnikova D A, Lebyodkin M A, Lebedkina T A, et al. Unusual behavior of the Portevin-Le Chatelier effect in an AlMg alloy containing precipitates[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 639:37–41.
- [6] Soare M A, Curtin W A. Solute strengthening of both mobile and forest dislocations: the origin of dynamic strain aging in fcc metals[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(15):4046–4061.
- [7] Fu S, Cheng T, Zhang Q, et al. Two mechanisms for the normal and inverse behaviors of the critical strain for the Portevin-Le Chatelier effect[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(19):6650–6656.
- [8] Zhou P, Song Y, Hua L, et al. Mechanical behavior and deformation mechanism of 7075 aluminum alloy under solution induced dynamic strain aging[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759:498–505.
- [9] 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.
- [10] Xie J, Chen X P, Mei L, et al. Multifractal analyses of serrated flow in friction stir processed Al-Mg-Sc alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 786:139436.
- [11] Zhang Q, Jiang Z, Jiang H, et al. On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: an experimental study with digital speckle pattern metrology[J]. *International journal of plasticity*, 2005, 21(11): 2150–2173.
- [12] 刘颢文, 张青川, 项国富, 等. 高速 DSPI 研究 PLC 剪切带成核演化过程[J]. *实验力学*, 2006, 21(4):411–417 (LIU Haowen, ZHANG Qingchuan, XIANG Guofu, et al. Investigation on the nucleation of PLC shearing deformation band with high-speed DSPI method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2006, 21(4):411–417 (in Chinese))
- [13] 符师桦, 高越, 潘华烨, 等. 数字散斑相关法研究镍钴基高温合金中的 PLC 效应[J]. *实验力学*, 2012, 27(5): 581–586 (FU Shihua, GAO Yue, PAN Huaye, et al. Investigation on Portevin-Le Chatelier effect in a Ni-Co based superalloy base on digital speckle correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(5):581–586 (in Chinese))
- [14] Fu S, Gao Y, Cai Y, et al. Study on the out-of-plane deformation of the Portevin-Le Chatelier band by using digital shearography[J]. *Measurement*, 2015, 72:61–67.
- [15] 卢俊勇, 蒋震宇, 张青川. Al-4%Cu 多晶合金中锯齿形屈服现象的初步时序分析[J]. *金属学报*, 2006, 42(6): 611–618 (LU Junyong, JIANG Zhenyu, ZHANG Qingchuan. Preliminary time series analysis of serrated yielding in Al-4%Cu alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(6):611–618 (in Chinese))
- [16] 胡琦, 张青川, 符师桦, 等. 析出相在铝镁合金 Portevin-Le Chatelier 效应中的作用研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(9): 096201 (HU Qi, ZHANG Qingchuan, FU Shihua, et al. Effect of precipitation on Portevin-Le

- Chateliereffect in Al-Mg alloys[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(9):096201 (in Chinese))
- [17] Ananthakrishna G, Noronha S J, Fressengeas C, et al. Crossover from chaotic to self-organized critical dynamics in jerky flow of single crystals[J]. *Physical review E*, 1999, 60(5):5455.
- [18] Maj P, Zdunek J, Gizynski M, et al. Statistical analysis of the Portevin-Le Chatelier effect in Inconel 718 at high temperature[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 619:158—164.
- [19] 高云, 张青川, 胡琦, 等. Al-Cu 合金 Portevin-Le Chatelier 效应的多重分形分析[J]. *实验力学*, 2010, 25(1):22—29 (GAO Yun, ZHANG Qingchuan, HU Qi, et al. A multifractal analysis of Portevin-Le Chatelier effect in Al-Cu alloy[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(1):22—29 (in Chinese))
- [20] 孙亮, 张青川, 晏顺平, 等. Al-4.5wt%Cu 合金中溶质原子及析出相对锯齿形屈服时空特性的影响[J]. *物理学报*, 2007, 56(6):3411—3417 (SUN Liang, ZHANG Qingchuan, YAN Shunping, et al. Effect of solute atoms and precipitated phase in Al-4.5wt% Cu alloys on the spatiotemporal characteristics of the serrated yielding[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6):3411—3417 (in Chinese))
- [21] Wang X, Han G, Cui C, et al. On the γ' precipitates of the normal and inverse Portevin-Le Chatelier effect in a wrought Ni-base superalloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(1):84—87.
- [22] Liu Y, Cai Y, Tian C, et al. Experimental investigation of a Portevin-Le Chatelier band in Ni-Co-based superalloys in relation to γ' precipitates at 500°C[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 49:35—41.
- [23] 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 Shihua, CAI Yulong, ZHANG Qingchuan, 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 (in Chinese))
- [24] Yuan Z, Li F, He M. Fast Fourier transform on analysis of Portevin-Le Chatelier effect in Al 5052[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 530:389—395.
- [25] Chelliah A X G X, Robinson B S P S, Sellathurai M, et al. A power-efficient variable-length prime factor MDC FFT architecture for high-speed wireless communication applications[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2020, 120:153194.
- [26] 刘增华, 曹丽华, 何存富, 等. 铝板中激光 Lamb 波信号的模态分析与缺陷检测研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(4):425—430 (LIU Zenghua, CAO Lihua, HE Cunfu, et al. On the mode identification and defect detection of laser-induced Lamb waves signal in an aluminum plate[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(4):425—430 (in Chinese))
- [27] Bianchi T, Piva A, Barni M. On the implementation of the discrete Fourier transform in the encrypted domain[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2009, 4(1):86—97.
- [28] 王海霞, 彭柔, 钱克矛. 加窗傅里叶滤波和相干增强扩散在条纹去噪中的比较分析[J]. *实验力学*, 2017, 32(5):620—626 (WANG Haixia, PENG Rou, QIAN Kemao. Comparison of windowed Fourier filtering and coherence enhancing diffusion for fringe pattern denoising[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(5):620—626 (in Chinese))
- [29] Chang Y L, Hung F Y, Lui T S. Enhancing the tensile yield strength of A6082 aluminum alloy with rapid heat solutionizing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 702:438—445.
- [30] Zhang L, He H, Li S, et al. Dynamic compression behavior of 6005 aluminum alloy aged at elevated temperatures[J]. *Vacuum*, 2018, 155:604—611.
- [31] Kuijpers N C W, Kool W H, Koenis P T G, et al. Assessment of different techniques for quantification of α -Al (FeMn) Si and β -AlFeSi intermetallics in AA 6xxx alloys[J]. *Materials Characterization*, 2002, 49(5):409—420.
- [32] 汪波, 王晓姣, 宋辉, 等. Al-Mg-Si 合金时效早期显微组织演变及其对强化的影响[J]. *金属学报*, 2014, 50(6):685—690 (WANG Bo, WANG Xiaojiao, SONG Hui, et al. Strengthening effects of microstructure evolution during early ageing process in Al-Mg-Si alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(6):685—690 (in Chinese))

Fast Fourier transform analysis on Portevin-Le Chatelier effect in 6061 Al-based alloy at different nature aging

XU Jianfei, FU Shihua, HUANG Feng, QIN Peicheng

(School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract: Fast Fourier transform (FFT) is a highly efficient method for analysis of complex signal curves. The frequency domain feature of the Portevin-Le Chatelier (PLC) effect is investigated by FFT in 6061 Al-based alloy with different nature aging time of 0 ~ 7 h. The stress-time curves obtained via tensile test at a constant strain rate show that the serrations change from type B to type A with increasing nature aging time. The FFT results show that a peak appears at near 1.9 Hz in the frequency spectrum of the whole range for the samples nature aged 0 ~ 2 h and disappears for the samples nature aged 3 ~ 7 h. The evolutions of the peaks are expressed by the frequency spectrum of subsections. Firstly, the peak value increases, and the peak frequencies decrease and then fluctuate in a steady range for the samples nature aged 0 ~ 1 h. For the samples nature aged 2 h, both the peak value and the peak frequency fluctuate in a steady range. Finally, a simplified spectrum analysis method based on conservation of power is proposed to obtain the optimal simplified spectrum, which presents more concisely the characteristics of serrated stress curves in frequency domain. Moreover, the discussion combined with dynamic strain aging is conducted to explain the behaviors in frequency domain.

Keywords: Portevin-Le Chatelier effect; nature aging; dynamic strain aging; Fast Fourier transform