

固溶处理对 Al-Cu 合金中 Portevin-Le Chatelier 效应空域行为的影响*

江慧丰 张青川† 徐毅豪 伍小平

(中国科学技术大学,中科院材料力学行为和设计重点实验室,合肥 230027)

(2005 年 5 月 5 日收到,2005 年 5 月 30 日收到修改稿)

研究了在定加载速率拉伸条件下,固溶处理对 Al-Cu 合金材料中 PLC(Portevin-Le Chatelier)效应空域行为的影响.在较低拉伸速率时,变形初期 PLC 变形带在试件宽度方向中央附近某点处“成核”.随着变形的继续,出现多带共存的现象,且带宽较小,带与拉伸轴向的夹角较大.在较大拉伸速率条件下,PLC 变形带先连续传播,再随机出现.

关键词: PLC 效应,动态应变时效,固溶处理

PACC: 6220F, 8140C, 4225H

1. 引 言

在一定的温度、应变率或合适的预变形下,一些合金材料中会出现特殊的塑性失稳现象,即时域上的锯齿形应力流动(jerky flow)和空域上的应变局域化(strain localization),该现象也被称为 Portevin-Le Chatelier(PLC)效应^[1-6]. PLC 效应在空域上的应变局域化行为通常以带状结构(亦称为 PLC 变形带)出现,且随着变形条件的不同,会在试件表面随机产生或沿着试件拉伸轴向传播.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^[7]: A 类型带沿着试件表面连续传播, B 类型带沿着试件表面间断“跳动”传播,而 C 类型带则在试件表面随机形成.长期以来,人们对于 PLC 变形带的观察作了大量的研究,如早期的“镜面研磨法”^[8]和最近的“激光引伸计法”^[9]等.但上述方法在可重复性、实时性以及精度方面的局限,使得对 PLC 变形带空间特性的进一步研究受到限制.而动态数字散斑干涉法^[10](digital speckle pattern interferometry, DSPI)则能很好地避免目前其他实验方法的不足.近年来,本工作组采用该方法对退火处理条件下的 Al-Cu 合金材料中的 PLC 变形带进行了一系列观察研究,并观察到了

与锯齿形应力流动相对应的 PLC 变形带的成核、空间演化与反复传播等有趣结果^[11-13].

关于 PLC 效应产生的机理,目前被广泛接受的是动态应变时效(dynamic strain aging, DSA)假设,但具体的 DSA 微观机理解释目前仍然存在诸多争论^[14-16].近年来,为了具体研究各微观缺陷在塑性变形中的作用,开展了大量的时效对析出相影响的研究工作^[17-19].本文将通过固溶处理(solution treated, ST)以及后续的时效来改变溶质原子在固溶体中以及障碍在晶体内的含量,并与变形过程中位错密度的变化相耦合,从宏观的 PLC 效应空域行为来分析上述微观缺陷对 PLC 效应的影响,从而为寻求 DSA 产生的真正机理提供实验依据.

2. 实验设置与实验方法

2.1. 实验材料及热处理

本实验中所研究的材料为 A2017 铝合金,其具体的化学成分(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, 其他 0.05, Al 为基体.试件实验段尺寸为长 55mm,宽 20mm,厚 3mm.试件拉伸实

* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10232030)和面上基金(批准号:10372098)资助的课题.

† E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

验前所接受固溶处理的工艺规范如下:试件由室温经 50min 加热到 773K,保持 3h,再直接投入冷却介质,即室温下的水中。

2.2. 实验原理

在本实验中采用的是动态数字散斑干涉法(DSPI),如图 1 所示,试件两端以夹头夹持,下端固定,上端以恒定加载速度拉伸.两束准直的 Nd-YAG 激光对称投射到拉伸试件的表面,形成的干涉散斑图,并由 CCD 摄像机连续记录并传到 PC 机进行处理.则沿试件拉伸方向的微小位移 U 与两束入射光

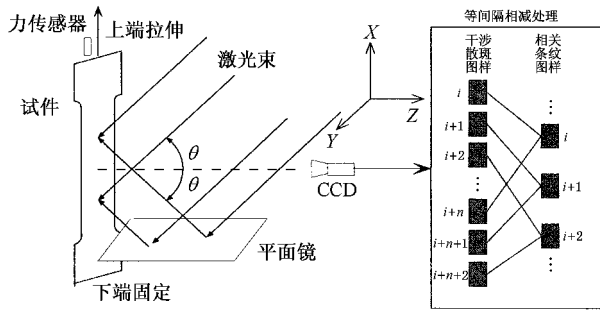


图 1 动态 DSPI 的实验原理图

的光程差 Δ 满足如下关系式^[10,11]：

$$\Delta = 2U\sin\theta = \pm n\lambda, (n = 0, 1, 2, \dots)$$

的像点形成相关条纹.其中 λ 是激光的波长, n 代表相关条纹的级数.由上式可知,条纹的灵敏度为 $\lambda/2\sin\theta$.本实验中,激光波长 λ 为 532nm,投射角 θ 为 45° ,对应的位移灵敏度 $\lambda/2\sin\theta = 0.378\mu\text{m}/\text{fringe}$.实验中,需根据相应的加载速率,选定合适的 CCD 采样率,以使处理后的相关条纹图更易分辨及进行量化分析.

3. 实验结果

在本实验中,试件在进行了固溶处理 ST 后,立即以恒定速率进行单向拉伸.图 2 给出了在拉伸速率为 $5\mu\text{m}/\text{s}$ 时(CCD 采样率为 2Hz),Al-Cu 合金材料拉伸实验中 PLC 效应出现时独特的时域和空域行为.图 2(a)给出了整个变形过程中的应力-时间曲线和与之相对应的 PLC 变形带的位置-时间图,与相同拉伸速率下退火材料的拉伸实验结果相比^[12],ST 材料中没有出现连续传播的 A 类型带以及典型的 A 类型应力锯齿,而是出现了随机分布的 C 类型带和 C 类型应力锯齿.且随着变形的继续,出现带的频率

降低,应力锯齿幅值逐渐增大.

通常在退火材料中,PLC 变形带是在试件宽度方向的一侧形成(或者说“成核”),然后逐渐发展直至贯穿整个试件^[20].而在 ST 材料中,本实验观察到 PLC 变形带是在试件宽度方向中央附近某点处“成核”,然后再向两端发展,如图 2(c)所示.与之相对应,图 2(b)中给出了刚进入塑性变形阶段的微弱的锯齿形应力流动曲线.另外,随着变形的发展,时域上一个锯齿形应力跌落将对应于空域上 3—5 条变形带同时出现的现象,如图 2(e)所示.与退火材料相比,ST 材料中多带共存现象出现的概率较大,PLC 变形带的带宽较小,与拉伸轴向的夹角也较大^[20].

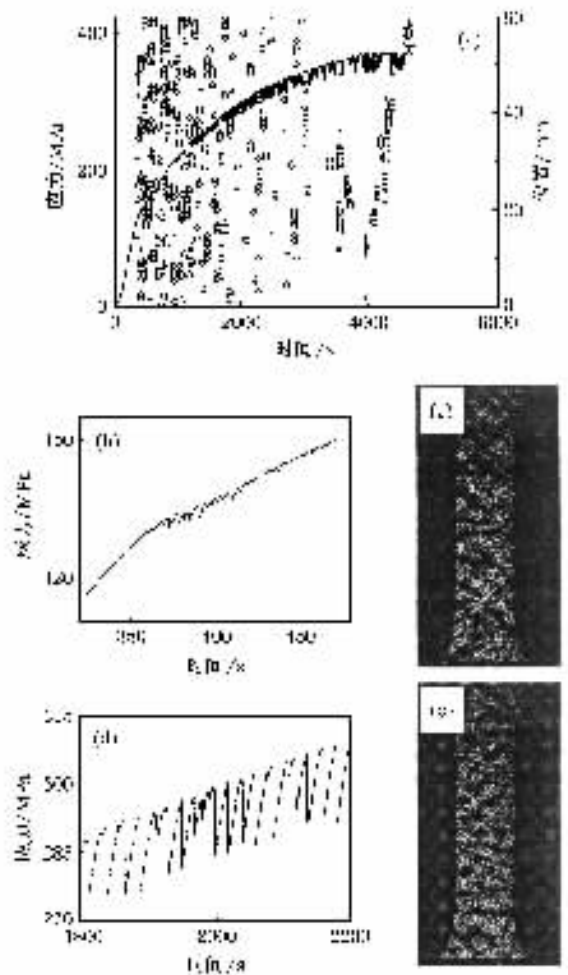


图 2 固溶处理后,拉伸速率为 $5\mu\text{m}/\text{s}$ 时 (a)整个变形过程中的应力-时间曲线和与之相对应的 PLC 变形带的位置-时间图 (b), (c)(d)(e)给出了局部放大曲线及与之相应的 PLC 变形带的相关条纹图

根据退火材料拉伸实验的经验,当加载速率增大时,PLC 变形带的空间特性将由类型 C→B→A 转

变^[13]. 以此为出发点, 我们提高加载速率至 $250\mu\text{m/s}$ (CCD 采样率增加到 8Hz), 以期出现如退火材料中的典型的 A 类型变形带以及应力锯齿. 但如图 3(a) 所示, 当拉伸速率提高至图 2 中的 50 倍时, 整个变形过程中的锯齿形应力曲线依然呈现传统意义上的

C 类型. 而在塑性变形的开始阶段, PLC 变形带由试件一端连续传播至另一端, 表现为典型的 A 类型空间特性, 如图 3(b) 所示. 随着变形的继续, 变形带的空间相关性减弱, 在试件的表面随机的形成, 即表现为 C 类型变形带的特性, 如图 3(c) 所示.

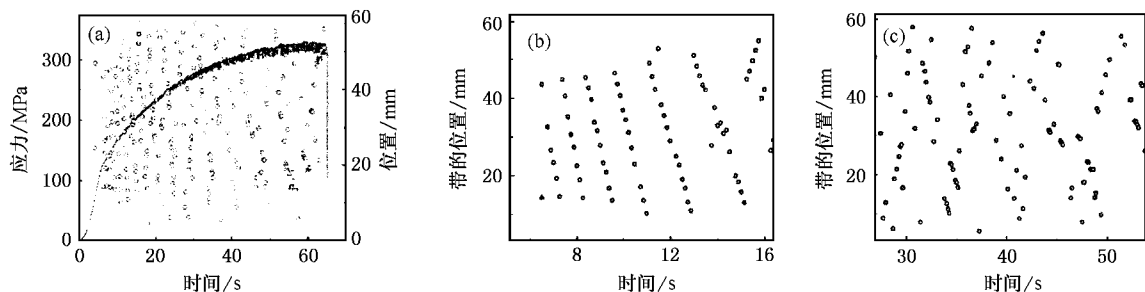


图 3 拉伸速率为 $250\mu\text{m/s}$ 时 (a) 固溶处理材料中 PLC 效应的时域和空域行为; (b) 塑性变形开始阶段, PLC 变形带连续传播; (c) 变形进入中后期时, PLC 带则随机分布

4. 讨 论

PLC 效应产生的原因, 目前被广泛接受的是基于溶质原子与可动位错之间的动态交互作用的 DSA 机理^[15]. 而近期 Picu 等人基于可动位错和已经聚集了溶质原子气团的障碍之间的相互作用, 提出了一种新的 DSA 微观机理假设^[16]. 即已经聚集了溶质原子气团的障碍将可动位错阻拦从而导致宏观应力的上升. 随后, 在外应力的作用下, 位错将克服障碍继续运动. 这种位错被障碍阻拦及其随后克服障碍继续运动的反复循环, 导致了锯齿形流动的产生, 即产生了 PLC 效应. 而当晶粒中的位错克服障碍继续滑移到试件表面时, 将导致该处局部塑性软化失稳, 进而引起试件的宏观剪切变形, 即产生 PLC 变形带.

根据金属学研究, 固溶处理后晶体中保留了大量的位错、空位以及障碍(析出相、林位错或晶界)等缺陷. 这些内部缺陷所引起的晶格畸变, 将使可动位错滑移困难, 从而进一步引起该处应力集中. 所以, 与退火处理后内应力消除的材料相比, 固溶处理材料中 PLC 变形带更容易在试件宽度方向中间“成核”, 如图 2(c) 中所示, 多带同时出现的概率也增大. 同样, 由于大量缺陷的存在, 使得 ST 材料在变形过程中较退火材料为“硬”. 那么, 在试件发生宏观剪切变形时, 仅能形成较窄的 PLC 变形带. 为了与上夹头移动的变形量相匹配, 多条较窄变形带的同时出现也就成为自然合理的结果, 如图 3(e) 所示.

本实验中所研究的是 Al-4% Cu 合金, 在固溶处

理后, 合金中含有过饱和固溶体 α 相, 而次生相(又称析出相) CuAl_2 则来不及析出, 则晶体内障碍的强度相对较小. 在外加速率很大时, 如本实验中的 $250\mu\text{m/s}$ 时, 位错所获得的能量很高. 故在塑性变形的初期, 障碍对位错的阻拦作用较弱, 可动位错能轻易克服障碍继续运动, 在宏观上则表现为连续传播的 PLC 变形带. 随着变形的进行, 由于位错的增殖, 位错和障碍之间的作用增强. 可动位错克服障碍继续运动的难度相应增强, 从而 PLC 变形带出现的频率降低, 空间相关性也将减弱, 如图 3 所示.

5. 结 论

1. 对固溶处理后的 Al-Cu 合金材料进行恒定加载速率的拉伸实验时, 进入塑性变形初期, PLC 变形带将在试件宽度方向中央附近某点处“成核”. 随着变形的进行, 试件中多带同时存在, 且每条带的带宽较小, 与拉伸轴向的夹角较大.

2. 当提高加载速率时, 试件中出现连续传播的 A 类型 PLC 带. 但随着变形的进行, 带将随机在试件上产生, 呈现 C 类型的空间特性. 与之相对的是, 整个变形过程的锯齿形应力-时间曲线则呈现出传统意义上的 C 类型时域特性.

3. 随着塑性变形的进行, 由于位错的增殖, 障碍对位错的阻拦作用变强, 将引起 PLC 变形带空间相关性的减弱. 本实验结果亦证实了基于可动位错和障碍之间的相互作用的 DSA 微观机制假设的合理性.

- [1] Le Chatelier M A 1909 *Revue de Metallurgie* **6** 914
- [2] Portevin A , Le Chatelier F 1923 *Comp. Rend Acad Sci. Paris* **176** 507
- [3] Bell J F 1973 *Encyclopedia of Physics , Mechanics of Solids I* (Berlin : Springer-Verlag) p41 and p649
- [4] Munz D , Macherauch S 1966 *Z. Metallkd* **57** 552
- [5] McCormick P G 1971 *Acta Metall.* **19** 463
- [6] Mulford R A , Kocks U F 1979 *Acta Metall.* **27** 1125
- [7] Pink E , Grinberg A 1981 *Mater. Sci. Eng.* **51** 1
- [8] Chihab K , Estrin Y , Kubin L P 1987 *Scripta Metallurgica* **21** 203
- [9] Ziegenbein A , Hahner P , Neuhauser H 2000 *Computational Materials Science* **19** 27
- [10] Zhang Q C , Toyooka S , Meng Z B 1999 *Proceedings of SPIE* **3585** 389
- [11] Zhang Q C , Toyooka S , Wu X P 2002 *Proceedings of SPIE* **4537** 69
- [12] Jiang H F , Zhang Q C , Jiang Z Y *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 99
- [13] Jiang H F , Zhang Q C , Jiang Z Y *et al* 2005 *Acta Metall. Sin.* **41** 727 (in Chinese) [江慧丰、张青川、蒋震宇 等 2005 金属学报 **41** 727]
- [14] Cottrell A H 1953 *Dislocations and plastic flow in crystals* (London : Oxford University Press)
- [15] McCormick P G 1972 *Acta Metall.* **20** 351
- [16] Picu RC 2004 *Acta Material* **52** 3447
- [17] Tan Q 1994 *Acta Phy. Sin.* **43** 1658 (in Chinese) [谭 启 1994 物理学报 **43** 1658]
- [18] Zhao H , Du Z W , Zhou T T *et al* 2004 *Acta Phy. Sin.* **53** 1251 (in Chinese) [赵 辉、杜志伟、周铁涛 等 2004 物理学报 **53** 1251]
- [19] Du Z W , Zhou T T , Zhao H *et al* 2004 *Acta Phy. Sin.* **53** 3601 (in Chinese) [杜志伟、周铁涛、赵 辉 等 2004 物理学报 **53** 3601]
- [20] Zhang Q C , Jiang Z Y , Jiang H F *et al* 2005 *Int. J. Plasticity* **21** 2150

The effect of solution treatment on the spatial behavior of the Portevin-Le Chatelier effect in Al-Cu alloys *

Jiang Hui-Feng Zhang Qing-Chuan[†] Xu Yi-Hao Wu Xiao-Ping

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

(Received 5 May 2005 ; revised manuscript received 30 May 2005)

Abstract

The effect of solution treatment on the spatial behavior of the Portevin-Le Chatelier effect in Al-Cu alloys is investigated under constant applied driving velocity. During the initial stage of plastic deformation, the PLC deformation band nucleates in the neighborhood of the middle of the transverse direction of specimen. And multiple bands will exist simultaneously in the specimen when deformation develops, whose width is narrower and incline at a larger angle than those in annealing treated material. At high applied velocity, the PLC deformation band propagates continuously first, and then nucleates randomly in the specimen.

Keywords : Portevin-Le Chatelier effect , dynamic strain aging , solution treatment

PACC : 6220F , 8140C , 4225H

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10232030 & 10372098).

[†] E-mail : zhangqc@ustc.edu.cn