第 35 卷 第 4 期
1 9 9 9 年 4 月

金 属 学 报
ACTA METALLURGICA SINICA

Vol.35 No.4
April 1 9 9 9

动态载荷下 Al−Li 合金剪切变形局部化 *

钟万里 [1,2] 张 匀 [2] 徐永波 [1,2] 沈乐天 [1] 白以龙 [1]

1) 中国科学院力学研究所非线性连续介质力学实验室，北京 100080

2) 中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室，沈阳 110015

摘 要 采用 Hopkinson 压杆装置，对 4 种时效处理的 Al−Li 合金在冲击压缩试验时变形局部化产生的力学条件和微结构进行了研究. 结果指出，4 种处理的合金均产生两种类型的剪切带即形变剪切带和白色剪切带. 它们是在局部化过程中不同形变阶段下形成的. 两者无本质上的差别. 白色剪切带内未发生相变. 大应变和高应变率是产生力剪切带的必要条件，即材料在一定的高应变率下形变到一定程度时才能形成剪切带. 电镜研究表明，剪切带内无畸变等轴晶粒是再结晶的结果.

关键词 剪切局部化，临界应变，再结晶

中图法分类号 TG111, TG146.2 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(1999)04-0384-86

SHEAR DEFORMATION LOCALIZATION IN Al−Li ALLOYS DURING DYNAMIC LOADING

ZHONG Wanli [1,2], *ZHANG Yun* [2], *XU Yongbo* [1,2], *SHEN Letian* [1], *BAI Yilong* [1]

1) Laboratory for Non−Linear Continous Media of Mechanics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

2) State Key Laboratory for Fatigue and Fracture of Materials, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

Correspondent: XU Yongbo, professor, Tel: (024)23842531-55324, Fax: (024)23891320

Manuscript received 1999-01-12, in revised form 1999-02-02

ABSTRACT Mechanical conditions and microstructures of the shear deformation localization produced during high speed impact compression in Al−Li alloys are investigated by split Hopkinson bar with about strain rate of $10^3 s^{-1}$. The alloys were subjected to peak−, over−, under− and natural aged treatments that provide wide microstructural parameters and mechanical properties. The results show that there are deformed shear bands and white shear bands, which are usually indicated by a different etching response in a narrow band of material in metallographic cross−sections, and there is no evidence of phase transformation in the white shear bands. Two types of shear bands are formed at different stages of deformation during localization. A number of observations show that a critical strain is required for their formation under a critical strain rate, *i.e.*, there are threshold values of strain and strain rate for occurrence of both the deformed and white shear bands. Examinations by TEM show that the fine equiaxed and distortion−free grans in the center of the shear bands are the result of recrystallization during localization.

KEY WORDS shear deformation localization, critical starin, recrystallization

鉴于理论和工程应用上的重要意义，近年来，人们对动态载荷下材料所发生的剪切变形局部化的研究兴趣一直保持长盛不衰的势头. 但对它产生的力学条件及形成的微观机制仍缺少系统的了解.

力学家们主要着眼于本构模型的描述，探讨塑性失稳的条件和演化规律 [1−5]；而冶金和材料科学工作者则侧重于工程应用，探讨局部化产生的力学条件、微结构特征以及影响的冶金因素，从而为优化设计、提高工程构件的服役寿命、推迟甚至进一步阻止由于变形局部化导致材料的破坏提供实验依据 [6−10].

本文从材料角度研究局部化变形的力学条件以及结构特征.

1 实验方法

试验采用 8090Al−Li 合金，合金的化学成分 (质量分数，%) 为: Li 2.2, Cu 2.49, Mg 0.24, Fe 0.15, Si 0.13, Zr 0.13, Al 余量.

* 国家自然科学基金 19891180−2 资助项目

收到初稿日期：1999-01-12, 收到修改稿日期：1999-02-02

作者简介：钟万里，1970 年生，硕士，现在广东电力厅工作

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

试验合金经峰时效、欠时效、过时效和自然时效处理后加工成直径 5 mm, 高 5 mm 的圆柱.

试验是在 Hopkinson 压杆上进行. 经高速冲击 (应变速率 $\dot{\gamma}$ 约为 $10^3 s^{-1}$) 后解剖试样以进行金相和电子显微镜观察.

2 实验结果

2.1 剪切带形态

在 4 种时效处理的合金中均出现两种类型的剪切带, 即形变剪切带和白色剪切带. 图 1 分别为这两种剪切带的典型形态.

不少学者称白色剪切带为相变带. 他们认为, 材料承受高速率、大应变时, 剪切带内的温度很可能达到相变点以上, 并发生相变, 剪切带被腐蚀, 表现为白色 [11−15]. 然而, 所有这些报道中关于剪切带内的温度值均是估算得来的. 近年来, Hartley 等 [16] 采用红外辐射技术测量了 1018 冷轧钢和 1020 热轧钢剪切带内的温度, 最高达 450 ℃, 而 Giovanola[17] 用高速摄影技术测量 4340 钢剪切带的温度达 1000 ℃. 受试验条件的限制, 目前尚很难准确地测定局部化过程中剪切带内的实际温度.

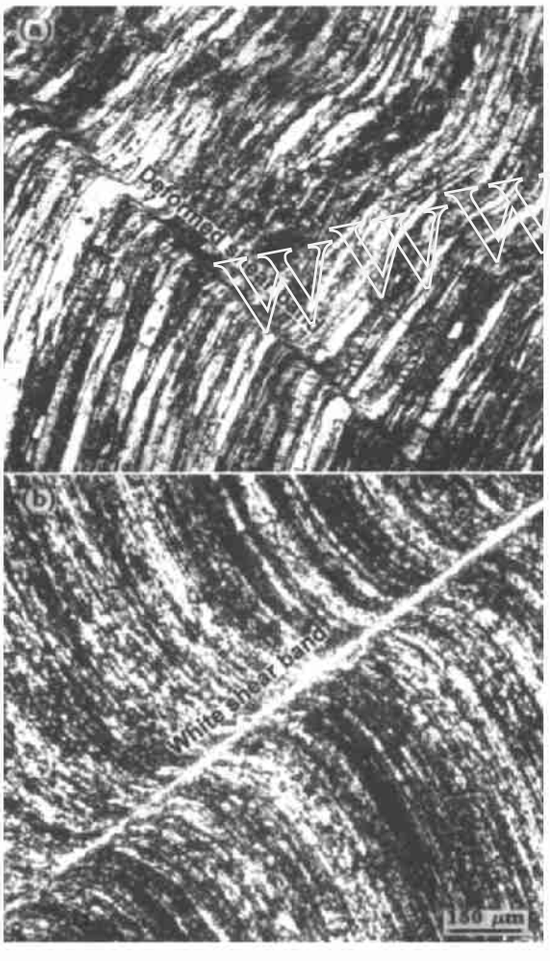

图 1　峰时效 Al−Li 合金中的形变剪切带和白色剪切带

Fig.1 Deformed shear bands (a) and white shear bands (b) in peak−aged Al−Li alloys

本研究表明, 无论是形变剪切带还是白色剪切带, 均是在局部化过程中材料变形至不同应变阶段下形成的. 形变带产生在先, 而白色剪切带则是形变剪切带进一步变形的结果, 在形态上表现为白色是一种腐蚀效应, 并不一定在带内发生了相变. 这与最近在 Ti 合金中的研究结果 [18] 一致.

应该说明的是, 动态载荷下材料的变形以及由此诱发的结构变化是极为复杂的 [8], 尚须进行深入系统的工作.

2.2 力学条件

剪切带形成的力学条件一直是多年来比较活跃的理论研究课题, 相比之下, 从冶金和材料科学的角度对剪切带形成的原因及影响因素的实验研究尚不够系统和深入, 并常常出现不同的结论.

Timothy[19] 和 Staker[20] 等根据各自的研究事实, 将应变作为剪切带形成的力学条件. 而 Rogers[7] 则指出, 除了应变外, 还可能存在一个产生剪切带的临界应变率.

本研究结果表明, 在一定的应变率下, 只有当应变达到一定数值时才能产生剪切局部化. 即应变及应变率同时作为剪切带形成的条件. 例如, 在应变率为 $1.6\times10^3 s^{-1}$ 的条件下, 对峰时效 Al−Li 合金加载, 当应变达到 0.14 时便可产生形变剪切带, 而进一步形变至应变值为 0.17 时, 才能产生白色剪切带 (见表 1). 这一现象与 Ti−55 合金的研究结果 [18] 完全一致.

表 1　峰时效和欠时效合金剪切带形成的临界应变和应变率

Table 1 Critical strain and strain rate for the formation of the two types of shear bands in peak− and under−aged Al−Li alloys

Alloy	Strain rate $10^3\ s^{-1}$	Critical strain	
		Deformed band	White band
Peak−aged	1.6	0.14	0.17
Under−aged	2.0	0.17	0.21

2.3 再结晶

动态载荷 ($\dot{\gamma}$ 约为 $10^4 s^{-1}$, γ 约大于 3) 下剪切带内发生再结晶的现象已为许多实验结果所证实 [21−25].

图 2 为峰时效合金的一个例子. 从图可以看出, 靠近剪切带的合金组织由于强烈变形, 其晶粒沿剪切方向拉长 (图 2a). 然而在剪切带中心, 这些拉长的晶粒被无畸变的等轴再结晶晶粒所取代 (图 2b). 据估算 [25], 剪切带内的温度可达 460 ℃, 远高于 Al−Li 合金的再结晶温度. 因此用再结晶机制可以很好地解释所观察到的这种结构特征.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

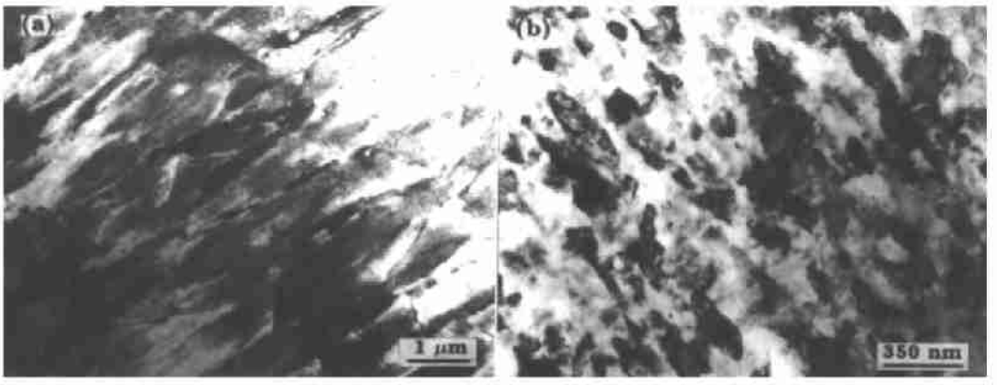

图 2 动态载荷下靠近剪切带附近拉长的晶粒和剪切带内的细小等轴再结晶晶粒

Fig.2 Elongated grains (a) near the shear bands and distortaion-free equiaxed grains (b) in the center of the shear bands

3 结论

(1) 动态载荷下 4 种时效处理的 8090Al-Li 合金中均出现形变剪切带和白色剪切带.

(2) 在一定应变速率下，当应变达到临界值时才产生剪切带.

(3) Al-Li 合金中的剪切带内的细小等轴晶粒的出现可以用再结晶机制予以解释. 未观察到剪切带内相变的发生.

参考文献

[1] Bai Y L. In: Mura L E, Meyers M A eds., *Shock-Waves and High-Strain-Rate Phenomena*. New York: Plenum Press, 1981: 277

[2] Olson G F. In: Mura L E, Meyers M A eds., *Shock-Waves and High-Strain-Rate Phenomena*, New York: Plenum Press 1981: 221

[3] Staker M R. *Acta Metall*, 1981; 1: 633

[4] Clifton R J. *Material Response to Ultra-High Loading Rates*. National Advisory Board Committee. Report NMAB 356, 1979

[5] Burns T J, Tracano T G. *Mech Mater*, 1982; 1: 313

[6] Wittman C L, Meyers M A, Park H R. *Metall Trans*, 1990; 21A: 707

[7] Rogers H C. *Ann Rev Mater Sci*, 1979; 9: 283

[8] Xu Y B, Bai Y L, Xue Q, Shen L T. *Acta Mater*, 1996; 44: 1917

[9] Giovanola J H. *Mech Mater*, 1988; 7: 73

[10] Meyers M A, Pak H R. *Acta Metall*, 1986; 349: 2493

[11] Andrews J H, Lee H, Bourne L, Wilson D V. *J Iron Steel Inst London*, 1969; 165: 369

[12] Manion S A, Stock T A C. *Int J Fract Mech*, 1970; 6: 106

[13] Glenn R C, Leslie W C. *Metall Trans*, 1971; 2: 2945

[14] Woodward R L, Aghan R L. *Metall Forum*, 1978; 1: 180

[15] Thomson P A, Heiser F A. *Metall Trans*, 1971; 29: 1496

[16] Hartly K A, Duffy J, Kawley R H. *J Mech Phys Solids*, 1987; 35: 283

[17] Giovanola J H. *Mech Mater*, 1988; 7: 59

[18] YU J Q, Zhou H H, Shen L T, Xu Y B, Bai Y L. *Acta Metall Sin*, 1999; 35: 379
(禹金强, 周惠华, 沈乐天, 徐永波, 白以龙. 金属学报, 1999; 35: 379)

[19] Timothy S P, Hutchings I M. *Acta Metall*, 1985; 33: 607

[20] Staker M R. *Acta Metall*, 1981; 129: 683

[21] Andrade U, Meyers M A, Vecchio K S, Chokshi A H. *Acta Metall Mater*, 1994; 42: 3183

[22] Hiness J A. Vecchio K S. *Acta Mater*, 1997; 45: 635

[23] Meyers M A, Chen Y J, MarQuis F D S, Kim D S. *Metall Mater Trans*, 1995; 26A: 2493

[24] Li Q, Xu Y B, Lai Z H, Bai Y L, Shen L T. *Acta Metall Sin*, 1998; 34: 49
(李 强, 徐永波, 赖祖涵, 白以龙, 沈乐天. 金属学报, 1999; 35: 49)

[25] Xu Y B, Zhong W L, Chen Y J, Shen L T, Bai Y L, Meyers M A. *Metall Mater Trans*, in press

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net