

②1237-1239

高密度脉冲电流对 Cu 单晶体驻留滑移带的影响 *

肖素红¹⁾ 周亦霄¹⁾ 吴世丁²⁾ 姚戈²⁾ 李守新²⁾ 周本濂^{1,3)}

1) 中国科学院金属研究所, 沈阳 110015

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

3) 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 110015

摘 要 对含驻留滑移带 (PSB) 的 $[\bar{1}23]$ 取向的疲劳 Cu 单晶体, 进行了高密度脉冲电流处理. 结果表明, 高密度脉冲电流处理产生的热压应力改善了 PSB- 基体界面的应力集中状态, 使驻留滑移带局部消失. 理论计算同时表明, 高密度脉冲电流处理能提高 Cu 单晶疲劳寿命.

关键词 驻留滑移带, 脉冲电流, 热压应力

中图分类号 TG146.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)12-1237-03

铜单晶体

TG146.11

THE EFFECT OF HIGH CURRENT DENSITY ELECTROPULSING ON PERSISTENT SLIP BANDS (PSBs) IN FATIGUED COPPER SINGLE CRYSTALS

XIAO Suhong¹⁾, ZHOU Yizhou¹⁾, WU Shiding²⁾, YAO Ge²⁾, LI Shouxin²⁾, ZHOU Benlian^{1,3)}

1) Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

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

3) International Center for Materials Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

Correspondent: XIAO Suhong, Tel: (024)23843531-55156, Fax: (024) 23891320,

E-mail: blzhou.imr@imr.ac.cn

Manuscript received 2000-03-21, in revised form 2000-05-22

ABSTRACT Fatigued copper single crystals with $[\bar{1}23]$ loading axis were treated by high current density electropulsing after the formation of persistent slip bands (PSBs). The results show that thermal compressive stress caused by electropulsing improved the stress concentration at the interface between PSB and matrix, and the PSBs disappeared locally. Theoretical calculation shows that the treatment by high current density electropulsing could raise the fatigue life of copper single crystals.

KEY WORDS persistent slip band (PSB), electropulsing, thermal compressive stress

驻留滑移带 (PSB) 在金属材料疲劳断裂的基本机制研究中起着十分重要的作用, 因此得到普遍重视^[1,2]. 90 年代初期, Conrad 等^[3] 以及 Lai 等^[4] 在多晶 Cu, α -Ti 的疲劳实验过程中, 施加连续的高密度脉冲电流, 研究了脉冲电流对疲劳性能的影响. 结果表明, 高密度脉冲电流对驻留滑移带中位错运动或次滑移系中的位错运动有影响, 提高了滑移带的均匀性, 并使疲劳寿命增加;

对于低周疲劳的 α -Ti 脉冲电流可降低疲劳初期的软化速率, 也可消除软化过程中的硬化峰. 本工作的高密度脉冲电流处理是在 PSB 形成之后实施的, 这就使其更具有潜在的实用价值. 由于形成驻留滑移带是纯晶体产生疲劳裂纹的先决条件, 因此设想, 若在 PSB 形成以后通过某种方法使其从损伤状态有所恢复, 则材料将得到再生.

1 实验方法

实验所用的 $[\bar{1}23]$ Cu 单晶体是用 99.999% 的纯铜, 采用 Bridgman 方法生长得到的. 用线切割机切取疲劳试样, 试样的总体尺寸为 2.0 mm×8 mm×50 mm, 标距部分尺寸为 2.0 mm×4.3 mm×16 mm. 对称拉-压疲劳实验在 1 kN Shimadzu 电液伺服疲劳试验机上并在室温及

* 国家自然科学基金资助项目 59931020

收到初稿日期: 2000-03-21, 收到修改稿日期: 2000-05-22

作者简介: 肖素红, 女, 1972 年生, 博士生

空气环境中进行, 实验中采用恒塑性应变幅控制, 应变控制信号为三角波, 频率为 0.3 Hz. 对疲劳后的试样进行高密度脉冲电流处理, 电压为 15 kV, 脉冲宽度为 110 μ s. 利用扫描电子显微镜 (SEM) 电子通道衬度 (ECC) 技术比较脉冲电流处理前后驻留滑移带位错结构变化情况, 以获得微观结构信息.

2 实验结果与分析

图 1a, b 分别是脉冲电流处理前后驻留滑移带特征. 在利用 SEM 观察 PSB 的过程中, 定位观察目前难以实现, 因此采用大量测量结果的统计平均来表示 PSB 状态. 结果显示, 脉冲电流处理以前, 其平均宽度约为 5.8 μ m, 平均间距约为 10.2 μ m, PSB 所占的体积分数为 0.57; 经过多次脉冲电流处理后, 其平均宽度减小到约

2.0 μ m, 平均间距减小到约 6.0 μ m, PSB 所占体积分数为 0.33, 同时可观察到驻留滑移带有局部消失的现象.

在恒塑性应变幅下进行疲劳循环的 Cu 中, PSB 中的应变分布极不均匀, 局部集中在 PSB-基体界面部位处^[2], 而驻留滑移带宽度和间距的减小意味着驻留滑移带的均匀化^[5]. Hunsche 和 Neumann^[6] 指出, 对单个 PSB, 在 PSB-基体界面的局部塑性应变 $\gamma_{p,loc}^{PSB}$ 正比于它的宽度 W

$$\gamma_{p,loc}^{PSB} = kW\gamma_p^{PSB} \quad (1)$$

式中 k 为常数, γ_p^{PSB} 为 PSB 上的平均塑性应变. 可见, 脉冲电流处理通过减少 W 而改善了 PSB-基体界面的应变集中状态.

Cao 等^[5] 给出了单晶体疲劳寿命的如下表达式

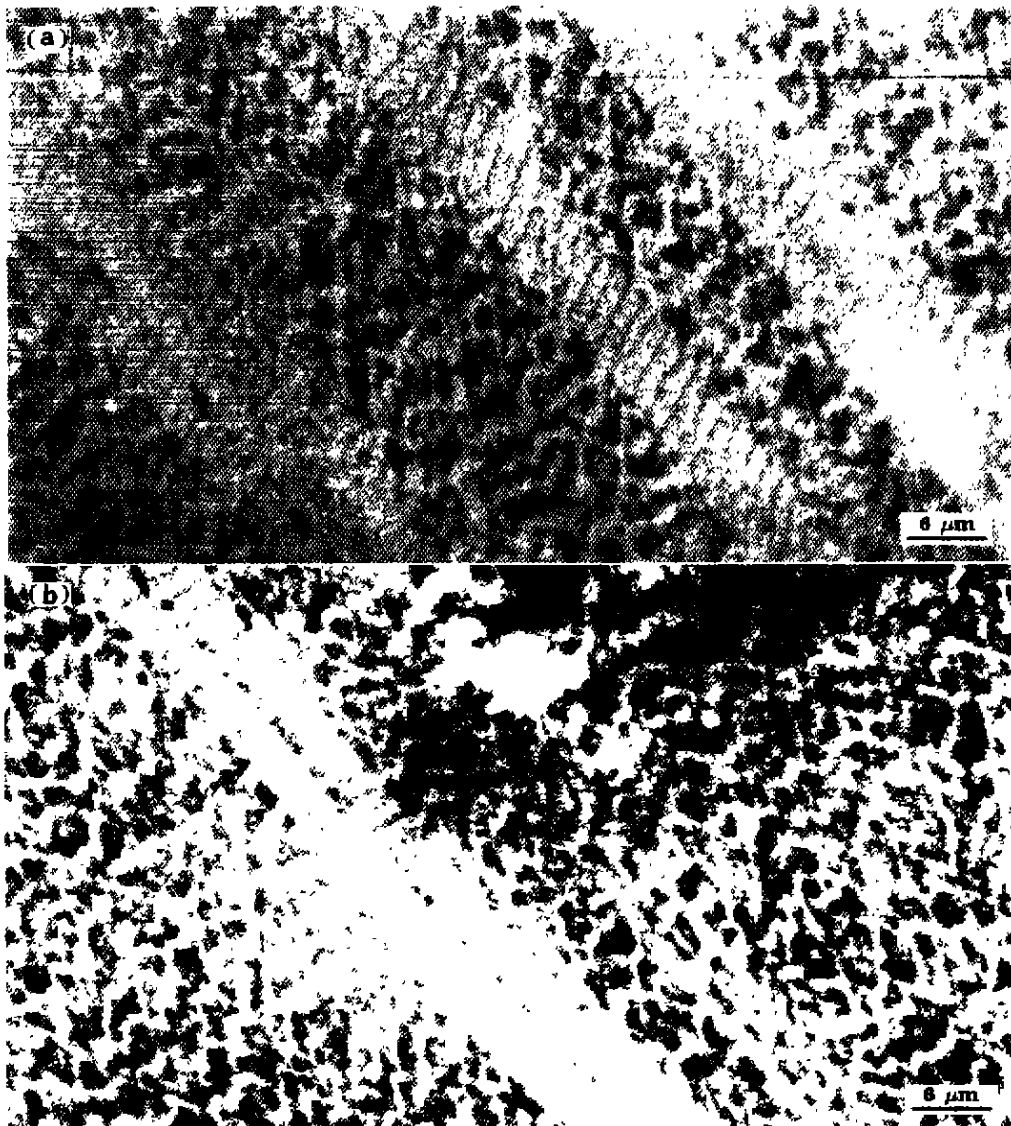


图 1 电脉冲处理对 $[1\bar{2}3]$ Cu 单晶循环疲劳后 PSBs 的影响 (5000 cyc, SEM)

Fig.1 SEM micrograph of the PSBs in $[1\bar{2}3]$ Cu single crystal fatigued to 5000 cycles before (a) and after (b) electropulsing

$$N_t = C\gamma_p^{-2} \left(\frac{1}{X} \right)^2 \quad (2)$$

其中 C 为常数, γ_p 为施加的塑性应变幅, X 为 PSB 的平均间距。由此可见, 脉冲电流处理导致 PSB 的均匀化, 能够提高 Cu 单晶体的疲劳寿命。根据该式可以得出脉冲电流处理以后的疲劳寿命

$$N_{t,p} = C\gamma_p^{-2} \left(\frac{1}{X_p} \right)^2 \quad (3)$$

其中 X_p 是脉冲电流处理以后 PSB 的平均间距。因此可以初步估算出经过脉冲电流处理以后疲劳寿命增加了约 3 倍。而且, 由于该公式假设 C 在脉冲电流处理前后是常数, 但脉冲电流处理对 PSB 的恢复作用 (使 PSB 局部消失) 可能使 C 发生较大变化, 有可能对疲劳寿命产生更大影响。

脉冲电流处理导致 PSB 发生局部消失的现象目前还未见文献报道。已有的工作表明: PSB-基体界面的两侧位错密度和分布有突变, 是疲劳裂纹萌生的有利地点, 裂纹容易在此处形核并扩展, 直至形成宏观裂纹。脉冲电流处理导致 PSB 的局部消失, 使裂纹形核失去了基本的依靠条件, 从而使利用脉冲电流处理提高疲劳寿命成为可能。对于脉冲电流处理引起 PSB 局部消失, 可以从位错运动角度分析。

一般来说, 在电脉冲作用下影响位错运动的主要因素有热压应力、电子风力及温度效应。在本工作中, 施加的电压为 15 kV, 电流密度为 1×10^6 A/cm²。如果忽略热损失和温度的积累效应, 相应的温升可以通过简单的计算求得: $\Delta T_{\max} = \frac{I_m^2 R t}{cm} \approx 342.5$ K。其中 $I_m = 89.5$ kA, 为最大电流; $R = 3.5 \times 10^{-5}$ Ω , 为试样电阻; $\tau = 110$ μ s, 为通电半周期; $c = 386$ J/K, 为试样热容; $m = 1.15$ g, 为试样质量。如此低的温升不足以使位错移动。因此温度效应不是使 PSB 局部消失的主要原因。

脉冲电流处理是一个迅速加热的过程。Tang 等 [7] 已经证实试样在快速加热的情况下膨胀与温升不同步, 膨胀落后于温升, 即存在一个弛豫过程。因此脉冲电流处理会在试样中产生瞬态热压应力, 最大可能热压应力 σ_{\max} 是沿试样长度方向分布, 其表达式为

$$\sigma_{\max} = E\alpha\Delta T_{\max} \quad (4)$$

式中 E 为弹性模量, α 为热膨胀系数。在 $\Delta T \approx 342.5$ K 的情况下, $\sigma_{\max} \approx 127$ MPa。热压应力在 PSB 上的分力 $\sigma = \sigma_{\max} \cos \phi \cdot \cos \lambda = 59.3$ MPa, 其中 ϕ , λ 分别是加载方向 $[123]$ 与 (111) 平面法线及 $[101]$ 滑移方向的夹角。这个分应力足以使位错发生移动。

电子风力是指大量电子定向碰撞原子实并通过动量交换而产生的力 [8], 作用在单位长度位错上的电子风力

F_{ew} 为

$$F_{ew} = \left(\frac{\rho_D}{N_D} \right) en_e j \quad (5)$$

式中 ρ_D 是单位长度位错对漂移电子的电阻率, N_D 是位错密度。根据 Conrad 等 [9] 给出的数据, $\frac{\rho_D}{N_D} = 2.05 \times 10^{-19}$ $\Omega \cdot \text{cm}^3$, 电子密度 $n_e = 8.76 \times 10^{22}$ /cm³, 可以算出当 $j = 1 \times 10^6$ A/cm² 时, $F_{ew} \approx 1 \times 10^{-7}$ N/cm, 又由 $F_{ew} = \tau_{ew} b$ (τ 为切应力, b 是 Burgers 矢量模), 得出 $\tau_{ew} \approx 0.1$ MPa。这个力远小于热压应力, 因此对于 Cu 来说, 脉冲电流作用使位错移动的主要原因是热压应力。

脉冲电流作用下, 热压应力在 PSB 上的分应力将改善 PSB-基体界面的应力集中状态, 使集中在界面上的位错游离出来。但由于这种应力集中分布是不均匀的, 因此热压应力的作用也相应具有了选择性, 这就导致了 PSB 在脉冲电流作用下的局部消失。由于基体中没有应力集中, 所以热压应力对基体不起作用。Qin 等 [10] 也证实了脉冲电流对基体的影响可以忽略。另外, 晶体取向与施加电压方向的变化可能会使脉冲电流处理引起的热压应力在 PSB 上的分力不同, 从而产生不同的效果, 这方面的具体研究正在进行。

3 结论

- (1) 高密度脉冲电流处理使位错移动的主要原因是热压应力。
- (2) 高密度脉冲电流处理产生的热压应力改善了 PSB-基体界面的应力集中状态, 导致 PSB 局部消失。
- (3) 理论计算表明, 高密度脉冲电流使 Cu 单晶体中 PSB 的均匀化能提高疲劳寿命。

参考文献

- [1] Mughrabi H. *Mater Sci Eng*, 1978; 33: 207
- [2] Suresh S. *Fatigue of Materials*. 2nd ed, Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 43
- [3] Conrad H, White J, Cao W D, Lu X P, Sprecher A F. *Mater Sci Eng*, 1991; 145A: 1
- [4] Lai Z H, Ma C X, Conrad H. *Scr Metall Mater*, 1992; 27: 527
- [5] Cao W D, Conrad H. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1992; 15: 573
- [6] Hunsche A, Neumann P. *Acta Metall*, 1986; 34: 207
- [7] Tang D W, Zhou B L, Cao H, He G H. *J Appl Phys*, 1993; 73: 3749
- [8] Nabarro F R. *Theory of Crystal Dislocation*. Oxford: Clarendon Press, 1967: 529
- [9] Conrad H, Sprecher A F. In: Nabarro F R N ed., *The Electroplastic Effect in Metals*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B V, 1989: 528
- [10] Qin R S, Su S X, Guo J D, He G H, Zhou B L. *Biomimet-ics*, 1996; 4: 121