

纯度对 ECAP 制备超细晶铜疲劳性能的影响

王庆娟, 周 滢, 双翼翔, 杜忠泽

(西安建筑科技大学 陕西省冶金工程技术研究中心, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用应力比 $R=-1$ 的对称加载疲劳试验, 研究了 ECAP 制备的超细晶高纯铜 (HP Cu)、低纯铜 (LP Cu) 的疲劳行为, 分析了循环应力-应变响应、疲劳寿命和疲劳前后晶粒取向分布, 讨论了纯度与超细晶材料疲劳稳定性的关系。结果表明: 在任何应力幅下, 获得的超细晶低纯铜的寿命都大于 ECAP 变形前的粗晶铜; 在相同应力幅下, 循环周次提高 1.6~2.0 倍。而超细晶高纯铜的疲劳曲线, 表现出不同的特性, 在高应力幅下, 超细晶高纯铜具有较高的疲劳寿命, 但在低应力幅下, 超细晶高纯铜循环周次下降, 疲劳寿命低。在应力控制条件下, 随应力幅的降低, 超细晶纯铜的循环应力-应变响应从循环软化逐渐过渡为循环硬化。杂质的存在能有效阻止疲劳过程中晶粒的转动和位错的运动, 降低其回复软化, 减小相邻晶粒间取向差变化, 使超细晶低纯铜与超细晶高纯铜相比有较大的循环硬化指数 n 和循环硬化系数 K , 具有较好的疲劳稳定性。

关键词: 等径弯曲通道变形; 超细晶铜; 高周疲劳; 纯度

中图分类号: TG146.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1806-06

等径弯曲通道变形 (equal channel angular pressing, ECAP) 制备的超细晶材料与常规材料相比, 具有较高的强度和韧性, 并且材料内部含有大量的高能非平衡晶界和位错^[1-3]。在循环变形过程中, 超细晶材料是否具有较好的疲劳性能是决定其应用范围的最终判据之一, 而粗晶材料的疲劳机制难以推广至亚微米材料范围。因此, 研究超细晶材料的疲劳行为和疲劳机制有着重要的意义。

近年来, 对 ECAP 制备的超细晶材料的疲劳性能已有大量的研究报道, 涉及的材料非常广泛, 研究的方向主要集中在材料的宏观应力-应变响应和材料的宏观变形规律上^[4-7]。研究认为, ECAP 制备的超细晶材料与粗晶相比, 应力控制的高周疲劳 (HCF) 寿命均得到提高, 而应变控制的低周疲劳 (LCF) 寿命小于同类粗晶材料^[8-10]; 超细晶材料的疲劳特性受晶粒尺寸、挤压温度、挤压方式、挤压速度、样品纯度和合金种类等诸多因素影响, 疲劳断裂机制比较复杂^[11-13]。超细晶纯 Ni 在循环变形过程中往往经历回复、再结晶以及晶粒长大, 并伴随内应力的降低, 固溶体和六方金属组织较为稳定, 而合金在某些条件下也仅发生很少的晶粒长大。对于面心立方结构代表性材料的超细晶铜的疲劳研究较多^[14-16], 其结果是有的超细晶铜具有

高的强度, 同时拥有高的疲劳寿命, 但是有的超细晶铜却强度较高, 而疲劳寿命却与粗晶铜相近。由于超细晶晶粒尺寸远小于特征位错胞的尺寸(微米量级), 超细晶铜应表现出循环软化特征, 但 Vinogradov 等人^[17]发现, 塑性应变幅在 $\epsilon_p=4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$ 范围内, 由 ECAP 制备的超细晶铜却表现出循环硬化及随后显著饱和的特征, 但并未就硬化机制给出具体解释。而 Agnew 和 Weertman^[18]全面研究了超细晶铜的循环形变行为, 在与上述应变幅部分重叠的 $\epsilon_p=1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2}$ 范围内, 得出与其相反的结论, 超细晶铜的循环变形特征为典型的循环软化, 且直到最后断裂, 也没表现出任何饱和阶段。他们认为, 循环软化的主要原因是循环变形造成了晶粒取向差增加。Kunz^[19]通过 EBSD 和 TEM 对循环加载后的超细晶铜进行观察, 研究认为, 超细晶铜的疲劳特性与金属纯度有关, 超细晶低纯铜循环形变后, 晶粒尺寸、形状, 未发生显著变化, 位错密度降低, 疲劳寿命显著提高, 为一般粗晶铜的 1.7 倍。相应的循环变形剪切带是超细晶铜在循环变形后试样表面出现的一种典型的形变特征^[20-22]。研究认为, 这种剪切带其形貌和粗晶铜疲劳后出现的驻留滑移带 (persistent slip band, PSB) 十分相似, 超细晶铜的剪切带和局部晶粒粗化是同一损伤机制下的两个不

收稿日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51104113); 陕西省工业科技攻关项目 (2016GY-207)

作者简介: 王庆娟, 女, 1973 年生, 博士, 教授, 西安建筑科技大学陕西省冶金工程技术研究中心, 陕西 西安 710055, 电话: 029-82205097, E-mail: jiandawqj@163.com

同表现形式。Hoppel 等人^[23]认为，宏观剪切带的形成是循环变形导致的晶粒粗化和晶粒旋转之间交互作用的结果，晶粒粗化和转动共同造成了材料局部强度的降低以及由此引发的应变集中，而应变的局部化又进一步触发了晶粒的粗化和转动，并逐渐导致剪切带的形成。

综上所述，ECAP 制备超细晶铜疲劳极限与强度的关系表现不同，即同时出现循环软化又出现循环硬化现象，其损伤机制与超细晶组织的长大与转动有关，杂质和析出相的存在能否有效地阻止晶粒长大和转动，提高超细晶材料的疲劳性能还有待进一步研究。因此，本实验以 ECAP 制备的超细晶高纯 Cu、低纯 Cu 为研究对象，对其疲劳行为、循环应力-应变响应、疲劳寿命、疲劳前后晶粒取向分布等进行详细研究，分析纯度对材料疲劳性能的影响，以探讨更深层次的机理。

1 实验

本实验所用材料为低纯 Cu (low purity copper, LP Cu, 99.7%)、高纯 Cu (high purity copper, HP Cu, 99.9995%)，其化学成分见表 1 和表 2。

超细晶 (ultrafine grained, UFG) 铜采用 ECAP 挤压，ECAP 挤压模具拐角为 90°，挤压速度 2 mm/s，在室温条件下，采用“C 方式”挤压 6 道次。以 ECAP 挤压前的退火态低纯粗晶 (coarse grained, CG) 铜作为对比制备疲劳试样。通过电火花切割制取试样。拉伸试样平行段标距 12.5 mm，横截面 5 mm×2 mm；应力控制疲劳试样平行段标距 10 mm，横截面 4 mm×4 mm，用于应力比 $R=-1$ 的对称加载疲劳试验。拉伸和疲劳试样取样位置如图 1 所示，拉伸试样及疲劳试样受力方向平行于最后一次挤出方向。疲劳试验在电液伺服试验机上进行，应力控制疲劳频率取 30 Hz，应力比 $R=-1$ ，正弦波加载，同时加持引伸计采集各循环周期的应变量。拉伸性能在同一设备上测试，拉伸速率 1 mm/min。具有电子背散射功能的 Jeol JSM 6460 扫描电镜配备牛津仪器分析 INCA Crystal 用来做 EBSD，对晶粒取向进行统计分析。

表 1 实验用低纯铜的化学成分

Table 1 Chemical composition of the prepared LP Cu ($\omega/\%$)									
Cu	B	Zn	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O
Bal.	0.02	0.05	0.01	0.05	0.02	0.01	0.05	0.01	0.003

表 2 实验用高纯铜的化学成分

Table 2 Chemical composition of the prepared HP Cu ($\leq \mu\text{g/g}$)									
Cu	Bi	Zn	Al	Fe	Ni	Pb	Sn	Sb	Mg
Bal.	0.1	0.1	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1

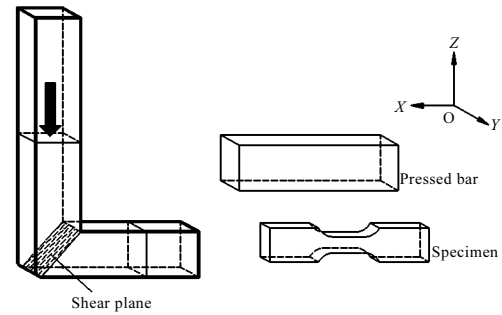


图 1 ECAP 工艺图解及试验取样方位示意图

Fig.1 Schematic diagram for the test specimen and ECAP process

2 实验结果

2.1 应力控制疲劳性能及循环应力-应变响应

图 2 为高纯 (HP) Cu、低纯 (LP) Cu 不同状态在对称循环载荷 (应力比 $R=-1$) 作用下的 $S-N$ 曲线。可以看出，粗晶和超细晶低纯 Cu 的疲劳曲线特性相似，随着应力幅的降低，断裂的循环次数升高，没有明显的疲劳极限。并且从图中曲线比较可知，在任何应力幅下，获得的超细晶低纯铜的寿命都大于 ECAP 变形前的粗晶铜，在相同应力幅下，循环周次提高 1.6~2.0 倍。而与通过 ECAP 制得的超细晶高纯铜的疲劳曲线相比，表现出不同的特性：在高应力幅下，超细晶高纯铜和超细晶低纯铜都具有较高的疲劳寿命，但在低应力幅下，超细晶高纯铜疲劳寿命迅速下降，趋向于一个较低的值。将本实验所得的数据拟合，可得超细晶、粗晶低纯铜和超细晶高纯铜应力幅 σ_a 与疲劳断裂循环周次 N_f 之间的关系曲线 (见图 2 中实线)。

若以循环周次 10^7 作为疲劳极限，则可得各状态的铜的拟合所得的疲劳极限值 σ_{-1} (见表 3)。由疲劳数

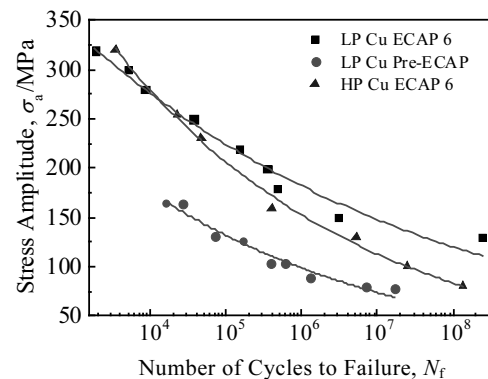


图 2 高纯 (HP) Cu、低纯 (LP) Cu 的 $S-N$ 曲线 ($R=-1$)

Fig.2 $S-N$ curves ($R=-1$) of HP Cu and LP Cu

据分析可以看出，超细晶材料的应力控制疲劳寿命得到了较大的提高，由光滑试样的疲劳极限 σ_{-1} 和材料抗拉强度 σ_b 之间基本满足线性关系。根据表 3 数据可得，粗晶和超细晶低纯 Cu 抗拉强度和疲劳极限满足关系式 $\sigma_{-1} = 0.35\sigma_b$ ，超细晶高纯 Cu 抗拉强度和疲劳极限满足关系式 $\sigma_{-1} = 0.25\sigma_b$ ，表明超细晶低纯铜与常规应变条件下的粗晶铜遵循相同的关系，即抗拉强度高，疲劳极限也高。而超细晶高纯铜的疲劳行为却不同，有较高的抗拉强度，却有较低的疲劳极限。

图 3 为超细晶高纯 Cu 和低纯 Cu 在系列应力幅下的循环应力-应变响应（横坐标为相对坐标， N 为记录滞后环的循环周次， N_f 为在该应力幅下的疲劳寿命）。在高应力幅（ $\sigma_a=320$ MPa）时，超细晶高纯 Cu 和低纯 Cu 疲劳寿命分别为 3.34×10^3 、 1.84×10^3 （见图 2），

表 3 低纯 Cu、高纯 Cu 疲劳极限与抗拉强度

Table 3 Fatigue limit and tensile strength for LP and HP Cu

Sample	Yield strength, $\sigma_{0.2}$ /MPa	Ultimate tensile strength, σ_b /MPa	Elongation, δ_5 /%	Hardness, HV/ $\times 10$ MPa	Fatigue limit, σ_{-1} /MPa
UFG LP Cu	378.8	447.2	16.2	135	146.4
UFG HP Cu	365.4	444.8	17.3	136	113
CG LP Cu	92.6	193.5	32.5	46	73.6

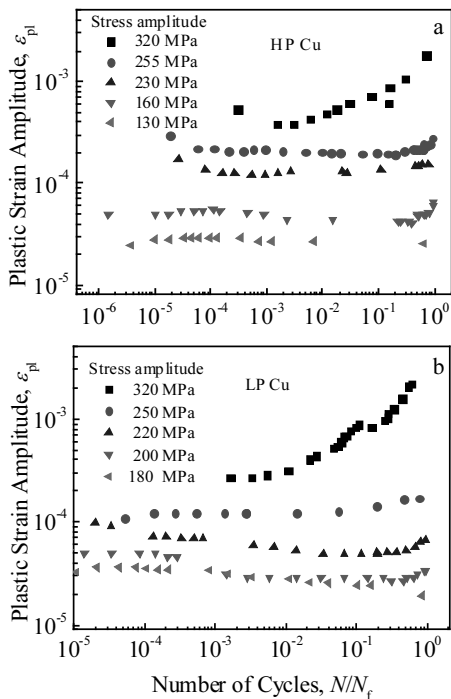


图 3 超细晶高纯（HP）Cu、低纯 Cu 的循环应力-应变响应（ $R = -1$ ）

Fig.3 Plastic strain amplitude vs number of cycles for ultra-fine grain HP Cu (a) and LP Cu (b)

超细晶高纯 Cu 疲劳寿命高，其都表现出明显的循环软化特征（在应力幅不变的条件下，应变幅随循环逐渐增大）；在较高应力幅（ $\sigma_a=250$ MPa）时，超细晶高纯 Cu 和低纯 Cu 疲劳寿命分别为 2.23×10^4 、 3.7×10^4 （见图 2），此时，超细晶低纯 Cu 的疲劳寿命高于高纯 Cu，在循环应变过程中其塑性应变趋于稳定；在中等应力幅（ $\sigma_a=200$ MPa 左右）时，超细晶低纯 Cu 的疲劳寿命明显高于高纯 Cu，在疲劳加载过程中表现出缓和的循环硬化特征。

2.2 疲劳前后晶粒取向变化

图 4、图 5 分别给出了超细晶低纯 Cu 和超细晶高纯铜疲劳前后的晶粒取向柱状分布图（4a、4c、5a、5c）和大角度晶界与小角度晶界分布图（4b、4d、5b、5d）。其中红色代表高角度晶界，绿色代表低角度晶界，图中对于取向差在 5° 以下的小角度晶界没有标出，取向差小于 10° 为小角度晶界，大于 10° 为大角度晶界。比较疲劳前后的柱状图可以看出，ECAP 制备态小角度晶界所占的比例较大，经过循环后，大角度晶界所占的比例明显增大。疲劳后的位错密度降低，晶界比较清晰，更容易标定，超细晶铜疲劳前后晶粒的尺寸变化不明显。疲劳前，大角度晶界分布比较均匀，疲劳后，大角度晶界数增加。低纯铜疲劳后的大角度晶界峰值出现在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间，而对于高纯 Cu，疲劳后的大角度晶界比疲劳前的大角度晶界的增多比低纯铜明显，大角度晶界的峰值出现在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。经过疲劳循环后，晶粒的取向和取向差发生了较大的变化，纯度越高，这种变化越明显，说明超细晶材料的疲劳软化与组织取向变化有较大关系，从 S-N 曲线可知，超细晶高纯 Cu 的抗疲劳能力较弱，在较低应力幅条件下，其疲劳极限与粗晶 Cu 相当。

3 分析与讨论

在应力控制条件下，超细晶铜与粗晶铜相比，表现出较高的疲劳强度，应力幅越大，其疲劳寿命越明显优于未经 ECAP 处理的样品；当应力幅降低时，超细晶高纯铜的疲劳寿命明显降低，而低纯铜的寿命比较稳定。超细晶铜在高应力幅条件下，表现出明显的循环软化特征；随着应力幅的降低，超细晶低纯铜塑性应变趋于稳定，在应力幅 $\sigma_a=220$ MPa 时表现硬化特征。而高纯铜在应力幅 $\sigma_a=220$ MPa 时，依然表现循环软化特征。在高应力幅下，超细晶材料低周疲劳表现出循环软化特征。在文献[23-25]的 UFG-Cu 疲劳行为研究中也出现类似现象。通常认为造成软化的主要原因是由于 ECAP 形变后的超细晶铜内部存在很高的内应力，在循环交变应力作用下，出现晶粒粗化、再结

晶和剪切带所导致的。疲劳加载过程中，微观结构越稳定，循环软化越难产生。ECAP 变形后的处于亚稳

态的亚结构通过位错间的湮灭和重组产生回复，使晶粒粗化以及表面产生驻留滑移带是造成软化的主要原

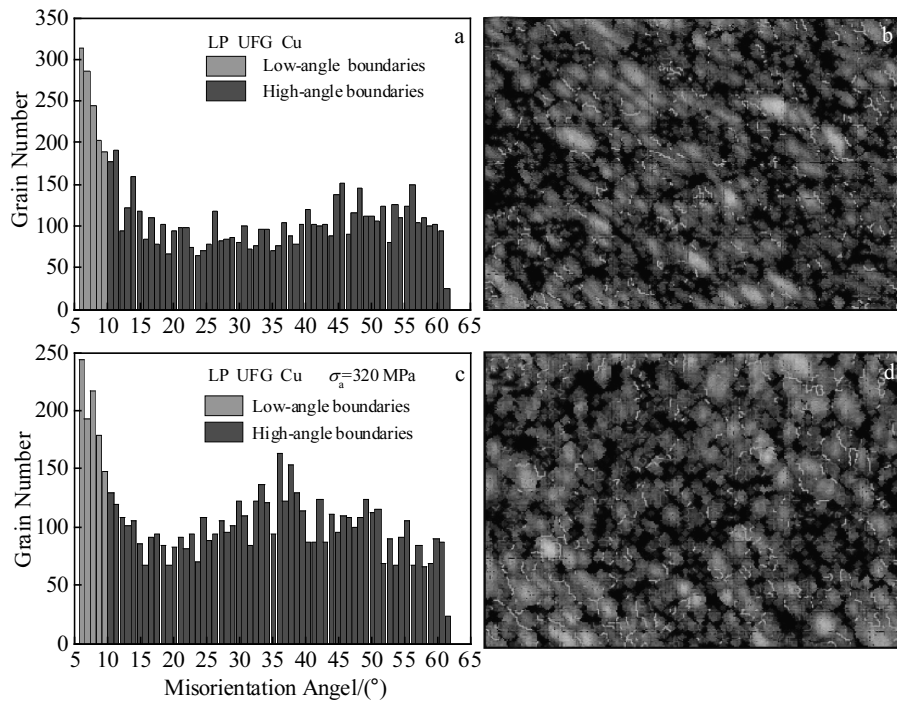


图 4 超细晶低纯 Cu 疲劳前、后晶粒取向柱状分布图；疲劳前、后大角度晶界与小角度晶界分布图

Fig.4 Columnar maps of grain-orientation before (a) and after (c) fatigue; images of high-angle grain boundaries and low-angle grain boundaries before (b) and after (d) fatigue for LP UFG Cu

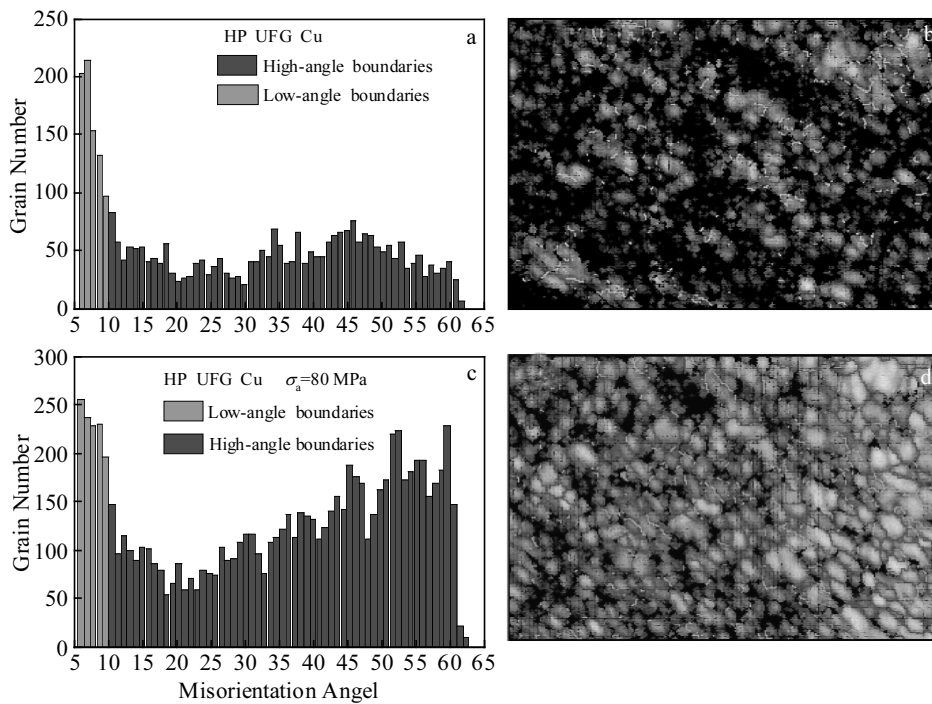


图 5 超细晶高纯 Cu 疲劳前、后晶粒取向柱状分布图；疲劳前、后大角度晶界与小角度晶界分布图

Fig.5 Columnar maps of grain-orientation before (a) and after (c) fatigue; images of high-angle grain boundaries and low-angle grain boundaries before (b) and after (d) fatigue for HP UFG Cu

因。而 Vinogradov^[17]等人研究超细晶铜循环形变后，无论是晶粒尺寸、形状，甚至于位错密度，均未发生显著变化，认为循环软化并不是由晶粒粗化造成的，而是相邻晶粒间取向差增大的结果，小角晶界构成了亚晶。L. Collini^[15]在研究超细晶铜裂纹扩展时，发现晶粒边界的纯度和胞状结构对超细晶的疲劳裂纹扩展产生影响，低纯铜具有更高的疲劳强度。另一方面，软化的剧烈程度和晶粒转动的严重程度与塑性应变幅的大小有关，控制结构的变化是一个热激活过程，应变幅越大，晶粒发生转动的可能性越大，导致大角度晶界越多，引起循环软化。因此，在高应力幅条件下，塑性应变较大，表现出循环软化。软化及疲劳稳定性与晶粒的转动和取向差有关。

为进一步分析纯度的影响，图 6 给出了超细晶高纯 Cu 和低纯 Cu 在 $0.5N_f$ 时，塑性应变量 ϵ_{pl} 与应力幅 σ_a 对应的循环应力-应变曲线。其拟合方程见式 (1) 和 (2)：

低纯 Cu 循环应力应变：

$$\sigma_a = K \epsilon_{pl}^n = 1279.1 \epsilon_{pl}^{0.196} \quad (1)$$

高纯 Cu 循环应力应变：

$$\sigma_a = K \epsilon_{pl}^n = 743.02 \epsilon_{pl}^{0.118} \quad (2)$$

从拟合结果和实验点分布可以看出，与超细晶低纯 Cu 相比，超细晶高纯 Cu 具有较小的循环硬化指数 n 和循环硬化系数 K ，表明其稳定性较弱，在循环变形过程中，位错易滑动，通过位错间的湮灭和重组产生回复，所以循环过程中，超细晶高纯 Cu 的疲劳稳定性较差。超细晶低纯铜主要由于纯度较低，含有大量杂质元素，这些杂质元素分布于晶界或与位错缠结，对晶界和位错起钉扎作用，有效阻止晶粒的转动和位错的运动，降低其回复软化，使其具有高的抗拉强度和较好的疲劳稳定性。综合分析，材料内的杂质或第二

相可以影响材料的疲劳稳定性。经 ECAP 挤压处理，基体内含有大量的位错和亚晶界，当循环变形开始后，材料内部的位错及晶界由于往复运动又发生位错湮灭及晶界滑移的趋势，这也是材料发生循环软化的最直接原因之一。但由于位错和杂质（合金元素）间的交互作用可以很大程度地影响自由位错的湮灭、重组及滑移，有效阻止其回复过程，晶粒转动及循环软化行为，使组织稳定性增强，可以显著增强材料的抗疲劳性能，对提高材料的强度和疲劳稳定性有一定的作用。

4 结 论

1) 在任何应力幅下，获得的超细晶低纯铜的疲劳寿命都大于 ECAP 变形前的粗晶铜；在相同应力幅下，循环周次提高 1.6~2.0 倍。超细晶低纯铜与常规应变条件下的粗晶铜遵循相同的关系，即抗拉强度高，疲劳极限也高。而超细晶高纯铜的疲劳行为却不同，有较高的抗拉强度，却有较低的疲劳极限。

2) 在应力控制条件下，超细晶铜在高应力幅条件下，表现出明显的循环软化特征；随着应力幅的降低，超细晶低纯铜塑性应变趋于稳定，在应力幅 $\sigma_a=220$ MPa 时表现硬化特征，而高纯铜在应力幅 $\sigma_a=220$ MPa 时，依然表现循环软化特征。

3) ECAP 制备态超细晶铜的小角度晶界所占的比例比较大，经过循环变形后，大角度晶界所占的比例明显增大，疲劳后的位错密度降低，超细晶铜疲劳前后晶粒的尺寸变化不明显。

4) 与超细晶低纯 Cu 相比，超细晶高纯铜杂质含量低，在循环变形过程中，位错和晶粒易动，位错间的湮灭和重组易产生回复，相邻晶粒间取向差增大，超细晶高纯 Cu 具有较小的循环硬化指数 n 和循环硬化系数 K ，表明其疲劳稳定性较差。

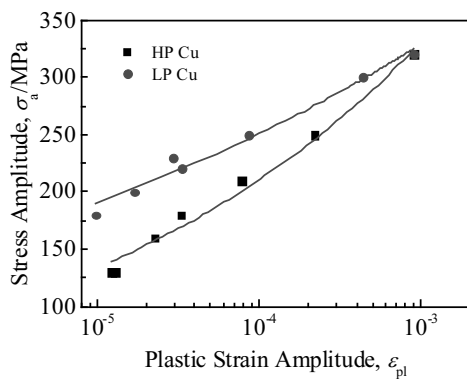


图 6 超细晶高纯 (HP) Cu 和低纯 (LP) Cu 的循环应力-应变曲线

Fig.6 Stress amplitude vs plastic strain amplitude for HP UFG Cu and LP UFG Cu

参考文献 References

[1] Goodarzy M H, Arabi H, Boutorabi M A et al. *J Alloy Compd* [J], 2014, 585: 753

[2] Rabkin E, Gutman I, Kazakevich M et al. *Mater Sci Eng*[J], 2005, A396: 11

[3] Goloborodko A, Sitdikov O, Kaibyshev R et al. *Mater Sci Eng* [J], 2004, A381: 121

[4] Wang Qingjuan(王庆娟), Xu Changzheng(徐长征), Zheng Maosheng(郑茂盛) et al. *Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 2007, 43(5): 498

[5] Kim Ho-Kyung, Lee Young-In, Chung Chin-Sung. *Scripta Materialia*[J], 2005, 52: 473

[6] Del B R, Crimi M, Sciacco M et al. *Mater Sci Eng A*[J], 2003,

- 340(1): 243
- [7] Chung C S, Kim J K, Kim H K *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2002, 337(1-2): 39
- [8] Mughrabi H, Höppel H W. *Int J Fatigue*[J], 2010, 32(9): 1413
- [9] Mughrabi H, Höppel H W, Kautz M. *Scripta Materialia*[J], 2004, 51(8): 807
- [10] Wang Q J, Du Z Z, Luo L *et al. J Alloy Compd*[J], 2012, 526(11): 39
- [11] Cavaliere P. *Int J Fatigue*[J], 2009, 31(10): 1476
- [12] Hanlon T, Tabachnikova E D, Suresh S. *Int J Fatigue*[J], 2005, 27(10-12): 1147
- [13] Wu S D, Wang Z G, Jiang C B *et al. Scripta Materialia*[J], 2003, 48(12): 1605
- [14] Oscar Fabián Higuera-Cobos, Jonathan Antonio Berríos-Ortiz, José María Cabrera. *Mater Sci Eng A*[J], 2014, 609: 273
- [15] Collini L, Hoppel H W, Zhou Z M *et al. Procedia Engineering*[J], 2010, 2(1): 2065
- [16] Goto M, Han S Z, Yamamoto T *et al. Int J Fatigue*[J], 2016, 92: 577
- [17] Vinogradov A, Patlan V, Hashimoto S *et al. Philosophical Magazine A*[J], 2002, 82(2): 317
- [18] Agnew S R, Weertman J R. *Mater Sci Eng A*[J], 1998, A244(2): 145
- [19] Kunz L, Lukas P, Svoboda M. *Mater Sci Eng A*[J], 2006, 424(1-2): 97
- [20] Hashimoto S, Kaneko Y, Kitagawa K *et al. Mater Sci Forum* [J], 1999, 312-314: 593
- [21] Ludvík Kunz, Stanislava Fintová. *Procedia Engineering*[J], 2014, 74: 2
- [22] Xu C, Wang Q, Zheng M *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2008, 475(1): 249
- [23] Hoppel H W, Zhou Z M, Mughrabi H *et al. Philosophical Magazine A*[J], 2002, 82(9): 1781
- [24] Agnew S R, Vinogradov A Y, Hashimoto S *et al. J Electronic Mater*[J], 1999, 28(9): 1038
- [25] Vinogradov A, Kaneko Y, Kitagawa K *et al. Scripta Materialia*[J], 1997, 36(11): 1345

Effect of Purity on Fatigue Properties of Ultrafine Grained Cu Processed by Equal Channel Angular Pressing

Wang Qingjuan, Zhou Ying, Shuang Yixiang, Du Zhongze

(Metallurgy Engineering Technology Research Center of Shaanxi, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The fatigue properties of ultra-fine grained (UFG) high purity (HP) and low purity (LP) copper prepared by equal channel angular pressing (ECAP) were investigated by fatigue tests performed in air, with a symmetrical loading ratio $R = -1$. The cyclic stress-strain response, fatigue life and grain orientation distribution before and after fatigue were analyzed. The relationship between purity and fatigue stability of ultra-fine grained copper was discussed. The results indicate that the stress-controlled fatigue life of UFG low purity copper is about 1.6~2.0 times longer than that of coarse grain (CG) counterparts at any given stress amplitude. On the other hand, the fatigue curve of UFG high purity copper shows different characteristics. The fatigue failure cycles of UFG HP copper is strongly dependent on the applied stress amplitude and decreases sharply with decreasing stress amplitude. At lower cyclic stress, UFG HP copper exhibits lower fatigue life. The cyclic stress-strain response of UFG Cu under stress-controlled loading changes from cyclic softening to cyclic hardening with decreasing stress amplitude. The UFG low purity copper shows a relatively high cyclic strain hardening exponent, hardening coefficient and fatigue stability compared to the UFG high purity copper, because impurities hinder grain rotation and dislocation motion, decline recovery rate, and reduce grain orientation difference.

Key words: equal channel angular pressing (ECAP); ultrafine grained copper; high-cycle fatigue; purity

Corresponding author: Wang Qingjuan, Ph. D., Professor, Metallurgy Engineering Technology Research Center of Shaanxi, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82205097, E-mail: jjiandawqj@163.com