

不同取向疲劳态铜单晶高速冲击下的绝热剪切带*

杨瑞青 李守新 李广义 张哲峰

(中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室, 沈阳 110016)

摘要 采用分离式 Hopkinson 压杆装置 (SHPB) 和扫描电镜电子通道衬度 (SEM-ECC) 技术研究了不同取向疲劳态铜单晶高应变率压缩下形成的绝热剪切带 (ASB). 实验表明, ASB 形成的临界应变与晶体取向有关, 接近压缩临界双滑移取向晶体需要的临界应变最小, 单滑移和压缩共轭双滑移取向的次之, 共面双滑移取向的最大. 本实验条件下形成的 ASB 内部典型的位错组态为位错胞结构, 未观察到再结晶现象. 根据空间取向, ASB 可以分为 3 类: 第 1 类非常接近铜晶体疲劳时形成的第 2 类形变带 (DB_{II}) 平面, 其临界应变最小; 第 2 类 ASB 位向或者比较接近 DB_{II} 平面或者比较接近第 1 类形变带 (DB_I) 平面, 其临界应变居中; 第 3 类 ASB 位向与 DB_I 和 DB_{II} 平面均不接近, 其临界应变最大.

关键词 铜单晶, Hopkinson 压杆, 绝热剪切带, 形变带

中图法分类号 TG117

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)03-0245-06

STUDY OF ADIABATIC SHEAR BANDS IN FATIGUED COPPER SINGLE CRYSTALS WITH DIFFERENT ORIENTATIONS UNDER HIGH VELOCITY IMPACT

YANG Ruiqing, LI Shouxin, LI Guangyi, ZHANG Zhefeng

Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Correspondent: LI Shouxin, professor, Tel: (024)83978779, E-mail: shxli@imr.ac.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50271075)

Manuscript received 2005-07-04, in revised form 2005-09-13

ABSTRACT Adiabatic shear bands (ASBs) were studied by SEM electron channeling contrast (ECC) technique, which formed in fatigued copper single crystals with different orientations under high velocity impact using split-Hopkinson pressure bar (SHPB). The experimental results show that the critical strain of ASBs' formation is orientation-dependent. Single crystal close to the compression critical double slip orientation needs less strain for ASB formation than the crystals with typically single slip and close to compression conjugate double slip orientations. Single crystal close to the coplanar double slip orientation needs the maximum critical strain. Under current experimental circumstance the typical dislocation pattern within ASBs is dislocation cell structure, and no recrystallization was observed. There are three types of ASBs according to their orientations. The first type is that the plane of ASB is very close to the habit plane of the second type deformation band (DB_{II}) in fatigued copper single crystals, which needs the minimum critical strain to form. The second type is rather close to the habit plane of either DB_I (the first type deformation band) or DB_{II}, which needs a modest critical strain. The third type is neither close to the habit plane of DB_I nor DB_{II}, which needs a the maximum critical strain.

KEY WORDS copper single crystal, split-Hopkinson pressure bar (SHPB), adiabatic shear band (ASB), deformation band (DB)

形变局部化在金属材料的塑性变形中经常发生. 比如在受到单向拉伸和压缩时, 样品中会出现滑移线(带). 在

循环形变中除了出现滑移线(带)以外, 还会出现驻留滑移带 (PSB) 和形变带 (DB). 而在高速加载条件下, 形变局部化(即绝热剪切带 (ASB)) 的出现更是相当普遍.

ASB 是材料中塑性应变高度集中的狭窄带, ASB 的出现表明材料承载能力的下降甚至丧失, 将直接影响材料的使用性能. 因此, 对于 ASB 的研究具有重要的理论价值和背景.

* 国家自然科学基金资助项目 50271075

收到初稿日期: 2005-07-04, 收到修改稿日期: 2005-09-13

作者简介: 杨瑞青, 男, 1980 年生, 博士生

目前关于绝热剪切带的研究, 绝大多数集中在多晶体系中^[1-6], 没有考虑材料的各向异性(即晶体取向)对 ASB 萌生和扩展的影响. 通常, 高速加载后出现的 ASB 宽为 $1-10^2 \mu\text{m}$ 量级, 其宽度覆盖了一般金属材料普通晶粒尺寸(约为 $20-30 \mu\text{m}$) 的范围. ASB 也有一个萌生及扩展的过程. 若一个多晶材料晶粒尺寸比 ASB 的宽度大, 则很有可能 ASB 的产生与扩展受晶粒取向影响. 另外, 即使晶粒尺寸比 ASB 的宽度小, 但 ASB 的宽度在动态形变中也有一个从薄变厚的过程, 这样晶粒取向也会在一定程度上对 ASB 的形成与扩展有影响. 因此, 为了更深入地了解 ASB 的形成机制, 研究晶粒取向对 ASB 的影响很有必要.

铜单晶体是研究金属材料变形的良好模型材料, 但是原始态铜单晶体相对较难出现 ASB^[7,8]. 最近的工作^[9]表明, 微观缺陷(如夹杂和第二相)以及各种界面缺陷是促成 ASB 形成的重要原因. 李军伟等^[10]采用分离式 Hopkinson 压杆实验装置(SHPB)和扫描电镜电子通道衬度(SEM-ECC)技术, 研究了疲劳态铜单晶体在高应变率下形成的 ASB. 实验发现, 疲劳态铜单晶比原始态铜单晶更容易出现 ASB. 同时, 规则排列的 PSB 位错花样可以作为标识物, 以识别 ASB 的形成及位错的进一步运动. 但该文未考察晶体原始取向对形成 ASB 的影响. 因此, 本工作进一步研究了不同取向疲劳态铜单晶体高速加载下的形变行为.

1 实验方法

本实验采用 4 组单滑移取向铜单晶体(分别设定为 A, B, C 和 D 组). 加载轴方向在标准取向三角形中的位置见图 1. 在室温下采用 Shimadzu 电液伺服疲劳试验

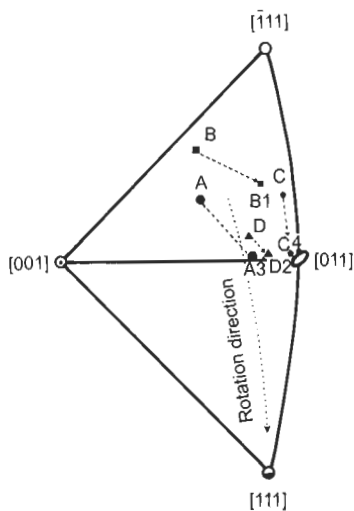


图 1 样品加载轴取向在标准取向三角形中的位置

Fig.1 Loading axis orientations in the stereographic triangle for the tested Cu single crystals (A, B, C, D are original orientations; A3, B1, C4, D2 are orientations after deformation induced ASBs)

机对试样进行对称拉-压循环疲劳. 控制轴向塑性应变幅为 0.1%, 频率为 0.1 Hz, 疲劳 10^4 cyc. 与文献 [11] 一致, 疲劳后 4 组单晶体中均形成 PSB 和脉络组成的位错规则结构. 其中样品 A(1 13 $\bar{7}$) 面上的位错组态如图 2 所示.

各疲劳后的样品在标距区内垂直于轴向用电火花切割机切成 4 个小块, 尺寸约为 $(5 \times 5 \times 4)\text{mm}$ (长度 \times 宽度 \times 冲击方向厚度). 高速冲击时将试样小块置于 SHPB 装置输入杆和输出杆之间. 晶体的冲击方向采用原轴向方向. 本装置在输出杆后装有附加杆可以起到一定的卸波作用, 但不能完全消除应力波反射. 应变率采用第一次加载波计算得出. 实验过程中可以通过调整撞击杆的长度、速度和试样的厚度改变试样经历的应变率. 本实验样品初始长度相同, 其它实验参数不变, 结果控制应变率约为 $4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. 但为了获取高速形变中某个阶段是否出现 ASB 的信息, 采用样品外面带有不同长度不锈钢衬管的方法, 以控制应变(见图 3). 当入射杆与不锈钢衬管接触以后, 由

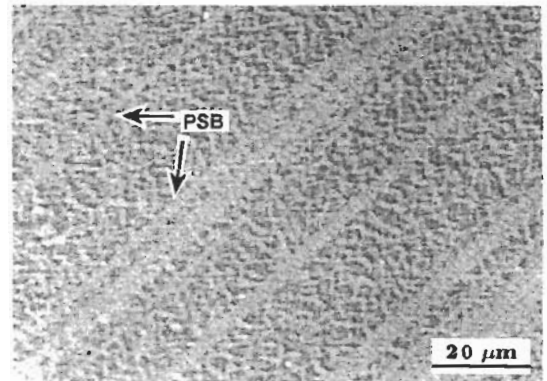


图 2 疲劳后 Cu 单晶样品 A 在 (1 13 $\bar{7}$) 面上的驻留滑移带 PSB 和位错脉络

Fig.2 PSBs and dislocation vein structures on the (1 13 $\bar{7}$) plane of a fatigued Cu single crystal No.A

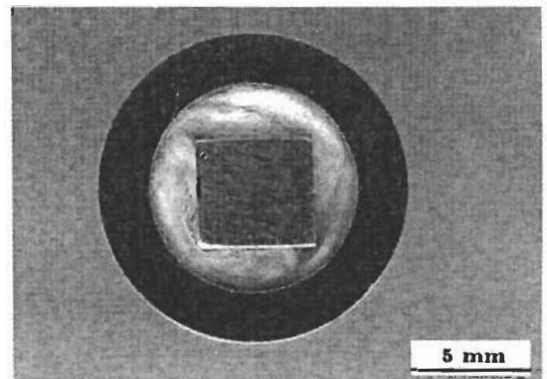


图 3 样品和不锈钢衬管的组合方式

Fig.3 The assembly of specimen and stainless steel tube, which can control strain

于衬管强度大,可以很快阻止入射杆继续压缩.因此总的压缩量大致可由衬管的高度决定.这种方法可以使得同一取向、同一疲劳状态样品受到同一高速形变率压缩,但可停在不同应变处,便于比较 ASB 的形成与演变.本文将各组不同冲击应变下的样品分别标为 A1—A4, B1—B4, C1—C4, D1—D4. 通过 SEM-ECC 技术观察冲击后各样品的位错组态. 其它实验细节同文献 [10].

2 实验结果

2.1 实验前后样品取向变化和临界应变

原始样品用扫描电镜背散射技术 (SEM-EBSD) 定出轴向取向亦见图 1. 其中用虚线加箭头连接的点中,起点为各试样原始轴向取向,终点为冲击后的样品轴向取向. 可知冲击前 4 个晶体均为单滑移取向. 同时可以看到: 样品 A 为典型的单滑移取向; 样品 B 接近 $[001]$ — $[\bar{1}11]$ 线, 即拉伸时的共轭双滑移取向 (压缩时为临界双滑移取向)^[12]; 样品 C 接近 $[011]$ — $[\bar{1}11]$ 线, 即接近共面双滑移取向; 样品 D 接近 $[001]$ — $[011]$ 线, 即拉伸时的临界双滑移取向 (压缩时的共轭双滑移取向)^[12]. 各样品的原始轴向取向见表 1, 主滑移系统均为 (111) — $[\bar{1}01]$. 对于同一取向样品, 通过加装不锈钢衬管可以得到不同应变的压缩样品. 经过观察可以确定每个应变下 ASB 是否出现, 本文把能够出现 ASB 的样品所对应的最小应变定义为临界应变, 其值亦列于表 1 中.

文献 [12] 详细描述了单晶体在单向拉伸和压缩条件下晶体的角度旋转. 其中在单向压缩情况下, 晶体轴向将朝 $[111]$ 方向旋转. 从冲击后出现 ASB 的样品的轴向取向 (图 1)(同时排除晶体变形及 EBSD 测量误差的影响) 可知, 晶体高速冲击压缩时, 晶格依旧大致沿其轴向和 $[111]$ 取向点确定的大圆旋转, 与文献 [12] 的论述基本一致. 另外, 表 1 和图 1 中有以下 2 点值得注意:

(1) 样品 B 中出现 ASB 时的应变, 即所谓的临界应变最小, 为 -10.8% . 样品 B 初始轴向取向接近压缩临界双滑移取向. 样品 A 和 D 出现 ASB 的临界应变居中, 分别为 -18.5% 和 -16.7% . 它们分别是典型单滑移取向和接近压缩共轭双滑移取向. 而样品 C 出现 ASB 的临

界应变最大, 为 -22.7% , 接近于共面双滑移取向.

(2) 出现绝热剪切带时, 样品 A, C 和 D 轴向取向均旋转到接近 $[001]$ — $[011]$ 线, 表明此时各样品均达到压缩共轭双滑移取向. 而样品 B 初始是压缩临界双滑移取向, 在应变较小、未达到压缩共轭双滑移取向时即可形成 ASB.

2.2 绝热剪切带结构和内部位错组态

图 4 示出样品中 ASB 的形态. 从图可见, ASB 之间互相平行, 宽度约为 $10\text{--}20\ \mu\text{m}$, 间距约为 $50\text{--}200\ \mu\text{m}$. 这种 ASB 之间有规律的排列与应变率有很大关系^[10], 而其空间位向则与晶体取向有关, 具体见下述分析讨论. 图 5 示出样品中 ASB 内部典型的位错组态. 从图可见, 其位错组态为位错胞结构, 其中位错胞尺寸约为 $1\text{--}2\ \mu\text{m}$. 已知 ASB 内部的胞状位错结构与带内次滑移系的启动以及其与主滑移系的相互作用密切相关. 图 5 中另一显著特点就是未观察到再结晶晶粒. Meyers 等^[13]指出, 可产生再结晶的真应变临界值与材料相关. 他们的工作表明, 对于超声波硬化的铜样品, 出现再结晶时的真应变临界值约为 1.9. 而本实验最大工程应变约为 -25% . ASB 内应变虽大, 但在目前实验条件下一般也只为基体的 2—3 倍^[10]. 显然本实验条件还达不到再结晶临界应变, 故带内只能出现位错的重新排列.

2.3 绝热剪切带 ASB 的位向

根据 ASB 在样品正面和侧面的迹线, 并结合试样的晶体取向, 可以确定 ASB 平面的取向 (注意, 本文所指 ASB 面并非严格意义上的晶体学平面). 如晶体疲劳态冲击样品 D2, 在 $[\bar{1}811]$ 为加载轴时形成的 ASB 的宽度约为 $15\ \mu\text{m}$, 间距约为 $400\ \mu\text{m}$. 在 $(\bar{5}5\bar{4})$ 和 $(53\bar{2})$ 面上, ASB 迹线与冲击方向夹角分别为 47° 和 72° . 通过几何计算可得出, ASB 所在的平面接近 $(41\bar{9})$ 面. ASB 面与冲击方向的夹角为 45° , 与主滑移面的夹角为 76° . 已知在循环形变中, 条件适当的时候可以形成以下 2 类形变带^[14]:

(1) 第 1 类形变带 (DB_I) 基本平行于主滑移面 (111) (注意, PSB 严格平行于主滑移面).

表 1 各样品中绝热剪切带与加载轴及某些特殊面的几何关系
Table 1 Geometrical relationship among ASB, loading axis and some special planes

Sample No.	Loading axis	Plane of ASB	Angles between ASB plane and loading axis deg	Angles between ASB plane and DB habit plane, deg		Critical strain %
				$DB_I (111)$	$DB_{II} (\bar{1}01)$	
A3	$[\bar{1}24]$	(367)	56	18	72	-18.5
B1	$[\bar{3}47]$	$(563\bar{7}\bar{3})$	58	85	8	-10.8
C4	$[\bar{4}1516]$	$(\bar{7}55)$	57	79	30	-22.7
D2	$[\bar{1}811]$	$(41\bar{9})$	45	76	21	-16.7

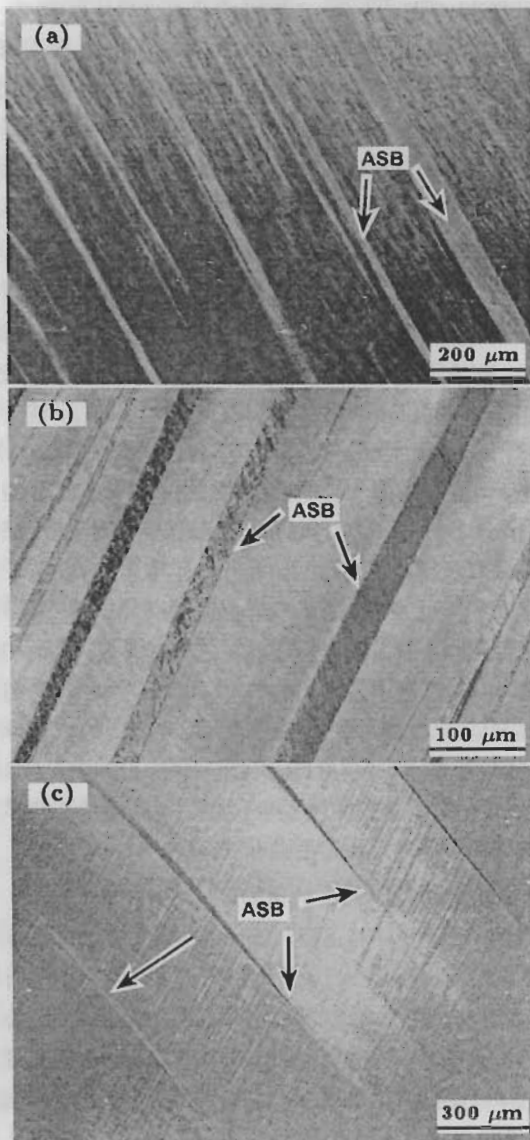


图4 绝热剪切带 ASB 的 SEM-ECC 衬度形貌

Fig.4 SEM-ECC patterns of the ASB after pre-fatigued with a plastic strain amplitude of 0.1%, 10^4 cyc, and impact strain rate of $4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

(a) sample No.A3, $(1\ 13\ \bar{7})$ plane, axial strain -18.5%

(b) sample No.B1, $(\bar{1}\ 15\ 8)$ plane, axial strain -10.8%

(c) sample No.D2, $(\bar{5}\ 5\ \bar{4})$ plane, axial strain -16.7%

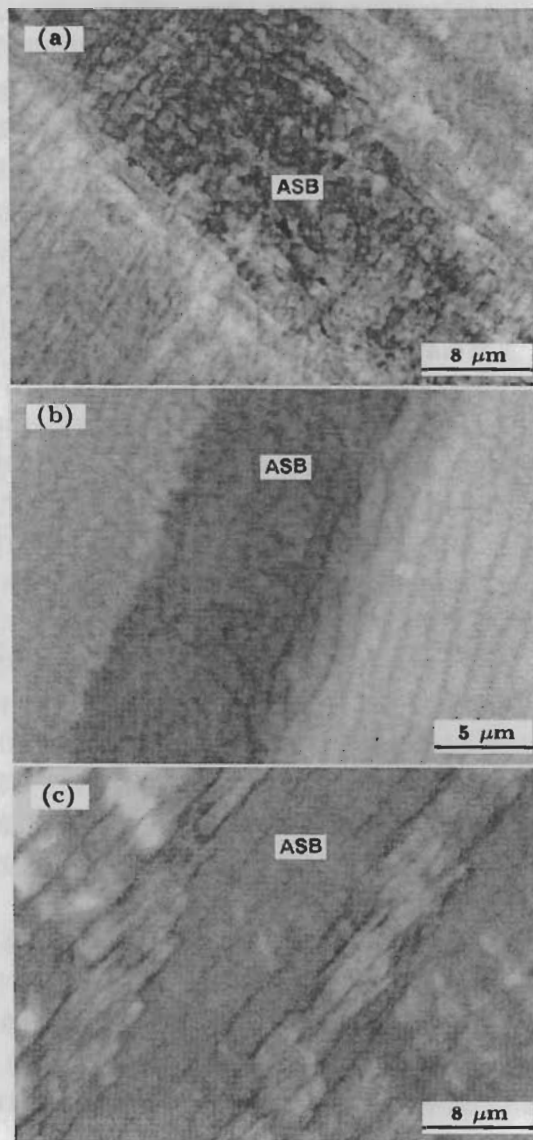


图5 样品 D2, B1 和 C4 的 ASB 内部位错组态, SEM-ECC 衬度形貌

Fig.5 SEM-ECC contrast morphologies of samples No.D2 (a), No.B1 (b) and No.C4 (c), showing configurations of dislocation cells within ASBs and no recrystallization observed

(2) 第2类形变带 (DB_{II}) 基本平行于 $(\bar{1}01)$ 面, $DB_I(111)$ 平面与 DB_{II} 平面互相垂直。在本实验中, 样品 D2 晶体中 ASB 面与 DB_{II} 平面的夹角为 21° 。

图6 为晶体疲劳态冲击样品 D2 中的 ASB 与主滑移面 (111) 以及 DB_{II} ($\bar{1}01$) 面几何关系示意图。

表1 亦给出4组样品中出现的 ASB 平面与主滑移面 (111) (DB_I 平面) 及 DB_{II} 平面夹角的数据。从表可见, 形成的 ASB 大致可以分为以下3类: 第1类的 ASB

取向非常接近 DB_{II} , 如样品 B 晶体, 它的原始加载轴方向接近压缩临界双滑移取向, 形成的 ASB 的临界应变最小。第2类 ASB 取向或较接近 DB_{II} (如样品 D), 或较接近 DB_I (如样品 A), 但相对于第1类则偏离较远 (如样品 D 晶体 ASB 与 DB_{II} ($\bar{1}01$) 偏离约 21° , 样品 A 晶体的 ASB 与 $DB_I(111)$ 偏离约 18°), 它们产生的 ASB 的临界应变居中。第3类 ASB 的取向与 DB_I 和 DB_{II} 都不接近 (如样品 C), 所产生的 ASB 的临界应变最大。

经过简单计算可得出, 晶体在其取向点与 $[111]$ 取向点组成的大圆上, 初始取向旋转离开三角形 $[001]$ — $[011]$ 边的角度。以这一角度为横坐标, 又以表1 中的 ASB 与

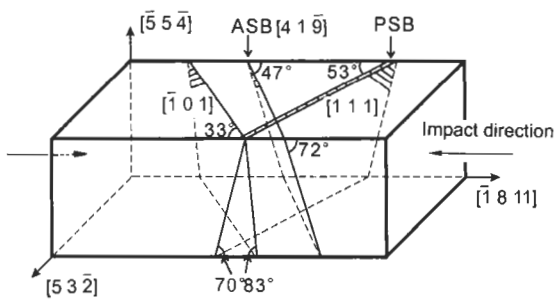


图 6 晶体疲劳态冲击样品 D2(加载轴为 $[\bar{1} 8 11]$) 中 ASB 与主滑移面 $(\bar{1} 0 1)$ 及 DB_{II} 平面的几何关系示意图

Fig.6 Illustration of geometrical relationship among ASB plane, primary slip plane and DB_{II} plane of crystal sample No. D2 (loading axis $[\bar{1} 8 11]$)

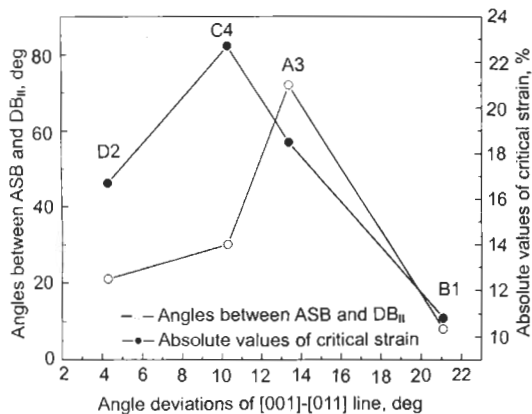


图 7 各样品中 ASB 位向和临界应变与晶体取向的关系

Fig.7 Relationships among ASB orientations, critical strains and specimens' original orientations

$(\bar{1} 0 1)$ 面的夹角以及临界应变为纵坐标, 可作图 7(图中从左到右分别为样品 D2, C4, A3 和 B1)。从图中可以清楚地看出 ASB 取向和临界应变与其原始取向的关系。需要注意的是, 横轴最左边对应三角形 $[001]-[011]$ 边, 最右边对应三角形 $[001]-[\bar{1} 11]$ 边。晶体的初始取向与这两条边的接近程度, 对 ASB 的形成和位向有很大影响。而晶体取向与 $[011]-[\bar{1} 11]$ 线, 即与共面双滑移取向的接近程度对其影响不大。

3 讨论

Asaro 等^[15,16]曾构想了一个对称双滑移模型, 以说明准静态加载下剪切带的形成。在这一模型中, 剪切带的形成被描述为两个相互独立的共轭滑移系滑移所致。并且认为共轭滑移引起的晶体转动所产生的几何软化是剪切带形成的重要原因。

李军伟等^[10]用这一模型解释了高速加载条件下疲劳态铜单晶中 ASB 的产生机制。但是由于其样品只有一组取向, 缺乏对临界应变的分析。本工作发现, 除压缩共

轭滑移外, 压缩临界滑移亦可促进 ASB 的形成。如样品 B 的轴向取向接近 $[001]-[\bar{1} 11]$ 线, 即接近压缩时的临界双滑移取向。样品 B 的临界应变较小(为 -10.8%)。可能由于加载初期实际上是临界双滑移系统中的某一滑移系率先启动, 因为是临界滑移, 该滑移系一旦启动就能保持继续滑移, 容易造成晶格旋转, 轴向变化较快, 进而容易造成失稳也容易获得新的二次滑移系开动, 促使 ASB 形成。样品 D 接近 $[001]-[011]$ 线, 即压缩时的共轭双滑移取向, 加载初期实际上也是共轭双滑移系中某一滑移系率先启动, 但因为是共轭滑移, 一个启动不久, 另一个就又启动。结果轴向变化相对较慢, 对比压缩临界双滑移, 出现失稳所需临界应变较大, 本工作测得为 -16.7% , 该值大于样品 B, 但小于样品 A 和 C。由于样品 A 和 C 分别处于典型的单滑移取向和共面双滑移取向, 可能需要一定的额外应变促使晶格旋转到共轭位置(即接近 $[001]-[011]$ 线的位置)上, 共轭滑移系才能启动。而样品 C 形成 ASB 的临界应变最大, 这可能与共面双滑移的特点有关, 由于滑移的共面性, 比较更难以造成失稳。Li 等^[14]也指出, 在形变带形成机制中晶格旋转导致二次滑移启动促进失稳进而形成 DB。这与 ASB 的形成有一定类似性。本工作中又加上高速加载产生的形变热瞬时不易散失, 进一步促进了 ASB 的形成。因此, 若 ASB 平面较接近 DB 平面, 则所需临界应变较小。但是由于在 SHPB 装置高速加载条件下发生应力波作用, 加之 PSB 的存在, 故应力状态比较复杂, 因此也存在 ASB 平面偏离 DB 平面较大的情况, 此时需要临界应变大一些。不论哪种情况, 压缩导致晶体转动, 产生几何软化, 在动态载荷作用下, 局部地区产生二次滑移, 促进形变失稳, 导致了 ASB 的形成, 其形成临界应变与晶体取向有关。

目前看来, ASB 的形成与晶体取向, 受力状态以及位错反应强度等密切相关。而要定量预测 ASB 的取向还相当困难, 需要进一步开展工作。

4 结论

(1) 在高速加载条件下, 疲劳态铜单晶体的 ASB 形成的临界应变与晶体取向有关。压缩临界双滑移取向晶体需要的临界应变最小, 单滑移和压缩共轭双滑移取向的临界应变居中。共面双滑移取向需要的临界应变最大。

(2) 在 $4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率条件下, 疲劳态铜单晶体高速加载条件下形成的 ASB 内部典型的位错组态为位错胞结构, 未观察到再结晶现象。

(3) 根据空间位向, ASB 可以分为以下 3 类: 第 1 类, 非常接近铜晶体疲劳时形成的第 2 类形变带 (DB_{II}), 此类 ASB 形成临界应变最小; 第 2 类, ASB 位向或较接近 DB_{II} 平面, 或较接近 DB_I 平面, 此类 ASB 形成临界应变居中; 第 3 类, ASB 位向与 DB_I 和 DB_{II} 平面均不接近, 此类 ASB 形成临界应变最大。形成的 ASB

位向与晶体原始取向存在很大关系。

需要注意的是,当变形速率很高时(应变率远大于 10^4 s^{-1}),晶体的变形方式会由滑移转向孪生,本结论将不再适用。

扫描电镜观察得到中国科学院金属研究所苏会和及高薇老师,高速形变实验得到中国科学院力学研究所沈乐天及陈淑霞老师的大力协助,谨致谢忱。

参考文献

- [1] Meyers M A, Wittman C L. *Metall Trans*, 1990; 21A: 707
- [2] Lee C G, Park W J, Lee S, Shin K S. *Metall Mater Trans*, 1998; 29A: 477
- [3] Dobromyslov A V, Taluts N I, Kazantseva N V. *Scr Mater*, 1999; 42: 61
- [4] Dai L H, Liu L F, Bai Y L. *Int J Solid Struct*, 2004; 41: 5979
- [5] Duan Z Q, Li S X, Huang D W. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2003; 26: 1119
- [6] Duan Z Q, Cheng G Q, Li S X, Huang D W. *Acta Metall Sin*, 2003; 39: 486
(段占强, 程国强, 李守新, 黄德武. 金属学报, 2003; 39: 486)
- [7] Edington J W. *Philos Mag*, 1969; 19: 1189
- [8] Rashid M M, Gray G T, Nemat-Nasser S. *Philos Mag*, 1992; 65A: 707
- [9] Cheng G Q, Li S X. *Mater Sci Technol*, 2005; 21: 813
- [10] Li J W, Li M Y, Guo X L, Li S X. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 161
(李军伟, 李明扬, 郭小龙, 李守新. 金属学报, 2005; 41: 161)
- [11] Li X W, Umakoshi Y, Gong B, Li S X, Wang Z G. *Mater Sci Eng*, 2002; A333: 51
- [12] Reid C N. *Deformation Geometry for Materials Scientists*. New York: Pergamon Press, 1973
- [13] Meyers M A, Nesterenko V F, La Salvia J C, Xue Q. *Mater Sci Eng*, 2001; A317: 204
- [14] Li S X, Li X W, Zhang Z F, Wang Z G, Lu K. *Philos Mag*, 2002; 82: 3129
- [15] Asaro R J. *Acta Metall*, 1979; 27: 445
- [16] Peirce D, Asaro R J, Needleman A. *Acta Metall*, 1982; 30: 1087