

## 铜单晶体在循环形变中形成的形变带 \*

李小武 王中光 李守新

(中国科学院金属研究所)

**摘 要** 系统研究了循环形变铜单晶体中宏观形变带的产生规律和特征及相应的位错结构, 并对其形成机制进行了综合探讨. 结果表明, 在不同取向铜单晶体的循环形变中, 形变带 DBI 近似沿主滑移面 (111) 发展, 而 DBII 的惯习面接近传统的扭折面 {101}, 两者成严格的正交分布. 这两类形变带的形成可能与循环加载中产生的晶体不可逆旋转密切相关. 此外, 有利的宏观应力状态也可能导致其它形变带的出现. 对于不同取向铜单晶体, 形变带可能具有很不相同的位错结构, 如 PSBs 的楼梯结构或迷宫结构等.

**关键词** 铜单晶体 循环形变 形变带 晶体旋转 位错结构

**分类号** TG111

## DEFORMATION BANDS FORMED IN CYCLICALLY DEFORMED COPPER SINGLE CRYSTALS

LI Xiaowu\*\* WANG Zhongguang LI Shouxin

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

**ABSTRACT** The characteristics and corresponding dislocation structures of the deformation bands (DBs), formed in cyclically deformed copper single crystals, were summarized systematically. The formation mechanism of DBs was also explored synthetically. It was shown that the appearance of DBs seems to be a general phenomenon in differently oriented crystals during cyclic deformation. The deformation band denoted DBI develops roughly along the primary slip plane (111), and the habit plane of DBII is close to the conventional kink band {101}. Their habit planes are strictly perpendicular to each other. An analysis based on the crystallographic deformation geometry showed that the local irreversible rotation of crystal which exists during symmetrical push-pull loading may be responsible for the formation of DBI and DBII. In addition, a favorable macroscopic state of stress might also be responsible for the occurrence of other types of DBs. Electron channeling contrast in scanning electron microscopy (SEM-ECC) observation showed that the DBs, formed in cyclically deformed copper single crystals with various orientations, might correspond to quite different dislocation structures, such as persistent slip bands (PSBs) ladders structure, labyrinth structure and so on.

\* 国家自然科学基金资助项目 19392300-4. 1998 年 5 月 4 日收到初稿; 1999 年 6 月 25 日收到修改稿.

本文联系人: 李小武, 沈阳市 110015, 中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室

\*\* To whom correspondence should be addressed

**KEY WORDS** copper single crystal, cyclic deformation, deformation bands, rotation of crystal, dislocation structure

单晶体在循环形变进入饱和状态后,在表面上可以观察到驻留滑移带 (PSBs) 和形变带 (DBs), 它们将损坏初始光滑的表面, 直接影响疲劳裂纹的萌生以及扩展方向<sup>[1]</sup>. 因此, 系统研究循环变形单晶体中产生的形变带的机制, 有助于进一步弄清疲劳裂纹的形核及扩展机制.

关于形变带的早期工作大都建立在单向形变的基础上<sup>[2~6]</sup>. 从 70 年代开始, 研究者<sup>[7~11]</sup>才陆续发现铜单晶体在循环形变中也会产生宏观形变带, 但至今对形变带的形成机制及其在疲劳断裂中的作用还认识不够. 本文系统研究循环形变铜单晶体中的宏观形变带.

## 1 实验方法

实验方法参见文献 [10,12,13]. 实验用晶体材料为  $[\bar{1}35]$  单滑移取向和  $[011]$  多滑移取向以及  $[\bar{2}33]$ 、 $[\bar{1}12]$  和  $[\bar{2}23]$  双滑移取向铜单晶体<sup>[12]</sup>, 还包括  $[034]$  和  $[\bar{2}55]$  双滑移取向<sup>[13]</sup> 以及  $[001]$  多滑移取向<sup>[10]</sup> 铜单晶体.

## 2 结果与讨论

### 2.1 形变带产生的规律及其特征

对循环变形后晶体表面的观察发现, 在晶体试样表面普遍形成两类形变带 DBI 和 DBII (图 1), 在  $[011]$  晶体中还发现另一类形变带 DBIII. 从表 1 可知, 所有晶体的 DBI 的惯习面都接近于主滑移面  $(111)$ , 而 DBII 的惯习面分别接近于  $(\bar{1}01)$  和  $(\bar{1}10)$ . DBI 和 DBII 与加载轴之间的夹角无明显的规律可寻, 它们不处在  $45^\circ$  剪切平面上, 但两者均呈严格的正交关系.

形变带 DBI: DBI 类形变带都近似平行于主滑移系的 PSBs 发展. Vorren 和 Ryum<sup>[14]</sup> 在铝单晶体中也曾观察到此类形变带, 但对此类形变带未作过多的评述. 宫波等<sup>[15]</sup> 认为此类形变带的产生与次滑移的大量启动有关. 但在作者的大量实验中发现, 当 DBI 形成时, 表面常常观察不到次滑移系的开动, 说明 DBI 的出现可能与次滑移的启动并非紧密相关.

形变带 DBII: 形变带 DBII 沿着与主滑移面成一定角度的方向发展, 其惯习面接近传统的扭折面  $\{101\}$ . 此类形变带非常类似于扭折带 (kink bands), 如图 2 所示. 在  $[\bar{1}35]$  单滑移取向铜单晶体循环形变中产生的 DBII 类形变带就表现出明显的扭折性质.

形变带 DBIII: 当塑性应变幅增大到  $\gamma_{pl} \geq 5.0 \times 10^{-3}$  时,  $[011]$  多滑移取向晶体的表面出现了形变带 DBIII, 其惯习面为  $(001)$ . 由于  $(001)$  面与加载轴  $[011]$  正好成  $45^\circ$ , 处于  $45^\circ$  最大剪切平面上, 如此有利的宏观应力状态可能是导致  $(001)$  形变带形成的主要原因<sup>[16]</sup>.

### 2.2 DBI 和 DBII 形成机制的晶体形变几何学分析

最近, 翟同广等<sup>[17,18]</sup> 在研究铝单晶体的疲劳损伤时, 利用 SEM 的通道衬度技术和时间分辨声学显微镜观察发现宏观形变带相对于其周围的基体发生了大约  $6^\circ$  的晶格旋转, 但对不可逆晶格旋转现象的产生未能给出满意的解释. 本文从晶体形变几何学的角度对这种不可逆旋转现象给出较合理的解释, 进而很好地描述形变带 DBI 和 DBII 产生的机制.

面心立方单晶体在单向拉伸条件下, 晶体轴向朝主滑移方向旋转; 在单向压缩条件下, 晶体轴向朝主滑移面法向旋转. 一般认为, 在晶体的对称循环受载中, 没有这种取向的变化<sup>[19]</sup>. 实际上, 在循环加载下, 拉压是交替进行的. 以任意取向晶体为例 (图 3), 当晶体在拉应力作用

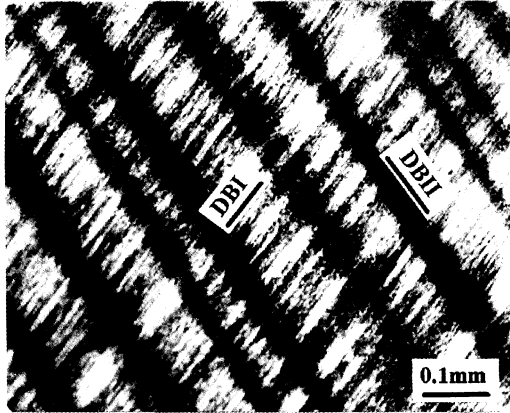


图 1 形变带 DBI 和 DBII 的表面形态  
Fig.1 Surface features of deformation bands DBI and DBII formed in cyclically deformed  $[\bar{1}12]$  copper single crystal at plastic shear strain amplitude  $\gamma_{pl}$  of  $3.3 \times 10^{-3}$

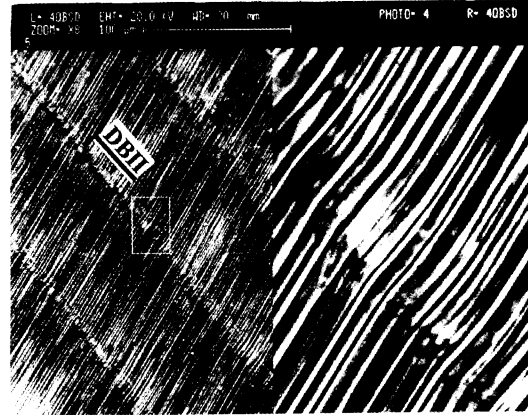


图 2 在循环变形  $[\bar{1}35]$  铜单晶体中出现的具有扭折性质的形变带 DBII  
Fig.2 Deformation band DBII having obvious kinking characteristics formed in  $[\bar{1}35]$  copper single crystal cyclically deformed at  $\gamma_{pl} = 6.0 \times 10^{-3}$

表 1 形变带 (DBs) 与加载轴及其某些特殊面的几何关系

Table 1 Geometrical relationship among DBs, loading axis and some special planes

Loading axis	Habit plane of DBs	Angles between						
		DBI & loading axis	DBII & loading axis	DBIII & loading axis	DBI & (111)	DBII & $(\bar{1}01)$	DBII & $(\bar{1}10)$	DBI & DBII
[011]	DBI(0.49 0.67 0.56)							
	DBII(-0.63 -0.18 0.76)	60°	24°	45°	7°	11°	—	90°
	DBIII(001)							
[034]	DBI(0.54 0.64 0.56)							
	DBII(-0.59 -0.21 0.78)	56°	30°	—	4°	14°	—	89°
[ $\bar{2}55$ ]	DBI(0.70 0.57 0.44)							
	DBII(-0.65 -0.76 0.00)	30°	44°	—	9°	—	4°	89°
[ $\bar{2}33$ ]	DBI(0.65 0.57 0.50)							
	DBII(-0.44 -0.25 0.86)	24°	35°	—	7°	23°	—	90°
[ $\bar{1}12$ ]	DBI(0.65 0.51 0.57)							
	DBII(-0.64 -0.07 0.77)	24°	59°	—	3°	4°	—	89°
[ $\bar{2}23$ ]	DBI(0.59 0.60 0.54)							
	DBII(-0.64 -0.02 0.77)	23°	59°	—	3°	4°	—	88°

下, 晶体轴向将向  $\bar{1}01$  方向旋转, 其旋转途径为  $a$ , 轴向由  $O$  位置转到  $P$  点位置, 此时  $O$  和  $\bar{1}01$  在同一个大圆弧上; 当变到压应力作用时, 晶体轴向将由  $P$  点位置朝  $111$  方向旋转, 其途径为  $b$ , 此时  $P$  与  $111$  在同一个大圆弧上. 显然, 在拉压旋转时, 旋转途径不重合, 随着累积应变的增大, 这种旋转的不可逆性将进一步增加, 最终导致晶体取向发生局部的小角度旋转. 由此可看出, 在拉—压对称循环中, 晶体旋转不是完全可逆的. 随着应变幅的增大以及累积应变量的增加, 晶体轴向反复向  $\bar{1}01$  和  $111$  两个方向的偏转更趋显著, 从而导致滑移在这两个方向的集中. 这可能是产生 DBI 和 DBII 两类形变带的一个原因, 也是这两类形变带总是成正交分布的原因.

对于  $[255]$  晶体, DBII 的惯习面接近于  $(\bar{1}10)$  面.  $[255]$  是共面双滑移取向, 主滑移系可以是  $(111)[\bar{1}01]$ , 也可能是  $(111)[\bar{1}10]$ , 先启动的滑移系作为主滑移系参与形变. 对于  $[255]$  晶体,  $(111)[\bar{1}10]$  滑移系作为主滑移系率先启动, 形成的 DBII 的惯习面自然就接近于  $(\bar{1}10)$  面. 宫波等<sup>[10]</sup> 发现  $[001]$  晶体在循环形变中出现的 DBI 的惯习面接近于  $(\bar{1}11)$  面, 而 DBII 的惯习面接近于  $(101)$  面 (见文献 [10] 中图 11). 对于  $[001]$  晶体, 它有 8 个滑移系处于同等的几何有利位置, 其中任何一个滑移系均可能作为主滑移系启动. 从  $[001]$  晶体的滑移形貌可以清晰地看出, 在循环初期率先启动的是  $(\bar{1}11)[101]$  滑移系 (见文献 [10] 中图 9), 它作为主滑移系参与形变. 因此, 其形成的 DBI 的惯习面接近于  $(\bar{1}11)$  面, 而 DBII 的惯习面接近于  $(101)$  面.

### 2.3 形变带的微观结构

利用透射电子显微镜 (TEM) 很难明确地针对形变带内的微观结构进行观察. 宫波等<sup>[20]</sup> 利用扫描电镜电子通道衬度 (SEM-ECC) 技术观察研究了  $[001]$  多滑移取向铜单晶体的宏观形变带的微观结构, 发现  $[001]$  晶体中形成的形变带由迷宫结构和次滑移系的 PSBs 组成, 而在形变带之间“无滑移线区”则由大量  $(001)$  位错墙组成. 本文利用 SEM-ECC 技术对  $[\bar{1}35]$  单滑移取向铜单晶体中形成的形变带的微观结构进行了观察研究. 由图 4 可见, 形变带内的位错结

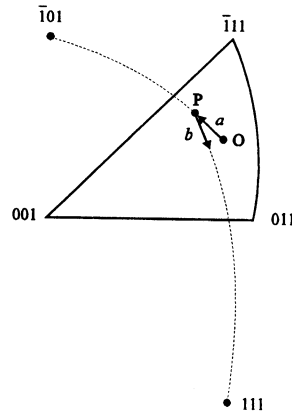


图 3 在拉压对称循环载荷下造成的晶体轴向的不可逆旋转示意图

Fig.3 Stereographic plot of irreversible rotation of crystal axial orientation under push-pull symmetrical cyclic loading

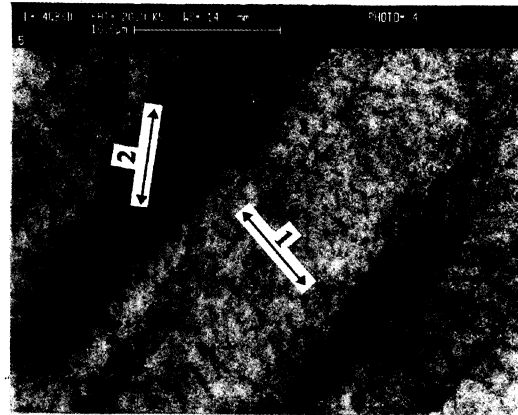


图 4  $[\bar{1}35]$  铜单晶体在  $\gamma_{pl}=6.0 \times 10^{-3}$  下形成的形变带的 SEM-ECC 位错结构像

Fig.4 SEM-ECC images of dislocation structure in deformation bands in  $[\bar{1}35]$  copper single crystal cycled at  $\gamma_{pl} = 6.0 \times 10^{-3}$

构为不规则的 PSBs 楼梯结构, 而形变带之间的“无滑移线区”则由位错墙结构或迷宫结构组成. 从图中还可看出, 形变带内不规则的 PSBs 墙的方向(图 4 中“1”方向)与相邻区域的位错墙的方向(图 4 中“2”方向)明显不同, 这进一步证实了 DBs 与周围基体之间可能存在晶格旋转.

形变带是形变集中的区域, 承担大量的塑性应变. 对于不同取向的晶体, 其形变带的相应位错结构应该与更利于承受大应变量的结构相对应. 对于 [001] 多滑移晶体, 难以形成 PSBs 楼梯结构, 其塑性应变主要是由迷宫结构的形成承担<sup>[21]</sup>, 因此形变带的相应位错结构主要为迷宫结构, 而在一些硬区形成单一的位错墙, 这些墙的间距明显小于迷宫中的墙间距. 对于  $[\bar{1}35]$  单滑移晶体, PSBs 楼梯结构能够大量形成, 由它携带绝大部分的塑性应变变量, 在形变带这种形变集中的区域自然对应着大量的 PSBs 楼梯结构, 在某些硬区则形成单一的位错墙或迷宫结构. 由这些结果可知, 不同取向的铜单晶体在循环形变中形成的形变带可能具有很不相同的微观结构, 这可能与它们各自具有不同的活动滑移系及其位错反应特点密切相关.

### 3 结 论

在不同取向铜单晶体的循环形变中, 形变带 DBI 近似沿主滑移面 (111) 发展, 而形变带 DBII 的惯习面接近于传统的扭折面 {101}, 两者成严格的正交分布. 这两类形变带的形成与循环加载中产生的晶体不可逆旋转有关. 而有利的宏观应力状态导致了 [011] 多滑移晶体中 (001) 形变带的产生. 对于不同取向铜单晶体, 在循环形变中形成的形变带具有很不相同的微观结构, 如 PSBs 的楼梯结构或迷宫结构等.

### 参 考 文 献

- 1 M.Saletore, R.Taggart, Mater.Sci.Engng., **36**, 259(1978)
- 2 C.S.Barrett, L.H.Levenson, Trans.Metall.Soc.AIME, **135**, 327(1939)
- 3 C.S.Barrett, L.H.Levenson, Trans.Metall.Soc.AIME, **137**, 112(1939)
- 4 R.W.Cahn, J.Inst.Met., **79**, 129(1950-51)
- 5 R.K.W.Honeycombe, J.Inst.Met., **80**, 45(1951-52)
- 6 E.A.Calnan, Acta Crystall., **5**, 557(1952)
- 7 C.R.Gostelow, Met.Sci.J., **5**, 177(1971)
- 8 H.Mughrabi, Mater.Sci.Engng., **33**, 207(1978)
- 9 B.Gong, Z.G.Wang, Y.W.Zhang, Mater.Sci.Engng., **A194**, 171(1995)
- 10 B.Gong, Z.R.Wang, Z.G.Wang, Acta Metall., **45**, 1365(1997)
- 11 S.X.Li, B.Gong, Z.G.Wang, Scripta Metall. Mater., **31**, 1729(1994)
- 12 李小武, 铜单晶体循环形变行为的取向效应, 博士论文, 中国科学院金属研究所 (1998)
- 13 张轶伟, 双滑移取向铜单晶体的循环形变行为, 硕士论文, 中国科学院金属研究所 (1995)
- 14 O.Vorren, N.Ryum, Acta Metall., **36**, 1443(1988)
- 15 宫 波, 王中光, 张轶伟, 李广义, 张天宜, 金属学报, **30**, 439(1994)
- 16 X.W.Li, Z.G.Wang, G.Y.Li, S.D.Wu, S.X.Li, Acta Mater., **46**, 4497(1998)
- 17 T.Zhai, J.W.Martin, G.A.D.Briggs, Acta Metall. Mater., **43**, 3813(1995)
- 18 T.Zhai, J.W.Martin, G.A.D.Briggs, A.J.Wilkinson, Acta Mater., **44**, 3477(1996)
- 19 S.Suresh 著, 王中光译, 材料的疲劳 (北京, 国防工业出版社, 1993)
- 20 B.Gong, Z.R.Wang, D.L.Chen, Z.G.Wang, Scripta Mater., **37**, 1605(1997)
- 21 Z.R.Wang, B.Gong, Z.G.Wang, Acta Mater., **45**, 1379(1997)