

金属面心立方晶体疲劳位错组态形成规律研究取得进展

从 2005 年开始，中科院金属研究所沈阳材料科学国家（联合）实验室材料疲劳与断裂研究部张哲峰研究员和李鹏博士在综合分析前人大量研究成果的基础上，针对其中的薄弱环节展开补充实验工作，进一步完善了 FCC 晶体的研究体系。在深入理解影响 FCC 晶体微观位错组态影响因素的基础上，进一步将内外因素加以区分，最终得出关于 FCC 晶体循环形变行为，特别是疲劳位错组态演化的基本规律。

众所周知，面心立方（FCC）晶体循环形变行为的广泛研究起始于 1956 年 Thompson 对铜晶体中滑移带“驻留”（PSB）现象的发现。上世纪 50 年代到 70 年代，大量研究工作集中于揭示驻留滑移带的力学及结构特性，包括硬度、位错分布、体积分数、两相模型等。基于这些早期的研究工作，Mughrabi 于 1978 年建立了著名的单滑移取向铜单晶体的循环应力-应变（CSS）曲线，这是第一次量化地将 FCC 晶体的宏观应力-应变响应与微观位错结构联系起来。进入 80 年代，Bretschneider 和 Holste 领导的研究小组从温度和取向这两个因素入手完整地阐述了镍单晶体循环形变行为的主要特征。自从上世纪 90 年代初，在王中光研究员的带领下，材料疲劳与断裂国家重点实验室围绕取向对铜单晶体循环形变特别是微观位错组态形成机理展开了一系列的研究工作，建立了完整的关于取向效应与位错组态形成的关系图谱。同一时期，各种其他 FCC 晶体，包括铝、铜铝合金、铜锌合金单晶体疲劳行为的研究也相继展开。

研究人员研究表明：影响 FCC 晶体循环形变行为的核心因素包括晶体取向、层错能和短程有序，后两者可进一步统称为滑移方式的影响。因此，在系统地分析和比较了不同 FCC 晶体循环形变行为后，他们提出了 FCC 晶体中各种规则位错组态的形成机理以及演化过程的物理本质。这一研究课题的完成不仅对 FCC 晶体家族疲劳损伤与断裂的研究有着重要的理论意义，也会对深入理解金属晶体的塑性形变行为，滑移与孪生之间的竞争关系具有重要的意义。上述研究成果主要归纳如下：

1. 首次揭示了不同取向银单晶体在不同应变幅下的循环形变和相应的位错组态特征。银单晶的 CSS 曲线依据取向的不同呈现出两个饱和平台：单滑移、共轭双滑移和 [011] 多滑移取向晶体形成梯墙结构，平台饱和应力为 18~21MPa，而形成迷宫结构的临界双滑移取向晶体和形成胞结构的共面双滑移取向晶体，平台饱和应力为 25~26MPa。

2. 系统地总结了不同取向银单晶体各种典型疲劳位错组态的形成，并结合铜和镍单晶体的实验结果，对 FCC 晶体疲劳位错组态的晶体学效应进行了概括，即单滑移取向铜、镍、银 3 种单晶体的 CSS 曲线均有饱和平台，平台应力分别为 50MPa，28MPa 和 20MPa；位错组态的取向关系可用取向三角形中的 3 个区域归纳表示：以单滑移和 [011] 多滑移取向的梯墙结构为代表的“中心区”；以迷宫结构为代表的 [001] 区和以胞结构为代表的 $[\bar{1}11]$ 区。

3. 通过对 3 种典型多滑移取向铜单晶体进行分析，可以进一步发现，复杂位错组态的形成取决于优先开动的次滑移系统，临界次滑移系的开动决定了迷宫结构的形成；共面次滑移系的开动决定了胞结构的形成；而如果没有次滑移系及时开动，更高的塑性形变将通过位错墙构成的形变带 (DBII) 所承担。总之，位错组态的形成与晶体取向有直接的关系，进一步则可以归结为位错运动对滑移系统的选择。如果考虑将非密排面的滑移系统与位错反应之间的关联，可以简化整个位错反应的过程，从中得出了“高阶”（迷宫、胞和墙）位错组态形成的规律及其几何机理。



4. 在分析和对比高层错能的铝晶体，中等层错能的镍、铜、银晶体和低层错能的铜铝晶体循环形变和位错组态特征的基础上，可以判断滑移方式是影响位错组态不同形态的根本原因。进一步分析表明，层错能和短程有序对滑移方式的改变至关重要，层错能高的材料更多地表现为波状滑移，比如铝、镍、铜等；而层错能低材料，如高溶质含量的铜铝、铜锌合金，则表现为平面滑移，这时短程有序取代层错能值成为主要影响因素。滑移方式的改变直接影响到位错的捕获和交互作用，最终决定了微观位错组态的不同聚集形态。

上述研究结果从 2008 年开始陆续在 *Acta Mater*、*Philos Mag*、*Scripta Mater* 等刊物上发表，其中 *Acta Mater* 论文 3 篇。由于材料疲劳与断裂研究部多年来在面心立方金属疲劳损伤行为方面系统的研究，2009 年 8 月收到 *Progress in Materials Science* 刊物主编 Arzt 教授的邀请，为该刊物撰写长篇综述论文 *Fundamental factors on formation mechanism of dislocation arrangements in cyclically deformed fcc single crystals*。(全文链接：<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.12.001>)。

本项研究工作得到国家自然科学基金重大项目、国家杰出青年基金和中国科学院“百人计划”项目的资助。

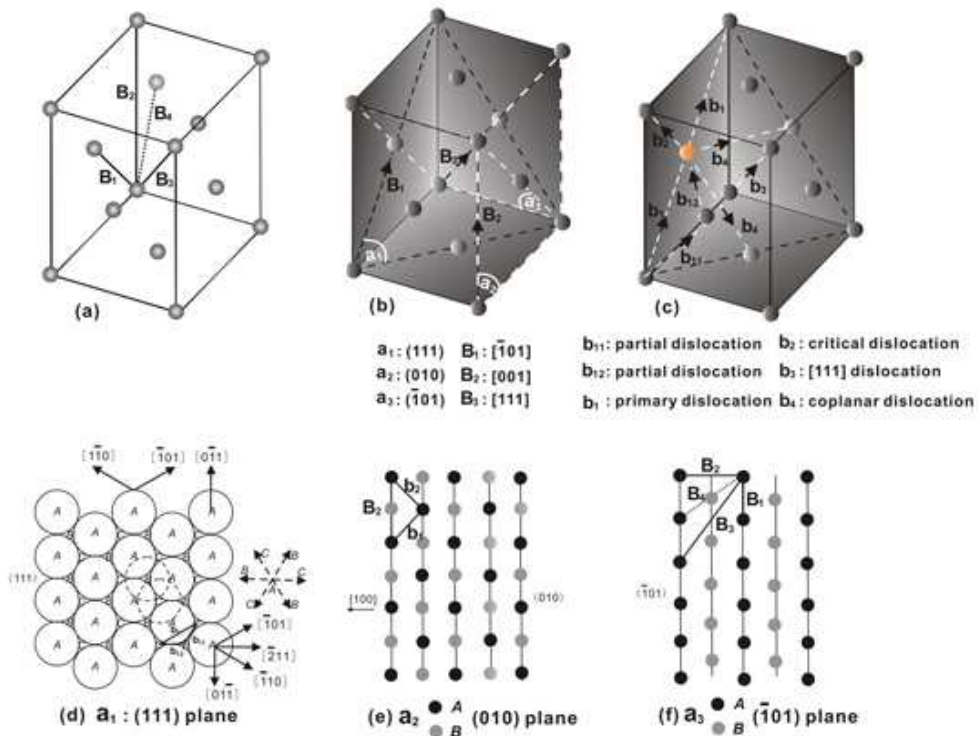


图 1 不同取向晶体位错组态的形成原因一位错运动与滑移系选择：(a) 潜在柏氏矢量；(b) 滑移与剪切系统；(c) 位错组态的运动；(d)，(e)，(f) 滑移与剪切系统的选择。

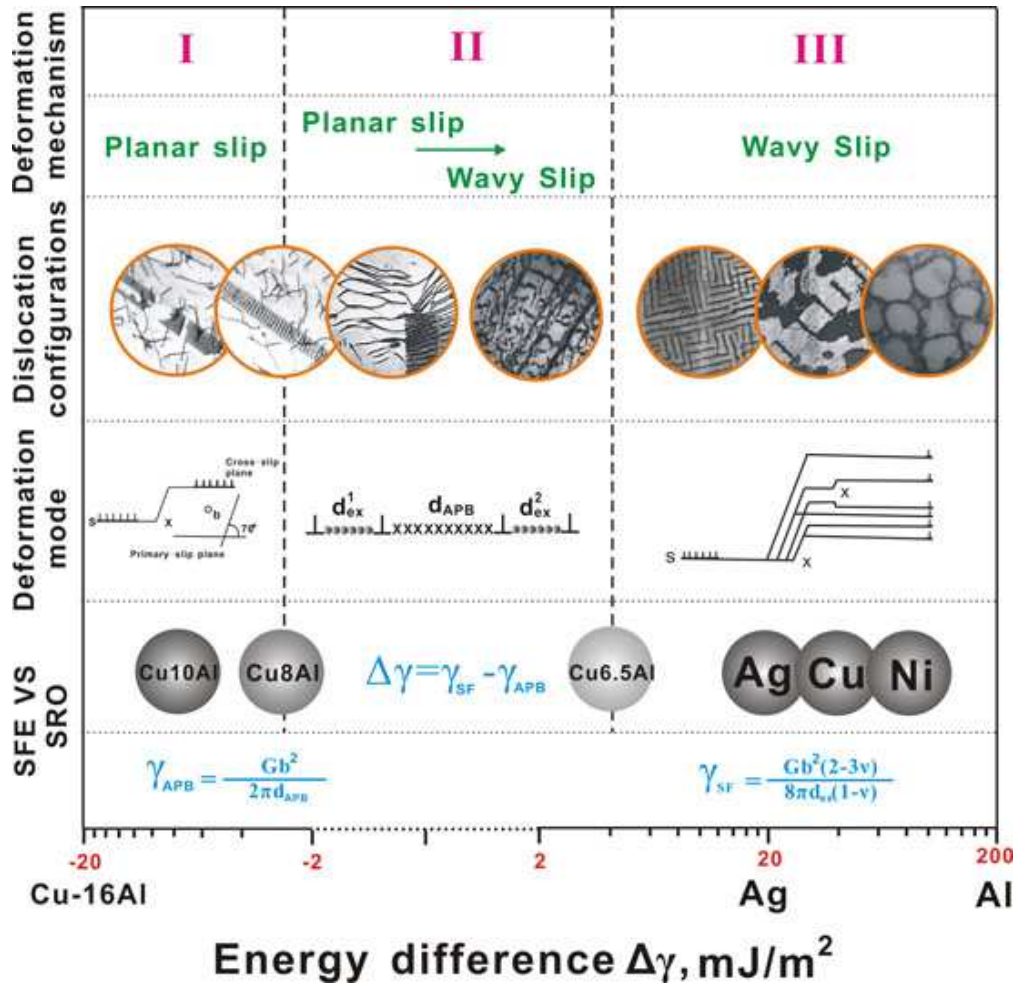


图2 面心立方金属或合金循环变形过程中不同位错组态形成的基本判据—层错能与短程有序的影响。