疲劳加载下纳米尺度金属薄膜晶粒长大机制研究获新进展

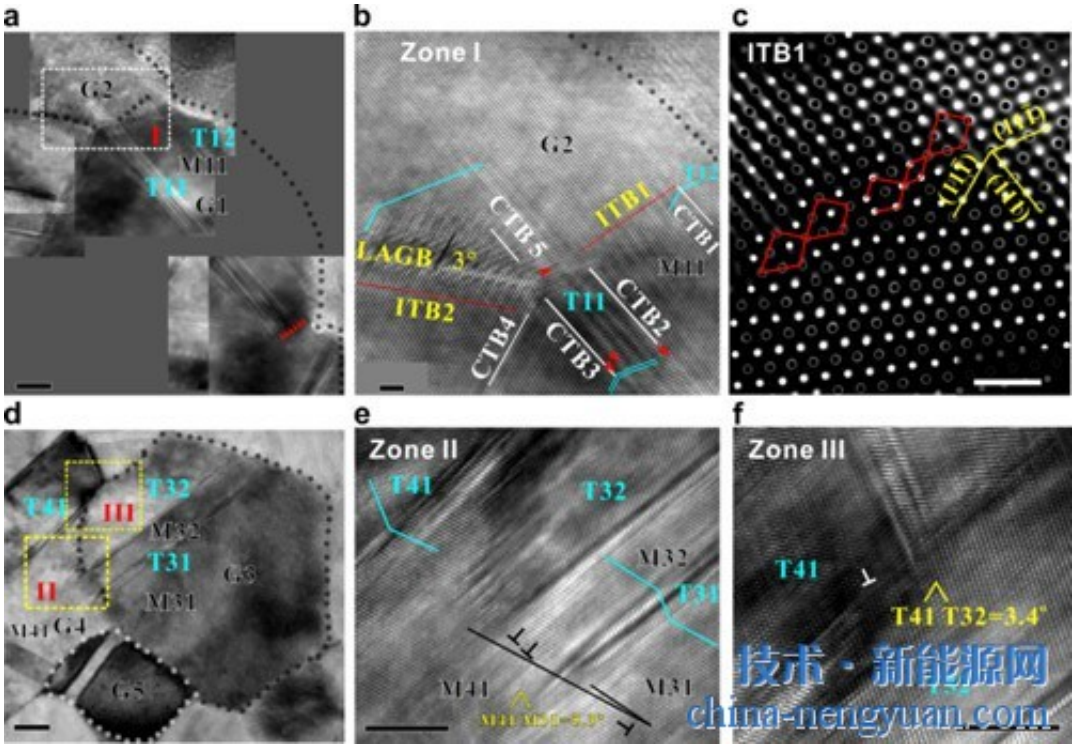

图1 循环加载后的20 nm厚金薄膜微观形貌观察。a、d为带有多重孪晶的粗化晶粒；b、c和e、f为相应区域的放大图。标尺: a、d-f为5 nm， b、c为1 nm。

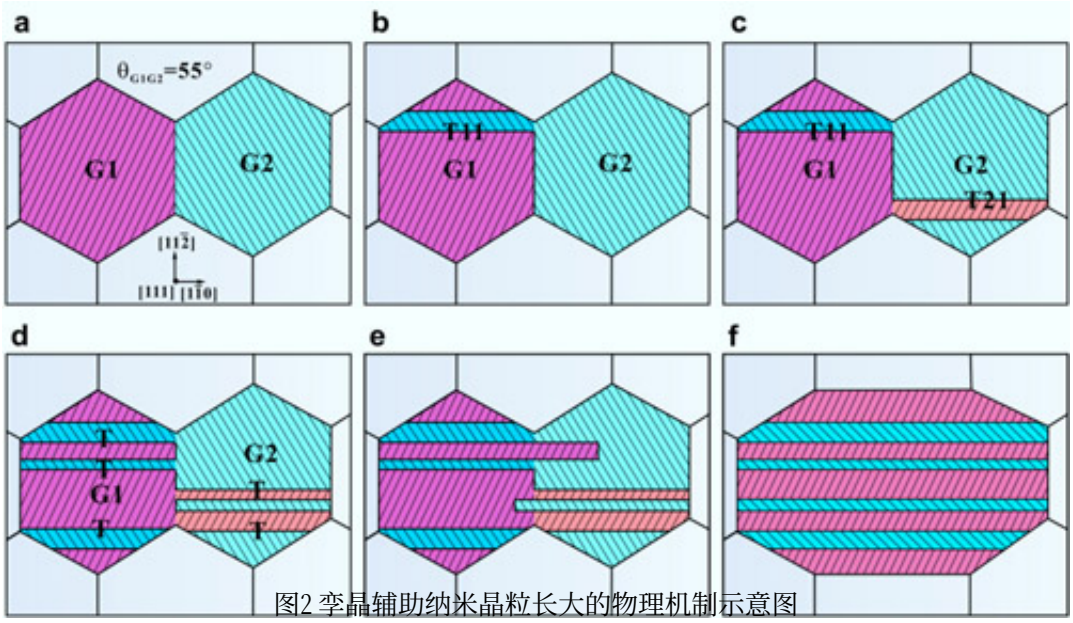

图2 孪晶辅助纳米晶粒长大的物理机制示意图

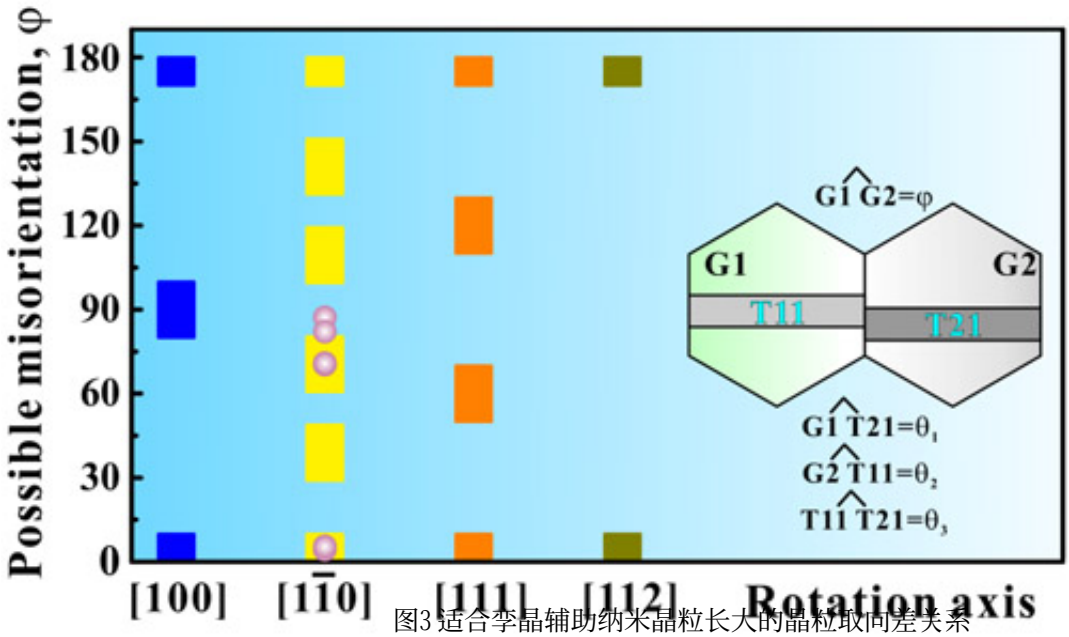

图3 适合孪晶辅助纳米晶粒长大的晶粒取向差关系

在多晶金属中，尽管晶界具有阻碍位错运动、强化材料的重要作用，但当材料的晶粒尺寸减小到纳米尺度时，晶界将变得不稳定。主要表现为：室温下的各种机械加载（单向拉伸、疲劳、压痕加载等）能够诱发明显的晶粒长大和晶界迁移。另一方面，由于晶粒尺寸的减小，面心立方金属中不全位错运动及由此而引发的孪生行为变得更加突出。关键的科学问题在于：纳米尺度下晶粒长大/晶界迁移是否与这个尺度下的孪晶形成有关？如果有关，孪晶形成在晶粒长大过程中扮演怎样的角色？

最近，中国科学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研究员张广平领导的课题组（包括博士生罗雪梅和副研究员朱晓飞）通过对纳米尺度面心立方结构的金薄膜疲劳加载下晶粒长大原子尺度的观察与理论分析，揭示了孪生辅助纳米晶粒长大的物理机制。这项研究发现，室温下的疲劳加载导致平均晶粒为19 nm的20 nm厚金薄膜中晶粒长大；同时，发生孪生的晶粒数目明显增加。

大多数长大的晶粒中出现了纳米尺度的多重孪晶。通过原子尺度的观察和分析发现：纳米孪晶的形成是辅助晶粒长大的一个有效方式。这一物理过程为：疲劳加载下孪晶的形成可以逐渐改变晶粒的局部取向，并促使晶界分解为易迁移的片段(图1)；随着循环周次的增加，两个晶粒通过相互的孪晶形成以及晶界的不断分解，逐渐合并长大为一个晶粒。为此，科研人员提出了一个循环加载下“孪晶辅助纳米尺度金薄膜晶粒长大”的全新物理机制(图2)。

这一研究结果的意义在于：一方面，清楚地揭示了疲劳加载下孪晶辅助纳米晶粒长大的基本机制及这一机制下存在的晶粒取向差关系(图3)，阐明了孪晶辅助纳米晶粒的有限长大能够在一定程度上消耗循环塑性、减缓疲劳损伤形成，从而对金属薄膜疲劳强度的提高具有显著作用；另一方面，对纳米尺度金属薄膜及纳米晶金属材料的晶界设计及晶界稳定性的利用与调控，发展高强度、高疲劳可靠性的结构金属材料具有重要的参考价值。

相关论文已于2014年1月3日在线发表于《自然-通讯》上（Nature Communications 5:3021(2014), DOI: 10.1038/ncomms4021）。

本研究得到国家自然科学基金、科技部“973”计划项目以及沈阳材料科学国家（联合）实验室导向项目的资助。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/56914.html