

Ti-15-3 板材中晶界特征及其对疲劳裂纹萌生与扩展的影响

撒世勇¹, 王 平²

- (1. 中国人民解放军 海军驻鞍山钢铁集团公司军事代表室, 鞍山 114000 ;
2. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要: 研究 Ti-15-3 合金冷轧板晶界特征及其对疲劳滑移带萌生和短裂纹扩展的影响。结果表明: Ti-15-3 合金冷轧板中晶界大多为大角度晶界, 小角度晶界很少。在本文统计范围内, 相邻晶粒取向差在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的范围内超过 60%, 小于 15° 的只占 4%; 大角度晶界有利于疲劳滑移带的萌生, 对短裂纹穿越有阻碍作用, 在小角晶界附近未发现滑移带产生, 但短裂纹很容易穿过小角度晶界。

关键词: Ti153 合金; 冷轧板; 晶界; 滑移带; 疲劳短裂纹

中图分类号: TG 146.23

文献标志码: A

Grain boundary characterization and its influence on fatigue crack initiation and propagation in Ti-15-3 sheet

SA Shi-yong¹, WANG Ping²

- (1. Representative Office of PLA Navy to Anshan Iron and Steel Group Corporation, Anshan 114000, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The grain boundary characterization and its influence on the fatigue sliding band initiation and short crack propagation in Ti-15-3 sheet were studied. The results show that most of the grain boundaries belong to the large-angle grain boundary, less of them belong to the small-angle grain boundary. In the present statistic scope, the adjacent grains with misorientation angle of $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ are over 60%, the adjacent grains with misorientation angle less 15° are about 4%. The fatigue sliding band prefers to initiate near the large-angle grain boundary, which shows the barrier effect on the short crack propagation. And no sliding band is found near the small-angle grain boundary, but the fatigue short crack propagates across easily these small-angle grain boundaries.

Key words: Ti-15-3 alloy; cold-rolled sheet; grain boundary; sliding band; fatigue short crack

Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al(Ti-15-3)合金是美国 Timet 公司在 20 世纪 80 年代初研究开发的一种亚稳定 β 钛合金, 该合金具有很好的冷轧和冷成形能力^[1-3], 它作为亚稳 β 型钛合金以其优良的加工性能和潜在的应用能力而成为最受关注的钛合金之一。

晶界是影响合金力学行为的最重要因素之一^[4]。

本文作者研究 Ti153 合金冷轧板材中晶界特征, 旨在深入理解 Ti153 合金微观组织特征以及晶界在合金受疲劳载荷作用下的表现行为。研究发现, Ti153 合金冷轧板经过固溶处理后, 合金中晶界大部分为大角度晶界, 少部分为小角度晶界, 这通常被认为与冷轧工艺历史有关。在疲劳载荷作用下, 滑移带优先在大角度

晶界处形成, 这样的滑移带通常被看成是疲劳裂纹的雏形; 而没有滑移带被发现形成在小角度晶界附近。上述研究结果为该合金的冷轧工艺以及实际工程应用提供了重要参考^[5-6]。

1 实验

本实验所用的材料是被冷轧成 1.2 mm 厚的 Ti-15-3 薄板。板状试样经过 800 真空固溶处理, 然后水淬。典型的金相组织为等轴组织, 如图 1 所示。试样经过砂纸磨光、机械抛光后, 再进行电解抛光。晶粒取向采用电子背散射衍射技术确定^[5-7]。拉-拉疲劳试验在 MTS 疲劳试验机上完成。利用 SEM 观察试样表面变形形貌。

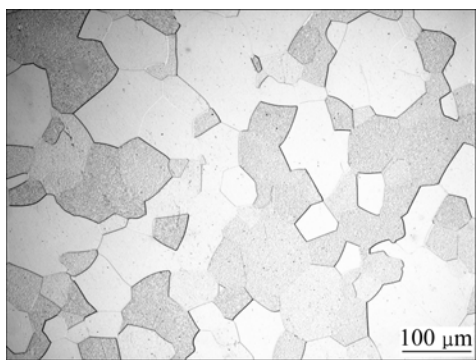


图 1 经(800 , 30 min)固溶处理和水淬处理后 Ti-15-3 合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti-15-3 alloy after solid solution treatment at 800 for 30 min and then water quenching

2 结果与讨论

2.1 Ti-15-3 合金中相邻晶粒的取向差

晶界两侧的晶粒取向通常并不相同, 因而会表现出取向差。如果把一个晶粒的取向确定为初始取向, 则可以用另一个晶粒的取向来表示两晶粒的取向差, 即可以从一个晶粒的取向出发, 绕该晶粒某一 $[uvw]$ 方向转动 δ 角度, 从而达到另一个晶粒的取向。转动的角度就是这 2 个晶粒的取向差。测量大量晶粒的取向, 通过晶粒取向矩阵计算, 得到相邻晶粒之间的取向差。图 2 所示为取向差的测量计算结果。由图 2 可知, 这种合金相邻晶粒之间的取向差大多数在 $40^\circ \sim 60^\circ$, 约占 66%, 大于 60° 的取向差几乎没有, 小于 15° 的只占 4%。可见, 在这种合金中, 晶界多为大角晶界。

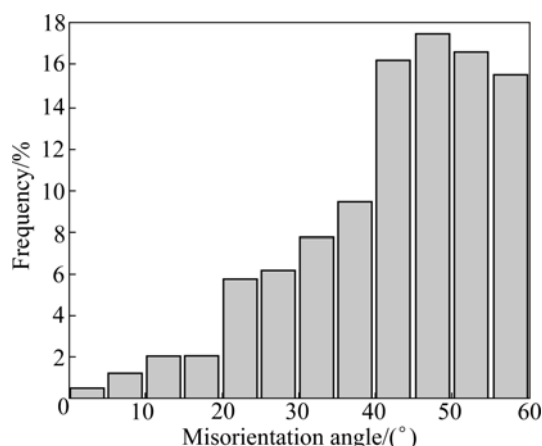


图 2 Ti-15-3 合金中相邻晶粒取向差的分布

Fig.2 Distribution of misorientation angles between adjacent grains in Ti-15-3 alloy

相邻晶粒取向大小与该合金的再结晶有关。因为这种合金的组织是冷轧后再结晶的组织。再结晶核往往是变形或回复过程中形成的某种亚组织。再结晶核必须具有足够大的尺寸, 而且与周围环境有足够大的取向差才会自发生长。足够大的取向差意味着再结晶核与环境之间的晶界为可动性较好的大角度晶界。因为大角度晶界的界面能远高于小角度晶界的界面能, 所以大角度晶界的迁移速率比小角度晶界的大。因此, 只有周围环境有大角度晶界的亚晶才容易自发长大, 不具备这个条件的将会被吞并。所以, 最终形成的晶体组织中, 相邻晶粒之间大多数拥有较大取向差。

由此也可推断, 固溶处理时间越长或处理温度越高, 合金再结晶将进行得越彻底。合金中相邻晶粒之间小的取向差越少, 大的取向差就越多。也就是说合金中大角度晶界变多, 小角度晶界变少。

2.2 晶粒取向差对滑移带萌生的影响

试样经电解抛光后, 轻微腐蚀, 然后放在拉伸机上进行疲劳拉伸。在夹试样时, 要使试样与受力方向平行, 而且要做好标记, 以便每次夹试样时都夹在同一位置, 这样可以保证在每次加载时, 力在试样上的分布不会有太大差异。经多次卸样观察, 直到试样出现滑移带。这些滑移带也可以看作是微裂纹, 因为很有可能短裂纹就会在某个滑移带上形成, 然后扩展。

然后, 把试样放在扫描电镜下进行 EBSD 分析, 算出滑移带附近每个晶粒的取向矩阵, 再由计算程序算出相邻晶粒之间的取向差, 然后分析相邻晶粒之间的取向差对滑移带的影响。

图 3 所示为典型的滑移带萌生后的观察结果。由

图 3 可看出, 晶粒间取向差标注在照片上的晶界上, 如晶粒 1 和 3 之间的取向差为 60° ; 可以看出滑移带出现在晶粒 1、2、3、5 中, 晶粒 6 和 7 之间的取向差较小(19°), 晶界附近几乎没有出现滑移带。由此可见, 这种合金的滑移带总是优先在晶粒取向差较大的相邻晶粒之间的晶界附近产生。在取向差小于 15° 的晶界附近更没有观察到滑移带痕迹。

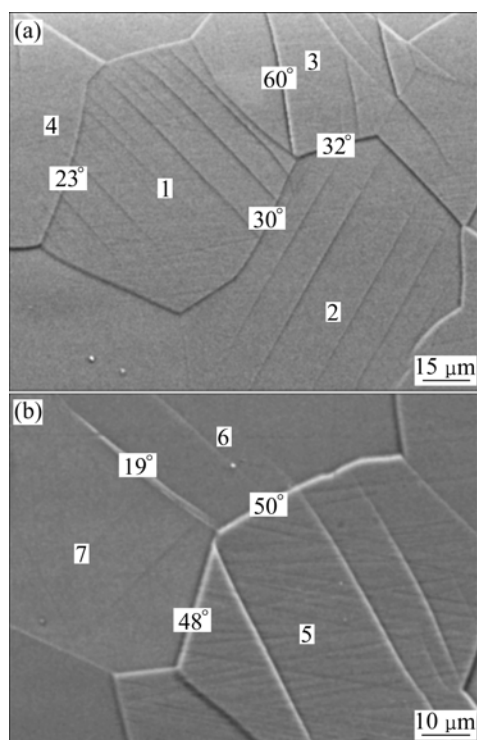


图 3 Ti-15-3 合金中滑移带萌生的 SEM 像

Fig.3 SEM images of fatigue sliding band initiation in Ti-15-3 alloy

解释这种现象可从位错入手, 当试样受到循环的拉伸作用力时, 位错在晶粒内沿着某些滑移平面运动。当位错遇到大角晶界(两个晶粒之间的取向差较大)时, 由于大角晶界相当于两晶粒之间的过渡层, 是仅有 3~4 个原子厚度的薄层, 这里虽然也存在一些排列比较规则的位置, 但总体来说, 原子排列相对无序, 也比较稀疏, 且两边晶粒之间的取向差越大, 晶界上的原子排列越无序。因此, 相邻晶粒之间的取向差越大, 在晶界附近, 应变协调性就越差, 位错越易受阻。当位错受到一定大的阻力时便停止运动。随着循环加载应力的进行, 位错会在相邻晶粒取向差较大的晶界附近产生大量塞积, 造成应力集中。当应力达到某一临界值时, 就会激活滑移系, 在晶界附近形成滑移线, 进而形成滑移带, 以便释放集中的应力。

当晶粒取向差较小时, 晶界上的大多数原子和两

侧点阵匹配很好, 晶界上的原子仍处于正常的结点位置, 在几何上就像单晶中存在位错平面排列一样。所以, 两个晶粒间弹塑性兼容性较好, 位错到达晶界时可以通过晶界, 不易在晶界处塞积, 这样就不会在晶界处造成应力集中。

2.3 晶粒取向差对短裂纹扩展的影响

当观察到试样中有滑移带(也可看作短裂纹)萌生后, 再把试样放到试验机上继续进行疲劳试验, 使短裂纹扩展。加载一定周次后卸载, 再把试样放到扫描电镜下进行观察, 分析研究短裂纹的扩展规律以及相邻晶粒之间的取向差对短裂纹的扩展的影响。

经多次实验观察发现, 当相邻晶粒之间的取向差很小时, 有利于短裂纹的扩展。当短裂纹前端滑移带(可以看作短裂纹)的尖端在一个晶粒内达到晶界时, 如果这两个晶粒之间的取向差小于 15° , 也就是说晶界是小角度晶界时, 裂纹会直线穿过晶界扩展到另一个晶粒内。

表 1 所列的数据是图 4 中每个晶粒的 3 个欧拉角, 根据这些数据可计算得到图 4 中晶粒 1 和 2 之间的取向差为 8° , 晶粒 3 和 4 之间的为 2° , 4 和 5 之间的为 11° , 这 3 个晶界都是小角度晶界。从图 4(a)看到短裂纹从晶粒 1 直线穿过晶界扩展到晶粒 2 中; 图 4(b)中

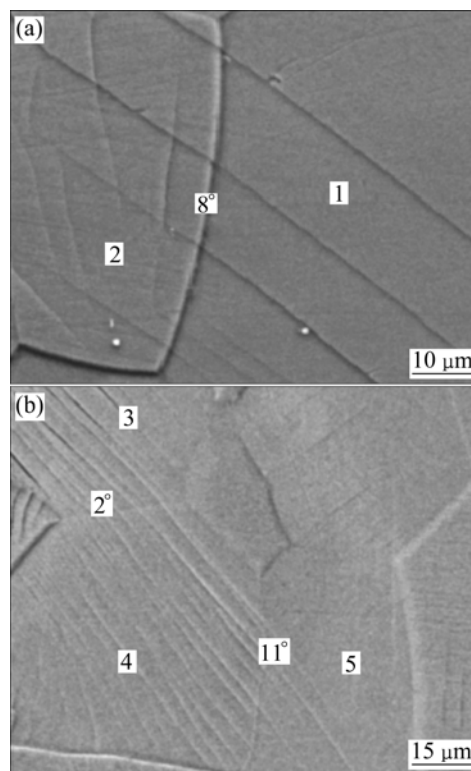


图 4 Ti-15-3 合金中短裂纹扩展的 SEM 像

Fig.4 SEM images for growth of short cracks in Ti-15-3 alloy

表 1 图 4 中部分晶粒的欧拉角

Table 1 Euler angles of part grains in Fig.4

Grain number	Angle 1/(°)	Angle 2/(°)	Angle 3/(°)
1	121.43	47.21	46.49
2	120.51	42.10	53.12
3	350.99	51.69	50.42
4	117.34	51.52	38.10
5	224.00	54.67	44.97

的短裂纹先从晶粒 3 开始，直线穿过晶界达到晶粒 4 中，然后又从晶粒 4 直线穿过晶界到达晶粒 5 中。这也充分验证了上面的结论。

分析其原因，主要与小角度晶界的特点有关。当相邻晶粒之间有较小的取向差时，晶界基本由位错组成，晶界上的大多数原子和两侧点阵匹配很好。所以，没有空隙存在，并且原子间的键也只是稍有歪扭，晶界上的原子仍处于正常的结点位置，在几何上就象单晶中存在位错平面排列一样。所以，两晶粒间的弹塑性兼容非常好，晶界阻力很小。当短裂纹尖端的滑移带达到晶界时，很容易直线穿过。因此，晶粒之间的取向差小时，有利于短裂纹的扩展。

由实验也可得出，相邻晶粒取向差较大时不利于短裂纹的扩展。从相邻晶粒取向差较大有利于短裂纹的萌生也可知道，当短裂纹尖端的滑移带将达到晶界时，由于晶粒之间的取向差较大，相邻两个晶粒之间的弹塑性兼容性不好，晶界对滑移带产生很大的阻力。因此，当短裂纹到达晶界时会被严重阻碍，扩展会暂停。当在晶界处集中的应力达到某一临界值时，短裂纹才会穿过晶界到达另一个晶粒中。短裂纹每遇到一个晶界便暂停一段时间，所以短裂纹在扩展时，速率

会出现振荡变化。

3 结论

- 1) 在 Ti-15-3 合金冷轧板中，相邻晶粒取向差多在 40° ~ 60° ,大角晶界占多数，取向小于 15°的小角晶界很少。
- 2) 在 Ti-15-3 合金相邻晶粒之间，在大角晶界附近，由于应变协调性差，造成应力集中，有利于滑移带(短裂纹)的萌生。相对而言，在小角度晶界附近很少有滑移带。
- 3) 在 Ti-15-3 合金相邻晶粒之间，晶粒取向差小于 15° (小角度晶界)时，有利于短裂纹的扩展，晶粒取向差大的晶界对裂纹穿越有阻碍作用。

REFERENCES

[1] 吴以琴, 罗国珍, 张树启. 钛科学与工程[C]//第八届钛及钛合金学术交流会文集. 上海: 上海钢铁研究所, 1993: 521.

[2] 王庆如, 张庆玲, 戴美云. Ti-15-3 钛合金的应用研究[J]. 材料工程, 1996(12): 16.

[3] 王庆如, 陈玉文, 魏寿庸. 钛科学与工程[C]//第八届钛及钛合金学术交流会文集. 上海: 上海钢铁研究所, 1993: 516-517.

[4] [美] S. Suresh. 材料的疲劳[M]. 王中光, 等译. 北京:国防工业出版社, 1999: 385-386.

[5] 毛卫民. 金属材料的晶体学结构与各向异性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 186-187.

[6] 毛卫民. 晶体材料的结构[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 177.

(编辑 杨 华)