

强化层亚结构对 TA2 疲劳强度的影响^{*}

张建斌 樊 丁 马 勤

(甘肃工业大学材料科学与工程学院 兰州 730050)

王静宜

(西安工业学院材料科学与工程系 西安 710032)

文 摘 研究了滚压强化多晶纯钛在疲劳前后的显微组织特征和残余应力的变化。结果发现:疲劳强度的提高主要归于形变组织,同时表面粗糙度的降低也起了良好的作用。滚压试样表层 TEM 组织中形成高密度位错和单个、分散的变形孪晶,历经 10^6 以上循环周次后,孪晶—晶界的交互作用是其主要特征。滚压引入的残余压应力和层深均较小,有益贡献也相应降低。

关键词 钛合金,疲劳,孪晶,残余应力

Effect of Substructure in Strengthened Layer on Fatigue Strength of Pure Titanium

Zhang Jianbin Fun Ding Ma Qin

(College of Materials & Engineering, Gansu University of Technology Lanzhou 730050)

Wang Jingyi

(Department of Materials & Engineering, Xi'an Institute of Technology Xi'an 710032)

Abstract For polycrystalline titanium after cold rolled (CR), the microstructures and the compressive residual stress before and after fatigue deformation are investigated by transmission electron microscopy (TEM) and X-ray diffraction (XRD) respectively. Experimental results show that the microstructure is a predominant factor in improving fatigue strength of pure titanium, and the decrease of surface roughness resulting from CR also has positive effects. High-density dislocations, odd and dispersed deformation twins are formed in CR samples. After more than 10^6 cyclic deformations, twin-grain boundary interactions play an important role in CR samples. The compressive residual stress value and depth is rather small, and their contribution decreases correspondingly.

Key words Titanium alloy, Fatigue, Twins, Residual stress

1 引言

喷丸、滚压等表面机械强化是改善材料疲劳性能的有效手段,在不锈钢、高强度钢、镁合金、铝合金以及钛合金中得到应用与研究^[1~5]。表面机械强化机

理与材料表面强化层的组织亚结构和应力状态有关,目前对残余应力作用机理的研究比较成熟,而对组织的研究因实验材料的不同而相差较大。

Ti 是一种重要的密排六方结构(hcp)金属,其形

收稿日期:2001-10-26

*国家自然科学基金:59571025;甘肃工业大学科技发展基金资助项目

张建斌,1972年出生,硕士,主要从事材料组织与强度的研究工作

宇航材料工艺 2002年 第3期

— 47 —

变机理不但与滑移、孪生和晶界有关,而且要考虑它们之间的交互作用^[6,7]。本文研究了滚压对 TA2 形变组织结构的影响及其与材料高周疲劳性能的关系。

2 试验方法

试验用材料为退火工业纯钛 TA2。材料的成分(质量分数)为:Fe 为 0.11, O₂ 为 0.12, H₂ 为 0.001, C 为 0.01, N₂ 为 0.02, Si < 0.04。疲劳试验用条形试样,尺寸为 10 mm × 20 mm × 100 mm。滚压在改装的 JP-BD1500 接触疲劳试验机上进行,以仪器所能满足的最大压下量为准。

滚压试样残余应力测定用 MSF-2M 型 X 射线应力分析仪,疲劳前后试样每剥层一次,就进行一次残余应力的测定。金属薄膜 TEM 样品的制取采用线切割滚压强化表面层,其中疲劳后的试样从最大

拉应力处切取,因强化层深较小(不足 0.5 mm),故需对表面层取样进行单面抛光(即从单一方向进行手工抛光)制样,以保证在 JEM-200CX 型透射电镜上观察不同层深的组织结构。

3 结果与讨论

3.1 疲劳强度

在 Amsler-5100 疲劳试验机上,测定三点弯曲条件疲劳强度($r = 0.1, N > 10^6$ 周次),TA2 及滚压试样的疲劳强度分别为 410 MPa、450 MPa。

3.2 滚压改善疲劳强度的机理

TA2 室温为等轴组织,其平均晶粒直径约 27 μm。TA2 疲劳前后的 TEM 组织如图 1 所示。图 1(a) TA2 疲劳前组织中仅有少量位错,没有层错和变形孪晶出现;疲劳后,晶粒内位错数量显著增加[图 1(b)],并有细小变形孪晶在三叉晶界处产生^[4]。



(a) 疲劳前



(b) 疲劳后

图 1 TA2 试样的 TEM 照片

Fig. 1 TEM micrographs of pure titanium samples

图 2 是滚压试样疲劳前强化表层和过渡层的透射电镜明场像,可见,表面强化层中存在高密度位错和少量变形孪晶。图 2(a) 强化表层基体等轴晶粒中形成高密度位错组态,且位错与位错之间相互缠绕、交割,交互作用明显。在图 2(b) 滚压强化区过渡层组织中,除高密度位错外,还出现了变形孪晶,选区电子衍射分析表明,该变形孪晶位于(0001)滑移面上,而孪晶的切变方向(孪晶片的主轴方向)是(0001)滑移面的三个滑移方向 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 中的一个,故变形孪晶的宽度为其实际宽度。

历经 10^6 周次以上的循环变形后,滚压试样的 TEM 组织中初生变形孪晶(图 3)的一端在晶界受

阻,激发产生了次生孪晶;另一端呈尖劈状终止于晶粒内,其内部分布有高密度的位错。在图 3(a) 表面层中可以看到粗大的初生孪晶在晶界处激发产生两个次生孪晶,其中一个越过最近邻晶界,终止于次近邻晶界;另一个则终止于最近邻晶界(这和切应力大小有关)。

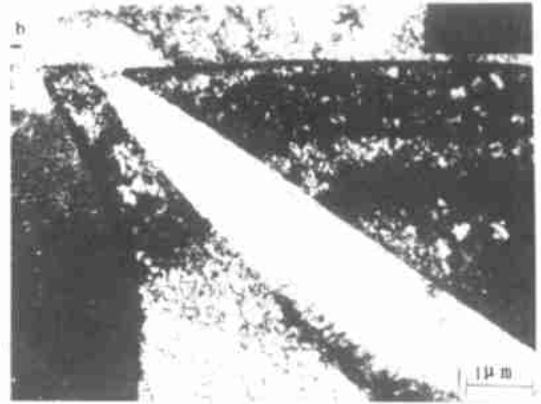
滚压试样疲劳后的组织特征是变形孪晶和晶界的交互作用。究其原因可能有二:一是本试验中滚压强化时的应变速率以及压下量相对较小,是一种低应力状态,故滚压组织中仅有单个、分散变形孪晶,孪晶的形成地点通常与晶界和大晶粒有关^[6];二是由于晶界是分割两个晶粒的界面,晶界结构与晶内不同,存在晶界影响区,在循环塑性变形过程中起

阻碍作用,同位错在晶界受阻一样,初生变形孪晶长大至晶界处,撞击晶界,晶界附近点阵发生畸变,产生很高的应力集中。当孪生切应力达到足以克服晶

界阻力时,便产生了次生孪晶,减缓了晶界处的应力集中。



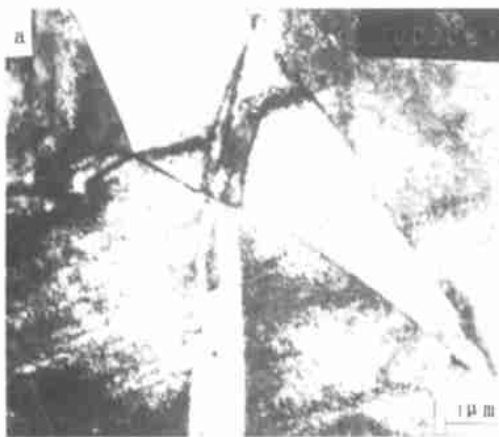
(a) 表面层



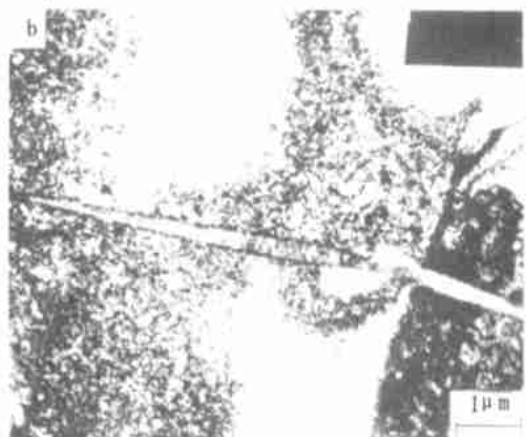
(b) 过渡层

图 2 滚压试样疲劳前组织结构的 TEM 照片

Fig. 2 TEM micrographs of the cold rolling samples before fatigue deformation



(a) 表面层



(b) 过渡层

图 3 试样疲劳后孪晶—晶界作用的 TEM 照片

Fig. 3 TEM micrographs of the twin-grain boundary interactions of the samples after fatigue deformation

进一步的 TEM 组织对比发现,滚压试样疲劳前的组织[图 2(a)]同 TA2 疲劳后[图 1(b)]非常相似,均形成高密度位错,说明疲劳加载和滚压强化具有等同效应。依据变形孪晶数量随变形速率和变形量的增大而增加^[7],以及滚压试样强化层组织中变形孪晶数量少,说明孪晶核胚的形成需要满足两个基本条件:一是基体中预先存在滑移为先导;另一是孪生存在临界分切应力。高密度位错可通过循环加载或滚压强化,使金属表层经塑性变形,位错滑移并增殖得以实现。而持续的循环加载虽然加剧了晶粒内

的应力集中,但未达到新生孪晶核胚形成的条件,结果只能使得变形孪晶撞击晶界,形成如图 3 所示的孪晶—晶界间的相互作用。

本试验中孪生对塑性变形的贡献主要是:孪生变形补充了六方金属 TA2 塑性变形方式的不足,从而促进了其均匀塑性变形时不开裂能力(Von-Mises 准则);孪生变形的萌生应力高于其扩展应力,因此,孪生变形可以释放局部应力集中,抑制裂纹的发生。

滚压 TA2 试样疲劳前后表层残余应力沿层深

(下转第 53 页)

弱基体镀的强度。

本实验三种材料中的 BeO 均沿晶界分布, GY—1, GY—2 由于 BeO 较细小在晶界不连续分布, 因此对材料基体有一定强化作用, σ_{mys} 和 σ_b 均较高。但 GY—3 中的 BeO 在晶界连续呈簇状分布, 断裂方式为脆性断裂。因此, 不仅对强度没有贡献, 反而随其数量的增多, 团聚的加剧, 严重损害了基体强度, 使 σ_{mys} 和 σ_b 均大幅度下降。

3 结论

在镀膜中, BeO 含量、粒子大小及其分布状况对镀膜 σ_{mys} 都有很大影响, 细小 BeO 粒子沿晶界均匀弥散分布时有利于获得高的 σ_{mys} , 而即使 BeO 含量很高, 但成簇状聚集在晶界, 则对 σ_{mys} 包括对 σ_b 有害。

参考文献

1 Marschall C W, Maringer R E, Cepollina F J et al. Dimensional stability and micromechanical properties of materials for use in an orbiting astronomical observatory. In: 13th Structure, Structural

Dynamics and Materials Conf., 1972; AIAA: 72 ~ 325

2 Hugel T J. Dimensional stability of several types of beryllium. In: The Institute of Metals ed. The Metallurgy of Beryllium, London: Chapman and Hall Ltd., 1963: 546 ~ 552

3 Kumar K, McCarthy J, Petri F et al. Materials research for advanced inertial instrumentation task 1: Dimensional stability of gyroscope structure materials. AD - A098165, 1980

4 Kishner S J, Gardopee G J, Magida M B et al. Large stable mirrors: a comparison of glass, beryllium and silicon carbide. In: Paguin R A ed. Dimensional Stability. San Diego, California: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1990; 1335: 127 ~ 139

5 Hodge W. Beryllium for structural applications. Defense Metals Information Center, Columbus, AD278723, 1962: B - 32

6 Pinto N P, Keith G H. High-strength beryllium black. In: The Metals Society ed. Beryllium 1977: Fourth Inter. Conf. On Be., London: The Royal Society, 1977: 16

7 黄培云. 粉末冶金原理(第二版). 北京: 冶金工业出版社, 1997: 402

(编辑 任涛)

(上接第 49 页)

的分布曲线结果表明: 滚压试样表层残余压应力数值和层深都较小, 疲劳后应力松弛较小, 且主要发生于次表层(约 50 μm ~ 100 μm)。

用 SURTRONIC3 型接触式表面粗糙度检测仪对试样粗糙度进行了检测(其中 TA2 在测试前经金相砂纸打磨)。TA2 及滚压试样 10 mm \times 100 mm 面的表面粗糙度 R_a 分别为 0.40 μm 和 0.16 μm 。

4 结论

TA2 经表面滚压强化后虽具有表层残余压应力的松弛较小、表面粗糙度降低等有益因素, 但疲劳强度提高幅度仍然不大。这主要是本试验条件下, 滚压试样属于低应力状态, TA2 仍以滑移为主要塑性变形方式, 孪生的作用没有得到充分发挥。表层残余压应力虽未明显松弛, 但压应力数值及层深较小, 故对疲劳强度的贡献并不突出。

参考文献

1 Altenberger I, Scholtes B, Martin U, Oettel H. Cyclic deformation and near microstructures of shot peened or deep rolled

austenitic stainless steel AISI 304. Mater. Sci. Eng., 1999; A264: 1 ~ 16

2 吕永华, 王天宰. 滚压强化对高强螺栓用 35CrMoV 钢疲劳性能的影响. 机械工程材料, 1989; 72(3): 46 ~ 51

3 北京航空材料研究所. 金属材料的表面喷丸强化. 机械工程材料, 1981; 27(6): 7 ~ 11

4 张建斌, 马勤, 樊丁等. 工业纯钛喷丸强化研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2001; 30(5): 365 ~ 368

5 Wagner L. Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys. J. Mater. Sci. Eng., 1999; A263: 210 ~ 216

6 Song S G, Gray G T. Structural interpretation of the nucleation and growth of deformation twins in Zr and Ti — . TEM study of twin morphology and defect reactions during twinning[J]. Acta. Mater., 1995, 43(6): 2339 ~ 2350

7 Chichilli D R, Ramesh K T, Hemker K J. The high strain rate response of alpha-titanium: experiments, deformation mechanisms and modeling. J. Acta. Mater., 1998; 46(3): 1025 ~ 1043

(编辑 任涛)