

[文章编号] 1004-0609(2001)06-1037-04

表面强化对工业纯钛显微组织的影响^①

张建斌¹, 马 勤¹, 周 琦¹, 王静宜²

(1. 甘肃工业大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050; 2. 西安工业学院 材料工程系, 西安 710032)

[摘 要] 工业纯钛经喷丸、滚压强化后, 疲劳强度得到不同程度的提高。逐层 TEM 亚结构对比分析结果表明: 工业纯钛疲劳强度的提高和强化层组织中孪晶的形成有关; 工业纯钛疲劳前后组织中主要是位错数量的变化, 而强化试样疲劳前后组织结构既有位错、孪晶数量的变化, 又有孪晶-晶界、孪晶-孪晶之间的交互作用; 喷丸较滚压强化效果显著的部分原因是表层形成了准孪晶栅栏。

[关键词] 钛; 孪晶; 疲劳; 表面强化

[中图分类号] TG 113.11

[文献标识码] A

钛及其合金因具有较高的比强度、良好的生物相容性以及优异的抗蚀性等特点, 在航空航天、医学、民用工业中已得到广泛应用, 被誉为继铁和铝之后的“第三”金属^[1, 2]。

喷丸、滚压等表面形变强化手段通过改善表面组织、产生压应力等使材料疲劳强度得到显著提高, 特别是在面心立方和体心立方金属中得到了广泛研究和应用^[3~5]。材料周期性变形后的组织亚结构一直是疲劳研究的重点, 然而利用 TEM 对六方合金微观组织的研究报道较少。

作者在对工业纯钛试样经喷丸、滚压两种方式强化后, 通过表层微观组织的 TEM 分析, 以了解强化引起 TA2 工业纯钛疲劳性能提高的组织因素。

1 实验

1.1 实验材料

实验用材料为退火工业纯钛 TA2, 由西北有色金属研究院提供。材料的成分为(质量分数, %): Fe 0.11, O 0.12, H 0.001, C 0.01, N 0.02, Si < 0.04。

疲劳实验用条形试样尺寸为 10 mm × 20 mm × 100 mm, 强化表面为 10 mm × 100 mm 面。喷丸工艺参数为: 钢丸直径 0.3 mm, 喷距 100 mm, 气压 0.4 MPa, 喷丸强度 0.19 mm A, 覆盖率 200%。

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。

为书写方便, 下文中分别采用标记 A(退火态), AR(退火滚压), AS(退火喷丸)。

1.2 疲劳性能

在 Amsler-5100 疲劳试验机上, 测定 $r = 0.1$ 时的三点弯曲条件疲劳强度, A, AR, AS 试样疲劳强度分别为 410, 450, 470 MPa。

1.3 TEM 薄膜制备

金属薄膜 TEM 样品的制备采用线切割强化表面层, 其中疲劳实验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), 以保证在 JEM-200CX 型透射电镜上观察不同层深处的组织亚结构。

2 实验结果

2.1 疲劳实验前的 TEM 组织

疲劳性能的差异必然和其表面微观组织的变化相对应。为此, 进行了 AR, AS 与 A 状态下疲劳前后表面层亚结构的对比分析。

退火态工业纯钛 TA2 的室温显微组织仅由少量位错构成, 没有层错及孪晶等亚结构。图 1 是 AS 和 AR 不同层深处的 TEM 组织亚结构。可见, 经喷丸及滚压强化后, TEM 组织中不同程度的出现了变形孪晶, 在 AS 组织中除变形孪晶外(图 1

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59571025)

[收稿日期] 2000-12-10; [修订日期] 2001-04-09

[作者简介] 张建斌(1972-), 男, 讲师, 硕士。

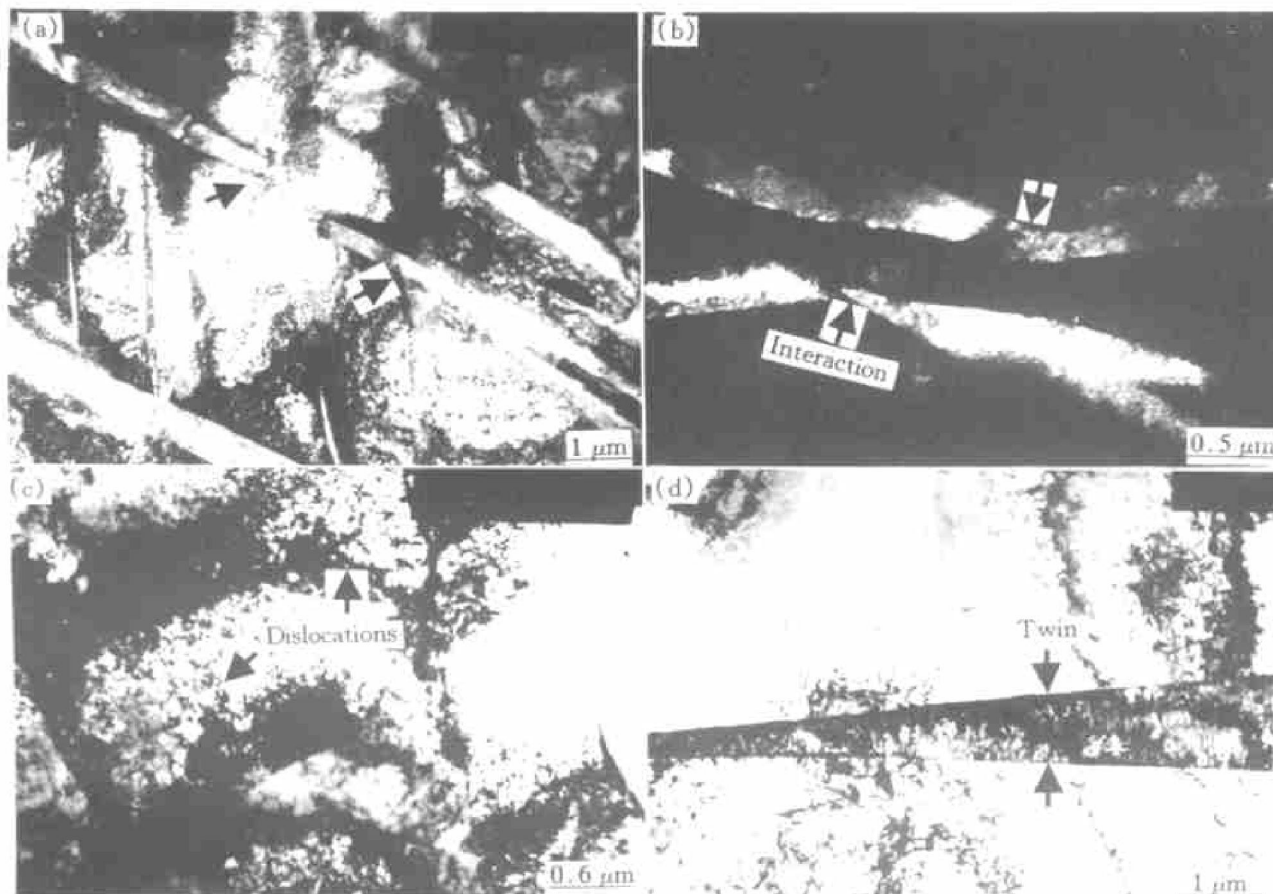


图 1 试样疲劳前的 TEM 组织

Fig. 1 Microstructures of samples before fatigue

(a), (b) —AS; (c), (d) —AR; (a), (c) —Surface layer; (b), (d) —Transition layer

(a), (b)), 还出现了呈平行排列, 条间方位差别极小, 但具有很高位错密度的条状变形带; 而 AR 组织中主要是位错密度的增加(图 1(c)), 以及单个分散的变形孪晶, 且孪晶内具有较高的位错密度(图 1(d))。

同一强化方式下, 变形孪晶的数量随层深的增加而减少。图 1(a) 中不同方位的变形孪晶交叠还形成了准孪晶栅栏结构。图 1(b) (暗场象) 示出了 AS 不同层深处组织中变形孪晶之间的交互作用, 其结果是形成尖劈状的变形孪晶终止端。

2.2 疲劳实验后的 TEM 组织

疲劳后, 工业纯钛中的位错数量增加(图 2(a)), 且晶内薄弱部位形成极少量变形孪晶。

历经 10^6 以上的循环周次后, AS 的 TEM 组织最大的变化是变形孪晶的进一步粗化长大, 以及在此过程中因变形孪晶的交迭而产生的孪晶-孪晶交互作用。导致单从形态上已看不出初生孪晶与次生孪晶的差别, 交互作用严重的区域甚至看不清基体组织(图 2(b))。

疲劳过程反复加载的结果, 使 AR 的 TEM 组

织中初生变形孪晶在晶界受阻, 激发产生了次生孪晶, 次生孪晶呈叶状, 头部尖、叶身宽而扁(图 2(c), (d))。在图 2(d) 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(这和剪应力大小有关)。

3 分析与讨论

喷丸、滚压的实质是在 Hertz 应力反复作用下的疲劳过程, 喷丸强化并非瞬间完成, 而是要持续一定的时间, 是一种反复加载、卸载过程。对表层金属的形变本质进一步分析指出这是一循环应变疲劳行为^[3]。这就是疲劳前 AR 和疲劳后 A 的 TEM 组织亚结构相似的原因(图 1(c) 和图 2(a))。

低温、高应变速率、大应变量、低间隙元素含量以及粗大晶粒均对多晶工业纯钛中孪晶的形成有利^[6, 7]。假如把喷丸和滚压过程看成加载速率不同的两类疲劳, 则对 AS 和 AR 的 TEM 组织中孪晶数量不同就有了很好的解释。

钛及其合金经喷丸或冷轧后的疲劳裂纹均起源

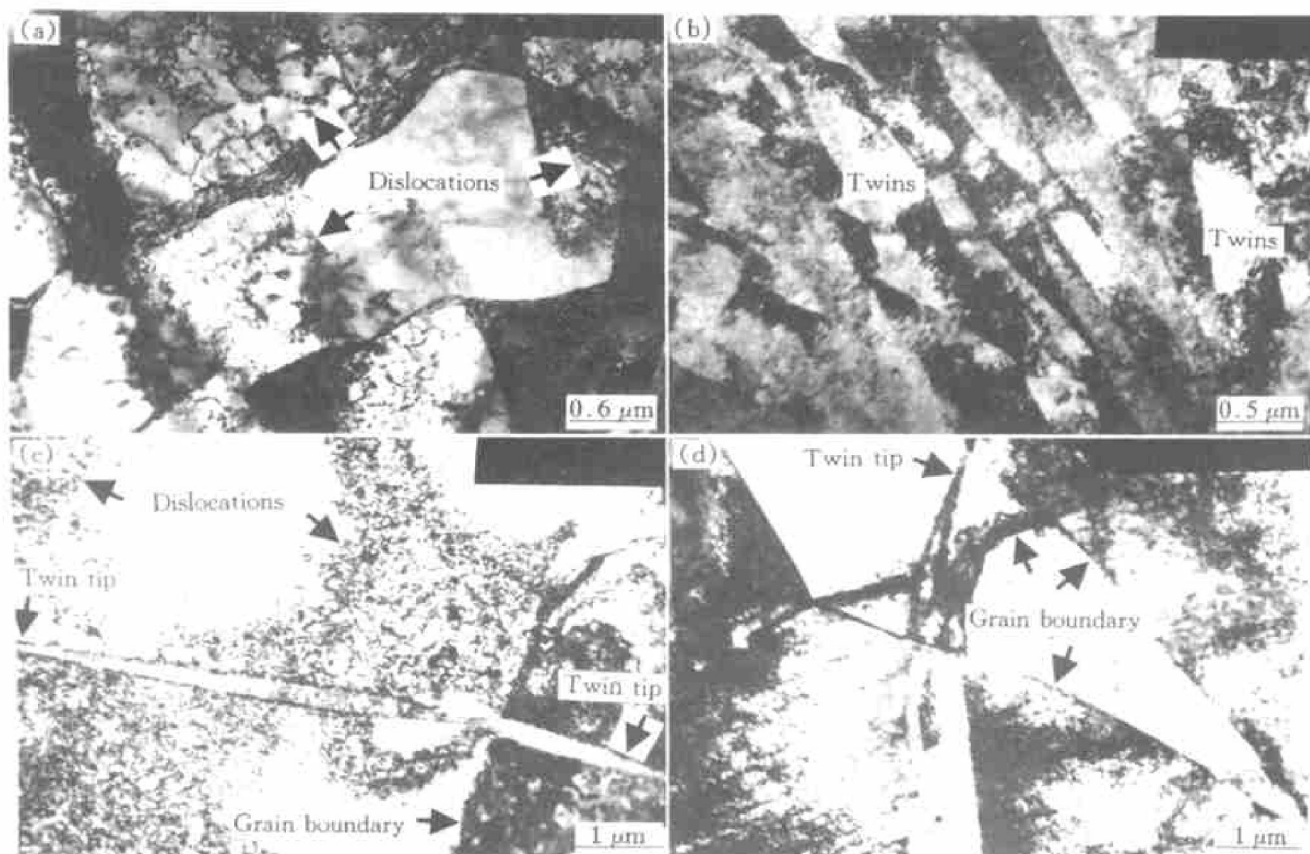


图 2 试样疲劳后的 TEM 组织

Fig. 2 Microstructures of samples after 10^6 cycles

(a) -A; (b) -AS; (c), (d) -AR; (a), (b), (d) -Surface layer; (c) -Transition layer

于存在残余应力的试样表面, 而不是其表面下^[8, 9]。工业纯钛与其它 fcc 金属相比, 表面强化对疲劳强度的提高幅度并不大, 需从组织上对强化工业纯钛的表面层疲劳裂纹的萌生地进行分析。

Takao 等人^[10, 11]对工业纯钛高周疲劳特性的研究表明, 显微裂纹在晶粒多系滑移带处萌生并汇集, 最终在一个晶粒内形成微裂纹, 微裂纹进一步与相邻晶粒内的其它起始裂纹汇集形成主裂纹, 主裂纹的扩展才是导致材料失效断裂的起始点。

同 AR 试样相比, AS 试样表面层组织中产生的大量变形孪晶(图 1, 2)有着相互矛盾的两个方面。一方面, 大量变形孪晶的产生, 使得塑性变形能够持续进行。虽然孪生对塑性变形的贡献远远低于位错滑移^[6], 但变形孪晶的主要作用在于它同滑移的相互补充机制, 即通过孪生的产生来改变晶体位向, 以激发次生孪晶或滑移的进一步进行。另一方面, 在疲劳加载条件下, 伴随着大量变形孪晶的粗化长大, 孪晶与孪晶之间的交互作用加剧(图 2(b)), 结果又导致显微损伤的产生, 成为疲劳裂纹萌生的策源地。

至于疲劳后 AR 试样组织中的变形孪晶和晶界相关的原因(图 2(c), (d)), 是由于晶界结构与晶

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, 撞击晶界产生应力集中, 当应力达到足以克服晶界阻力时, 便产生了次生孪晶, 这减缓了晶界处应力集中。

在低层错能面心立方金属中发现的孪晶栅栏这一稳定的亚结构, 可以大幅度的提高材料的疲劳强度^[4]。在工业纯钛中, 只有 AS 试样组织中可以看到排列并不连续致密的准栅栏结构(图 1(a)), 而 AR 试样组织中只有单个分散的变形孪晶(图 1(d))。从孪晶栅栏对疲劳强度的贡献看, 这也是导致 hcp 结构的 α -Ti 疲劳强度提高幅度大大低于 fcc 金属的一个原因。

因此, 从组织角度分析, 疲劳强度的高低与孪晶数量并没有比例关系。这一点在 α -Ti 的室温、低应变速率准静态压缩试验中也得到了验证^[6], 存在大量孪晶的喷丸强化并不比仅有位错或少量孪晶的滚压强化能大幅度地提高材料疲劳强度。

4 结论

从组织角度考虑, 在六方合金工业纯钛中, 滑

移因 Von Mises 条件的限制而受阻, 低温塑性变形主要以孪生的方式进行。在工业纯钛表面层组织中, 滚压强化形成大量位错及分散的少量孪晶, 且孪晶-晶界相互作用; 而喷丸强化则有变形带、准孪晶栅栏出现, 孪晶-孪晶间的交互作用强烈。两种强化方式中孪晶的产生都使塑性变形易于进行, 因而提高了疲劳强度。但疲劳强度的高低与孪晶数量并没有数值上的比例关系。

[REFERENCES]

- [1] LUO Guo-zhen, LIU Rui-ze. Non-aerospace application of Ti materials with a great many social and economic benefits in China [J]. Mater Sci Eng, 2000, A280: 25 - 29.
- [2] REN Xue-you(任学佑). 国内外钛市场现状及其前景 [J]. Nonferrous Metals(有色金属), 2000, 52(3): 88 - 91.
- [3] WANG Ren-zhi(王仁智). 喷丸强化技术在我国的发展 [J]. Chinese J Mater Sci(材料工程), 1989, 1: 4-7.
- [4] Tan Y X, Ren L P, Li G. Paling effects of substructure and fatigue strength of alloys [J]. Int J Fatigue, 1990, 12(1): 131- 134.
- [5] XU Ke-wei(徐可为), HU Na-sai(胡奈赛), HE Jia-wen(何家文). 纯铜和黄铜喷丸强化的组织效应 [J]. Acta Metall Sinica(金属学报), 1994, 30(1): A29-34.
- [6] Chichilli D R, Ramesh K T, Hemker K J. The high-strain-rate response of α -titanium: experiments, deformation mechanisms and modeling [J]. Acta Mater, 1998, 46(3): 1025- 1043.
- [7] Wasz M L, Brotzen F R, McLellan R B, et al. Effect of oxygen and hydrogen on mechanical properties of commercially pure titanium [J]. Inter Mater Rev, 1996, 41(1): 1- 12.
- [8] Sridhar B R, Ramachandar K, Padmanabhan K A. Effect of shot peening on the fatigue and fracture behavior of two titanium alloys [J]. J Metall Sci, 1996, 31: 5953.
- [9] Liu S Z, Minakawa K, Scholtes B, et al. Effect of cold rolling on the fatigue properties of Ti-6Al-4V [J]. Metall Trans, 1985, 16A: 144- 145.
- [10] Takao K, Nisitani H. Fatigue crack initiation and notch sensitivity of commercial purity titanium [J]. Trans Jpn Soc Mech Eng, 1984, 50: 1049- 1053.
- [11] Takao K, Kusukawa H K. Fatigue notch characteristics of commercially pure titanium [A]. Proc 6th Int Conf on Mechanical Behavior of Materials [C]. 1991, 2: 445.

Effect of surface plastic deformation on microstructure of commercial purity titanium

ZHANG Jia-bin¹, MA Qin¹, ZHOU Qi¹, WANG Jing-yi²

(1. College of Materials Science & Engineering, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China;

2. Department of Materials Engineering, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032, P. R. China)

[Abstract] The fatigue strength of commercial purity titanium was improved through shot-peening or cold-rolling treatment. By means of TEM methods to analyze the various layer substructures, the following results were obtained: (1) The improvement of fatigue strength of commercial purity titanium is related to the formation of twins in strengthened layer; (2) Before or after fatigue, the numbers of dislocation are different in commercial purity titanium, but the samples strengthened by shot-peening or cold-rolling not only have twin shape and number change, but also have interactions between twin-grain boundary and twin-twin; (3) The strengthening effects of shot peening are more obvious than that of cold rolling is partly for the formation of quasi-twin paling in the surface.

[Key words] titanium; twinning; fatigue; strengthening

(编辑 袁赛前)