

文章编号: 1004-0609(2004)01-0060-04

喷丸对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金拉-拉疲劳性能的影响^①

高玉魁

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 研究了高强度钛合金 Ti-10V-2Fe-3Al 表面喷丸强化所产生的表面形貌、表面粗糙度、表面残余应力和表面层残余压应力场变化及喷丸对其拉-拉疲劳性能的影响。结果表明: 喷丸强化可使 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金的表面粗糙度减小和表面层产生一定深度的残余压应力场, 喷丸强化引起的表面完整性的改善显著提高了疲劳性能。疲劳试验结果证实了喷丸强化不仅可以显著延长高强度钛合金 Ti-10V-2Fe-3Al 的拉-拉高周疲劳寿命, 而且可使 1×10^7 周次下的疲劳极限提高约 30%, 且表面喷丸强化后疲劳裂纹源由多个变为一个。

关键词: 钛合金; 疲劳; 喷丸; 残余应力

中图分类号: TG178

文献标识码: A

Influence of shot peening on tension-tension fatigue properties in Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy

GAO Yu-kui

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The changes of surface topography, surface roughness, surface residual stress and compressive residual stress field caused by shot peening and their effects on tension-tension fatigue properties in Ti-10V-2Fe-3Al titanium alloy were studied. The results show that the fatigue limit for 1×10^7 cycles is improved by about 30% with shot peening and confirm that shot peening can improve tension-tension fatigue properties of metals. Moreover, fatigue crack source is single after shot peening. The reason why tension-tension fatigue properties of metals can be modified by shot peening is that the surface integrity such as better surface finish roughness and beneficial compressive residual stress field can be induced by shot peening.

Key words: titanium alloy; fatigue; shot peening; residual stress

钛合金由于具有比强度高和抗蚀能力强等优良性能而在航空航天工业和生物材料制造业上得到广泛应用。目前国内外广泛使用的钛合金材料是 Ti-6Al-4V, 在工程应用中它约占整个钛合金的 65%, 而近 β 型和 β 型钛合金加起来约占 1%^[1]。随着航空航天工业对高强度、高韧度、低质量及热稳定性和抗蚀性日益增长的要求, 近 β 型和 β 型钛合金虽然价格较高但应用将越来越广泛。Ti-10V-2Fe-3Al 是高强度近 β 型钛合金, 它具有淬透性高、强度高、韧性好、切削加工性好、易于成形等特性,

在航空工业倍受青睐并已引起了国内外的关注和研究, 但到目前为止对采用表面强化来改善表面完整性方面的研究和报道甚少^[2], 因此本文作者着重研究表面喷丸强化对 Ti-10V-2Fe-3Al 疲劳性能的影响, 以便为表面强化的工程应用提供理论依据和指导。

此外, 很多研究结果^[3-5]表明, 表面强化在提高拉-拉疲劳性能上作用不大, 有时甚至会降低拉-拉疲劳性能, 因此在工程应用上一般不采用表面强化来提高拉-拉疲劳性能。本文作者采用拉-拉疲劳验证了表面强化效果, 并对拉-拉疲劳极限的提高

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59971040)

收稿日期: 2003-02-20; 修订日期: 2003-05-26

作者简介: 高玉魁(1973-), 男, 工程师, 硕士。

通讯作者: 高玉魁, 电话: 010-62458028; 传真: 010-62458028; E-mail: yukui.gao@biam.ac.cn

作了合理解释。

1 实验

采用 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金，其化学成分(质量分数，%)为：0.014 C，10.45 V，1.70 Fe，3.02 Al，0.011 N，0.0018 H，0.086 O，Ti 余量。热处理规范为：760℃保温 2h，水淬+ 525℃保温 8h，空冷。室温拉伸性能为： $\sigma_{0.2}$ = 1082MPa， σ_b = 1145MPa， δ_5 = 11.1%， ψ = 64.4%。

在气动式喷丸设备上对 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金进行表面喷丸强化，喷丸强度为 0.15(A)，表面覆盖率为 200%。采用电解抛光方法逐层在 300 型 X 射线衍射应力仪上测定了残余应力沿表面层的分布，测定条件为 CoK α 靶，X 光管管压为 26kV，X 光管管电流为 6mA，衍射晶面为 (114)，交相关法定峰。在 LT-10 表面轮廓仪上测定了表面喷丸前后的表面粗糙度，在 10t 高频疲劳试验机上对应力集中系数 K_t = 3 的缺口试样进行应力比 R 为 0.06 的拉-拉疲劳试验，用成组法测定疲劳试验曲线，采用升降法测定 1×10^7 周次下的疲劳极限。用 KYKY-1000B 型扫描电镜观察分析了喷丸和未喷丸试样的表面形貌和疲劳断口。

2 结果与讨论

喷丸和未喷丸试样的表面形貌如图 1 所示。表面粗糙度和疲劳试验结果如表 1 所列。表面形貌与表面粗糙度之间既有差别又有联系，目前多采用表面形貌来反映表面的显微起伏状态。因为表面形貌反映的是整个表面的“地质形貌”，它不仅能够反映表面的高低不平程度而且可以说明具体部位间的差别；而表面粗糙度反映的是表面显微起伏程度，而且只能反映整体区域的起伏程度。

表 1 表面粗糙度和疲劳试验结果

Table 1 Results of surface roughness and fatigue limit		
Type of specimen	Surface roughness $R_a/\mu\text{m}$	Fatigue limit/ MPa
Unpeened specimen	2.55~ 3.50	313
Shot peened specimen	1.48~ 3.41	403

常温下表面强化的主要强化机制是在表面层产生一定深度的残余压应力，即在表面层引入残余压应力场^[6-8]。喷丸和未喷丸试样的残余应力场分布

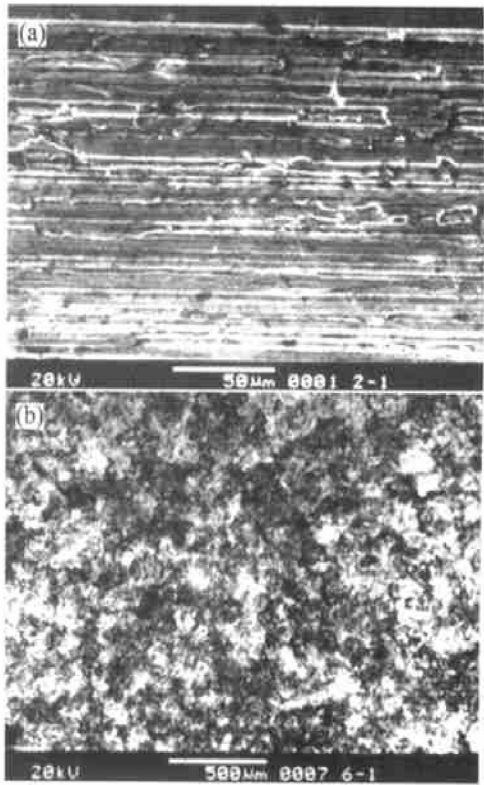


图 1 试样的表面形貌

Fig. 1 Surface topographies of specimen (a) —Unpeened specimen; (b) —Peened specimen

如图 2 所示。由图可知，磨削加工所产生的残余压应力场不仅深度浅(为 35 μm)，而且数值小(最大为 68MPa)，而喷丸产生的残余压应力场不仅数值大(最小为 352MPa，最大为 584MPa)，而且深度深(为 260 μm)。喷丸所产生的有利的残余压应力场不仅可以抑制疲劳裂纹的萌生^[9]而且可以增加裂纹的闭合效应来减小疲劳短裂纹的扩展速率^[10]，这是残余压应力强化的主要机理。

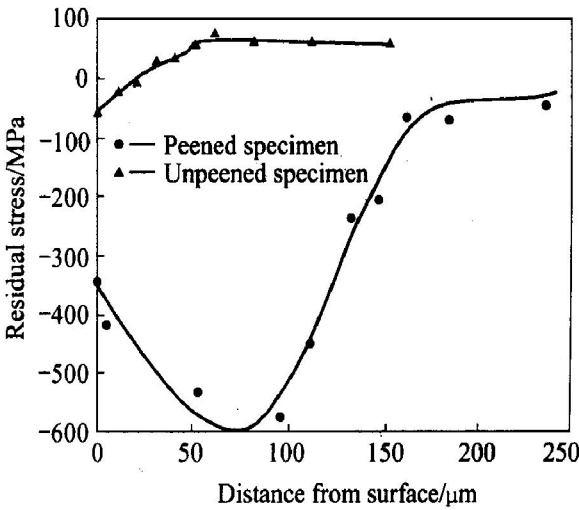


图 2 残余应力沿表面层的分布

Fig. 2 Distribution of residual stress along depth from surface

疲劳试验曲线如图 3 所示。可以看出, 喷丸强化不仅能够明显改善 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金的高周疲劳寿命, 并能使 1×10^7 周次下的疲劳极限提高约 30%。

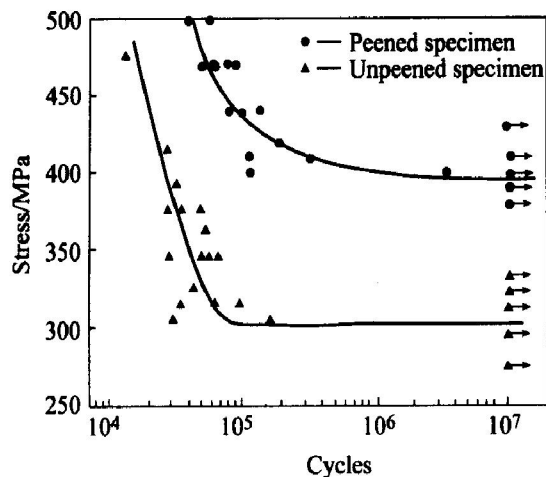


图 3 试样的疲劳试验曲线
Fig. 3 Fatigue curves of specimen

常温下喷丸所产生的残余应力对疲劳性能影响最大, 其次是显微组织结构和表面粗糙度或表面形貌的影响^[9-12]。作者曾在文献[6]中将喷丸所产生的各种效应归纳为图 4。由图可以看出, 喷丸产生了很多效应, 如残余压应力场的产生、表面产生弹丸坑、位错密度增加、表面层晶粒细化、硬度增加和表面层致密化(这对提高粉末涡轮盘的力学性能非常有利)等。高强度钛合金 Ti-10V-2Fe-3Al 是亚稳定近 β 型钛合金, 在外力作用下在室温下可能发生马氏体转变, 关于喷丸对钛合金组织结构的影响文献[11]研究比较深入, 本文主要定性研究了喷丸所产生的残余压应力场对疲劳性能的影响, 关于喷丸所产生的各种效应的定量研究有待深入。

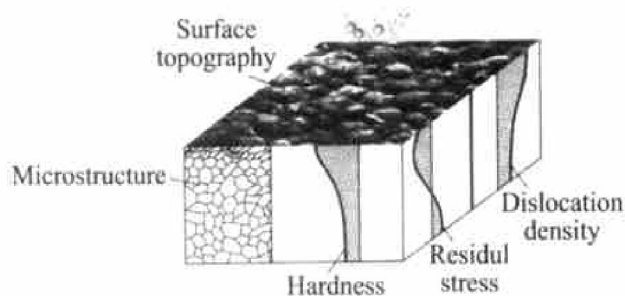


图 4 喷丸效应示意图^[6]
Fig. 4 Schematic effects caused by shot peening^[6]

疲劳断口分析表明未喷丸和喷丸试样的疲劳裂纹源均在表面, 但喷丸试样的疲劳裂纹源是单源而

未喷丸试样的疲劳裂纹源是多源, 如图 5 所示。由于疲劳裂纹在表面萌生, 所以表面层的残余应力对疲劳性能的影响很大。残余拉应力的存在会降低疲劳强度, 而残余压应力的存在可提高疲劳强度。喷丸强化可使表面层存在一定深度、数值较大的残余压应力(本文喷丸后残余压应力最小为 350MPa), 当表面层承受外加交变载荷时, 强化层内的残余压应力会降低外加交变载荷中的拉应力水平, 即可降低“有效拉应力”, 从而可提高疲劳裂纹萌生的临界应力水平(即疲劳极限)。当产生表面疲劳裂纹源时, 只要裂纹的深度小于强化层深度(260 μ m), 裂纹尖端将仍然存在一定的残余压应力区域。这时残余压应力不仅可以有效降低控制疲劳裂纹扩展的应力强度因子幅度, 而且可以增强疲劳裂纹的闭合效应使疲劳裂纹张开的临界应力增加。

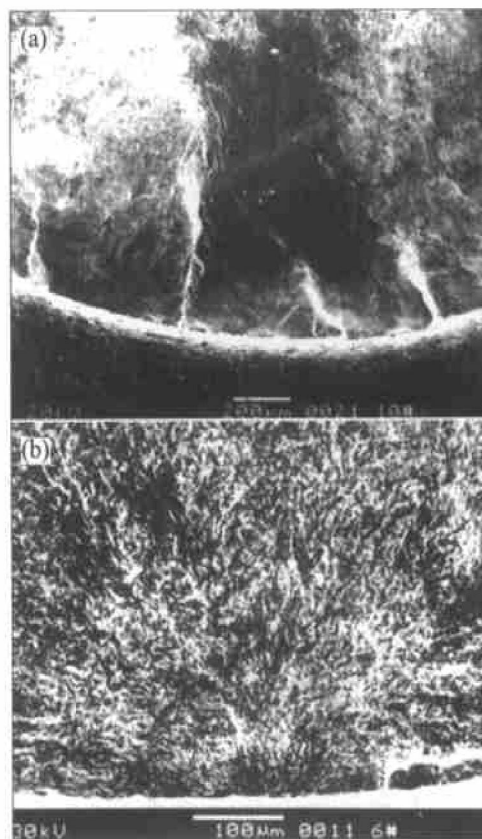


图 5 疲劳断口形貌

Fig. 5 Morphologies of fracture surface showing fatigue crack nucleation sites
(a) —Unpeened specimen; (b) —Peened specimen

3 结论

喷丸强化能明显改善 Ti-10V-2Fe-3Al 钛合金的疲劳性能, 不仅有效延长高周疲劳寿命, 而且能使 1×10^7 周次下的疲劳极限提高约 30%。

REFERENCES

- [1] Eylon D. Beta Titanium Alloys in the 90's[M]. Warrendale, PA: TMS Publications, 1993. 3 - 14.
- [2] Fujishiro S. Metallurgy and Technology of Practical Titanium Alloys[M]. Warrendale, PA: TMS Publications, 1994. 1 - 431.
- [3] Wagner L. Shot Peening[M]. Paris: Pergamon Press, 1982. 453 - 454.
- [4] 刘 锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977. 124 - 130.
LIU Suo. Metallic Materials Fatigue Properties and Shot Peening[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1977. 124 - 130.
- [5] Wagner L, Lütjering G. Shot Peening[M]. Chicago: American Shot Peening Society, 1984. 200 - 207.
- [6] 高玉魁, 陆 峰, 殷源发, 等. 喷丸强化技术及其工程应用[J]. 材料工程, 2002, 10(S): 315 - 316.
GAO Yu-kui, LU Feng, YIN Yuan-fa, et al. Shot peening and its applications in engineering[J]. Journal of Materials Engineering, 2002, 10(S): 315 - 316.
- [7] GAO Yu-kui, YAO Mei, LI Jiu-kui. An analysis of residual stress fields caused by shot peening[J]. Metall Mater Trans A, 2002, 33(6): 1775 - 1778.
- [8] 高玉魁, 姚 枚. 化学热处理对钢表象疲劳极限影响的量化研究[J]. 航空材料学报, 2002, 22(4): 23 - 25.
GAO Yu-kui, YAO Mei. Quantitative study on influence of chemical treatment on apparent fatigue limit of 40Cr steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(4): 23 - 25.
- [9] Gao Y K, Yin Y F, Yao M. Effect of shot peening on fatigue properties of 0Cr13Ni8Mo2Al steel[J]. Materials Science and Technology, 2003, 19(3): 372 - 374.
- [10] Mutoh Y, Fair G H, Nuble B, et al. The effect of residual stresses induced by shot peening on fatigue crack propagation in two high strength aluminum alloys[J]. Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structure, 1987, 10(4): 261 - 272.
- [11] 张建斌, 马 勤, 周 琦, 等. 表面强化对工业纯钛显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1037 - 1040.
ZHANG Jianbin, MA Qin, ZHOU Qi, et al. Effect of surface plastic deformation on microstructure of commercial purity titanium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 1037 - 1040.
- [12] Tan Y X, Ren L P, Li G. Effect of substructure and residual stress in strengthened layer on fatigue strength of stainless or low carbon steel[J]. Acta Metall A, 1990, 3(2): 132 - 137. (编辑 陈爱华)