

# 表面完整性对 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能的影响

## Influences of Surface Integrity on Fatigue Property of Ti6Al4V Alloy

无锡职业技术学院机械技术学院 曹秀中

中航工业北京航空制造工程研究所 韩秀全 盖鹏涛

**[摘要]** 研究了 Ti6Al4V 钛合金表面喷丸强化及光饰处理后表面粗糙度、表面残余应力和表面层微观组织结构等表面完整性因素的变化及其对高周疲劳性能的影响。结果表明, Ti6Al4V 钛合金对表面粗糙度和表面残余应力比较敏感, 经喷丸强度为 0.10~0.20mmA 的强化后, 受喷表面的残余压应力和粗糙度持续提高, Ti6Al4V 钛合金的疲劳寿命增加值先升高后降低; 后续光饰处理使强化后的材料表面粗糙度显著降低, 促进了疲劳寿命进一步提高。表面完整性影响因素的平衡与协调对 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能的提高有着非常重要的影响。

**关键词:** 表面完整性 喷丸 光饰 疲劳性能

**[ABSTRACT]** The influences of variations of surface integrity including surface roughness, surface residual stress, and microstructure caused by shot peening and vibration polishing on high cycle fatigue property of Ti6Al4V alloy are studied in this paper. The experimental results reveal that the effects of surface roughness and residual stress on fatigue property must be considered. Surface compressive residual stress and surface roughness induced by shot peening with the intensity of 0.10~0.20mmA increase persistently and the increasing extent of fatigue life of Ti6Al4V alloy firstly increases and then decreases. The vibration polishing process is more advantageous to fatigue improvement. The fatigue property of Ti6Al4V alloy is significantly influenced by balance and coordination of surface integrity factors.

**Keywords:** Surface integrity Shot peening Vibration polishing Fatigue property

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制造业中广泛应用, 特别是 Ti6Al4V, 在工程应用中约占整个钛合金用量的 65%。由于飞机飞行中的大气气流影响和发动机的振动作用, 疲劳失效成为航空钛合金结构的主要失效形式。统计表明, 90% 的航空钛合金结构件的失效与疲劳相关<sup>[1]</sup>。

对任何一种金属材料及其零部件的疲劳断裂(高

周或低周疲劳), 其疲劳源绝大多数情况下萌生于表面。因此, 表面完整性对金属材料及零件的疲劳性能有着重要的影响。所谓表面完整性是指材料表面粗糙度、表层残余应力、表层显微组织和表层致密度等表面状态的完好程度。因此, 通过改变材料的表面状态来改善材料的表面完整性以提高其疲劳性能和应力腐蚀抗力就显得尤为重要<sup>[2]</sup>。

目前, 国内外对材料表面状态的改变技术进行了大量研究<sup>[3-4]</sup>, 工程上也采用了多种表面强化措施来改善材料的表面完整性以提高其使用性能, 如表面冷作变形、表面化学热处理、表面离子注入、表面激光处理等, 其中应用最广泛的是表面喷丸强化技术。采用喷丸强化技术对飞机的一些关键承力部件进行处理, 改善其表面完整性, 效果显著; 而且与其他方法相比, 该方法成本较低廉, 因而得到了充分肯定。喷丸强化技术以其独特的优势(能耗低、成本低、适应性广且操作简单)在航空航天领域得到迅速推广。另外, 光饰处理能够有效地降低材料的表面粗糙度, 减少材料表面由加工引起的应力集中效应的影响, 也是改善材料表面完整性的一种有效手段。

目前, 我国对零件表面质量的评价正在由以测定形状尺寸、表面粗糙度为主, 向包括形状尺寸、表面粗糙度、表面形貌、表面层残余应力、表面层组织结构、表面层显微硬度等内容的表面完整性评价体系转变, 这将更加有利于提高零件的表面质量控制水平和零件的使用性能和服役能力, 特别是零件的疲劳性能。

本文以航空结构中广泛应用的 Ti6Al4V 钛合金为研究对象, 采用喷丸强化及后续光饰处理技术等手段, 研究表面完整性对疲劳行为的影响规律。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验采用的材料为 Ti6Al4V 钛合金板材, 厚度为 13mm, 其主要化学成分及组成如表 1 所示。

### 1.2 试验方法

改变 Ti6Al4V 钛合金板材表面完整性的喷丸强化及光饰工艺参数如表 2 所示。经不同工艺处理后再

表1 Ti6Al4V钛合金主要化学成分质量分数 %

元素	Al	V	Fe	C	O	N
质量分数	5.50~6.75	3.50~4.50	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 0.20	≤ 0.05

表2 喷丸强化及光饰工艺参数

试验件序号	喷丸强度 / mmA	弹丸材料	表面覆盖率 / %	是否光饰
O-1	0	—	—	—
PA-1	0.10	铸铁	100	—
PA-2	0.10	铸铁	100	是
PB-1	0.15	铸铁	100	—
PB-2	0.15	铸铁	100	是
PC-1	0.20	铸铁	100	—
PC-2	0.20	铸铁	100	是

测量材料的表面完整性。采用 LXR D 型 X 射线应力测试仪(Cr 靶, 25kV, 3mA)测定试样表面残余应力, 采用 Talysurf i 120 型粗糙度轮廓仪测定试样表面的粗糙度水平。将表面处理前后的试样加工成金相试样, 使用水砂纸对制好的金相试样进行粗磨、精磨后, 再进行机械抛光。显微组织的侵蚀采用 Keller 试剂: 2mLHF+10mLHNO<sub>3</sub>+88mLH<sub>2</sub>O, 使用 OLYMPUS-BX41M 型金相显微镜和 JSM-5600LV 型扫描电镜观察试样表面层微观组织形貌。

试验中采用的旋转弯曲疲劳试样如图 1 所示。在室温下进行旋转弯曲疲劳试验, 试验机型号为 PQ6-2, 频率为 3000r/min, 在 540MPa 应力水平下对比经不同表面喷丸强化及光饰处理(表 2)后试样的疲劳寿命。

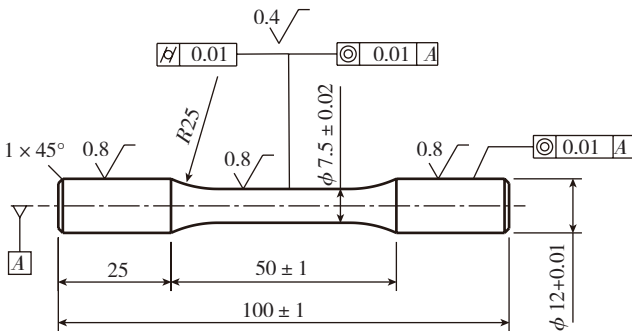


图1 旋转弯曲疲劳试样尺寸 (单位: mm)  
Fig.1 Size of rotary bending fatigue specimen

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 试验结果

#### (1) 表面粗糙度。

经不同参数喷丸强化和表面光饰加工的试验件表面粗糙度的变化如图 2 所示。试验件表面粗糙度较未喷丸试验件有显著增加, 而且随着喷丸强度的增加试验件表面粗糙度值逐渐增加, 但对喷丸强化后经过光饰处理的试验件, 其粗糙度又显著降低, 接近未经过喷丸强化试验件的表面粗糙度水平。

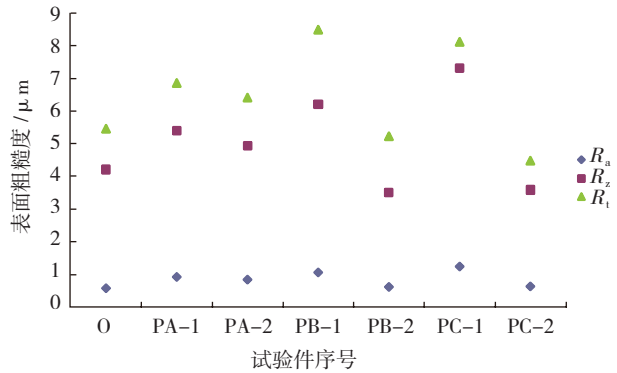
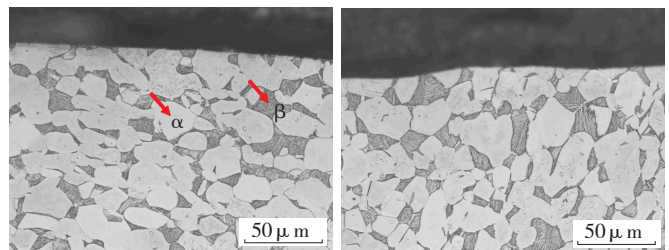


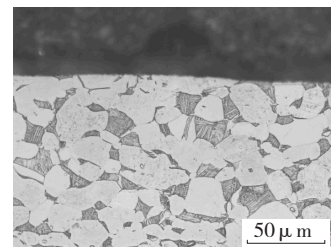
图2 不同表面处理试验件的表面粗糙度  
Fig.2 Surface roughness of specimens after different surface treatments

#### (2) 表面层微观组织结构。

表面处理前后试验件表面层的金相组织如图 3 所示。喷丸前平均晶粒尺寸在 12 μm 左右, α 与 β 相成等轴状均匀分布, 晶界清晰(图 3(a)), 而经 0.15mmA 喷丸后, 由于表层组织在高速弹丸反复撞击下产生剧烈的循环塑性变形, 材料表面出现凹凸不平, 表层晶粒相对基体发生了压缩变形, 且距表层越远, 受喷丸影响越小, 晶粒变形也越小(图 3(b)); 而经过表面光饰处理



(a) 试验件 O-1 (b) 试验件 PB-1



(c) 试验件 PB-2

图3 不同表面处理试验件表面层金相组织  
Fig.3 Microstructure of specimen surface layer after different surface treatments

后,材料表面又变得平整,与喷丸前的表面接近,但循环塑性变形引起的表层晶粒变形并没有发生变化(图3(c))。

图4为喷丸后表层深度在20~30 $\mu\text{m}$ 左右的扫描电镜(SEM)组织。由图4可知,喷丸后,材料表面经弹丸多次强烈的冲击后会发生剧烈的弹塑性变形,而晶体材料受力产生塑性变形一般是在滑移过程中进行的,即在晶粒内部会产生大量位错;随着喷丸的继续进行,塑性变形越来越大,位错大量产生,密度增加并产生滑移;伴随着位错的滑移,遇到障碍时就会发生位错缠结,形成位错墙,并伴随塑性变形的继续进行而形成孪晶等亚结构(如图4箭头所指)。晶粒内部孪晶等亚结构的形成能够在疲劳过程中起到阻碍位错往复滑移的作用,从而增加位错运动的阻力,提高材料的疲劳强度。

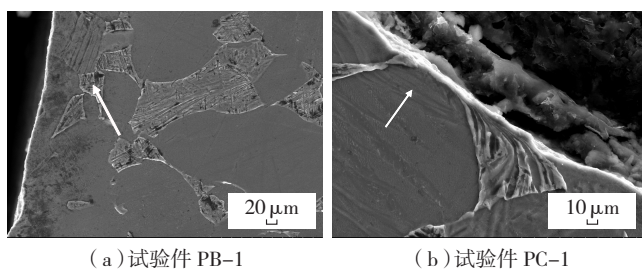


图4 喷丸后试验件表面层扫描电镜图

Fig.4 SEM micrographs of specimen surface layer after shot peening

### (3) 表面残余应力。

由图5可以看出,当喷丸强度为0.10~0.20mmA时,喷丸强化均在材料表面引入了超过600MPa的残余压应力,远大于喷丸强化前。这表明在一定的喷丸强度水平下,喷丸强化技术能大幅度稳定提高材料表面的残余压应力水平。喷丸强化的试验件经相同的光饰处理后,材料表面的残余应力都出现了降低,降低程度约为70MPa。

### (4) 高周疲劳性能。

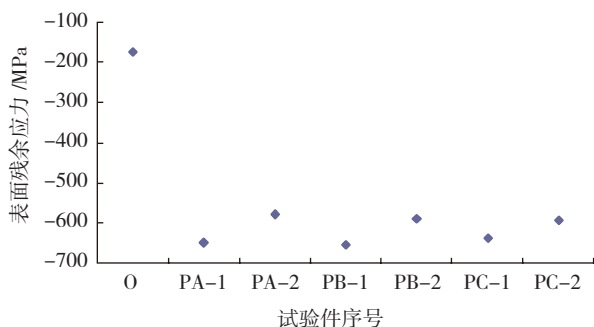


图5 不同表面处理后试验件的残余应力

Fig.5 Residual stress of specimens after different surface treatments

在室温下进行疲劳试验,在540MPa应力水平下对比不同喷丸强度处理后光滑试样的旋转弯曲疲劳寿命,当疲劳寿命达到 $10^7$ 次时即停止,试验结果如表3所示。可知最佳喷丸强化工艺参数为0.15mmA,在540MPa应力水平下,经此强度喷丸强化后试样的疲劳寿命比未喷丸强化试样的寿命提高了2个数量级。喷丸强化时在表面层产生激烈的变形,一方面在表面层引入了残余压应力场,另一方面引起表面粗糙度和表层微观组织结构的变化,这些变化对疲劳性能均有影响<sup>[5-7]</sup>。

表3 试验件经不同强度喷丸处理后的疲劳试验结果

试验件序号	O-1	PA-1	PA-2	PB-1	PB-2	PC-1	PC-2
疲劳寿命/次	$3.4 \times 10^5$	$1.6 \times 10^6$	$6.0 \times 10^6$	$\geq 10^7$	$\geq 10^7$	$5.5 \times 10^6$	$\geq 10^7$

## 2.2 分析与讨论

由表3的疲劳试验结果可以看出,采用不同的喷丸工艺处理材料表面会对材料的疲劳性能产生显著影响。在未喷丸处理前,原始材料的疲劳寿命在540MPa时只能达到 $10^5$ 次的水平,经过0.10mmA的喷丸表面处理,大大提高了材料的疲劳性能,疲劳寿命在540MPa时提高到 $1.6 \times 10^6$ 次,提高了约1个数量级;再经过表面光饰处理后,疲劳寿命继续提高至 $6.0 \times 10^6$ 次。当喷丸强度为0.15mmA时,在同样的应力水平下,疲劳寿命达到 $10^7$ 次,经过表面光饰处理后也为 $10^7$ 次。当喷丸强度继续提高到0.20mmA时,在540MPa的应力水平下,疲劳寿命为 $5.5 \times 10^6$ 次,经过表面光饰处理后,疲劳寿命提高至 $10^7$ 次。

这表明喷丸强化处理可以显著提高材料的疲劳性能,而经过适当的光饰处理可以进一步提高材料的疲劳寿命。这是由于喷丸强化在材料表面形成了合理的残余压应力层,这对阻碍裂纹在表面萌生有很大的积极作用,另外喷丸引起的材料表层晶粒组织的变形和孪晶等亚结构的形成也起到了阻碍裂纹扩展的作用。当喷丸强度从0.10mmA提高至0.15mmA时,材料表面的残余压应力提高,使疲劳寿命显著增加,这表明材料表面残余压应力的提高将显著提高材料的疲劳性能。当喷丸强度继续提高至0.20mmA时,材料的疲劳寿命又有所降低,这与材料表面粗糙度值进一步提高有一定关系,因为钛合金高周疲劳对表面缺陷极为敏感,喷丸虽然在材料表面形成了残余压应力层,但表面粗糙度相对原始表面却增加很大,而在循环载荷下,金属的不均匀滑移又主要集中在金属表面,疲劳裂纹也常集中在表面上,表面的微观几何形状就像微小的缺口一样,引起应力

(下转第100页)

衰减时间明显小于试样上电荷实际衰减时间<sup>[8]</sup>。由于 Cross-Over 效应,材料初始电位高时衰减快,电位低时衰减慢。所以要正确评价不同材料的静电衰减性能,应该使不同材料从相同的初始电位开始衰减。为此,可采用悬浮喷电法,即喷电过程中材料不接地,当材料表面电位不再上升时试样夹接地,同时非接触式静电电位计开始测量试样上的电位衰减情况。

### 2.3 最小点火能和静电火花能量对比

测出试验用航煤的最小点火能及电位测试部位的电容值,根据公式:  $U_{\max} = (2W_{\min}/C)^{1/2}$ ,推导出极限电位  $U_{\max}$  值,与测试所得电位值相比,若测试点电位值低于该极限电位值,则认为该点无静电放电引燃的危险。

或根据公式  $W = \frac{1}{2}U^2C$ ,由测试部位的电位值及电容值推算出该点的静电放电能量,与航煤的最小点火能相比,若低于最小点火能,则认为该点无静电放电引燃的危险。

## 3 结论

以上为常用的3种方式,参数比较易测,测试和对比结果比较直观。对以上几种评估方法的评估结果进行综合,评估复合材料整体油箱防静电措施设计的有效性和安全性。

静电安全评估试验项目应根据整体油箱的具体情况进行分析确定。确定项目后,根据试验目的,确定测试参数及部位,选取适宜的试验方法,根据相关标准设计试样,选择相应的测试仪器,最终制定试验大纲。试验后整理试验结果进行分析评估。

### 参考文献

[1] FAA Inspectors and Engineers, SFAR 88. Related Operating Rules Special Maintenance Requirements & Compliance Planning Briefing [EB/OL]. 2002-11-7. USA: <http://www.faa.gov>.

[2] 张兴金,邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机. 纤维复合材料, 2009, 26(2): 24-26.

[3] EIA-541. Packaging material standards for ESD sensitive items. 1988.

[4] Baumgartner G. Electrostatic decay measurement theory and applications. EOS/ESD Symposium, 1995:5.7.1-5.7.11.

[5] Chubb J N, Malinverni P. Experimental comparison of charge decay measurement for a variety of materials. Symposium EOS/ESD Dallas, 1992:5A.5.1-5A.6.9.

[6] 范立思,魏光辉,魏明,等. 静电衰减时间常数测试仪的原理与设计. 包装工程, 2001, 22(2): 41-42.

[7] 中国航空研究院编著. 复合材料设计手册. 北京: 航空工业出版社, 2001, 11: 225-237.

[8] 焦连跃,李华星. 从 FAA 看如何加强我国民航适航管理. 西北工业大学学报(社会科学版), 2009(9): 43-47. (责编 志一)

(上接第 97 页)

集中,促进疲劳裂纹萌生,所以喷丸试件在喷丸强度为 0.20mmA 时,表面粗糙度的大幅增加是影响 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能提高的一个主要原因。

光饰后试验件的表面残余压应力都出现降低,而疲劳寿命提高是由于光饰处理后虽然试验件的表面残余压应力降低,但同时表面的粗糙度也显著降低,基本与原始未表面强化的材料在一个数量级内,从而大幅降低了材料表面喷丸强化引起的应力集中因素的影响,所以光饰处理对改善 Ti6Al4V 钛合金的疲劳性能很有益处。

以上分析表明, Ti6Al4V 钛合金的疲劳性能不是由其表面层残余应力或表面粗糙度等某些单一因素决定的,而是由表面层微观组织结构特征、表面粗糙度和表层残余应力等众多综合因素的平衡来决定的,即由表面完整性来决定。

## 3 结论

(1) 在 0.10~0.20mmA 强度范围内喷丸强化时,喷丸表面粗糙度持续增加, Ti6Al4V 钛合金疲劳寿命增加值先升后降。

(2) 喷丸强化再经过光饰处理后,喷丸表层残余压应力降低,喷丸表面质量改善,其粗糙度可以达到强化前的水平,可使 Ti6Al4V 钛合金疲劳寿命进一步提高。

(3) 表面完整性控制,即表面层微观组织结构特征、表面粗糙度及表层残余应力等众多因素的综合平衡与协调,对改善和提高 Ti6Al4V 钛合金疲劳性能非常重要。

### 参考文献

[1] Kim H, Kim J. Region-based shape descriptor invariant to rotation scale and translation. Signal processing: Image Communication, 2000, 16(1-2): 87-93.

[2] 王仁智. 残余应力测定的基本知识. 理化检验: 物理分册, 2007, 43(10): 535-539.

[3] Sudarshan T S, Reitz W, Stiglich J J. Surface modification technologies IX//Proceedings of the Ninth International Conference on Surface Modification Technologies. Cleveland, Ohio, USA, 1995: 50-52.

[4] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺. 北京: 国防工业出版社, 1977: 76-82.

[5] 田唐永. TC4 钛合金喷丸强化组织与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

[6] 米谷茂. 残余应力的产生和对策. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[7] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536-1539.

(责编 谷雨)