

# 超声深滚降低 TC4 钛合金表面粗糙度和修复表面损伤的作用

李 礼, 朱有利, 吕光义

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

**摘 要:** 在 TC4 钛合金表面制备线形和圆形的模拟缺口, 定量分析研究超声深滚处理降低 TC4 钛合金表面粗糙度和修复表面损伤的作用。采用 TR240 表面粗糙度仪测试超声深滚处理前后的表面粗糙度, 采用 Quant 200 扫描电子显微镜 (SEM) 对处理前后表面进行观察分析。结果表明, 超声深滚处理可以使粗磨状态的 TC4 合金的表面粗糙度由 Ra 2.32  $\mu\text{m}$  降低到 Ra 0.11  $\mu\text{m}$ , 有效修复线形和圆形的模拟损伤。分析讨论了表面状态的改善对于恢复和提高老旧零件疲劳性能的作用。

**关键词:** 超声深滚; 钛合金; 表面粗糙度; 异物损伤; 疲劳性能

**中图分类号:** TG 115.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)02-0339-04

TC4 是航空和航天工业中应用最广泛的钛合金之一, 主要用于制造发动机的风扇、压气机盘和压气机叶片等零件<sup>[1]</sup>。叶片等零件在服役过程中既承受疲劳载荷, 又承受异物撞击而造成凹坑、划伤和微裂纹等损伤(异物损伤, FOD)。疲劳裂纹一般萌生于零件的表面, 而 FOD 会引起应力集中, 在工作循环载荷作用下, 容易导致疲劳裂纹的萌生和扩展, 降低叶片的疲劳寿命。因此, 表面状态对于叶片的使用性能具有重要的影响。

表面机械强化处理技术如喷丸<sup>[2,3]</sup>、超声冲击<sup>[4]</sup>、深滚 (Deep Rolling)<sup>[5]</sup>、低塑性滚光 (Low Plasticity Burnishing)<sup>[6]</sup> 和激光冲击强化 (Laser Shot Peening)<sup>[7]</sup> 等, 成功应用于提高零件的疲劳性能和抗异物损伤性能, 其强化机制主要在于引入残余压应力、产生加工硬化和细化组织结构等方面<sup>[2-7]</sup>。此外, 深滚和低塑性滚光技术还可降低表面粗糙度、提高表面质量<sup>[5,8]</sup>。国内外对表面机械强化技术在提高钛合金疲劳性能和抗异物损伤方面的作用进行了广泛的评价<sup>[2-8]</sup>, 对残余应力、加工硬化及组织结构方面的作用进行了深入的分析研究<sup>[9,10]</sup>。但是, 定量地分析评价表面强化处理对表面粗糙度和表面微缺陷的影响的研究工作相对较少。本实验研究一种新型表面机械强化处理技术——超声深滚技术 (Ultrasonic Deep Rolling, UDR)<sup>[11]</sup> 对于 TC4 钛合金表面粗糙度和表面模拟微缺陷的影响, 分

析讨论表面状态的改善对于提高和恢复老旧零件疲劳性能的作用和意义。

## 1 实验方法

试验材料为 TC4 钛合金板材, 试样尺寸为 30 mm×15 mm×6 mm (长×宽×高), 表面磨削处理。采用线切割技术制备 3 种规格的线形缺口模拟表面划伤和微裂纹, 具体尺寸见表 1。采用电火花技术制备 3 种规格的圆形缺口模拟因冲蚀、点蚀等造成的表面损伤, 具体尺寸见表 2。

表 1 线形缺口超声深滚处理前后几何尺寸

Number	Original notch		UDR treated notch	
	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$
1	100	100	15	15
2	150	150	50	50
3	200	200	90	90

表 2 线形缺口超声深滚处理前后几何尺寸

Number	Original indentation		UDR treated indentation	
	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$	Width / $\mu\text{m}$	Depth / $\mu\text{m}$
1	200	100	110	50
2	200	200	125	70
3	400	200	250	150

收稿日期: 2008-01-24

基金项目: 留学回国人员科研启动基金(2005-373)

作者简介: 李 礼, 男, 1981 年生, 博士生, 装甲兵工程学院装备再制造工程系, 北京 100072, 电话: 010-86063776, E-mail: soloxinli@hotmail.com

采用自行研制的 UDR-I 型超声深滚机在 ZXZ-4A 型铣床上对试样表面进行强化处理。在超声深滚过程中，超声振动的动态载荷和深滚的静态载荷同时施加在一枚弹子上，使材料表面发生塑性变形。处理方式如图 1 所示。 $V$  为工具头的移动速度，步距  $L$  为工具头的横向进给量。主要处理工艺参数：进给速度 200 mm/min，步距 0.1 mm，超声频率 20 kHz，工具头振幅 20  $\mu\text{m}$ ，深滚力 50 N。

使用 Quant 200 型扫描电子显微镜分析观察处理前后的试样表面形貌。采用 TR240 型表面粗糙度仪测试超声深滚处理对表面粗糙度的影响，取 5 次测量的平均值作为该表面的粗糙度。

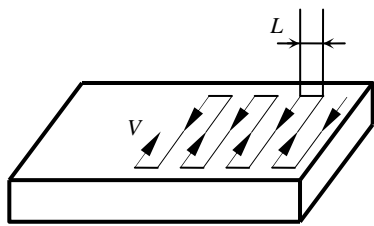


图 1 试样处理方式示意图

Fig.1 Schematic illustration of feeding route of the UDR treatment

## 2 实验结果

### 2.1 表面形貌及粗糙度

图 2 是试样表面未处理区和 UDR 处理后区域的表面形貌及相应的表面粗糙度曲线。可以看出，未处

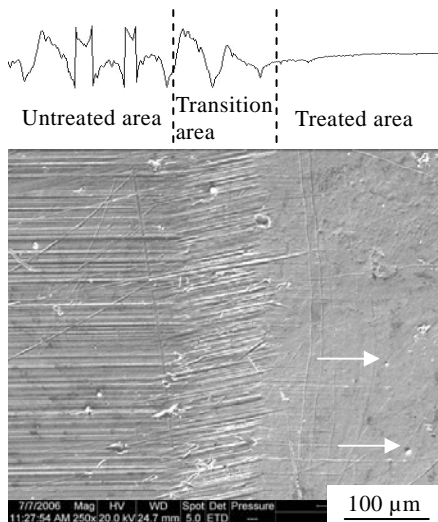


图 2 试样未处理区域和 UDR 处理后区域的表面形貌及相应的表面粗糙度曲线

Fig.2 Surface profile and the corresponding roughness curve of the UDR of treated and untreated areas

理的表面区域(图左侧)存在有较多的加工纹理，这些纹理主要是磨痕和因粘着引起的表面微缺陷。处理后的表面区域(图右侧)变得光滑、平整，大幅消除了加工纹理。超声深滚处理过程中，因表面塑性变形，表面粗糙度波峰被压平、波谷被填满，对零件表面起到了“削峰填谷”的作用。即使是表面微缺陷，经超声深滚强化处理后也基本闭合并钝化(图中箭头所指处)。表面粗糙度曲线更直接定量地反映出处理前后的表面形貌。经测量，在该试验条件下超声深滚使表面粗糙度由  $Ra\ 2.32\ \mu\text{m}$  降低到  $Ra\ 0.11\ \mu\text{m}$ ，接近镜面光洁度。

### 2.2 线形缺口

线形缺口超声深滚处理前后几何尺寸的变化情况见表 1。图 3 是宽度为 150  $\mu\text{m}$ 、深度为 150  $\mu\text{m}$  的线形缺口试样超声深滚前后缺口附近的表面形貌。可以看出，由于超声深滚的动态冲击力和静态压力的综合作用使工件材料表层产生强烈的塑性变形，缺口基本被填平，其宽度和深度(图 4)大大减小。这说明超声深滚工艺对线形损伤有很好的修复作用。线切割加工时，在试件表面上烧蚀大量的微坑洞，尺度在 10  $\mu\text{m}$  左右(图 3a)，经过超声深滚处理后，这些表面微坑大大减少甚至基本被压平(图 3b)。证明超声

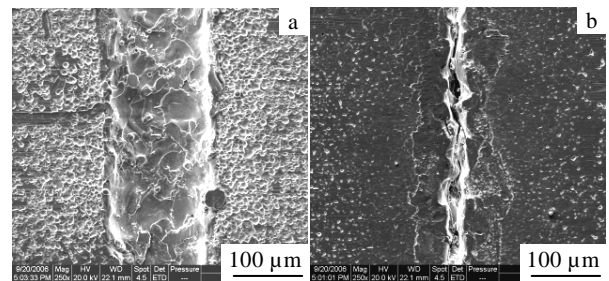


图 3 试样线形缺口超声深滚处理前后表面形貌

Fig.3 Surface profile of line notch before (a) and after (b) UDR

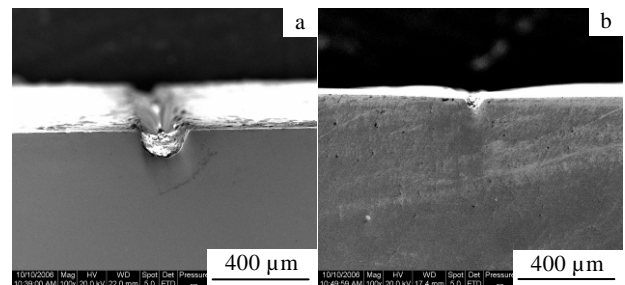


图 4 试样线形缺口超声深滚处理前后截面形貌

Fig.4 Section surface profile of line notch before (a) and after (b) UDR

深滚处理在消除零件表面点蚀坑、FOD 坑等微坑洞的作用。

### 2.3 圆形缺口

圆形缺口超声深滚处理前后几何尺寸的变化情况见表 2。图 5 是直径为 200  $\mu\text{m}$ 、深度为 200  $\mu\text{m}$  的圆形缺口试件超声深滚前后缺口附近的表面形貌。可见, 经超声深滚处理后圆形缺口的直径和深度都大幅度降低, 但是并没有完全消除。这是由于一方面圆形缺口处于弹子正下方时, 有“三向压应力效应”; 另一方面圆形缺口存在几何对称性, 压入时将在圆周方向产生很大的压应力(Hoop stress), 这会使塑性流动困难。

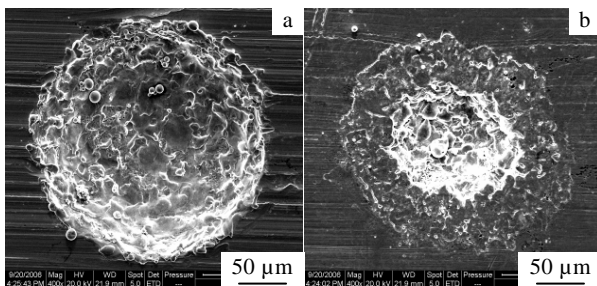


图 5 试样圆形缺口超声深滚处理前后表面形貌

Fig5 Surface profile of cycle indentation before (a) and after (b) UDR

## 3 讨论

表面粗糙度试验证明超声深滚表面强化处理在降低零件表面粗糙度方面的作用。由于消除了加工纹理、表面微缺陷等容易引起应力集中和裂纹萌生的因素, 改善了零件的表面状态, 对延长零件的疲劳寿命将会有重要的作用。

超声深滚对模拟的线形和圆形损伤的修复试验证明, 采用超声深滚处理可以有效修复材料的表面损伤, 有益于提高零件的抗疲劳性能。

实际上, 超声深滚处理不仅可以“愈合”表面微裂纹、蚀坑等损伤, 还可以降低缺口附近的应力集中系数并引入残余压应力, 这对于提高修复后零件的疲劳性能是十分有益的。

目前, 航空涡轮发动机压气机叶片的修理工艺流程主要为<sup>[12]</sup>: 分解→酸洗→目检(目视)→修理→探伤→喷丸→最终检验。抛光工艺是修理过程中最核心的一道工序, 其目的主要在于去除叶片的表面损伤, 并使其恢复性能。

超声深滚的“削峰填谷”作用是一个无屑抛光过

程, 是通过材料的塑性流动实现的, 因此没有材料去除, 不会造成断面减薄, 这与磨削或抛光工艺有着很大的区别。这对于零件的维修来说十分重要, 因为传统的打磨抛光过程会造成材料去除, 多次修复处理会造成零件的断面尺寸减小, 降低零件的静强度和疲劳强度。

## 4 结论

- 1) 超声深滚处理显著改善 TC4 钛合金的表面质量, 使表面粗糙度由 Ra 2.32  $\mu\text{m}$  降低到 Ra 0.11  $\mu\text{m}$ 。
- 2) 超声深滚可以有效修复模拟损伤。
- 3) 超声深滚处理有利于延长零件的疲劳寿命、恢复和提高老旧零件的抗疲劳性能。

### 参考文献 References

- [1] Shi Changxu(师昌绪), Yan Minggao(颜鸣皋) et al. *China Aeronautical Materials Handbook*(中国航空材料手册 Vol. 4)[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002
- [2] Gao Yukui(高玉魁). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(9): 1000
- [3] Lindemann J, Buque C, Appel F. *Acta Materialia*[J], 2006, 54(4): 1155
- [4] Wang Dongpo(王东坡), Huo Lixing(霍立兴), Zhang Yufeng(张玉凤). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2003, 13(6): 1456
- [5] Juijerm P, Altenberger I. *Scripta Materialia*[J], 2006, 55(10): 943
- [6] Prev y P S. *International Journal of Fatigue*[J], 2004, 26(11): 975
- [7] Charles S, Wei Tao, Ye Lin et al. *International Journal of Fatigue*[J], 2002, 24(10): 1021
- [8] Juijerm P, Altenberger I. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 452~453: 475
- [9] Torres M, Voorwald H. *International Journal of Fatigue*[J], 2002, 24(8): 877
- [10] Altenberger I, Liu G. *Scripta Materialia*[J], 2003, 48(10): 1593
- [11] Zhu Youli(朱有利), Li Li(李礼) et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2008, 44(2)(Accepted)
- [12] Su Qinyou(苏清友). *Guide for Service Life Determination of Main Components and Parts of the Turbine Jet and Turbine Fan Airplane Engine*(航空涡轮、涡轮发动机主要零部件定寿指南)[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004

## Influence of Ultrasonic Deep Rolling on Reducing Surface Roughness and Healing Surface Scar of TC4 Titanium Alloy

Li Li, Zhu Youli, Lü Guangyi

(Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effects of ultrasonic deep rolling process on the reducing surface roughness and healing surface scar or micro-damage, some line type surface notches and pit like surface caves were prepared and followed by ultrasonic deep rolling treatment on Ti-6Al-4V plate to simulate the foreign object damage. The surface roughness and geometry were evaluated by a surface profile tester and SEM observation for both the treated and untreated specimens. Results show that the surface roughness of the specimen can be reduced from  $Ra$  2.32  $\mu\text{m}$  to 0.11  $\mu\text{m}$  by the ultrasonic deep rolling process. Some line type surface notches and pit like surface caves were significantly attenuated. The above results are expected to improve the anti-fatigue performance of parts effectively or to restore the fatigue resistance of the FOD damaged surface.

**Key words:** ultrasonic deep rolling; titanium alloy; surface roughness; FOD; fatigue performance

---

Biography: Li Li, Candidate for Ph. D., Faculty of Remanufacture Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, P. R. China, Tel: 0086-10-86063776, E-mail: soloxinli2005@hotmail.com