

# 喷丸强化对 TC17 钛合金表面完整性及疲劳寿命的影响

张少平<sup>1</sup>, 谈军<sup>2</sup>, 谭靓<sup>3</sup>, 姚倡锋<sup>3</sup>

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500;

2. 中国航发发动机股份有限公司, 西安 710021;

3. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

**[摘要]** 研究了喷丸强化对 TC17 钛合金表面完整性及疲劳寿命的影响。采用表面粗糙度仪、扫描电子显微镜、X 射线残余应力测试仪、显微硬度计等分析了弹丸种类和喷丸强度对表面粗糙度、残余应力场、显微硬度场和微观组织的影响; 在旋转弯曲疲劳试验机上测试了喷丸强化后的疲劳寿命, 探讨了表面完整性与疲劳寿命的内在联系及作用机制。结果表明: 喷丸强化后 TC17 钛合金表面粗糙度为 0.5~1.0  $\mu\text{m}$ , 残余压应力层为 100  $\mu\text{m}$  左右, 最大残余压应力位于表面下 30  $\mu\text{m}$  处, 表面出现加工硬化, 晶粒发生了压缩变形; 与未喷丸试样相比, 玻璃丸对疲劳寿命的提升幅度最大, 陶瓷丸次之, 铸钢丸最小。喷丸强化提高疲劳寿命的机制归结于引入较深的残余应力层、较高的表面硬化程度和表层晶粒的细化。

**关键词:** TC17 钛合金; 喷丸强化; 表面完整性; 疲劳寿命; 表面粗糙度; 残余应力

## Effect of Shot Peening on Surface Integrity and Fatigue Life of TC17 Alloy

ZHANG Shaoping<sup>1</sup>, TAN Jun<sup>2</sup>, TAN Liang<sup>3</sup>, YAO Changfeng<sup>3</sup>

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Chengdu 610500, China;

2. AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China;

3. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**[ABSTRACT]** The effect of shot peening on the surface integrity and fatigue life of TC17 alloy was investigated. The effect of shot type and shot peening intensity on surface roughness, residual stress, microhardness, and microstructure was analyzed by using surface roughness tester, a scanning electron microscopy, X-ray diffraction residual stress analyzer, microhardness instrument, etc. The fatigue life before and after shot peening was tested by rotating bending fatigue testing machine. The relationship between surface integrity and fatigue life was discussed. Results show that surface roughness ( $R_a$ ) of 0.5~1.0  $\mu\text{m}$  was obtained after shot peening, the thickness of compressive residual stress layer was approximately 100  $\mu\text{m}$ , and the maximum compressive residual stress was located at about 30  $\mu\text{m}$  depth beneath the surface, work hardening and grain deformation were observed. Compared with the fatigue life of untreated specimens, the longest fatigue life is obtained when utilizing glass shot, then utilizing ceramic shot, last utilizing cast steel shot. The mechanism of improving fatigue life after shot peening is due to the induced deep compressive residual stress layer, high surface hardening degree and surface grain refinement.

**Keywords:** TC17 titanium alloy; Shot peening; Surface integrity; Fatigue life; Surface roughness; Residual stress

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.089

TC17 是一种近  $\beta$  型的  $\alpha + \beta$  两相钛合金, 具有强度高、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度范围宽等一系列优点, 正是这种优异的性能使其使用温度最高可达 427  $^{\circ}\text{C}$ , 广泛应用于制造航空发动机的风扇 / 压机机盘、离心叶轮等构件<sup>[1]</sup>。虽然 TC17 钛合金具有很高的强度, 但其疲劳性能对表面状态非常敏感, 因此对构件加工表面完整性的要求很高<sup>[2]</sup>。表面完整性是指表面无损伤

或强化的表面状态和性能, 主要包含表面粗糙度、表面形貌、残余应力、显微硬度和微观组织等指标<sup>[3]</sup>。大量试验研究表明: 表面完整性的优劣对构件的疲劳性能有着重要的影响<sup>[4-15]</sup>。工程上通常采用喷丸强化技术来改善构件的表面完整性(表层引入残余压应力、细化微观组织), 提高疲劳性能; 但喷丸强化工艺参数选择不当, 会使构件表面粗糙度增大、出现表面损伤缺陷等, 甚

至降低疲劳性能<sup>[7]</sup>。

目前,国内外针对钛合金喷丸强化后的表面完整性和疲劳寿命进行了积极的研究。Tsuji等<sup>[16]</sup>研究发现,采用70 $\mu\text{m}$ 工具钢弹丸,在0.3MPa气压和200%覆盖率下,TC4钛合金喷丸强化后表面粗糙度达到 $R_a$ 1.7 $\mu\text{m}$ ,残余压应力层深度约为100 $\mu\text{m}$ 。Tan等<sup>[17]</sup>研究了喷丸强度和覆盖率对TC17钛合金残余应力场的影响,并建立了喷丸强化残余应力场的预测模型。高玉魁等<sup>[8-9,18-19]</sup>针对TC4、TC21钛合金,研究发现喷丸强化后表层位错密度增加,晶粒发生了变形和细化,TC4和TC21钛合金旋转弯曲疲劳极限分别提高了36.3%和30%。刘道新团队研究发现,喷丸强化使TC4钛合金拉-拉疲劳极限提高14.5%<sup>[10]</sup>,过高的喷丸强度反而使TC21钛合金旋转弯曲疲劳极限降低11.7%<sup>[11]</sup>。温爱玲等<sup>[12]</sup>发现经2h和8h喷丸处理后,TC4钛合金旋转弯曲疲劳极限分别提高14.4%和20%。王欣等<sup>[13]</sup>研究发现200%覆盖率喷丸强化时,Ti60钛合金高温旋转弯曲疲劳寿命提高4倍左右,而覆盖率为100%和400%时,疲劳寿命提高2倍左右。

以上研究主要集中在TC4、TC21等牌号钛合金,本文以TC17钛合金为研究对象,开展弹丸种类和喷丸强度对表面完整性及疲劳寿命的影响研究,为TC17钛合金构件的喷丸强化提供工艺指导和技术支撑。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验材料为TC17钛合金,化学成分见表1。热处理工艺为360 $^{\circ}\text{C}$ 保温30min,550 $^{\circ}\text{C}$ 保温3~4h,空冷,力学性能见表2。疲劳试样几何形状和尺寸见图1。具体加工工艺为车削、磨削、机械抛光,然后进行喷丸强化。表面完整性测试所用为20mm $\times$ 20mm $\times$ 15mm的矩形试样。

### 1.2 喷丸强化试验

喷丸强化试验在气动式压缩空气喷丸强化设备上进行,采用N型Almen试片来确定喷丸强度,喷丸角度为45 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$ ,喷嘴至试样受喷表面的垂直距离为(150 $\pm$ 10)mm,具体工艺参数如表3所示。

### 1.3 表面完整性测试方法

表面粗糙度测试采用MarSurf 300C便携式粗糙度测量仪,取样长度为0.8mm,评定长度为5.6mm。表面形貌采用JEOL JSM-6360LV型扫描电子显微镜进行观察。残余应力场测试采用PROTO LXR D MG2000残余应力测试分析系统,测试条件:Cu靶K- $\alpha$ 波段,靶电压25kV,靶电流30mA,布拉格角142 $^{\circ}$ ,曝光时间2s,曝光次数10次,焦斑大小 $\Phi$ 3mm。为了获得残余应力沿深度分布情况,采用电化学剥层的方法对试样进行腐蚀剥层,

电解液为甲醇(590mL)、乙二醇单丁醚(350mL)和高氯酸(60mL)的混合溶液。显微硬度场的测量采用FM-800型自动显微硬度测试仪,试验力选择0.49N,保持载荷时间10s。测试前需将试样沿垂直加工面的方向线切割截得样块,并进行镶样、抛光。在显微硬度场测试试样,采用莱卡S6D显微镜进行微观组织观察,腐蚀液为氢氟酸(5mL)、硝酸(25mL)和水(70mL)的混合溶液。

### 1.4 疲劳试验方法

疲劳试验按照HB5152-96在PQ-6型旋转弯曲疲劳试验机上进行,转速为2200r/min,室温条件。加载最大应力为750MPa,疲劳试样跳动量控制在0.03mm以下。每组喷丸强化工艺下进行3~6件疲劳试样的疲劳试验,并求取中值疲劳寿命。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 喷丸强化对TC17钛合金表面完整性的影响

#### 2.1.1 表面粗糙度和表面形貌

图2为喷丸强化对TC17钛合金表面粗糙度的影响。可以看出,在0.30mmN喷丸强度下,铸钢丸获得的表面粗糙度最大为 $R_a$ 0.932 $\mu\text{m}$ ,其次为陶瓷丸,最小为玻璃丸。这是由弹丸的密度和硬度不同造成的,密度大、

表1 TC17钛合金化学成分(质量分数) %

元素	Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Ti
含量	4.5~5.5	1.6~2.4	1.6~2.4	3.5~4.5	3.5~4.5	余量
杂质	Fe	C	N	H	O	其他
含量	$\leq$ 0.30	$\leq$ 0.05	$\leq$ 0.05	$\leq$ 0.0125	0.08~0.13	$\leq$ 0.30

表2 TC17钛合金室温力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	截面收缩率/%
$\geq$ 1120	$\geq$ 1030	$\geq$ 5	$\geq$ 10

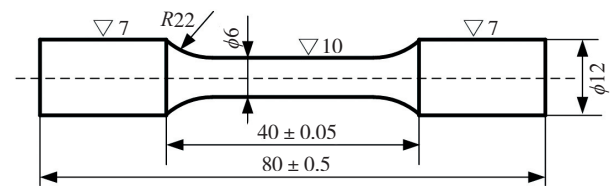


图1 旋转弯曲疲劳试样几何形状和尺寸(单位: mm)

Fig.1 Geometric shape and dimension of fatigue specimens

表3 TC17钛合金喷丸强化工艺参数

弹丸种类	弹丸直径/mm	喷丸强度(mmN)	表面覆盖率/%
Z300陶瓷丸	0.30	0.20, 0.30, 0.35	150
BZ25玻璃丸	0.25	0.15, 0.24, 0.30	150
S110铸钢丸	0.30	0.15, 0.25, 0.30	150

硬度高的铸钢丸撞击试样时所携带的动能大,弹坑尺度大。陶瓷丸的密度介于铸钢丸和玻璃丸之间,硬度与铸钢丸相当,玻璃丸的密度和硬度均最小,撞击时的能量最少,因此表面粗糙度最小。无论何种弹丸,表面粗糙度随着喷丸强度的增大而增大,这是由于喷丸强度越高,表面塑性变形程度越大,弹坑越深。图3为0.30mmN喷丸强度下试样表面轮廓。铸钢丸喷丸强化后试样表面轮廓起伏最大,存在明显的波峰和波谷,而陶瓷丸和玻璃丸喷丸强化后,表面轮廓曲线起伏较小。

图4为喷丸强化后TC17钛合金表面形貌。可以看出,随着喷丸强度的增加,弹坑周围塑性流变明显,出现局部褶皱和轻微脱层,造成轻微表面局部损伤。喷丸强度0.3mmN时,陶瓷丸喷丸后表面形貌良好;玻璃丸

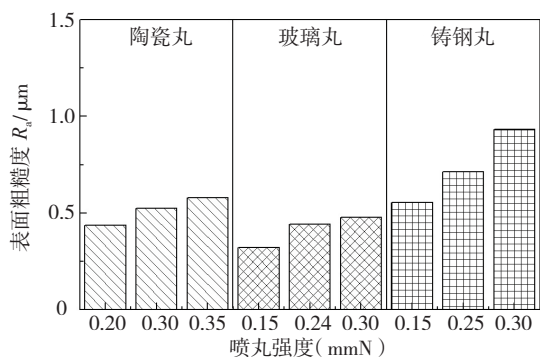


图2 喷丸强化对表面粗糙度的影响

Fig.2 Effect of shot peening parameters on surface roughness

喷丸后表面未出现较大和较深的弹坑;铸钢丸喷丸后表面弹坑尺寸和深度较大,有大量褶皱隆起和明显局部脱层,这是由于塑性变形层径向延伸受到邻近区域限制而引起的<sup>[10,14]</sup>。

### 2.1.2 残余应力场

图5所示为喷丸强化对TC17钛合金残余应力场的影响。喷丸强化后试样表层均引入一定深度分布的残余压应力,且沿深度呈先增大后减小的变化趋势。陶瓷丸0.20mmN喷丸强化后,最大残余应力位于 $28\mu\text{m}$ 处约为 $-771\text{MPa}$ ,残余应力层深度约 $100\mu\text{m}$ ;玻璃丸喷丸强化后,随着喷丸强度的增大,最大残余压应力和残余压应力

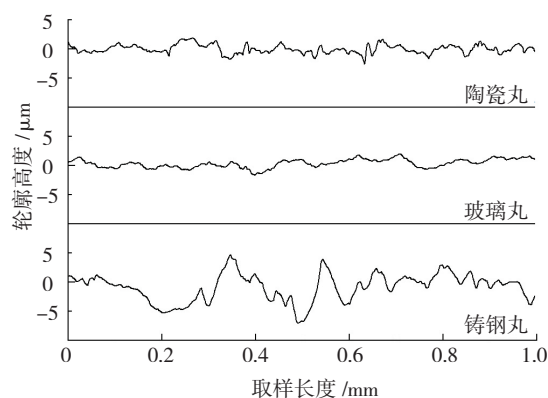


图3 不同弹丸喷丸强化后TC17钛合金表面轮廓

Fig.3 Surface profile of TC17 titanium alloy after shot peening

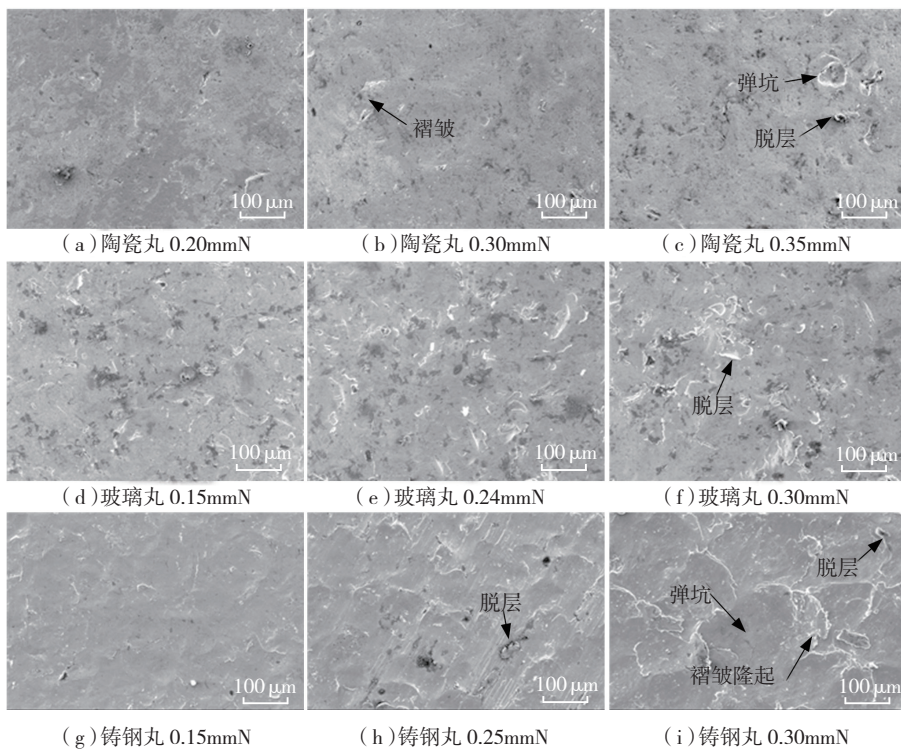


图4 喷丸强化后TC17钛合金表面形貌

Fig.4 Surface topography of TC17 titanium alloy after shot peening

层深度均有所增加;铸钢丸 0.25mmN 喷丸强化后,最大残余应力达到 -807MPa,残余应力层深度达到 140 $\mu\text{m}$ 。最大残余压应力、最大残余压应力所处深度、残余压应力层深度依玻璃丸 $\rightarrow$ 陶瓷丸 $\rightarrow$ 铸钢丸的顺序增大。

2.1.3 显微硬度场

图 6 为喷丸强化对 TC17 钛合金显微硬度场的影响。喷丸强化均使表面显微硬度增大,随着深度的增大,显微硬度逐渐降低,最后趋于基体显微硬度值 320~330 $\text{HK}_{0.049}$ ,硬化层深度在 70~90 $\mu\text{m}$ 。喷丸强化后钛合金表面显微硬度的提高是塑性变形层内晶粒细化和高密度位错共同作用的结果<sup>[10]</sup>。随着喷丸强度的增大,晶粒细化和位错密度增加程度增大,进而导致表面硬化程度增大。喷丸强度为 0.30mmN 时,陶瓷丸、玻璃丸和铸钢丸喷丸后试样表面硬化程度分别为 7.96%、6.77% 和 17.08%。

2.1.4 微观组织

图 7 为喷丸强化对 TC17 钛合金微观组织的影响。TC17 钛合金基体为  $\alpha + \beta$  型组织,呈网篮结构特征。喷

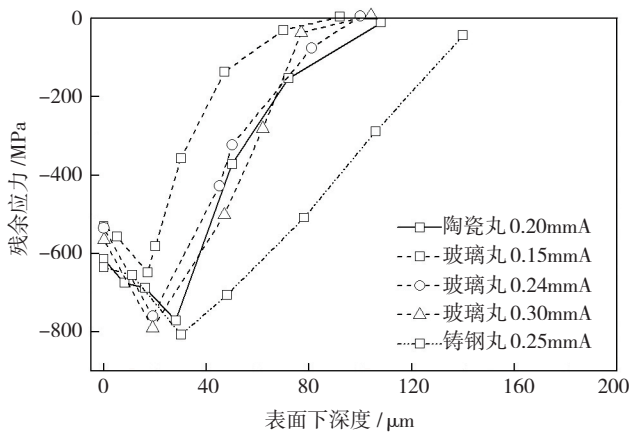


图5 喷丸强化对残余应力场的影响

Fig.5 Effect of shot peening parameters on residual stress

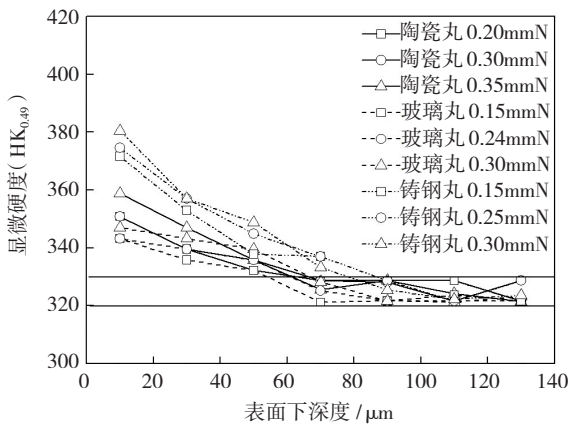


图6 喷丸强化对显微硬度场的影响

Fig.6 Effect of shot peening parameters on microhardness

丸强化后,表面呈现不同程度的凹凸不平。表层晶粒发生了压缩变形,且晶界模糊不清,距表层越远晶粒变形越小<sup>[20]</sup>。微观组织主要由变形区和过渡区两部分组成,随着喷丸强度的增大,表层塑性变形程度和深度均增大。0.30mmN 喷丸强度下,陶瓷丸、玻璃丸和铸钢丸喷丸强化后塑性变形层深度分别为 20 $\mu\text{m}$ 、40 $\mu\text{m}$  和 70 $\mu\text{m}$ 。

2.2 喷丸强化对TC17钛合金疲劳寿命的影响

图 8 为 TC17 钛合金疲劳试样未喷丸及喷丸强化后的中值疲劳寿命。未喷丸强化试样的疲劳寿命为  $3.37 \times 10^4$ 。玻璃丸 0.24mmN 喷丸强化试样的中值疲劳寿命最高,是未喷丸强化试样的 123 倍;铸钢丸 0.25mmN 喷丸强化试样的中值疲劳寿命是未喷丸强化试样的 35 倍;陶瓷丸喷丸强化效果介于玻璃丸和铸钢丸之间。铸钢丸喷丸强化后表面粗糙度较大,易产生应

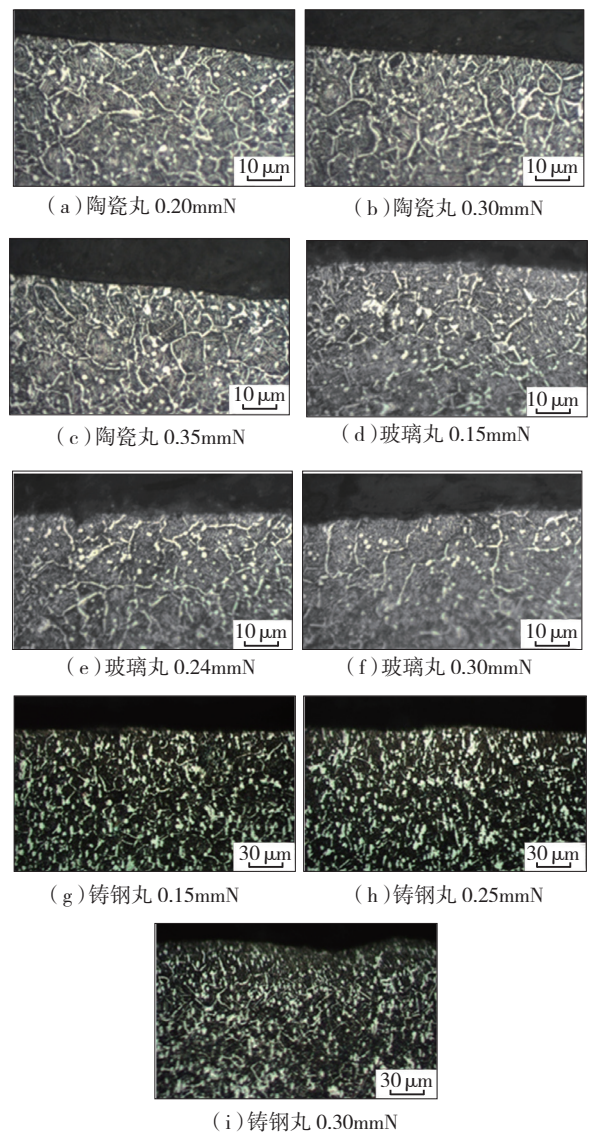


图7 喷丸强化后TC17钛合金微观组织

Fig.7 Microstructure of TC17 after shot peening

力集中,甚至会造成表面损伤,形成表面裂纹,因此疲劳寿命的提升幅度较低。

### 2.3 分析与讨论

图8表明,TC17钛合金经不同弹丸和喷丸强度处理后疲劳寿命得到不同程度的提高。喷丸强化对疲劳寿命的影响主要有两个方面:一是组织结构强化,二是应力强化<sup>[15]</sup>。由图7可知,喷丸强化后TC17钛合金表层产生晶格畸变、晶粒细化,这有利于延缓疲劳裂纹的萌生<sup>[21]</sup>,同时在表层引入大量的位错、层错和剪切带,有利于阻碍疲劳裂纹的扩展<sup>[16]</sup>。图5表明,喷丸强化在TC17钛合金表层引入数值较大,且呈梯度分布的残余压应力场,当构件受到外部交变载荷作用时,残余压应力能够抵消一部分载荷,同时可提高局部疲劳强度<sup>[22]</sup>。然而,铸钢丸喷丸强化虽然在表层引入大的残余压应力,但其疲劳寿命提高幅度较小,这是由于铸钢丸喷丸强化后表面粗糙度最大,易引起表面应力集中,削弱了喷丸强化效果。

由以上试验结果和分析讨论可知,疲劳寿命是由残余压应力场、显微硬度场、微观组织和表面粗糙度等因素共同影响的,需综合分析表面完整性的各个特征参量才能得到合理有效的喷丸强化效果。

## 3 结论

(1) TC17钛合金经陶瓷丸、玻璃丸、铸钢丸喷丸强化后,表面粗糙度 $R_a$ 为0.5~1.0 $\mu\text{m}$ ;在表层引入了深度为100 $\mu\text{m}$ 左右的残余压应力场,最大残余压应力位于表面下30 $\mu\text{m}$ 左右,数值为-800MPa左右;表面出现加工硬化现象;表层晶粒发生变形、细化,晶界模糊不清。

(2) 喷丸强化能够提高TC17钛合金旋转弯曲疲劳寿命。在本试验中,玻璃丸0.24mmN喷丸强度、150%覆盖率条件下疲劳寿命提升幅度最大,是未喷丸试样的123倍。

(3) 喷丸强化对TC17钛合金疲劳寿命的影响是由强化因素(残余压应力场、组织细化和硬度提高)和弱

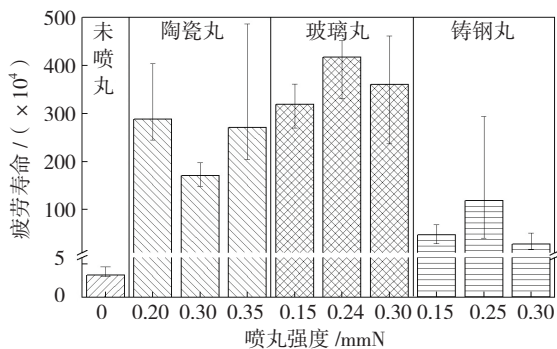


图8 喷丸强化对疲劳寿命的影响

Fig.8 Effect of shot peening parameters on fatigue life

化因素(表面粗糙度增大、表面损伤)共同作用的结果,应综合考虑表面完整性各个特征参量,选取合适的参数,才能达到最优的喷丸强化效果。

## 参考文献

- [1] 王宝林. 钛合金 TC17 力学性能及其切削加工特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.  
WANG Baolin. Study on the mechanical properties of titanium alloy TC17 and characteristics in machining [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [2] 赵振业. 高强度合金抗疲劳应用技术研究与发展 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(3): 90-94.  
ZHAO Zhenye. Investigation and development status of the application technology to improve fatigue behavior of high strength alloys [J]. Engineering Science, 2005, 7(3): 90-94.
- [3] JAWAHIR I S, BRINKSMIEIER E, SAOUBI R M, et al. Surface integrity in material removal processes: recent advances [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2011, 60(2): 603-626.
- [4] 王梅, 陆山, 古远兴, 等. 喷丸强化对 TC11 合金模拟叶片高周疲劳寿命影响的试验 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 507-512.  
WANG Mei, LU Shan, GU Yuanxing, et al. Experiment of effect of shot peening strengthening on TC11 alloy simulation blade's HCF life [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 507-512.
- [5] ALTENBERGER I, NALLA R K, SANO Y, et al. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550°C [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 292-302.
- [6] DEKHTYAR A I, MORDYUK B N, SAVVAKIN D G, et al. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 641: 348-359.
- [7] ZHANG X H, LIU D X. Effect of shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(5): 889-893.
- [8] 高玉魁. 不同表面改性强化处理对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(8): 915-922.  
GAO Yukui. Influence of different surface modification treatments on surface integrity and fatigue performance of TC4 titanium alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(8): 915-922.
- [9] 高玉魁. 喷丸强化对 TC21 高强度钛合金疲劳性能的影响 [J]. 金属热处理, 2010, 35(8): 30-32.  
GAO Yukui. Influence of shot peening on fatigue property of TC21 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(8): 30-32.
- [10] 夏明莉, 刘道新, 杜东兴, 等. 喷丸强化对 TC4 钛合金表面完整性及疲劳性能的影响 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(8): 1349-1353.  
XIA Mingli, LIU Daoxin, DU Dongxing, et al. Effects of shot peening on surface integrity and fatigue properties of TC4 titanium alloy [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(8): 1349-1353.
- [11] 李世平, 刘道新, 李瑞鸿, 等. 喷丸强化与表面完整性对 TC21 钛合金疲劳性能的影响 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(12): 1921-1926.  
LI Shiping, LIU Daoxin, LI Ruihong, et al. Influence of shot peening

and surface integrity on fatigue properties of TC21 titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(12): 1921-1926.

[12] 温爱玲, 闫秀侠, 任瑞铭, 等. 高能喷丸时间对 TC4 疲劳性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(14): 127-129.

WEN Ailing, YAN Xiuxia, REN Ruiming, et al. Effect of high-energy shot peening time on fatigue performance of TC4 alloy[J]. Material and Heat Treatment, 2009, 38(14): 127-129.

[13] 王欣, 蔡建明, 王强, 等. 喷丸表面覆盖率对 Ti60 高温钛合金疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 58-63.

WANG Xin, CAI Jianming, WANG Qiang, et al. Effect of shot peening surface coverage on the fatigue property in Ti60 high-temperature titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5): 58-63.

[14] 李鹏, 刘道新, 关艳英, 等. 喷丸强化对新型 7055-T7751 铝合金疲劳性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 86-89.

LI Peng, LIU Daoxin, GUAN Yanying, et al. Effects of shot peening on fatigue property of new aluminum alloy 7055-T7751[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 86-89.

[15] 陈国清, 田唐永, 张新华, 等. Ti6Al4V 钛合金陶瓷湿喷丸表面强化微观组织与疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 122-127.

CHEN Guoqing, TIAN Tangyong, ZHANG Xinhua, et al. Microstructure and fatigue properties of Ti6Al4V titanium alloy treated by wet shot peening of ceramic beads[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(1): 122-127.

[16] TSUJI N, TANAKA S, TAKASUGI T. Effect of combined plasma-carburizing and shot-peening on fatigue and wear properties of Ti-6Al-4V[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(10/11): 1400-1405.

[17] TAN L, YAO C F, ZHANG D H, et al. Empirical modeling of compressive residual stress profile in shot peening TC17 alloy using characteristic parameters and sinusoidal decay function[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016. DOI:10.1177/10954405416657585.

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

GAO Yukui. Effect of shot-peening on microstructure of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536-1539.

[19] 宋颖刚, 高玉魁, 陆峰, 等. TC21 钛合金喷丸强化层微观组织结构及性能变化[J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 40-44.

SONG Yinggang, GAO Yukui, LU Feng, et al. Evolution of microstructure and properties of surface layer after shot peening of TC21 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(2): 40-44.

[20] LIU Y G, LI H M, LI M Q. Characterization of surface layer in TC17 alloy treated by air blast shot peening[J]. Materials and Design, 2015, 65: 120-126.

[21] XIE L C, JIANG C H, LU W J, et al. Investigation on the residual stress and microstructure of (TiB+ TiC)/Ti-6Al-4V composite after shot peening[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(9): 3423-3427.

[22] 谭靛, 姚倡锋, 张定华. 7055 铝合金高速加工表面完整性对疲劳寿命的影响[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 872-876.

TAN Liang, YAO Changfeng, ZHANG Dinghua. Influence of the surface integrity on the fatigue life for high-speed milling of 7055 aluminum alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6): 872-876.

通讯作者: 张少平, 高级工程师, 研究方向为压气机结构设计, E-mail: 418923163@qq.com. (责编 逸飞)

(上接第88页)

YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 49-52.

[2] MI Y Y, YAN Q Z, LI X H, et al. Effects of temperature induced thermal expansion and oxidation on the Charpy impact property of C/C composites[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2015, 30(3): 473-477.

[3] 王永贵, 梁宪珠, 曹正华, 等. 热压罐工艺成型先进复合材料构件的温度场研究综述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3): 81-85.

WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua, et al. Review of the temperature field research of autoclave moulding for advanced composite components[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(3): 81-85.

[4] 张铖. 大型复合材料结构热压罐工艺温度场权衡设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

ZHANG Cheng. Curing temperature field tradeoff design method of largescale composite material structure in autoclave process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

[5] 张铖, 梁宪珠, 王永贵, 等. 热压罐工艺环境对于先进复合材料框架式成型模具温度场的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(4): 547-553.

ZHANG Cheng, LIANG Xianzhu, WANG Yonggui, et al. Rules of impact of autoclave environment on frame mould temperature field of advanced composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2011, 29(4): 547-553.

[6] XIE G N, LIU J, ZANG W H, et al. Simulation and improvement of temperature distributions of a framed mould during the autoclave composite curing process[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 22(1): 43-61.

[7] 林家冠, 杨睿, 王廷霞, 等. 大型复合材料构件热压罐成型温度分析与均匀性改善研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(5): 61-65.

LIN Jiaguan, YANG Rui, WANG Tingxia, et al. Large-scale composite curing temperature analysis and improvement in autoclave process[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(5): 61-65.

[8] 傅承阳, 李迎光, 李楠垭, 等. 飞机复合材料制件热压罐成型温度场均匀性优化方法[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(2): 273-276.

FU Chengyang, LI Yingguang, LI Nanya, et al. Temperature uniformity optimizing method of the aircraft composite parts in autoclave in autoclave processing[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2013, 31(2): 273-276.

[9] KAYS W M, WHITELOW J H. Convective heat and mass transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

通讯作者: 安鲁陵, 博士、教授, 研究方向为数字化设计制造技术、虚拟制造技术、飞机装配技术, E-mail: anllme@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)