

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180629002

热处理对超声喷丸 TC4 疲劳性能的影响

张聪惠, 任海涛, 荣花, 刘颖

(西安建筑科技大学 冶金工程学院, 西安 710055)

摘要: 对 TC4 进行超声喷丸 (USSP) 处理得到表面梯度结构, 并于 350 °C 分别进行 60、120、180 和 240 min 热处理。采用光学显微镜 (OM) 表征其微观组织, X 射线衍射仪 (XRD) 测得残余应力场分布; 通过扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM) 分别对其疲劳断口形貌、裂纹源组织进行表征。结果表明, 超声喷丸处理引入的残余应力场, 随热处理时间的延长, 残余应力特征参数值 (σ_{SRS} 、 σ_{MRS} 、 Z_m 和 Z_0) 逐渐降低。原始试样疲劳裂纹从表层萌生, 超声喷丸试样疲劳裂纹以单一裂纹源形式从次表层萌生, 超声喷丸+热处理试样以多源裂纹形式从次表层萌生。

关键词: 超声喷丸; 疲劳极限; 残余应力; 断口组织形貌

中图分类号: TG668

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0022-06

Effects of Heat Treatment on Fatigue Property of Ultrasonic Shot Peening TC4

ZHANG Conghui, REN Haitao, RONG Hua, LIU Ying

(College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Ultrasonic shot peening (USSP) was applied to the TC4 to achieve surface gradient structure. The heat treatment of TC4 was performed at 350 °C for 60, 120, 180, and 240 min. The microstructure was characterized by optical microscopy (OM), and the distribution of residual stress field was measured by X-ray diffractometer (XRD). The fatigue fracture morphology and microstructure of the crack source were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). Results show that the residual stress field introduces by ultrasonic shot peening treatment decreases gradually with the increase of heat treatment time, and the residual stress characteristic parameters (σ_{SRS} , σ_{MRS} , Z_m and Z_0) gradually decrease. The fatigue cracks of the original samples are initiated from the surface layer, and the fatigue cracks of the ultrasonic shot peening specimens are initiated from the subsurface layer in form of a single crack source. The ultrasonic shot peening combining with heat treated specimens are initiated from the subsurface layer in form of multi-source cracks.

Keywords: ultrasonic shot peening; fatigue limit; residual stress; fracture morphology

0 引言

钛合金自 20 世纪 50 年代以来广泛应用于各个领域, 其中钛合金的代表是 TC4, 因其比强度高, 耐高温、抗腐蚀性能好, 成为钛合金工业中的王牌合金。TC4 用于制造飞机压气机和涡轮叶片, 但是有 80% 的航空事故与钛合金的疲劳失效

相关, 这引起学者们对钛合金疲劳性能的重点关注。超声喷丸 (Ultrasonic shot peening, USSP) 是冷作表面强化的有效手段, 实质是弹丸以极高的速度从不同方向撞击金属表面^[1], 一方面引入由表及里的残余应力; 另一方面使表层晶粒发生剧烈塑性变形, 获得梯度纳米结构^[2]。张少平^[3]研究了喷

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-11-06

网络出版日期: 2018-11-30 11:10; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181130.1109.018.html>

通信作者: 张聪惠 (1974—), 女 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属表面强化; E-mail: jiandazhang2010@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51274160); 西安市科技计划项目 (CXY1438(3))

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51274160) and Science and Technology Project of Xi'an (CXY1438(3))

引用格式: 张聪惠, 任海涛, 荣花, 等. 热处理对超声喷丸 TC4 疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 22-27.

ZHANG C H, REN H T, RONG H, et al. Effects of heat treatment on fatigue property of ultrasonic shot peening TC4[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 22-27.

丸强化对 TC17 疲劳寿命的影响, 疲劳寿命提高的原因是较深的残余应力层、较高的表面硬化和表层晶粒的细化。高玉魁^[4]测得 TC18 喷丸引入残余压应力场的分布规律, 提出最大残余压应力值是材料的本征参数, 认为当温度低于再结晶温度或交变应力低于疲劳极限时, 残余应力释放缓慢。Christopher J. Lammi^[5]研究了残余应力在材料性能中的作用, 发现裂纹的闭合以及材料的塑性都与残余应力密切相关。Jong-Cheon Kim^[6]研究了中碳钢喷丸件在高周、低周疲劳过程中残余应力的释放行为, 发现残余压应力的释放和外加应变相关, 最大残余压应力值对中碳钢的疲劳极限有显著影响。Jinxiang Liu 等^[7]预测了钢喷丸后的疲劳寿命, 分析了残余应力场的分布, 认为在疲劳循环至断裂失效的过程中残余压应力会不断释放。在航空航天领域, 要求 TC4 合金在高温下具有优良的疲劳性能, 马崇^[8]研究了去应力热处理对焊接接头疲劳性能的影响, 得到疲劳极限随应力比 R 的增加, 接头能承受的应力幅降低。张晓化等^[9]研究了热处理对 TC4 疲劳性能影响, 分析了热处理对残余应力释放的影响, 并发现残余应力主要通过抑制裂纹扩展路径起作用。作者前期研究了热处理温度对表面梯度结构 Zr^[10]、Ti^[11]的影响, 提出相应表面梯度结构组织热稳定温度范围。为分析温度对残余应力稳定性的影响以及残余应力释放后材料的疲劳性能, 本研究通过超声喷丸处理 TC4 合金, 在 350 ℃ 条件进行不同时间的热处理, 保留表层梯度纳米结构的基础上, 通过四点弯曲疲劳实验, 对比研究了热处理对疲劳性能的影响。

1 材料及方法

材料选用热轧态 TC4 板材, 线切割成 25 mm×7.1 mm×3.3 mm 矩形块, 其化学成分和基本力学性能见表 1 和表 2。试验采用铸钢丸单面喷丸, 弹丸直径 3 mm, 密度 7.8 g/cm³。USSP 喷嘴出口压力 0.4 MPa, 喷丸时间 30 min。热处理在 CWF11 型马弗炉内进行, 加热至 350 ℃, 分别保温 60、120、180 和 240 min, 并随炉冷却至室温。采用 Instron8801 电液伺服疲劳机进行不同载荷下的四点弯曲疲劳实验, 每个测试点选取 3 个平行试样, 应力比 $R=0.1$, 得到疲劳极限与循环周次之间的关系, 对疲劳试样断口形貌采用 JSM-

6460 扫描电镜观测, 通过 JEM-200CX 透射电子显微镜观测疲劳裂纹源位置的微观组织。

表 1 TC4 的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 (w/%)				
Element	Al	Fe	N	H
Content	5.5–6.8	≤0.30	≤0.05	≤0.015
Element	V	C	O	Ti
Content	3.5–4.5	≤0.10	≤0.20	Bal.

表 2 TC4 的基本力学性能

Table 2 Basic mechanical properties of TC4	
Parameter	Value
σ_b / MPa	900
$\sigma_{0.2}$ / MPa	830
δ	20%
ψ	25%
KIC/(Pa·m ^{1/2})	50

2 热处理试样组织表征

试样经 USSP 处理 30 min, 金相组织如图 1 所示, 在表层形成大约 50 μm 的强化层, 白色 α 相和黑色 β 相互相交错, β 相均匀分布在晶界上。

将经 USSP 处理 30 min 并 350 ℃ 保温不同时间的试样表层进行 X 射线衍射分析, 计算结果如图 2 所示。晶粒尺寸可以通过 XRD 衍射峰宽化来计算, 取 (10 $\bar{1}$ 1) 晶面衍射峰来计算表层晶粒尺寸。一般衍射峰宽化是由细化晶粒、晶格畸变及仪器宽化引起, 采用标准 Si 试样测得仪器对衍射峰所造成的宽化影响, 并在图像处理中对仪器宽化进行了扣除。因此, 对于衍射峰宽度的变化可分解为晶粒细化造成的宽化 $\beta_1(2\theta)$ 与晶格畸变形

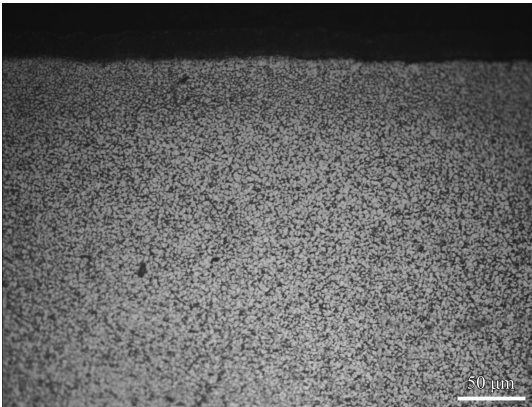


图 1 USSP-30 min 后 TC4 横截面组织

Fig.1 Cross-sectional structure of USSP-30 min TC4

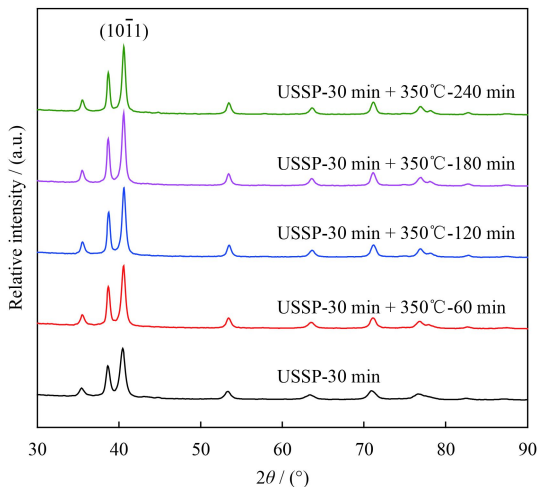


图2 TC4不同热处理时间后的XRD衍射图谱

Fig.2 XRD patterns of TC4 after different heat treatment time

成的造化 $\beta_2(2\theta)$ ，采用细晶效应引起的宽化计算晶粒尺寸。根据谢乐-威尔逊方程，两种宽化可以表示为：

$$\beta_1(2\theta) = \frac{K\lambda}{d \cos \theta} \quad (1)$$

$$\beta_2(2\theta) = 4\varepsilon \tan \theta \quad (2)$$

式中 λ 为 X 射线波长，选取 Cu 靶材； $K\alpha$ 辐射波长 $\lambda = 0.154056 \text{ nm}$ ； K 为系数，一般取 0.87~1，文中取 0.89； d 为晶粒尺寸， θ 是半衍射角， ε 表示晶格畸变， β 表示积分宽度， β 由 $\sqrt{B^2 - b^2}$ 计算得出，其中， B 为衍射峰半高宽， b 为仪器宽化程度，取 0.05。由式 (1) 可知，用晶粒细化造成的宽化计算得到 USSP-30 min 试样表层晶粒尺寸为 35.9 nm，热处理 60 min 表层晶粒尺寸为 40 nm 左右，热处理 120、180 和 240 min 试样，随着热处理时间的延长，表层晶粒尺寸长大不明显，仍然保持在纳米级，这对材料的综合性能十分有益。

3 四点弯曲疲劳实验结果分析

针对不同处理条件的试样，分别得到其 S-N 曲线，对比分析了原始试样、USSP 试样、USSP+350 °C 60 min 试样的裂纹萌生层组织变化。通过电解抛光剥层，测得不同处理条件下的残余应力场分布，对比分析不同应力场和疲劳极限的关系。

3.1 S-N 疲劳曲线分析

如图 3 所示，原始试样经超声喷丸 30 min 强

化，疲劳极限得到提高，从 376 MPa 提高到 416 MPa，疲劳极限提高 10.6%。试样热处理时间越长，疲劳极限下降越明显，热处理 60 min，疲劳极限下降到 395.6 MPa；经 120、180 和 240 min 热处理，疲劳极限分别是 344、301 和 283.8 MPa。但是由图可得，经热处理 60 min 试样疲劳极限高于原始试样，说明短时间热处理对其疲劳极限影响不大。

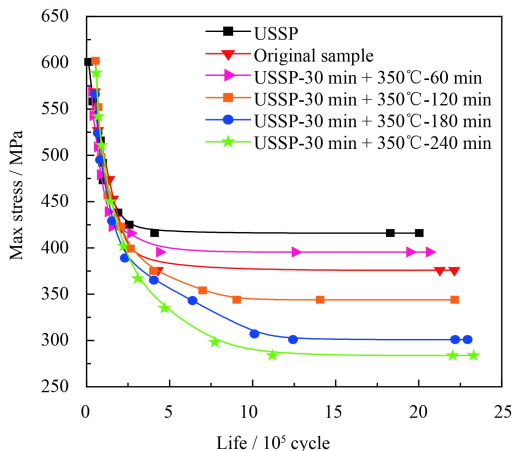


图3 不同条件试样的S-N曲线

Fig.3 S-N curves under different conditions

3.2 组织变化分析

图 4 对比分析了裂纹源处，不同处理条件试样透射组织，图 4(a) 是 TC4 基体组织，在一个晶粒内清晰可见单根自由位错，原始位错形态为细丝状。图 4(b) 为 USSP-30 min TC4 透射组织，相比原始基体，由于弹丸以一定的能量冲击到试样表面，由表及里发生了不同程度的塑性变形，当变形能产生的分切应力大于晶体滑移系的临界分切应力时，晶体内部发生滑移，进而发生位错的相互缠结^[12]。由于距离表层较远，变形程度低，滑移系的开动引起了位错在晶粒内部的运动，但不足以使位错运动穿越晶界，所以位错在应变过程中不断增值并积塞于晶界处。图 4(c) 为经过热处理 60 min 的试样，可见晶粒内位错密度降低，温度升高为位错运动提供能量，减少了位错的积塞^[13]。热处理时间不同的试样，变形层中积塞的位错得到不同程度释放，对比四点弯曲的结果可知，USSP-30 min 试样疲劳极限最高，因为积塞的大量位错，发生塑性变形需要更大的力^[14]，晶粒之间相互制约，使得变形更加困难，实现了材

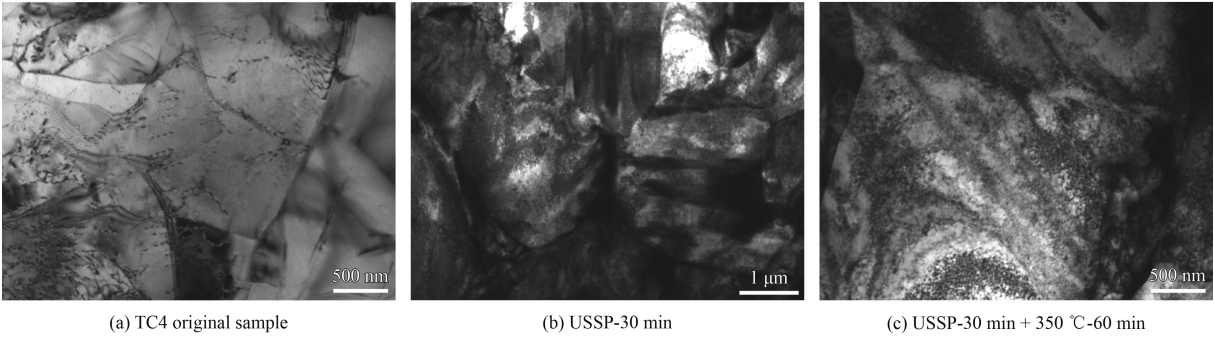


图 4 四点弯曲疲劳试样裂纹源处 TEM 组织

Fig.4 TEM structure at the crack source of four point bending fatigue specimens

料的强化^[15]。热处理 60 min 裂纹源处组织和 USSP 强化试样相比, 晶粒内积塞的位错明显减少, 强化效果减弱, 疲劳极限降低, 但晶内位错密度明显高于原始试样, 因此疲劳极限仍高于原始试样。

3.3 残余应力变化分析

TC4 经 USSP 处理 30 min, 表层发生塑性变形, 引入残余压应力, 于 350 °C 热处理不同时间, 得到不同表层应力梯度试样, 其残余应力距表层深度分布如图 5 所示, 不同热处理时间试样的残余应力特征参数如表 3 所示。结果表明, 试样经不同时间热处理仍保持较大的残余压应力值, 且表现出相同的变化趋势: 随着距表层深度的增加, 残余压应力先增大后减小, 最后趋于零。

由图 5 可见最大残余压应力均出现在次表层。在超声喷丸过程中, 弹丸首先使表层晶粒发生变形, 当喷丸时间持续增加时, 表层细晶区以下的组织发生畸变, 但其变形受到了表层组织和

表 3 不同热处理时间 TC4 残余应力的特征参数

Table 3 Characteristic parameters of TC4 residual stress in different heat treatment time

Treatment process	$\sigma_{\text{srs}} / \text{MPa}$	$\sigma_{\text{mrs}} / \text{MPa}$	$Z_{\text{m}} / \mu\text{m}$	$Z_0 / \mu\text{m}$
USSP	-516.1	-702.5	61	>201
USSP+350 °C-60 min	-317.8	-623.1	39	>186
USSP+350 °C-120 min	-237	-478.4	62	>189
USSP+350 °C-180 min	-172.5	-430.2	51	180
USSP+350 °C-240 min	-150.2	-294.9	24	170

基体的双重束缚, 变形难以得到释放, 即积累的残余压应力值最大。热处理时间越长, 残余压应力的特征参数值减小越明显, 表面残余压应力 σ_{srs} 、最大残余压应力 σ_{mrs} 、最大残余压应力距表面的距离 Z_{m} 和残余压应力场深度 Z_0 均减小。USSP-30 min 处理 TC4 表层残余应力为-516.1 MPa, 经过 240 min 热处理降至-150.2 MPa, 释放 71%。此外, 最大残余应力也从-702.5 MPa 降至-294.9 MPa, 释放 58%, 残余压应力场降低至 170~180 μm 。

4 疲劳断口分析

如图 6(a) 所示, 原始试样裂纹在表层萌生, 因为试样在四点弯曲疲劳实验过程中, 应力比 R 等于 0.1, 即始终受到拉应力, 在表层受到的拉应力最大, 因此原始试样首先从表层起裂。当试样经 USSP 强化 30min, 表层组织发生塑性变形, 得到一定厚度的强化层, 裂纹源转移至次表层, 如图 6(b), 以单一裂纹源方式萌生裂纹, 在扩展过程中不断分叉, 形成“人字形”扩展面^[16]。

超声喷丸试样裂纹源从次表层萌生, 一方面是由于残余压应力对外载荷的抵消, 并带来裂纹闭合效应, 而这种残余应力是经过一定周次循环

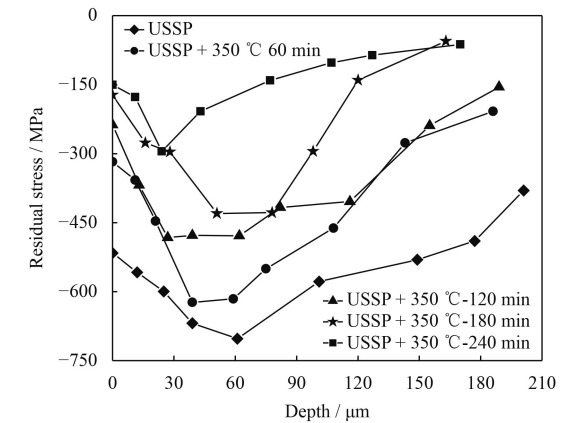


图 5 不同热处理时间 TC4 残余应力距表层深度变化曲线

Fig.5 Variation curves of residual TC4 stress at different heat treatment time along surface depth

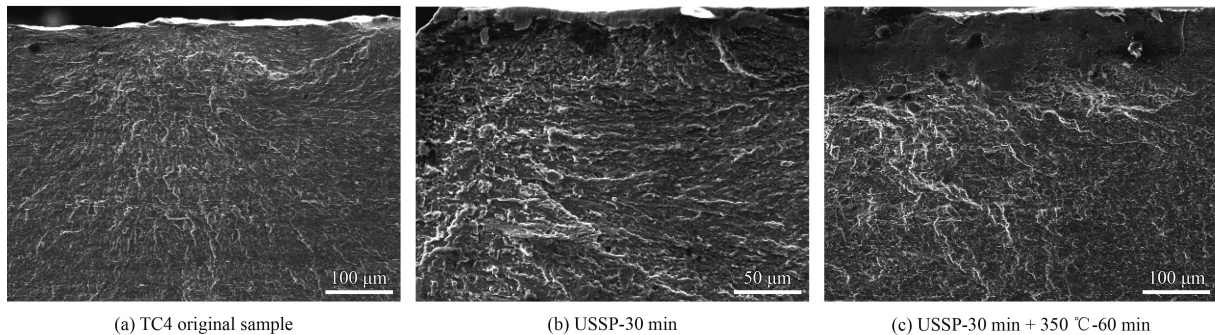


图6 四点弯曲疲劳试样的断口 SEM

Fig.6 SEM fracture images of four point bending fatigue specimens

加载后稳定存在的残余应力^[17]；另一方面是组织的强化，表层细化的晶粒和较高的位错密度，都有助于阻碍裂纹源在表层萌生。超声喷丸试样于 350 °C 热处理 60 min，裂纹源仍然萌生在次表层，但是起裂方式转变为多源裂纹起裂，裂纹源处于距表层 100 μm 左右，如图 6(c) 所注，有两个主要裂纹源，分别有多条细小裂纹向右下角扩展开，次生裂纹伴生在细小裂纹两侧^[18]。热处理后，残余应力得到了比较明显释放，而微观组织基本保持喷丸后的特征，但不可避免会发生回复现象。回复将会导致位错密度降低，如图 4(b)(c)，由于回复引起位错密度降低，热处理后试样在疲劳时，残余应力的释放将会较为显著^[19]，使最终的稳定的残余压应力较低，在这部分稳定的残余应力和热处理后仍保留的位错共同作用下，材料裂纹源萌生于次表面。

5 结 论

(1) 350 °C 热处理不同时间后，试样仍保有部分残余压应力，随热处理时间延长，残余压应力的特征参数值明显减小，且表层晶粒仍保持在纳米级。

(2) USSP-30 min 试样经过热处理后，裂纹源处组织中积塞的位错得到释放，热处理时间超过 60 min，疲劳极限显著降低。

(3) USSP-30 min 试样疲劳失效形式以单一裂纹源萌生形式生裂纹，USSP-30 min+350 °C-60 min 试样裂纹起裂方式转变为多源萌生，且都从次表层萌生，而原始试样裂纹从表层萌生。

参考文献

[1] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程,

2014, 27(5): 1-13.

HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

[2] 卢柯. 梯度纳米结构材料[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 1-10.

LU K. Gradient nano structure materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 1-10 (in Chinese).

[3] 张少平, 谈军, 谭靛, 等. 喷丸强化对 TC17 钛合金表面完整性及疲劳寿命的影响[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 89-94.

ZHANG S P, TAN J, TAN L, et al. Effect of shot peening on surface integrity and fatigue life of TC17 alloy[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 89-94 (in Chinese).

[4] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1209-1212.

GAO Y K. Residual compressive stress field in TC18 ultra-high strength titanium alloy by shot peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(11): 1209-1212 (in Chinese).

[5] CHRISTOPHER J, LAMMI, DIANA A LADOS, et al. Effects of processing residual stresses on fatigue crack growth behavior of structural materials: experimental approaches and microstructural mechanisms[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2012, 43(1): 87-107.

[6] KIM JONG-CHEON, CHEONG SEONG-KYUN, NOGUCHI HIROSHI. Residual stress relaxation and low- and high-cycle fatigue behavior of shot-peened medium-carbon steel[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 56: 114-122.

[7] LIU J X, PAN Mi. Fatigue life prediction of shot-peened steel[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 43: 134-141.

[8] 马崇. 消应热处理对焊接接头疲劳性能的影响[J]. 河北电力技术, 2004, 23(5): 11-14.

MA C. Stress eliminating heat treatment of welding joints and its effect on their fatigue performance[J]. Journal of Hebei Electric Power Technology, 2004, 23(5): 11-14 (in Chinese).

- [9] 张晓化, 刘道新, 高广睿. 喷丸强化因素对 Ti811 合金高温微动疲劳抗力的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(12): 1985-1989.
- ZHANG X H, LIU D X, GAO G R. The effect of shot peening factors on fretting fatigue resistance of Ti811 titanium alloy at elevated temperature[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(12): 1985-1989 (in Chinese).
- [10] 张聪惠, 朱珊珊, 王耀勉, 等. 退火对表面机械研磨处理工业纯锆显微组织和残余应力的影响[J]. *金属热处理*, 2017, 42(2): 155-158.
- ZHANG C H, ZHU S S, WANG Y M, et al. Effect of annealing on microstructure and residual stress of commercially pure zirconium with surface mechanical attrition treatment[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(2): 155-158 (in Chinese).
- [11] 何晓梅, 张聪惠, 杨占林, 等. 退火对表面机械研磨处理纳米化工业纯钛性能的影响[J]. *金属热处理*, 2013, 38(4): 69-73.
- HE X M, ZHANG C H, YANG Z L, et al. Effect of annealing on property of CP-Ti nanocrystallized by surface mechanical attrition treatment[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2013, 38(4): 69-73 (in Chinese).
- [12] 崔高健, 刘明显, 杨安, 等. 基于位错理论的超声波消除焊接残余应力的研究[J]. *工程材料应用*, 2003, 40(3): 49-51.
- CUI G J, LIU M X, YANG A, et al. Mechanism research of ultrasonic eliminate aluminum alloy welding residual stress based on dislocation theory[J]. *Application of Engineering Materials*, 2003, 40(3): 49-51 (in Chinese).
- [13] 张翥, 王群骄, 莫畏. 钛的金属学热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 206-212.
- ZHANG Z, WANG Q J, MO W. *Metallic heat treatment of titanium*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 206-212 (in Chinese).
- [14] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 137-149.
- SONG W X. *Physical metallurgy*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 137-149 (in Chinese).
- [15] DEMULSANT X, MENDEZ J. Influence of environment on low cycle fatigue damage in Ti6Al4V and Ti6246 titanium alloys[J]. *Material Science and Engineering A*, 1996, 219(1/2): 202-211.
- [16] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业出版社, 1998: 77-92.
- CUI Y X, WANG C L. *Metal fracture analysis*[M]. Harbin: Harbin Industrial Press, 1998: 77-92 (in Chinese).
- [17] 张聪惠, 宋薇, 朱珊珊, 等. 循环载荷下表面强化工业纯锆残余应力释放研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(10): 2513-2518.
- ZHANG C H, SONG W, ZHU S S, et al. Residual stress relaxation of surface strengthened commercial pure zirconium under cycle load[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(10): 2513-2518 (in Chinese).
- [18] 胡春燕, 高新灵, 陶春虎. DD6 单晶高温合金低周疲劳断裂特征的研究[J]. *失效分析与防护*, 2014, 9(4): 224-237.
- HU C Y, GAO X L, TAO C H. Low-cycle fatigue fracture features of single crystal superalloy dd6[J]. *Failure Analysis and Protection*, 2014, 9(4): 224-237 (in Chinese).
- [19] ANDREZ J KUBIT, MAGDALENA BUCIOR, WLADYSLAW ZIELECKI, et al. The impact of heat treatment and shot peening on the fatigue strength of 51CrV4 steel[J]. *International Journal of Procedia Structural Integrity*, 2016(2): 3330-3336.