

文章编号:1000-8055(2012)02-0307-05

# TC17 钛合金激光喷丸应力场及支持向量机 应力热松弛模型

李启鹏<sup>1</sup>, 李应红<sup>1</sup>, 何卫锋<sup>1</sup>, 汪 诚<sup>1</sup>, 全崇楼<sup>2</sup>(1. 空军工程大学 工程学院 等离子体动力学实验室, 西安 710038;  
2. 西京学院 机械工程系, 西安 710123)

**摘 要:** 对 TC17 钛合金进行了不同功率密度下激光喷丸强化, 使用 X 射线衍射仪测试了激光喷丸冲击波诱导的残余压应力场的分布, 测试了不同温度真空保温下残余压应力的热松弛规律, 最后基于支持向量机理论建立了残余压应力热松弛预测模型, 并用试验结果对模型进行验证. 研究表明: TC17 钛合金在功率密度为  $4\text{ GW/cm}^2$  时表层残余压应力场最佳; 残余压应力在  $280^\circ\text{C}$  和  $450^\circ\text{C}$  真空保温 150 min 后分别有 11.24% 和 27.11% 的松弛; 在  $280^\circ\text{C}$  和  $450^\circ\text{C}$  交替保温 160 min 后应力松弛 33.9%; 残余压应力在试验温度保温 160 min 后有大部分剩余, 可以有效提高 TC17 钛合金抗疲劳性能. 基于支持向量机的预测模型能够较精确的表征 TC17 钛合金的应力松弛规律, 满足工程使用要求. 对其他材料表层残余压应力热松弛分析具有借鉴意义.

**关 键 词:** 激光喷丸; 残余压应力; 支持向量机; 热松弛; TC17 钛合金

**中图分类号:** V216.3; TG665

**文献标志码:** A

## Residual stress of laser peening processed TC17 and stress relax prediction model based on support vector machines theory

LI Qi-peng<sup>1</sup>, LI Ying-hong<sup>1</sup>, HE Wei-feng<sup>1</sup>,  
WANG Cheng<sup>1</sup>, TONG Chong-lou<sup>2</sup>(1. Aero-Plasma Dynamics Laboratory, The Engineering Institute,  
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Mechanical Engineering Department, Xijing College, Xi'an 710123, China)

**Abstract:** TC17 titanium alloy was laser peening (LP) processed by different power densities. X-ray diffraction method was used to measure the residual stress induced by LP. Vacuum thermal retardation at  $280^\circ\text{C}$  and  $450^\circ\text{C}$  for 160 min was used to study the residual stress relaxation regularity. The prediction model was based on support vector machines (SVM) theory and the model was verified by experimental results at last. The results show that  $4\text{ GW/cm}^2$  is the optimal power density to process TC17 titanium alloy. The thermal relaxation is about 11.24%, 27.11% at  $280^\circ\text{C}$  and  $450^\circ\text{C}$  for 150 min respectively. And relaxation enhances to 33.9% after  $280^\circ\text{C}$  and  $450^\circ\text{C}$  alternate vacuum thermal retardation. The relaxation indicates that the majority of residual stress is preserved, and thus improves the fatigue resistance of titanium alloy. The residual stress prediction model can characterize the relaxation regularity accurately. And the model is useful to analyze the residual stress thermal relaxation of other metals.

**收稿日期:** 2011-05-29; **修订日期:** 2011-09-02

**作者简介:** 李启鹏(1982—), 男, 山东德州人, 博士生, 主要从事航空装备损伤修复与表面强化研究.

**Key words:** laser peening; residual stress; support vector machines; thermal relaxation; TC17 titanium alloy

TC17 钛合金具有比强度高、断裂韧度好、淬透性高和锻造温度范围宽等一系列优点,目前主要用于制造发动机风扇、压气机盘件和大截面的锻件<sup>[1]</sup>. 航空发动机内部工作环境恶劣导致 TC17 钛合金部件在服役过程中发生疲劳断裂和损伤,影响飞行安全. 为了提高部件的安全性和可靠性,可对工件表面进行激光喷丸强化处理. 激光喷丸是利用激光诱导的等离子体冲击波作用于金属构件表面,使得金属表层发生强烈的塑性变形,产生一定深度的残余压应力场、加工硬化和组织细化等有利因素,从而提升材料的抗疲劳、耐磨损和抗应力腐蚀性能<sup>[2-8]</sup>.

课题组前期研究发现,激光喷丸产生的残余压应力场的深度比传统表面强化手段的深,且数值较大,可以更加有效地抑制疲劳裂纹萌生和扩展,是提高材料常温疲劳强度的主要方法之一<sup>[9]</sup>. 残余压应力强化的效果取决于应力在实际疲劳过程中的稳定性,在外加交变载荷、静载荷、热机械载荷及高温条件下,残余压应力会发生松弛,这也就意味着提高疲劳性能的有益因素降低<sup>[10]</sup>. 本文主要研究不同功率密度强化后 TC17 钛合金残余压应力分布、残余压应力的热松弛规律,并建立基于支持向量机的残余压应力热松弛预测模型.

1 试验材料及方法

试验用 TC17 钛合金材料由中国航空工业贵阳航空发动机(集团)有限公司提供,化学成分见表 1. 热处理制度双重退火:950~980℃,1~2 h,空冷;530℃,6 h,空冷;相变点为 980~1020℃;其室温拉伸性能为  $\sigma_b=1\,183\text{ MPa}$ ,  $\sigma_{0.2}=1\,144\text{ MPa}$ ,  $\phi=23.3\%$ ,  $\delta_5=12.8\%$ ;室温下的剪切性能为  $\tau_b=980\text{ MPa}$ ,  $\tau_{0.3}=739\text{ MPa}$ ,  $\tau_{0.01}=659\text{ MPa}$ <sup>[1]</sup>.

表 1 TC17 钛合金化学成分 (%)

Table 1 Composition of TC17 titanium alloy (%)

| Al      | Mo      | Cr      | Sn      | Zr        |
|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 4.5~5.5 | 3.5~4.5 | 3.5~4.5 | 1.6~2.4 | 1.6~2.4   |
| Fe      | C       | N       | H       | O         |
| 0.30    | 0.05    | 0.05    | 0.0125  | 0.08~0.13 |

材料经线切割制成 50 mm×50 mm×4 mm 试

样,激光喷丸在 SGR-25 高能 Nd:YAG(钕离子-钇铝石榴石)激光器上完成. SGR-25 型激光器外观及主要参数如图 1 所示. 为防止激光喷丸材料表面发生氧化,残余压应力热松弛试验在真空管式炉中进行,在 280℃ 和 450℃ 恒温或两者交替变温条件下保温 160 min. 利用 Proto-LXRD 型 X 射线衍射仪对试件进行残余压应力测试,采用化学腐蚀减薄试样进行深度方向残余压应力测试.

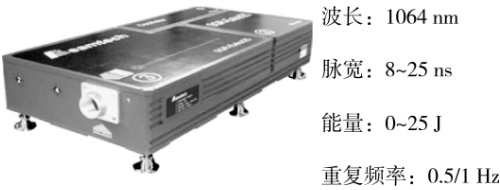


图 1 试验所用 YAG 激光器及其性能参数  
Fig. 1 YAG laser and its performance parameter

2 试验结果分析

2.1 不同功率密度下残余压应力分布

经计算,功率密度超过 1.6 GW/cm<sup>2</sup> 时 TC17 钛合金会发生塑性变形,在表层产生有益的残余压应力<sup>[11]</sup>. 为了研究不同功率密度下的强化效果,试验分别采用 3, 4, 5, 7 GW/cm<sup>2</sup> 4 种功率密度对 TC17 钛合金试件进行处理,图 2 为沿深度方向的残余压应力分布图,由图可知,强化后残余压应力最大值出现在表面,随着深度的增加残余压应力逐渐减小,深度在 200 μm 之前残余压应力变化的斜率较大,深度达到约 500 μm 时强化产生的残余压应力仍在 -100 MPa 左右.

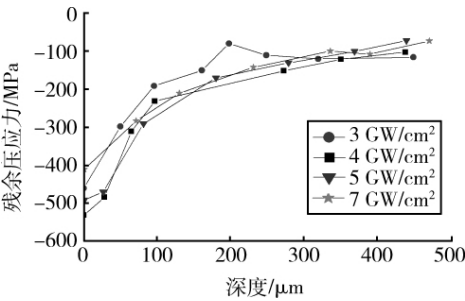


图 2 不同功率密度下残余压应力分布  
Fig. 2 Residual stress under different power densities

表 2 为冲击后表面残余压应力值,当功率密度为 4 GW/cm<sup>2</sup> 时表面残余压应力值最高,

为  $-530.4\text{ MPa}$ .

表 2 表面残余压应力值  
Table 2 Residual stress on TC17 surface

| 功率密/(GW/cm <sup>2</sup> ) | 表面残余压应力/MPa |
|---------------------------|-------------|
| 3                         | -460.2      |
| 4                         | -530.4      |
| 5                         | -492.3      |
| 7                         | -410.8      |

由测试结果可知,不同功率密度强化均在 TC17 钛合金表层产生了高数值、影响层较深的残余压应力场,其中  $4\text{ GW/cm}^2$  时残余压应力场数值最大、影响层最深,更有利于抑制疲劳裂纹的萌生和扩展,提升材料的抗疲劳性能,是 TC17 钛合金激光喷丸的最佳功率密度.

## 2.2 残余压应力热松弛

选取功率密度  $4\text{ GW/cm}^2$  激光喷丸试样,考虑 TC17 钛合金叶片在工程应用中的温度,选取  $280\text{ }^\circ\text{C}$  和  $450\text{ }^\circ\text{C}$  进行真空保温试验,研究温度对残余压应力松弛的影响.图 3 为试样分别在两种温度下保温,残余压应力的释放情况.

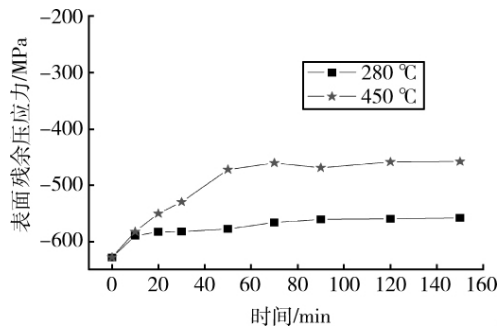


图 3 不同温度下表面残余压应力松弛

Fig. 3 Surface residual stress relaxation under different temperatures

由图 3 可知,  $280\text{ }^\circ\text{C}$  保温  $150\text{ min}$  残余压应力由  $-628.2\text{ MPa}$  下降到  $-557.6\text{ MPa}$ , 下降  $11.24\%$ ;  $450\text{ }^\circ\text{C}$  保温  $150\text{ min}$  残余压应力由  $-628.2\text{ MPa}$  下降到  $-457.9\text{ MPa}$ , 下降  $27.11\%$ ; 残余压应力的热松弛主要发生在前  $60\text{ min}$  左右, 符合文献[10]所述大部分松弛量发生在热暴露的最初  $3\text{ min}$  到  $1\text{ h}$  内;  $280\text{ }^\circ\text{C}$  和  $450\text{ }^\circ\text{C}$  保温  $50\text{ min}$  时, 表面残余压应力松弛量达到  $8.12\%$  和  $24.82\%$ , 此后残余压应力松弛速率逐渐减小; 深度方向测试表明, 越靠近材料表面, 残余压应力越

容易发生热松弛.

TC17 钛合金叶片工作环境不是恒温的, 因此在上述研究基础上, 对试件进行  $280\text{ }^\circ\text{C}$  和  $450\text{ }^\circ\text{C}$  的交替保温来模仿叶片工作的变温环境, 并与恒温试验结果进行对比分析. 图 4 为  $280\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $450\text{ }^\circ\text{C}$  及两种温度交替作用下材料表面残余压应力释放情况, 在交替保温  $160\text{ min}$  残余压应力由  $-628.2\text{ MPa}$  下降到  $-415.2\text{ MPa}$ , 下降  $33.9\%$ , 残余压应力的松弛主要发生在  $60\sim 80\text{ min}$ , 在保温开始一段时间, 残余压应力松弛是介于两种温度分别保温的情况之间, 从  $60\text{ min}$  之后, 松弛量开始大于  $450\text{ }^\circ\text{C}$ .

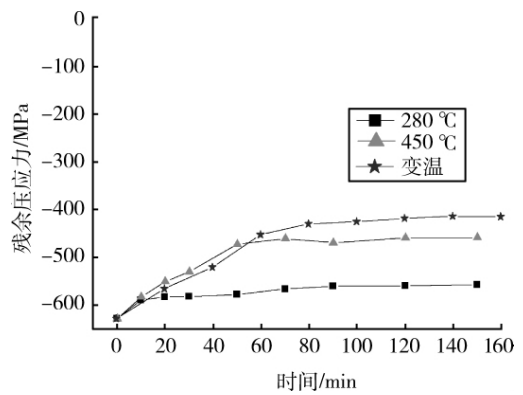


图 4 变温时表面残余压应力松弛

Fig. 4 Surface residual stress relaxation under alternate temperature

综合恒温 and 变温条件下的试验结果, TC17 钛合金激光喷丸产生的残余压应力在试验温度范围内存在大部分剩余, 剩余残余压应力是提高部件工程应用中疲劳性能的主要因素之一; 在温度处于金属原子扩散速率很低的温度范围内或远低于材料再结晶温度时, 在恒温或变温条件下, 应力松弛的最大速率发生在保温的最初阶段, 并且大部分残余压应力热松弛发生在该阶段, 原子扩散、位错运动和晶体滑移的难易程度决定温度对应力热松弛速率的影响; 材料一定时, 残余压应力热松弛与温度和保温时间有关.

## 3 基于支持向量机的残余压应力热松弛模型

通过以上恒温、变温下试验发现 TC17 钛合金激光冲击强化后引入残余压应力会发生热松弛, 下面研究应用支持向量机理论建立模型预测残余压应力的热松弛规律并和试验值进行比较, 验证模型的准确性.

3.1 SVM(support vector machines)预测模型建立

基于 SVM 的时序序列预测模型的基本框架、拓扑结构、相空间重构等内容在文献[12-14]都进行了详细的论述,在此不再赘述。

嵌入维数的选取采用最终误差预报准则(final prediction error,简称 FPE)评价模型的预测误差,根据误差大小选取嵌入维数  $m$ 。在工程实际应用中,嵌入维数通常是凭经验确定,一般选择为 4,5 或 6,本文选择 4 进行建模分析。嵌入维数确

定以后,就可以建立支持向量机回归预测模型

$$\hat{x}(t) = f(x(t-4), x(t-3), \cdots, x(t-1))$$

(1)

3.2 SVM 预测模型验证

把在 280℃和 450℃的交替保温后残余压应力数据分成两种样本,用其中的前 3 组数据作为训练样本进行机器学习,得到预测模型,余下的两组作为测试样本考察模型的预测能力和泛化能力,如表 3 所示。

表 3 预测模型的训练样本及测试样本  
Table 3 Training and testing samples of predicting model

| 样本类型 | 样本序号 | 输入        |           |           |           | 输出     |
|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
|      |      | $X_{i-4}$ | $X_{i-3}$ | $X_{i-2}$ | $X_{i-1}$ | $X_i$  |
| 训练样本 | 1    | -628.2    | -565.8    | -520.7    | -452.8    | -430.2 |
|      | 2    | -565.8    | -520.7    | -452.8    | -430.2    | -425.3 |
|      | 3    | -520.7    | -452.8    | -430.2    | -425.3    | -418.6 |
| 测试样本 | 4    | -452.8    | -430.2    | -425.3    | -418.6    | -414.3 |
|      | 5    | -430.2    | -425.3    | -418.6    | -414.3    | -415.2 |

在本文中,回归支持向量机采用高斯径向基核函数(式(2)),且  $\sigma^2 = 1.5$ ,规则化常数  $C = 1000$ ,不敏感系数  $e = 0.001$ ,对模型进行训练学习及预测,第  $l$  步预测模型为式(3)。

$$K(x,y) = \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

(2)

$$\hat{y}_{j,l} = \sum_{i=2+(m-1)\tau}^{n_{tr}} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(\hat{x}_i \cdot \hat{x}_{j,l}) + b$$

(3)

其中  $j = n_{tr+1}, \cdots, N; \hat{y}_{j,l}$  表示  $l$  步的预测值。

对预测结果进行误差分析(见表 4),训练及仿真结果如图 5 所示。由结果可知,预模型能够较精确的表征 TC17 钛合金激光喷丸后在 450℃以下的残余压应力的热松弛,预测误差小于 5%,满足工程使用要求。

表 4 预测模型误差(%)  
Table 4 Error percentage of predicting model (%)

| 时间/<br>min | SVM<br>预测值/MPa | 原始<br>数据/MPa | 相对<br>误差/% |
|------------|----------------|--------------|------------|
| 140        | -402.7380      | -414.3       | 2.78       |
| 160        | -397.2033      | -415.2       | 4.33       |

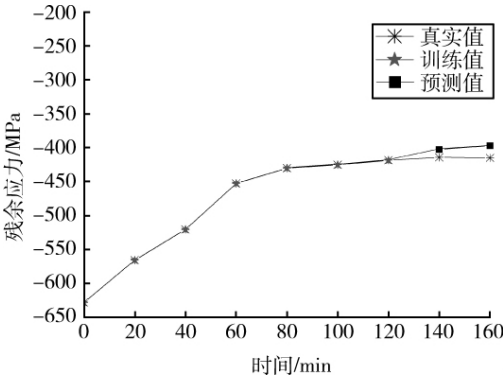


图 5 训练学习及预测结果  
Fig. 5 Training and predicting result

4 结 论

本文研究了不同功率密度激光喷丸后 TC17 钛合金残余压应力分布、残余压应力的热松弛规律,并建立了基于 SVM 的残余压应力热松弛模型。结论如下:

- 1) TC17 钛合金在功率密度为 4 GW/cm<sup>2</sup> 时表面残余压应力最大、影响层最深,为 TC17 钛合金最佳强化功率密度。
- 2) 残余压应力在在 280℃和 450℃真空保温 150 min 后分别有 11.24%,27.11%的热松弛,在

280 °C 和 450 °C 交替保温 160 min 时热松弛达到 33.9%, 在试验温度下强化后产生的残余压应力还有大部分剩余, 可以有效提高 TC17 钛合金抗疲劳性能。

3) 在恒温或变温条件下, 应力松弛的最大速率发生在保温的最初阶段, 并且大部分残余压应力热松弛发生在该阶段。

4) 论文建立的残余压应力热松弛预测模型能够较好地表征 TC17 钛合金在 450 °C 以下的应力松弛规律, 满足工程使用要求; 研究方法对其他材料残余压应力热松弛分析具有借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [2] Charles S M, TAO Wei, LIN Ye, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys; a review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(2): 1021-1036.
- [3] 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15-19.
- LI Wei, LI Yinghong, HE Weifeng, et al. Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15-19. (in Chinese)
- [4] Barradas S, Jeandin M, Bolis C, et al. Study of adhesion of protel copper coating of Al2017 using the laser shock adhesion test (LASAT) [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(3): 2707-2716.
- [5] ZHANG Yongkang, CHEN Jufang, XU Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(7): 1068-1072.
- [6] Sano Y, Obata M, Kubo T, et al. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating[J]. Materials Science and Engineering, 2006, 417(1-2): 334-340.
- [7] Holmlid L, Badiei S. Laser initiated detonation in Rydberg matter with a fast propagating shock wave, releasing protons with keV kinetic energy[J]. Applied Physics Letters, 2005, 344(2-4): 265-270.
- [8] CHENG Gaojin, Shehadeh M A. Multiscale dislocation dynamics analyses of laser peening in silicon single crystals [J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22 (12): 71-94.
- [9] 马壮. 航空发动机部件激光冲击强化应用基础研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2008.
- MA Zhuang. Fundamental research on laser shock processing used on aero-engine parts[D]. Xi'an: Air Force University, 2008. (in Chinese)
- [10] 冯宝香, 毛小南, 杨冠军, 等. TC4-DT 钛合金喷丸残余应力场及其热松弛行为[J]. 金属热处理, 2009, 34(4): 20-23.
- FENG Baoxiang, MAO Xiaonan, YANG Guanjuan, et al. Residual stress and its relaxation behavior of TC4-DT titanium alloy after shot peening[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(4): 20-23. (in Chinese)
- [11] 刘海雷. TC17 钛合金激光喷丸研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2011.
- LIU Hailei. Laser shock processing of TC17 titanium alloy [D]. Xi'an: Air Force University, 2011. (in Chinese)
- [12] 纪玲玲, 林振山, 王昌雨, 等. 最小二乘回归支持向量机对非线性时间序列预测的试验分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(1): 92-97.
- Ji Lingling, Lin Zhenshan, Wang Changyu, et al. Experiments on nonlinear time series prediction with least squares support vector regression machine[J]. J. of PLA University of Sci. and Tech., 2009, 10(1): 92-97. (in Chinese)
- [13] 刘莉, 徐浩军. 支持向量机的可靠度时序预测分析与应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(11): 118-120.
- LIU Li, XU Haojun. Analysis and application of time series prediction of reliability based on support vector machines[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32 (11): 118-120. (in Chinese)
- [14] 尉询楷, 李应红, 张朴, 等. 基于支持向量机的时间序列预测模型分析与应用[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(3): 530-532.
- WEI Xunkai, LI Yinghong, ZHANG Pu, et al. Analysis and applications of time series forecasting model via support vector machine[J]. System Engineering and Electronics, 2005, 27(3): 530-532. (in Chinese)