

# Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物喷丸强化残余应力 模拟分析与疲劳寿命预测

陈禹锡, 高玉魁

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

**摘 要:** **目的** 研究经喷丸强化处理后 Ti<sub>2</sub>AlNb 材料表层残余应力的分布特征, 并预测残余应力对材料疲劳性能的影响规律。**方法** 通过贴应变片逐层钻孔法, 对使用喷丸强化处理后的 Ti<sub>2</sub>AlNb 试样进行残余应力测试分析, 得到引入残余应力场各方面的测试数据, 结合 ABAQUS 数值模拟方式, 对比分析试验与模拟残余应力场结果, 获取材料的最终残余应力梯度。利用 FE-SAFE 软件, 通过叠加残余应力场的方式, 预测喷丸强化前后试样的疲劳寿命。**结果** 在文中加工参数下, 实验测试和软件模拟结果的重合度良好。喷丸强化可在 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物靶材内引入 300 MPa 左右的最大残余压应力, 深度达到了 0.12 mm 左右。材料表面塑性应变分布不均匀, 且造成的塑性应变距表面深度可达 0.1 mm。通过喷丸强化引入残余压应力, 预测的 Ti<sub>2</sub>AlNb 材料疲劳极限可提高 12%, 高低周疲劳寿命均有明显的延寿效果。**结论** 验证了有限元数值模拟此材料喷丸强化的准确性和可靠性, 得到了 Ti<sub>2</sub>AlNb 材料喷丸强化的残余应力场。由于塑性变形诱发机制的限制, 喷丸造成塑性应变分布不均匀, 塑性应变层深小于残余压应力层深。此外, 强化后材料的疲劳性能显著提高, 疲劳极限有可观的提升, 且高低周疲劳均有较好的延寿效果。

**关键词:** 喷丸强化; 表层改性; 数值模拟; 残余应力; 寿命预测; 新型材料

**中图分类号:** TG111.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)06-0167-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.019

## Simulation of the Residual Stress and Fatigue Prediction of Ti<sub>2</sub>AlNb Intermetallic Compound under Shot Peening

CHEN Yu-xi, GAO Yu-kui

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the distribution characteristics of residual stresses on the surface layer of Ti<sub>2</sub>AlNb materials by shot peening, and predict the effect of residual stresses on fatigue performance. The residual stresses of Ti<sub>2</sub>AlNb specimens modified by shot peening were measured by the method of hole-drilling with strain gauge layer by layer. The test data of the residual stress field in various aspects were obtained. Combined with ABAQUS numerical simulation method, the results of the test and simulation of residual stress field were compared, and the residual stress gradient of the material was finally ob-

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-03-19

Received: 2019-01-02; Revised: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372226)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372226)

作者简介: 陈禹锡 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物疲劳及修复。

Biography: CHEN Yu-xi (1994—), Female, Master graduate, Research focus: fatigue properties and repair of Ti<sub>2</sub>AlNb intermetallic compound.

通讯作者: 高玉魁 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向表面改性与疲劳断裂研究等。邮箱: yukuigao@tongji.edu.cn

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface modified technique, fracture and fatigue.  
E-mail: yukuigao@tongji.edu.cn

tained. The fatigue life of the specimens before and after shot peening was predicted by FE-SAFE software by superimposing the residual stress field. Under the processing parameters, the experimental and simulation results coincided well. Shot peening could introduce maximum residual compressive stress up to 300 MPa in  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  target and the depth of residual compressive stress layer was about 0.12 mm. The plastic strain distribution on the surface of the material was uneven, and the depth of plastic strain along the surface could reach 0.1 mm. After shot peening, residual compressive stresses were introduced so that the predicted fatigue limit of the material was raised by about 12%, and both the high and low cycle fatigue life was efficiently increased. The accuracy and reliability of FEM numerical simulation of shot peening of this material are confirmed, and the residual stress field of  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  material is obtained. Due to the limitation of plastic deformation induced mechanism, shot peening results in uneven distribution of plastic strain, and the depth of plastic strain layer is less than that of residual compressive stress layer. Meanwhile, the fatigue property of the material is improved significantly, the fatigue limit is increased considerably, and both the high and low cycle fatigues have visible life extension effect.

**KEY WORDS:** shot peening; surface modification; numerical simulation; residual stress; fatigue life prediction; new material

20 世纪末, 第三代高 Nb 含量的  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  金属间化合物被研制出来, 由于其具有优良的机械性能、良好的高温力学性能和较低的密度而受到越来越多的关注, 成为先进燃气轮机和喷气发动机零部件制造中最有发展前途的材料之一<sup>[1-3]</sup>。航空发动机的零部件, 在其服役期间, 最主要的失效形式就是疲劳。现有研究表明, 疲劳裂纹通常萌生于零部件或材料的表面位置, 因此经受疲劳载荷的零部件的表面状态, 即表面粗糙度、是否存在缺陷等, 对于疲劳寿命有着关键性的影响<sup>[4-5]</sup>。在机械加工中, 为了降低表面粗糙度, 通常采用精密切削加工、磨削抛光等方式对零部件进行精加工, 因此在零部件表面引入了加工残余应力, 同时还有可能引入表面缺陷, 不利于材料的疲劳性能。对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  金属间化合物零件进行表层改性, 能够有效改善其表面应力层状态, 消除加工产生的表面残余拉应力, 消除或弱化可能存在的表面缺陷, 从而提高疲劳强度, 延长零部件的服役周期。

喷丸强化作为一种广泛运用的表层改性技术, 具有操作简便、强化效果好等优点, 常用于提高材料的疲劳强度和抗应力腐蚀开裂性能<sup>[6-7]</sup>。喷丸强化的原理如图 1 所示, 弹丸经过喷嘴加速喷射, 撞击靶材表层, 使材料表层的弹坑周围产生塑性变形, 在撞击结束后, 由于材料内部的自平衡作用, 在表面形成一层压缩残余应力层<sup>[8]</sup>。残余应力是影响构件众多性能的重要因素, 如零部件的静强度、抗疲劳强度、抗应力

腐蚀性能, 并且会影响最终成件形状尺寸的稳定性。表层残余压应力的存在能够有效抵消部分零件表面的服役载荷, 进而抑制表面微裂纹的产生, 最终优化材料的疲劳性能。因此, 研究经喷丸强化后靶材内部残余应力场的变化规律及梯度分布, 对指导航空工业生产中零部件表面改性技术的应用具有重要意义。

对于  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  金属间化合物喷丸残余应力场的研究较为少有。文中采用 ABAQUS 软件进行喷丸强化的数值模拟, 并结合贴应变片逐层钻孔法进行实验测试, 得到此新型材料喷丸强化后的残余应力梯度。探究喷丸对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  金属间化合物表层改性的效果与数值模拟的有效性, 提供可靠的数值模拟方式。结合疲劳分析 FE-SAFE 软件, 探究此表层改性技术对  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  新型材料的疲劳延寿效果, 为材料的疲劳性能研究提供理论基础, 用于指导将来工程应用中的疲劳强化。

## 1 $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ 材料的喷丸强化有限元仿真

1985 年, Meguid 等<sup>[9]</sup>首次使用有限元法 (FEM) 模拟求解喷丸残余应力场, 将复杂喷丸过程简化成为平面应变条件下的光滑刚性冲头压入有界弹塑性固体材料的有限元分析。喷丸强化过程主要包括以下两个部分<sup>[8]</sup>:

1) 接触和撞击过程。在此过程中, 丸粒通过喷头加速, 冲击至目标材料表面, 在材料表层产生了永久塑性变形和一定的弹性变形。

2) 材料自平衡过程。在此过程中, 弹坑塑性变形区周围的弹性变形部分发生回弹, 使得材料表层内部发生挤压, 产生残余压应力。

在文中使用 ABAQUS 软件对喷丸强化进行模拟的过程中, 也将强化过程分为以上两个部分。同时参考前人研究<sup>[8,10-11]</sup>提出三个假设: 所有弹丸均为完整球体, 具有相同的尺寸和物理性质; 单个弹丸只撞击

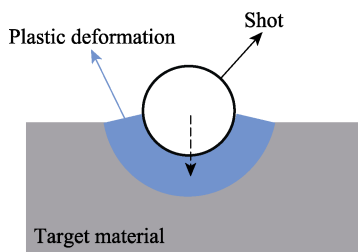


图 1 喷丸强化原理

Fig.1 Principle of shot peening

靶材一次;忽略多弹丸间的相互接触与轨迹干涉。丸粒的接触撞击是一个高应变率的瞬时过程,故采用 ABAQUS/Explicit 显示时间积分算法来进行数值模拟;而冲击结束后材料的自平衡过程,则采用 ABAQUS/Standard 隐式算法模拟。由于接触撞击模型具有对称性<sup>[11]</sup>,建模时采用 1/2 对称模型,满足模拟要求的同时可以提高软件的计算效率。表面覆盖率定义为喷丸后材料表面总弹坑面积与材料表层面积的比值,是喷丸加工工艺主要参数之一。

实际加工过程中,喷丸表面覆盖率为 200%。为了模拟 200% 的覆盖率,采用了八层弹丸叠加的 1/2 模型,如图 2 所示。模型中弹丸直径取 0.36 mm,以对应实际加工喷丸所使用的 AGB35 玻璃丸的几何参数,定义 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物靶材的半径(2.16 mm)为 6 倍弹丸直径,厚度(2.88 mm)为 8 倍弹丸直径。在网格划分中,因喷丸强化的变形原理,弹丸撞击靶材所发生的塑性变形主要集中于材料表层,故而细化了靶材表层及被撞击中心部位的网格(图 2 放大区域),设定的最小单元网格大小为 0.01 mm。模型中使用 C3D8R 八节点六面体减缩积分单元,经过划分后,整体模型单元个数为 159 432 个。设置靶材剖面与半球剖面的界面属性为对称边界条件,靶材底面的界面属性为位移边界条件(*z* 向位移为 0),靶材上表面的界面属性为自由表面。在喷丸加工的过程中,主要作用方式为弹丸与材料表面发生碰撞引入永久塑性变形。若弹丸选用铸钢丸,此金属弹丸在与 Ti<sub>2</sub>AlNb 靶材表面发生接触时,可能会在靶材表面留下部分铁元素,从而对 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物零部件表面造成污染,故而在实验加工和仿真过程中选用玻璃丸进行喷丸强化。选择靶材和弹丸的材料参数见表 1,弹丸初始入射速度设置为 50 m/s。

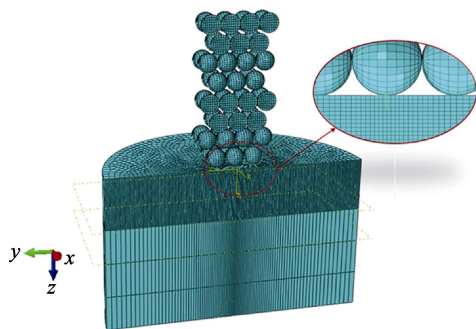


图 2 喷丸强化有限元模型  
Fig.2 Finite element model of shot peening

表 1 材料的力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of materials

Material	Density $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	Young's modulus $E/\text{GPa}$	Poisson's ratio $\nu$	Yield strength/MPa
Ti <sub>2</sub> AlNb	5.3	120.2	0.33	775
Glass	8.9	46.2	0.245	

## 2 实验测试分析

为了验证数值模拟结果的准确性,进行了相同工况室温下的喷丸强化实验研究。文中采用的残余应力测试方法为逐层钻孔法,从应变释放角度测量残余应力<sup>[12]</sup>。此方法的测量精度高、可靠性强、操作方便且破坏性较小。在测试中使用了如图 3a 所示的固定式钻孔装置,利用目镜确定钻孔中心位置点,使用旋转螺旋测微器调节跟进深度,测得应力在材料表层的分布梯度。逐层钻孔法(HDSG)的原理是:在残余应力非均分布的平板上,使用钻孔仪钻一小孔,孔边径向应力随之迅速下降至 0,被钻孔区域附近残余应力重新分布,此内部应力的自发变化称为应力释放。通过使用应变片测量其释放应力造成的应变变化,反推得到两个主应力和主方向角共三个未知参数。图 3b 为钻孔处残余应力的示意图,在深度 *k* 步时,平面应力分别为 $(\sigma_x)_k$ 、 $(\sigma_y)_k$ 、 $(\tau_{xy})_k$ 。在增量数为 *j* 时( $1 \leq k \leq j$ ),表面释放应变的计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j = & \frac{1+\nu}{E} \sum_{k=1}^j \bar{a}_{jk} \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)_k + \\ & \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)_k \cos 2\theta + \\ & \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} (\tau_{xy})_k \sin 2\theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\bar{a}_{jk}$ 、 $\bar{b}_{jk}$  为校准常数,表示孔深在 *j* 步内单位应力释放的应变;*E* 为材料的杨氏模量,  $\nu$  为泊松比;  $\theta$  为应变片与 *x* 轴之间夹角(参考系如图 3b 所示)。

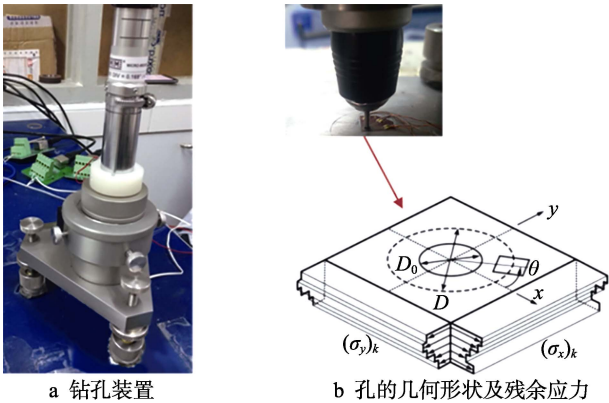


图 3 钻孔应变释放法  
Fig.3 Hole drilling strain release method: a) hole drilling instrument; b) hole geometry and residual stresses

实验测试时,使用 BHI120-2CA-K(11)-Q30P500 应变片测得式(1)中的应力参数,然后根据得到的应变求解出此钻孔深度位置的残余应力。钻孔时由表面逐层递进,递进深度需手动控制在 20  $\mu\text{m}$  左右,测试至残余应力值稳定趋于 0 时,认为此深度下的材料内部已经达到平衡,不再受喷丸强化的影响。

### 3 分析与讨论

喷丸强化作为常用表层改性技术,主要通过冲击靶材造成塑性变形,从而在材料内部引入残余压应力,提高材料性能。同时,喷丸强化会造成材料表面的微观组织变形<sup>[13]</sup>,也会影响材料的表层硬度和残余应力。故而其残余压应力的数值与压应力层深的测定结果,将直接影响强化后的材料疲劳性能。喷丸强化后,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  材料表层残余应力 ( $x$ 、 $y$  向) 的梯度分布如图 4 所示。

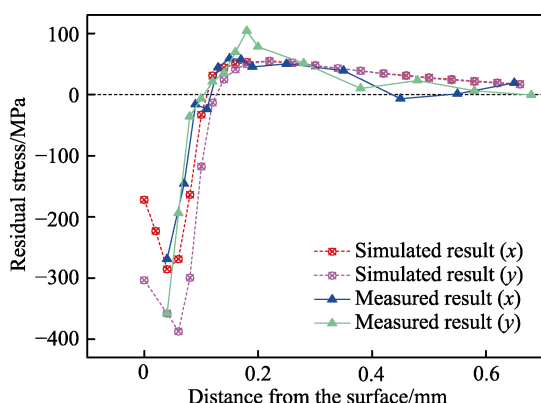


图 4 喷丸强化后残余应力场  
Fig.4 Distribution of residual stress field after SP

图 4 中,虚线为喷丸数值仿真结果,实线为钻孔法实验测试结果。数值仿真和钻孔法实验得到的喷丸后  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  残余应力场分布呈现出相同的变化趋势。实际加工和撞击仿真的喷丸强化过程均在靶材表面引入了残余压应力,并且随着距表面深度的增加,残余压应力值急剧下降,在转变为残余拉应力后缓慢趋于平衡,残余应力值最终趋近于 0。这是由于在丸粒和靶材材料的接触撞击过程中,由于工艺本身以及材料性能的限制,喷射出的弹丸不能整个嵌入到靶材的表层中,所引起的塑性变形深度会受到弹丸尺寸的影响<sup>[14]</sup>。因此限制了喷丸工艺引入残余压应力层的深度,造成引入塑性变形的区域也十分有限。随着深度的增加,塑性变形迅速消减,残余压应力的数值也随之迅速衰减。由于残余应力是材料不受外载时其内部具有的自相平衡的内应力,故在压应力层之下也会存在残余拉应力。随深度的增加,当材料内部的残余拉、压两应力值互相抵消,在此深度下,不再存在残余应力,即残余应力值为 0 时,认为材料内部在此深度不再受喷丸残余应力的影响。

喷丸强化工艺下,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  金属间化合物的塑性应变 (PE) 在材料表面处的分布如图 5 所示。可以看出,在靶材表面塑性变形分布均匀度不高,存在峰值,并且在此变形平面内,塑性应变值相差较大。塑性应变随深度变化的结果如图 6 所示,可以看出,喷丸所产生的塑性变形消减十分迅速。在材料表层下 80  $\mu\text{m}$

处,塑性变形接近 0;在深度达到 100  $\mu\text{m}$  之后,材料内部不再有塑性变形。由此可见,塑性变形层的深度低于残余压应力层的深度,在残余压应力达到 0 或是存在残余拉应力的情况下,塑性变形不再存在。

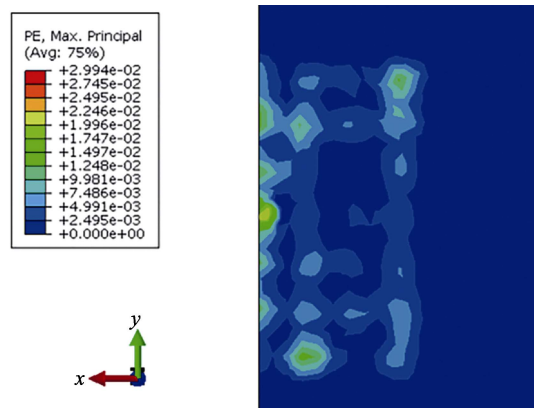


图 5 喷丸强化后表面塑性应变分布  
Fig.5 Distribution of PE field on the surface after SP

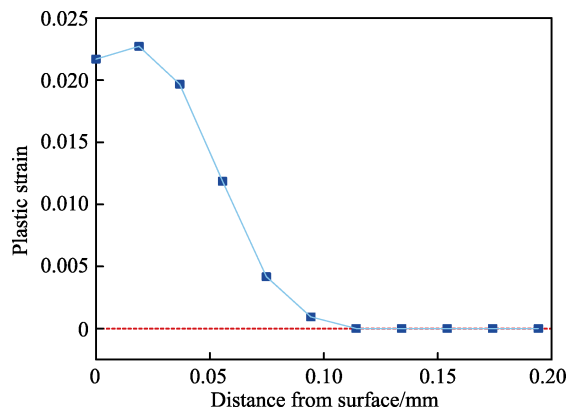


图 6 喷丸强化后塑性应变随深度分布  
Fig.6 Distribution of PE along the surface depth after SP

通常喷丸所产生的残余压应力场可以由以下四个特征参数表征<sup>[15]</sup>:材料表面残余压应力  $\sigma_{\text{srs}}$ 、内部最大残余压应力  $\sigma_{\text{mrs}}$ 、测试点距表层距离  $\delta_{\text{m}}$ 、总残余压应力场深度  $\delta_0$ 。需要指出的是,钻孔法是一种微损检测方式,无法直接测得材料表面的残余压应力,故而仅能比较其余三个参数。

表 2 列举了实验和仿真结果的残余应力场特征参数。可以发现,仿真获得的最大残余压应力与应力层深度比实验值更大,这可能与试样表面存在的初始残余拉应力有关。A. H. Mahmoudi 等人<sup>[16]</sup>研究了初始残余应力的存在对喷丸引入残余应力场的影响,并表明初始应力的存在可显著改变超过最大残余压应力点的喷丸残余应力,同时这些变化与残余应力的大小和方向密切相关。比较实验和仿真获得的特征值参数,计算得出两种方式所得最大残余压应力值的误差分别为 5.6% 和 7.4%,相对的总残余压应力层深度误差分别为 5.4% 和 7.8%。同时,图 4 中实验和仿真的



表 2 残余应力场参数对比  
Tab.2 Comparison of residual stress field parameters

Method		$\sigma_{\text{srs}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{mrs}}/\text{MPa}$	$\delta_{\text{m}}/\mu\text{m}$	$\delta_0/\mu\text{m}$
HDSG	x		-269	40	105
	y		-358	40	117
CAE	x	-172	-285	40	111
	y	-303	-387	60	127

残余应力梯度曲线重合度良好,由此验证了仿真获得的残余应力场的准确性。因为残余应力产生的机制即为塑性应变和弹性应变导致材料内部挤压,由此可以基本推断出在此喷丸参数下 Ti<sub>2</sub>AlNb 材料表面的残余压应力值。

4 FE-SAFE 材料疲劳寿命模拟

为了研究喷丸强化对 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物疲劳性能的影响,故而对试样进行疲劳寿命模拟。采用了疲劳分析 FE-SAFE 软件,此软件采用了先进的单/双轴疲劳计算方法,同时综合了多种参考因素(主要包括受载平均应力、应力集中、试样表面状态等),利用软件自带的丰富的材料数据库和疲劳载荷组设计功能,根据提供的各种应力应变进行疲劳寿命及耐久性分析<sup>[17]</sup>。在 FE-SAFE 中,结构的疲劳分析主要包括材料本身的疲劳性能和结构所受的载荷历程,文中侧重分析 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物旋转弯曲试样的疲劳性能。利用软件自带功能,设计试样受正弦载荷谱,应力比  $R=-1$ ,并通过叠加残余应力梯度曲线,计算喷丸强化前后材料的旋转弯曲疲劳寿命。

旋转弯曲疲劳作为简单的线弹性疲劳,进行疲劳分析前,FE-SAFE 软件中需要输入被计算结构单位加载的节点应力结果。利用单位节点应力结果,结合设计载荷谱,乘以相对应的载荷指数,生成最终疲劳载荷谱,最后通过计算求出疲劳寿命。首先在 ABAQUS 软件中建模,参考疲劳试样标准,使用图 7 所示航空用标准旋转弯曲光滑疲劳试样。设计的应力集中系数

$K_t=1$ ,工作部位直径为 4 mm,加载端直径为 6.25 mm,总长度为 52 mm。通过计算得到有限元分析的应力结果,在 FE-SAFE 中导入.odb 格式的结果文件,根据加载频率定义疲劳载荷谱,设置材料系数,最后进行分析,得到寿命结果。在疲劳预测中,工程上通常都使用保守估计的方式,以保障零部件的服役可靠性。故而在喷丸强化后疲劳寿命预测的过程中,叠加的残余应力场采用了较小的 x 向的数据,模拟获得的旋转弯曲疲劳 S-N 曲线如图 8 所示。

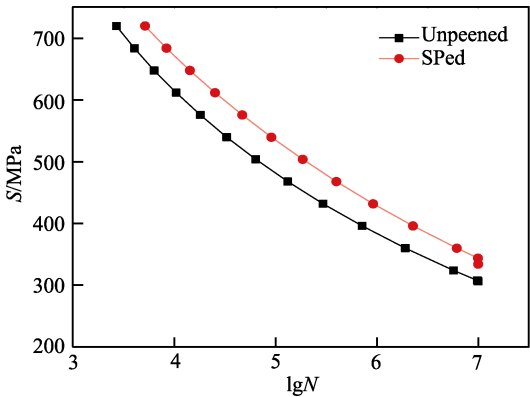


图 8 疲劳 S-N 曲线对比  
Fig.8 Comparison of S-N curves

S-N 曲线图中的纵坐标表示疲劳幅值 S,平均应力为 0,横坐标为对数疲劳循环次数 lgN,初始疲劳曲线和喷丸后的疲劳曲线分别使用黑色和红色拟合曲线表示。可以看出,S-N 曲线整体向右上方偏移,疲劳寿命和疲劳强度都有相应的提升。经验上通常将循环次数达 10<sup>7</sup> 时的疲劳载荷定义为材料的疲劳极限<sup>[5]</sup>。喷丸前 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物的旋转弯曲疲劳极限为 307 MPa,此疲劳极限与材料屈服极限的比值为 0.396,符合前人关于喷丸极限与材料力学性能的研究<sup>[18]</sup>,印证了此疲劳寿命预测模拟的可靠性。喷丸强化后,疲劳极限分别提升至 343 MPa,增幅为 12%。

同时比较了相同疲劳载荷下的疲劳寿命延寿效果,模拟的对数疲劳寿命的对比云图如图 9 所示。对于高周疲劳,即疲劳寿命高于 10<sup>5</sup> 循环次数的区域中,选取疲劳载荷为 468 MPa 时,强化后的疲劳寿命为未喷丸寿命的 4 倍。相应地,对应低周疲劳寿命 540 MPa 也有一定的提升,然而增幅相比高周疲劳下较小,仅为 2.7 倍。结果表明,在相同的疲劳载荷下,喷丸强化处理对于材料的疲劳性能有良好的延寿效果。

需要注意的是,模拟的疲劳结果仅为理论数据,在文中仅考虑了残余压应力的影响,而喷丸强化引入塑性变形造成的加工硬化并未列入考虑中。因此该寿命预测的理论值依旧是偏保守的估计,实际的疲劳服役寿命可能高于软件模拟获得的理论值。

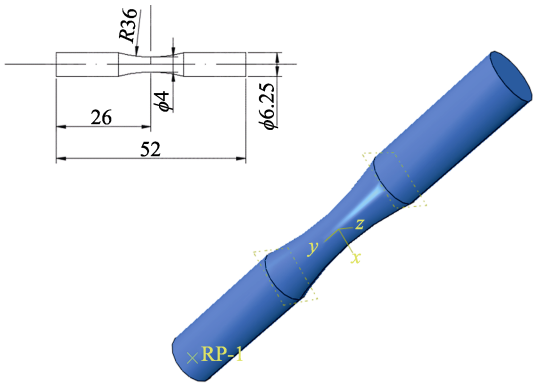


图 7 疲劳试样模型(单位: mm)  
Fig.7 Configuration of fatigue specimen (Unit: mm)

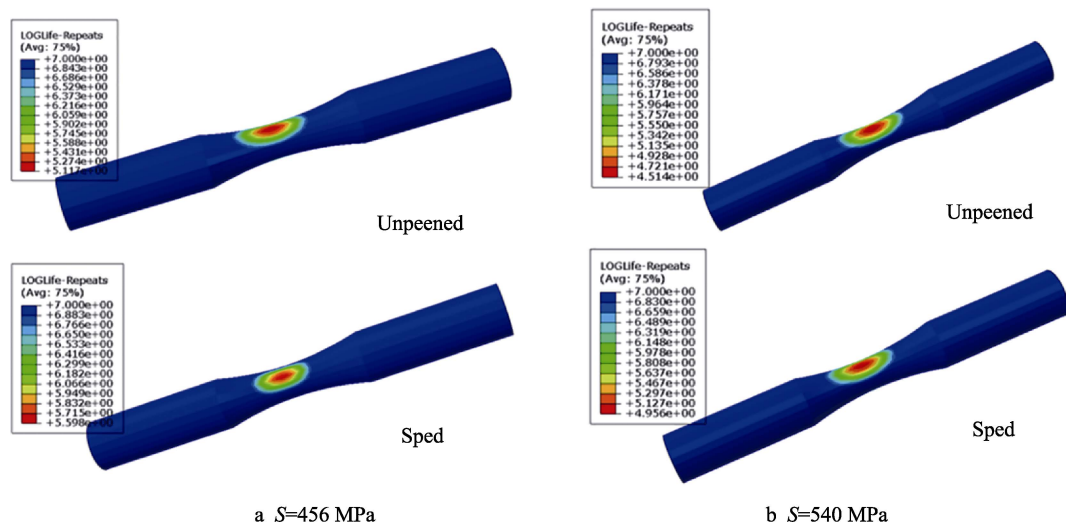


图9 不同疲劳载荷下材料的对数疲劳寿命云图  
Fig.9 Logarithmic fatigue life of material under different fatigue loads

## 5 结论

文中通过数值模拟和实验相结合的分析方法,阐述了喷丸强化表层改性技术对材料表层残余应力的影响,并模拟了其材料疲劳性能的强化效果,得到以下结论:

1) 喷丸强化通过碰撞冲击,诱发材料表层发生塑性变形,材料回弹而产生残余压应力,可抵消部分外加载荷,由此提高材料的性能。在使用 AGB35 玻璃丸,初始速度为 50 m/s,覆盖率为 200%的喷丸参数强化后,  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  金属间化合物次表层的最大残余压应力数值可达 300 MPa 左右,所引入的残余应力层深度达到 0.12 mm 左右。

2) 喷丸强化因变形机制限制,造成的塑性变形层较浅,在文中模拟参数下,塑性应变层深度为 0.1 mm 左右,低于残余压应力层深。

3) 喷丸强化后,材料的疲劳性能有显著提高,材料疲劳极限提高可达 12%。高周疲劳寿命的提升可达 4 倍,低周疲劳寿命增幅可达 2.7 倍。

## 参考文献:

- [1] BANERJEE D, GOGIA A K, NANDI T K, et al. A new ordered orthorhombic phase in a  $\text{Ti}_3\text{AlNb}$  alloy[J]. Acta metallurgica, 1988, 36(4): 871-882.
- [2] GERMANN L, BANERJEE D, GUEDOU J Y, et al. Effect of composition on the mechanical properties of newly developed  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ -based titanium aluminide[J]. Intermetallics, 2005, 13(9): 920-924.
- [3] 冯艾寒, 李渤渤, 沈军.  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  基合金的研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(1): 30-38.  
FENG Ai-han, LI Bo-bo, SHEN Jun. Recent advances on  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$ -based alloys[J]. Journal of materials and metal-

lurgy, 2011, 10(1): 30-38.

- [4] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
GAO Yu-kui. Surface integrity theory and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [5] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001.
- [6] GAO Yu-kui, WU Xue-ren. Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without shot peening-induced residual stresses[J]. Acta materialia, 2011, 59(9): 3737-3747.
- [7] GAO Yu-kui. Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening [J]. Materials science and engineering A, 2011, 528 (10/11): 3823-3828.
- [8] 蒋聪盈, 黄露, 王婧辰, 等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 5-9.  
JIANG Cong-ying, HUANG Lu, WANG Jing-chen, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 5-9.
- [9] MEGUID S A, KLAIR M S. An examination of the relevance of co-indentation studies to incomplete coverage in shot-peening using the finite-element method[J]. Journal of mechanical working technology, 1985, 11(1): 87-104.
- [10] 盛湘飞, 李智, 赵科宇, 等. 相同喷丸强度条件下喷丸强化效果的数值模拟研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 42-48.  
SHENG Xiang-fei, LI Zhi, ZHAO Ke-yu, et al. Numerical simulation research on strengthening effect of shot peening at identical intensity[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 42-48.

(下转第 188 页)

- [J]. Surface technology, 2017, 46(7): 161-167.
- [4] ZHANG R L, ZHU Y, HUANG J, et al. Electrochemical sensor coating based on electrophoretic deposition of Au-doped self-assembled nanoparticles[J]. ACS applied materials & interfaces, 2018, 10(6): 5926-5932.
- [5] 魏磊, 杨胡坤, 刘耀, 等. 沉积电压对电泳沉积成膜均匀性的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(11): 44-48.  
WEI Lei, YANG Hu-kun, LIU Yao, et al. Influence of deposition voltage on uniformity of film formation by electrophoretic deposition[J]. Materials protection, 2017, 50(11): 44-48.
- [6] 赵洪涛. 石墨烯/纳米银复合导电功能织物制备及性能研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.  
ZHAO Hong-tao. Preparation and multifunctional properties of graphene/nano silver composite conductive fabric[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018.
- [7] DELLE L E, HUCK C, BACKER M, et al. Impedimetric immunosensor for the detection of histamine based on reduced graphene oxide[J]. Physica status solidi A, 2015, 212(6): 1327-1334.
- [8] UNNIKRISHNAN B, PALANISAMY S, CHEN S M. A simple electrochemical approach to fabricate a glucose biosensor based on graphene-glucose oxidase biocomposite[J]. Biosensors and bioelectronics, 2013, 39(1): 70-75.
- [9] WHITESIDES G M, GRZYBOWSKI B. Self-assembly at all scales[J]. Science, 2002, 295(5564): 2418-2421.
- [10] SUN J D, LIU X Y, MENG L, et al. One-step electrodeposition of self-assembled colloidal particles: A novel strategy for biomedical coating[J]. Langmuir, 2014, 30(37): 11002-11010.
- [11] XU S, LIN G Y, ZHAO W, et al. Necklace-like molecularly imprinted nanohybrids based on polymeric nanoparticles decorated multiwalled carbon nanotubes for highly sensitive and selective melamine detection[J]. ACS applied materials & interfaces, 2018, 10(29): 24850-24859.
- [12] ZHANG R L, XU S, LUO J, et al. Molecularly imprinted photo-sensitive polyglutamic acid nanoparticles for electrochemical sensing of hemoglobin[J]. Microchimica acta, 2015, 182(1-2): 175-183.
- [13] BAI Y Y, ZHANG Z, ZHANG A P, et al. Novel thermo- and pH-responsive hydroxypropyl cellulose-and poly (l-glutamic acid)-based microgels for oral insulin controlled release[J]. Carbohydrate polymers, 2012, 89(4): 1207-1214.
- [14] HUMMERS J, OFFEMAN R E. Preparation of graphitic oxide[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(6): 1339-1339.
- [15] 王雷, 于飞, 马杰. 石墨烯基电极材料的设计和构建及其在电容去离子中的应用[J]. 物理化学学报, 2017, 33(7): 1338-1353.  
WANG Lei, YU Fei, MA Jie. Design and construction of graphene-based electrode materials for capacitive deionization[J]. Acta physico-chimica sinica, 2017, 33(7): 1338-1353.

(上接第 172 页)

- [11] 陈家伟, 廖凯, 车兴飞, 等. 铝合金喷丸应力-变形的仿真分析与实验[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 41-47.  
CHEN Jia-wei, LIAO Kai, CHE Xing-fei, et al. Simulation analysis and experiment of surface stress-deformation on Al-based alloy by shot peening[J]. Surface technology, 2018, 47(11): 41-47.
- [12] ASTM E837-08, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gauge method [S].
- [13] 高玉魁. 冲击强化对 304 奥氏体不锈钢拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2014(8): 36-40.  
GAO Yu-kui. Influence of impact enhancements on tensile property of 304 austenite steel[J]. Journal of materials engineering, 2014(8): 36-40.
- [14] ZHAO Chun-mei, GAO Yu-kui, GUO Jing, et al. Investigation on residual stress induced by shot peening[J]. Journal of materials engineering and performance, 2015, 24(3): 1340-1346.
- [15] GAO Y K, YIN Y F, YAO M. Effects of shot peening on fatigue properties of 0Cr13Ni8Mo2Al steel[J]. Materials science and technology, 2003, 19(3): 372-374.
- [16] MAHMOUDI A h, GHASEMI A, FARRAHI G H, et al. A comprehensive experimental and numerical study on redistribution of residual stresses by shot peening[J]. Materials and design, 2016, 90: 478-487.
- [17] 姜年朝. ANSYS 和 ANSYS/FE-SAFE 软件的工程应用及实例[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.  
JIANG Nian-chao. Engineering applications and examples of ANSYS and ANSYS/FE-SAFE software[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2006.
- [18] LINDEMANN J, BUQUE C, APPEL F. Effect of shot peening on fatigue performance of a lamellar titanium aluminide alloy[J]. Acta materialia, 2006, 54(4): 1155-1164.