

# 超声滚压工艺对镍基单晶高温合金 DD6 表面完整性和疲劳寿命的影响

夏天成<sup>1</sup>, 杨晓峰<sup>1</sup>, 邵照宇<sup>2</sup>, 孙凯<sup>2</sup>, 李晓<sup>3</sup>, 王继<sup>1</sup>, 刘怡心<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>

(1. 华东理工大学, 上海 200237; 2. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108;  
3. 湖州师范学院, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 目的 改善长期服役于高温高压环境的镍基单晶高温合金 DD6 材料的表面完整性, 提高其使用寿命。  
**方法** 采用超声滚压表面强化工艺 (Ultrasonic Rolling Process, USRP) 对镍基单晶高温合金 DD6 试样进行表面强化, 用正交试验法对三因素三水平的试样组进行试验, 使用三维形貌仪、显微硬度仪、XRD 射线衍射仪和 MTS 万能疲劳试验机探究静压力、进给速度和加工遍数等超声滚压参数对镍基单晶合金表面完整性和疲劳寿命的影响规律。**结果** 对于镍基单晶材料, 超声滚压强化工艺能有效降低其表面粗糙度, 提高表面显微硬度, 并在材料内部引入一定的残余应力, 并提升疲劳寿命。经 USRP 处理后, 不同晶体取向的材料能够取得的最佳表面增益效果为, 表面硬度从 465HV 提高到 679.2HV, 表面粗糙度从 0.703  $\mu\text{m}$  降低至 0.253  $\mu\text{m}$ , 表面引入了约为 782 MPa 的残余压应力。不同晶向材料的疲劳寿命提升表现为, 应力水平为 742.4 MPa 时, 疲劳寿命提升 1.3 倍; 应力水平为 649.6 MPa 时, 疲劳寿命提升 1.5 倍。**结论** 超声滚压工艺能够有效降低 DD6 材料的表面粗糙度、提高表面显微硬度, 并在表面引入一定的残余应力, 疲劳断裂模式主要为沿 {110} 面的滑移断裂。在低于 742.4 MPa 的应力加载时, 超声滚压强化可以明显提高 DD6 材料在高温下的疲劳寿命。  
**关键词:** 超声滚压; 镍基单晶合金; 工艺参数; 表面完整性; 断裂特征; 疲劳寿命  
**中图分类号:** TG663; TG146.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)01-0182-10  
**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.01.017

## Effect of Ultrasonic Rolling Process on Surface Integrity and Fatigue Life of Nickel-based Single Crystal Superalloy DD6

XIA Tiancheng<sup>1</sup>, YANG Xiaofeng<sup>1</sup>, SHAO Zhaoyu<sup>2</sup>, SUN Kai<sup>2</sup>, LI Xiao<sup>3</sup>,  
WANG Ji<sup>1</sup>, LIU Yixin<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>

(1. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China; 3. Huzhou University, Zhejiang Huzhou 313000, China)

**ABSTRACT:** Nickel-based single crystal superalloy is one of the important materials for manufacturing aero-engine turbine blades. Due to long-term service in high-temperature and high-pressure environment, turbine blades are prone to wear, fracture and other accidents, and their surface integrity needs to be improved to extend their service life. In this work, ultrasonic rolling

收稿日期: 2023-01-02; 修订日期: 2023-04-15

Received: 2023-01-02; Revised: 2023-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (5180052032)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (5180052032)

引文格式: 夏天成, 杨晓峰, 邵照宇, 等. 超声滚压工艺对镍基单晶高温合金 DD6 表面完整性和疲劳寿命的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(1): 182-191.

XIA Tiancheng, YANG Xiaofeng, SHAO Zhaoyu, et al. Effect of Ultrasonic Rolling Process on Surface Integrity and Fatigue Life of Nickel-based Single Crystal Superalloy DD6[J]. Surface Technology, 2024, 53(1): 182-191.

process(USRP) was used to strengthen the surface of nickel-based single crystal superalloy DD6. The vibration frequency of the ultrasonic generator was 10 kHz, and the static force and dynamic force were combined to be applied to the workpiece surface. The orthogonal test method was used to test the three factors and three levels of sample group. The effect of ultrasonic rolling parameters such as static pressure, feeding rate and processing times on the surface integrity of nickel-base single crystal superalloy was investigated by three-position topography, microhardness tester, XRD diffraction and MTS universal fatigue tester, the corrosion solution mixed with 10% perchloric acid and 90% absolute ethanol was used to thin several strengthened samples layer by layer, and the distribution of residual stress on the surface of the strengthened samples with depth was studied after the average value was taken. The fatigue test was carried out at 650 °C high temperature to explore the law of improving the fatigue life of samples with different crystal orientations by ultrasonic rolling strengthening technology under different stress levels. The experimental results and theoretical analysis showed that the ultrasonic rolling strengthening process could reduce the surface roughness of the material, improve the surface microhardness, introduce a certain depth of residual stress in the material, and have different effects on improving the fatigue life under different stress levels. After USRP treatment, the best surface gain effect could be obtained for materials with different crystal orientations: the surface hardness increased from 465HV to 679.2HV, and the surface roughness decreased from 0.703  $\mu\text{m}$  to 0.253  $\mu\text{m}$ . The surface introduced residual compressive stress of about 782 MPa, and the average thickness of residual stress layer was 400  $\mu\text{m}$ . It was found that residual stress layer and hardness layer were related to plastic deformation layer formed after surface impact. The fatigue life changes of materials were as follows: the fatigue life decreased when load was applied at a higher stress level. When load was applied at a stress level of 742.4 MPa, the fatigue life was 1.3 times higher than that of unreinforced samples, and the fatigue life was 1.5 times higher when the stress level was 649.6 MPa. The ultrasonic rolling process strengthening can effectively reduce the surface roughness of DD6 material, improve the surface microhardness and introduce a certain effective thickness of residual stress layer on the surface. The fatigue fracture is mainly slip fracture along {110} plane, and the fatigue life of DD6 under high temperature can be obviously improved by ultrasonic rolling strengthening. When the stress is lower than 742.4 MPa, ultrasonic rolling strengthening can significantly improve the fatigue life of DD6 material at high temperature.

**KEY WORDS:** ultrasonic rolling; nickel-based single crystal superalloy; process parameters; surface integrity; fracture characteristics; fatigue life

镍基单晶高温合金是自然生长成形的典型单晶材料, 具有优异的高温抗疲劳和抗蠕变性能<sup>[1-4]</sup>, 被广泛用于制造在极端环境下工作的航空发动机涡轮叶片<sup>[5-6]</sup>。在交变载荷的作用下, 涡轮叶片容易发生表面磨损、疲劳破坏等失效<sup>[7-8]</sup>, 零部件的表面完整性高低对零件是否能够正常使用起着关键作用。表面完整性按特征<sup>[9]</sup>可以分为表面形貌(如表面粗糙度、跳动度和表面织构)、冶金状态(如表面微观结构、晶粒尺寸和夹杂物)、力学性能(如显微硬度和残余应力)。因此, 需要用 USRP 工艺改善合金表面状态, 防止微裂纹的萌生, 提高零部件使用寿命和安全性。

镍基单晶高温合金是典型的各向异性材料<sup>[10]</sup>, 由于其晶体呈现各向异性和自身排序状态的不确定性, 导致其研究难度比常用多晶材料大。目前, 国内外学者对表面强化的研究主要集中在多晶材料<sup>[11-14]</sup>, 对单晶材料表面强化的研究较少。对于 DD6 材料, 高玉魁<sup>[15]</sup>对比了试样在 760、650 °C 高温下喷丸强化前后的疲劳寿命, 发现在不同温度下, 喷丸强化都能提高试样的疲劳寿命, 但强化后试样的表面粗糙度大于强化前试样的表面粗糙度。王欣等<sup>[16]</sup>用陶瓷弹丸对 DD6 单晶高温合金进行了喷丸强化, 发现经过强化后的

DD6 材料表层组织发生严重的塑性变形, 表面粗糙度随之提高。

USRP 工艺依靠其对表面超高频率的持续冲击, 在避免喷丸强化工艺降低表面完整性的同时<sup>[17]</sup>, 能够使材料获得更优的表面粗糙度、更大的显微硬度和更均匀的残余应力分布<sup>[18-22]</sup>, 但目前超声滚压工艺在单晶材料上的应用还相对较少。本文研究了 USRP 工艺对 DD6 合金表面完整性和疲劳寿命的影响, 分析了不同工艺参数(静压力、进给速度和加工遍数)对 DD6 合金表面粗糙度、显微硬度、残余应力和疲劳寿命的影响规律, 以推动表面强化工艺在单晶涡轮叶片榫头强化上的应用。

## 1 超声滚压工艺原理

超声滚压表面强化技术是一种不改变试样表面材料成分且无污染的加工技术<sup>[23]</sup>, 结合静态滚压力和动态冲击力, 便能有效降低表面粗糙度, 提高显微硬度, 并在材料表层引入残余应力<sup>[24]</sup>。超声滚压工艺结构如图 1 所示, 主要由超声波发生器、换能器、变幅杆和工具头等组成。超声发生器输出频率为 18 kHz

的电信号,再通过换能器将收到的电信号转换为机械振动,变幅杆将获得的振动进行放大,并传递给装置前部的碳化钨工具头,工具头通过对试样的高频冲击,将静压力和动态力传递给材料内部,使材料表面发生弹塑性变形,达到强化试样表面的目的。超声滚压加工装置安装于卧式车床上对工件进行加工,在220 V交流电压下,将超声发生器的电流大小保持在1.14 A。碳化钨加工头是 $\phi 10$  mm的均质圆球,在非加工状态时,加工头的动态振幅为15  $\mu\text{m}$ ,静态下压量由加工参数决定。

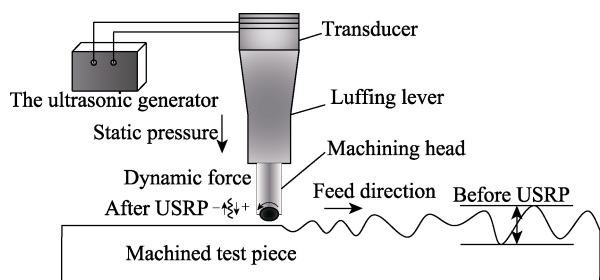


图1 超声滚压工艺系统结构  
Fig.1 Structure of ultrasonic rolling process system

## 2 研究方法及试验参数

### 2.1 试样制备

本次试验用慢走丝线切割的方式将原料切割成若干个20 mm×10 mm×10 mm的长方体试样,试样表面的初始粗糙度 $R_a$ 约为0.703  $\mu\text{m}$ ,硬度约为465HV。在切制的长方体试样表面区域按固定间距选取面积为8 mm×8 mm的正方形区域进行USRP表面处理。依据ASTM E466将疲劳试样形状定为板状薄板试样,疲劳试样及其强化区域如图2所示。在切制疲劳试样前,对其侧边进行USRP处理,以防在薄板试样上处理后导致试样变形影响疲劳试验结果。

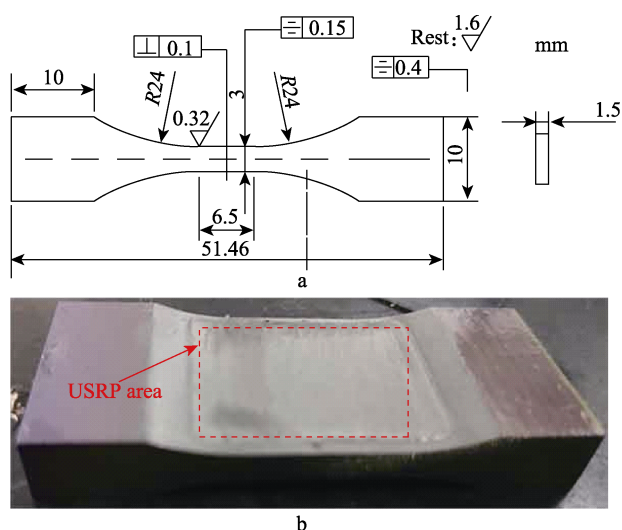


图2 疲劳试验件尺寸及强化区域  
Fig.2 Schematic diagram of fatigue test piece size and USRP area

### 2.2 试验参数

现有研究表明,材料经过强化后的表面完整性由静压力、进给速度和加工遍数这3个加工参数决定<sup>[24]</sup>。因此,本文主要研究这3个参数对材料表面完整性的影响,针对3个加工参数选取3个水平进行正交参数试验,见表1。

表1 表面超声强化工艺影响参数及水平  
Tab.1 Affecting parameters and levels of surface ultrasonic strengthening process

Level	Static pressure/N	Times	Speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
1	336	20	17
2	420	30	25
3	504	40	33

### 2.3 检测方法与设备

本试验将采用PS-50型三维形貌仪对USRP加工后的镍基单晶高温合金初始试样进行粗糙度测量。将超声加工后的试样放入装有无水乙醇的烧杯中进行超声清洗,去除试样上的杂质后再进行粗糙度检测。用仪器压痕测试技术<sup>[26-27]</sup>表征材料局部的硬度,采用HVS1000型数显硬度计上进行硬度测试,载荷为0.490 3 N,加载时间为15 s,选择金刚石正四角锥压头,对角为136°。采用Proto-iXRD-MG 40 PFS-STD型XRD射线衍射仪测量强化前后试样表面的残余应力,对试样进行沿深度方向的残余应力测试。X射线穿透深度为10~30  $\mu\text{m}$ ,探测器最宽角度为29.6°。使用江苏特检院提供的MTS万能试验系统进行疲劳试验,试验机的型号为MTSlandmark370.10,最大加载载荷为50 kN,疲劳试验机加持的方式为液压加持,最大加持力为20.68 MPa。采用Station manager和Multipurpose Express Operator软件作为试验机控制及数据采集软件。疲劳试验温度为650  $^{\circ}\text{C}$ ,加热到指定温度后,进行30 min保温,再进行试验。试样断裂后,待其自然冷却至室温,取下试样。

## 3 结果及分析

按照不同静压力大小将9个试样分为3组,每一组试样的加工遍数从20遍增加至40遍,进给速度从17 mm/s增大至33 mm/s,见表2。

### 3.1 表面粗糙度分析

取静压力为504 N、加工遍数为20遍、进给速度为33 mm/s的试样放在三维形貌扫描仪下进行粗糙度及表面形貌检测。由图3a可以发现,试样在超声滚压加工前,表面较为粗糙,且具有明显的机加工沟壑状条纹,粗糙度 $R_a$ 为0.703  $\mu\text{m}$ 。在经过超声滚压强化后,可以发现试样表面机加工痕迹明显减少(如图3b所示),这说明超声滚压强化工艺能够提高试样的平整度。

表 2 表面超声强化工艺正交试验参数  
Tab.2 Orthogonal test parameters of surface ultrasonic strengthening process

Group	Static pressure/N	Times	Speed/(mm·s <sup>-1</sup> )
Group 1	336	20	17
	336	30	25
	336	40	33
Group 2	420	20	25
	420	30	33
	420	40	17
Group 3	504	20	33
	504	30	17
	504	40	25

表面粗糙度和进给速度之间的关系如图 4a 所示, 是对同一加工水平下不同组别的试样数据相加后取均值得到的预测曲线, 且后续章节中的预测曲线均由取均值法得出。总体来看, 第 2 组试样在经过 USRP 处理后, 粗糙度高于第 1 组和第 3 组的试样。这是因为其本质上是由[001]方向的侧枝晶体组成的, 初始质地较软, 材料表面的粗糙度随进给速度的增大而先增大后减小。表面粗糙度和加工遍数之间的关系如图 4b 所示, 加工遍数为 30 遍时, 材料的表面粗糙度最小, 过多的加工遍数会使表面产生过加工效应, 破坏表面结构。表面粗糙度和静压力之间的关系如图 4c 所示, 可见材料的表面粗糙度随着静压力的增大而减小, 因此适当增加静压力可以增大金属表层的光整度, 从而有效降低表面粗糙度。

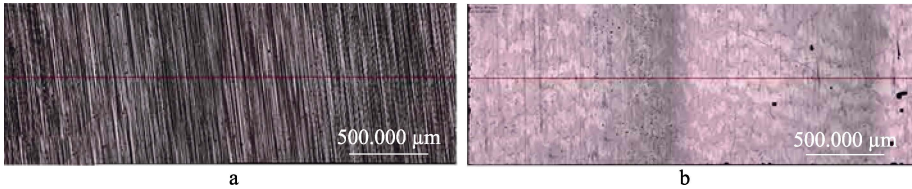


图 3 DD6 合金超声滚压前后 10×放大的表面形貌  
Fig.3 10× enlarged surface morphology of DD6 superalloy before and after ultrasonic rolling

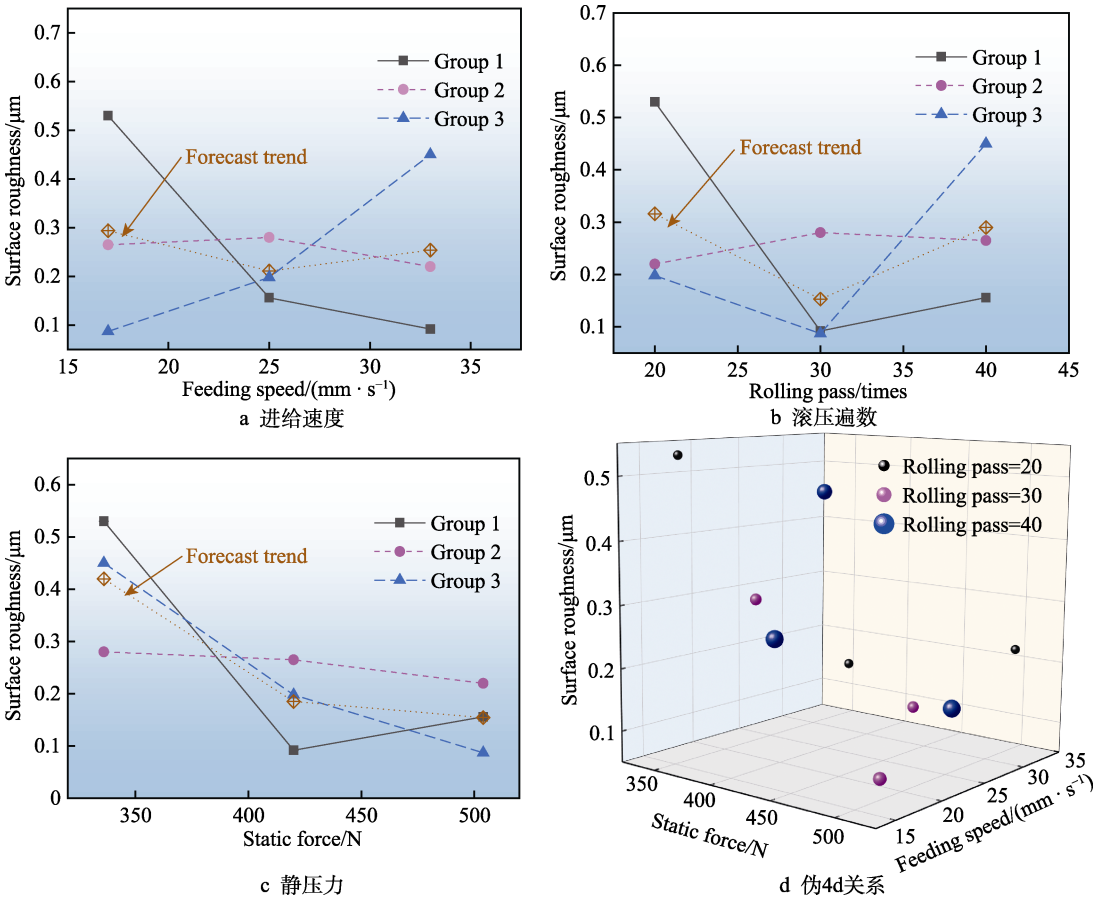


图 4 表面粗糙度与进给速度、滚压遍数、静压力之间的关系  
Fig.4 Relationship between surface roughness and three processing parameters (a) feed speed, (b) rolling passes, (c) static pressure and (d) pseudo 4D relationship between surface roughness and three processing parameters

### 3.2 表面显微硬度及显微组织分析

从图5可以发现,强化试样的硬度均随深度的增大而逐渐减小,强化试样的表面硬度比未强化试样的表面硬度提升了40%。在次表层,材料硬度到达峰值,为645HV。随着深度的继续增大,强化试样的硬度值回复至初始值,这说明超声滚压工艺能在试样次表面形成一层厚度约为400  $\mu\text{m}$ 的变质层。屈盛官等<sup>[28]</sup>也在研究中发现,超声滚压工艺可以在20CrMoH钢的表面形成200  $\mu\text{m}$ 的变质层。

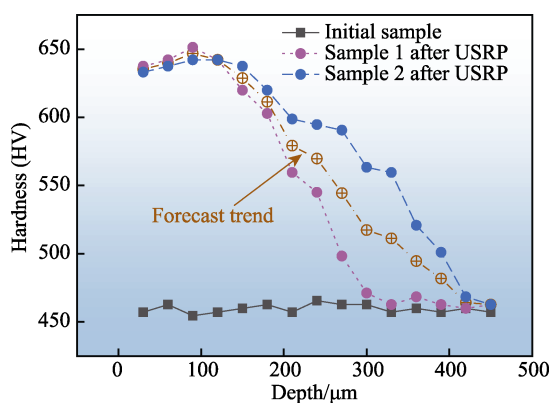


图5 超声滚压处理前后表面显微硬度随深度变化趋势  
Fig.5 Variation Trend of surface microhardness with depth before and after ultrasonic rolling treatment

未强化和强化后试样截面的微观组织 EBSD 图如图6和图7所示。可以看出,经过超声滚压强化后,原始试样的晶粒取向并未发生改变,且从表层至内部区域均未发现明显的晶粒细化现象。陈蔚清等<sup>[29]</sup>在研究中指出,对于多晶材料,强度或硬度随晶粒尺寸的变化通常服从 Hall-Petch 关系,材料硬度和强度的提升是由于内部晶界的位错运动受到阻碍<sup>[30]</sup>,晶界变形的连续性受到限制,导致了表面硬度的提升<sup>[31]</sup>。DD6 高温合金是典型的单晶材料,材料内部没有明显的晶界,这说明对于单晶材料,表面硬度的提升不是来自于内部晶粒间的相互作用,而是来自于试样受到冲击头反复高频冲击后表面形成的一定厚度的堆积变质层。

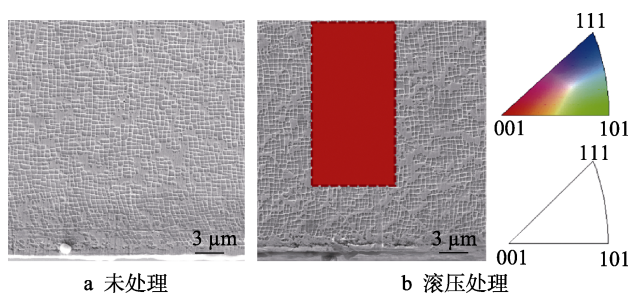


图6 [001]取向未处理和滚压处理试样横截面微观组织及区域 EBSD

Fig.6 Microstructure and EBSD of cross section of [001] (a) untreated sample and (b) rolled sample

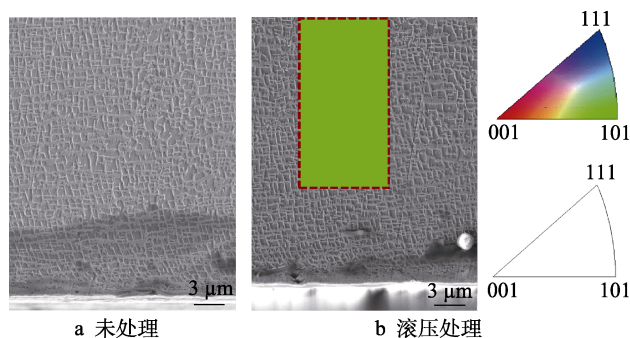


图7 [011]取向未处理和滚压处理试样横截面微观组织及区域 EBSD

Fig.7 Microstructure and EBSD of cross section of sample [011] (a) untreated sample and (b) rolled sample

DD6 合金具有良好的高温强度和稳定的铸造工艺性能,且其断面收缩率较低的特性使其广泛应用于对表面硬度有较高要求的使用场合。材料硬度与进给速度的关系如图8a所示,结果显示,强化试样表面硬度有较大的提高,提升效果较理想的试样,表面硬度从初始的465HV提升至679.2HV,且由预测曲线可知,显微硬度随着进给速度的增大而减小。材料硬度与加工遍数的关系如图8b所示,由预测曲线可知,显微硬度在加工遍数为33次时,效果达到理想值,过量的加工会导致材料表面发生过加工效应,使表面受到破坏,从而降低硬度。材料硬度与静压力的关系如图8c所示,由预测曲线可以看出,显微硬度总体随静压力的增大而减小,但[011]取向的试样依然需要较小的加工参数来保证其表面完整性,抵抗变形能力相比[001]取向的试样较差。镍基单晶材料通过添加Al、Ti等合金元素生成 $\gamma'$ 相进行固溶强化,由起强化作用的 $\gamma'$ 相和基体 $\gamma$ 相有规律地构成<sup>[32]</sup>,这也导致其有单晶合金的固有缺陷,形成了 $\gamma/\gamma'$ 相界。这种晶格结构导致相界处于热力学不稳定状态,在经过USRP工艺后,促进了相界在服役过程中产生位错,进而抵消合金受到的拉应力,从而有利于提高高温合金的性能。

### 3.3 表面残余应力分析

表面残余应力与进给速度的关系如图9a所示。可以看出,残余应力的绝对值随进给速度的增大而增大,残余应力绝对值最大为835.7 MPa,最小为725.7 MPa。表面残余应力与加工遍数的关系如图9b所示。可以看出,残余应力随加工遍数的增大而先减小、后增大,这是因为加工遍数的增加会加剧表面的塑性变形发生,由塑性变形引入的残余应力也随之增大。当加工遍数从20遍增大至30遍时,残余应力值没有发生较大的变化,当继续增加至40遍时,残余应力增大了77 MPa。表面残余应力与静压力的关系如图9c所示,静压力的增大导致预测曲线中的残余应力绝对值从824 MPa降低至750 MPa,下降趋势在第3组参数中较为明显,静压力的增大使试样表面残

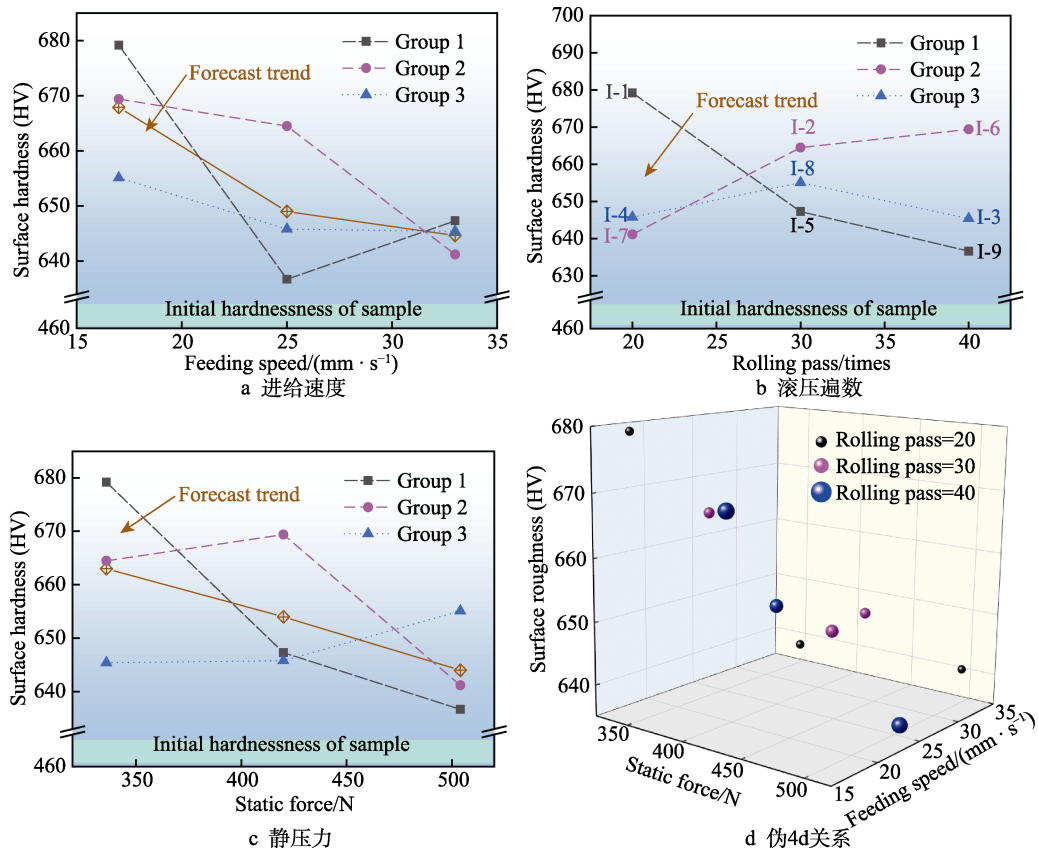


图 8 表面显微硬度与进给速度、滚压遍数、静压力之间的关系

Fig. 8 Relationship between surface microhardness and (a) feed speed, (b) rolling passes, (c) static pressure, and (d) pseudo-4D relationship between surface microhardness and three processing parameters

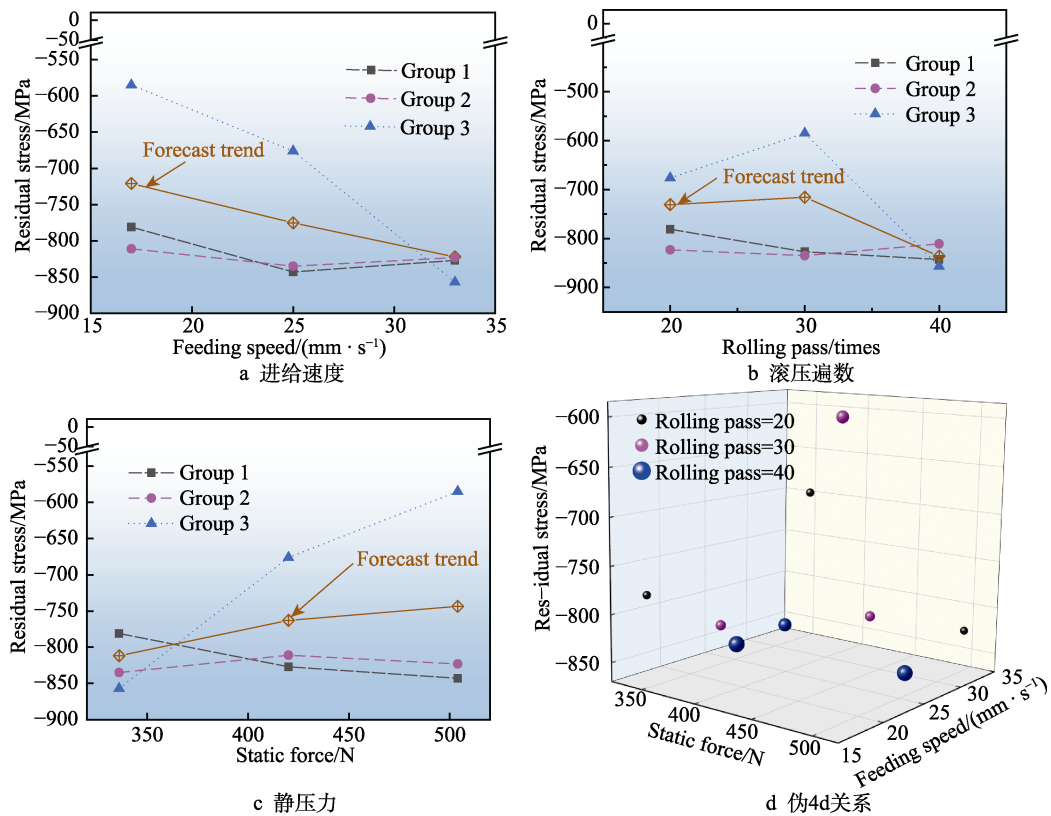


图 9 表面残余应力与进给速度、滚压遍数、静压力之间的关系

Fig. 9 Relationship between surface residual stress and (a) feed speed, (b) rolling passes, (c) static pressure, and (d) pseudo-4D relationship between surface residual stress and three processing parameters.

余应力绝对值降低了 272 MPa, 这一差值在 3 组参数中最大。材料表面残余应力受到取向的影响不大, 不同取向试样间的变化范围均在 50 MPa 内。

材料表面经过强化后会引入残余应力, 若经过一段时间的自然放置或受载后, 残余应力也会逐渐释放<sup>[33-34]</sup>, 残余应力层越厚, 材料的有效残余应力释放得越慢, 强化效果也就越好。因此, 使用逐层减薄法对强化试样沿深度方向测量残余应力, 结果如图 10 所示。材料表面的残余应力绝对值为 600 MPa, 随着深度逐渐变大, 峰值残余应力出现在距离表面 65  $\mu\text{m}$  处, 大小为 1 275 MPa。随着深度继续增大, 残余应力逐渐降低至 0 MPa, 残余应力层厚度约为 420  $\mu\text{m}$ 。残余应力层的厚度范围与图 5 中硬度层的厚度范围一致, 这说明变质层与残余应力层在提升材料表面完整性上起到类似的作用, 均由受到强化后表面组织的塑性变形导致。

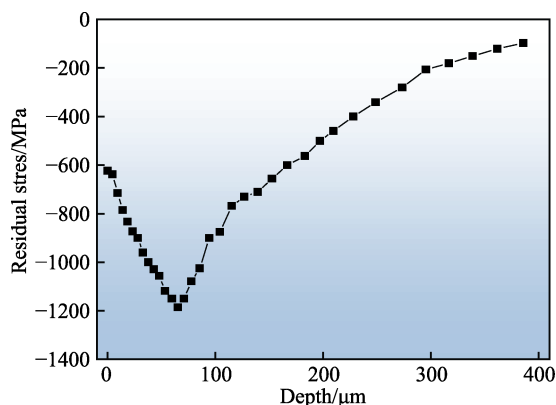


图 10 强化试样残余应力沿深度方向的分布  
Fig.10 Distribution of residual stress along the depth of the USRP sample

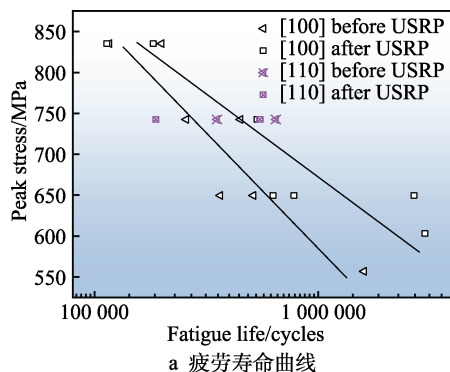
### 3.4 疲劳寿命分析

根据上述章节不同参数对表面质量的影响, 选取较大的静压力 (504 N)、较小的进给速度 (17 mm/s) 和适当的加工遍数 (30 遍) 对试样进行 USRP 处理,

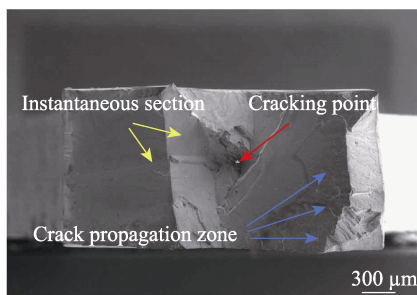
用于高温疲劳试验。未强化和强化试样在不同应力下加载的疲劳寿命曲线如图 11 所示。可以看出, 当应力水平较高时, 试样的强化效果不明显, 甚至还有小幅的负增长。当应力下降至 742.4 MPa, 强化试样的疲劳寿命提升了 30%。当应力幅值下降至 649.6 MPa 时, 强化试样的疲劳寿命提升较为明显, 提升了 50%。综上所述, 说明当应力水平较大时, 试样在经过超声滚压强化后, 疲劳寿命没有明显提升; 在低应力水平下加载时, 超声滚压工艺对试样疲劳寿命的提升作用较为明显。未强化和强化试样的疲劳断口形貌如图 11b、c 所示。可以发现, 未强化试样从中间起裂, 并存在多个瞬断面, 说明对于 DD6 材料, 突然的脆性断裂是其主要的疲劳失效方式; 强化试样沿边缘出现了大面积的裂纹扩展区, 且在内部发现多个解理台阶, 这是解理断裂的特征。由此可以发现, USRP 工艺降低了 DD6 材料出现脆断的可能, 并延缓了裂纹的扩展速度, 延长了其疲劳寿命。

由前述章节的描述可知, 单晶材料表现出较大的强度, 但韧性较差, 因此不同取向合金的疲劳断口形貌基本相同, 都由平面构成, 在断口上可见断裂平面、裂纹扩展区和瞬断区等特征。由单晶高温合金的滑移变形机制可知, 断面主要沿 {111} 面进行滑移<sup>[35]</sup>, 且其滑移断裂平面均与试样中心的应力轴线呈一定角度。由于在进行疲劳试验时, 试样外层最先承受疲劳应力作用, 所以疲劳裂纹一般起源于试样最外层存在缺陷或疏松等存在应力集中的位置。经强化后, 塑性变形层的强度更大, 这也导致强化试样的疲劳寿命高于未强化试样。当疲劳裂纹在试样外层萌生后, 将沿着 {111} 平面逐渐扩展, 且从疲劳带的特征上可以大致得出裂纹的扩展趋势。随着疲劳应力继续作用, 试样内部的裂纹开始向另一边扩展, 直至断裂。当达到合金的有效疲劳极限时, 试样发生断裂。

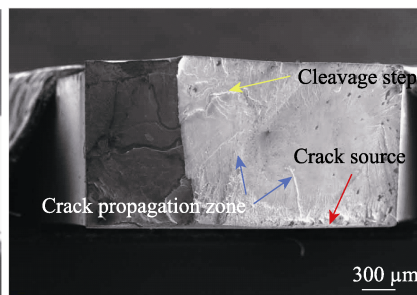
从图 12 及图 13 中可以看出, 不同取向 DD6 合金的疲劳断口特征基本相同, 试样的断口整体均较为平整, 且部分区域经放大后观察到明显的台阶和撕裂棱轨迹, 并在每个撕裂棱周围均匀分布着河流纹状条



a 疲劳寿命曲线



b 未强化试样断口形貌



c 强化试样断口形貌

图 11 未强化试样和强化试样疲劳寿命曲线及试样断口形貌

Fig.11 Fatigue life profiles and fracture surfaces of unstrengthened samples and strengthened samples: a) fatigue life profiles; b) fracture surfaces of unstrengthened samples; c) Fracture surfaces of strengthened samples

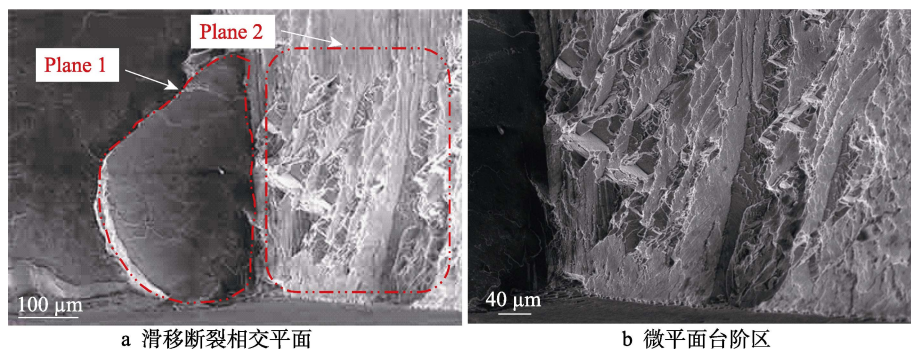


图 12 高周疲劳断裂中的相交平面断裂

Fig.12 Intersecting plane fracture in high cycle fatigue fracture: a) intersection plane of slip fracture; b) micro flat step area

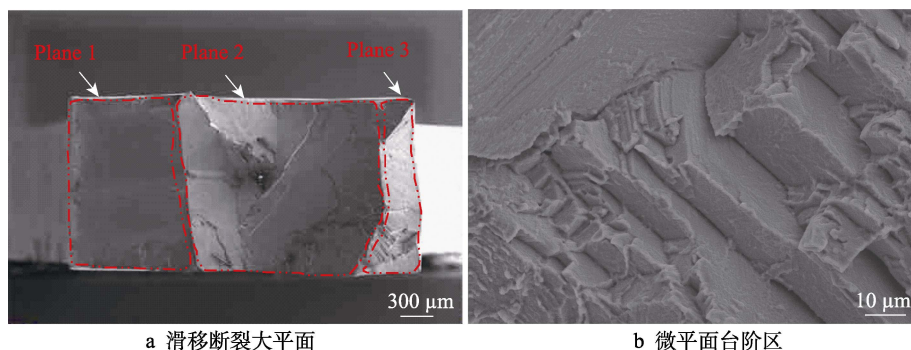


图 13 高周疲劳断裂中的大平面断裂

Fig.13 Large plane fracture in high cycle fatigue fracture: a) large plane of slip fracture; b) micro flat step area

带<sup>[36]</sup>。结合试样切制方向及疲劳试验应力拉伸方向得知, 试样的断面均属于 FCC 结构中的 $\{111\}$ 面, 裂纹沿 $\{111\}$ 平面随机发生扩展, 且滑移线的轨迹与切面大多呈  $60^\circ$ 。在撕裂棱即 2 个平面分界线的周围散布着台阶状的微平面, 大多数疲劳裂纹均起源于由 $\{111\}$ 等大晶面组成的微结构裂纹萌生部位。裂纹起始的大晶面大致可以分为 2 种类型: 单一的大平面和由 2 个小平面组合而成的相交面。这些包含类似解理台阶的规则平面实际为 DD6 单晶在受载过程中断裂产生的滑移现象<sup>[37]</sup>。对于绝大多数 FCC 金属材料 and 铁素体材料, 在高温下加载时, 晶格间的抗滑移能力减小, 加剧了弱滑移系的开动, 而且由于单晶合金的剪切强度小于拉伸强度<sup>[38]</sup>, 导致 FCC 金属在任意温度下都容易发生滑移。因此, 对于镍基单晶合金, 在 $\{111\}$ 面上发生的准解理滑移断裂是疲劳断裂中较为常见的失效机制。

## 4 结论

本文选取 3 个主要的加工参数研究了 USRP 加工工艺对不同取向镍基单晶高温合金表面粗糙度、表面显微硬度、表面残余应力和疲劳寿命的影响规律, 得出以下主要结论。

1) 经 USRP 工艺加工后, DD6 材料表面被分为 3 个区域: 塑性变形区、微变形区和未影响区。材料的晶体取向没有发生变化, 且没有出现晶粒细化现

象。因塑性变形在材料表面引入了一定厚度的堆积变质层, 此变质层是提高材料表面完整性的主要因素。

2) 经 USRP 进行处理后, 不同取向的 DD6 材料的表面完整性均有明显提高。试样经加工后, 能获得的理想效果: 表面粗糙度从  $0.703 \mu\text{m}$  降低至  $0.253 \mu\text{m}$ , 降低了 64%; 表面显微硬度从 465HV 提高至 679.2HV, 提高了 40%; 试样表面引入了 782 MPa 残余应力, 沿深度方向残余应力绝对值最大为 1 275 MPa, 最大残余应力位于距试样表面  $65 \mu\text{m}$  处。

3) 未强化和强化试样的疲劳断口较为平整, 没有明显的韧性断裂特征, 均以沿 $\{111\}$ 面发生的滑移断裂为主。应力水平较高时, 超声滚压强化对 DD6 材料的疲劳寿命没有较大的提升, 反而有一定的降幅; 当应力水平为 742.4 MPa 时, 超声滚压强化后, 试样的疲劳寿命提升至 1.3 倍; 应力水平为 649.6 MPa 时, 超声滚压强化后, 试样的疲劳寿命提升至 1.5 倍。

## 参考文献:

- [1] LIU Y, ZHOU H, WU M M, et al. Coating-Related Deterioration Mechanism of Creep Performance at a Thermal Exposed Single Crystal Ni-Base Superalloy[J]. Materials Characterization, 2022, 187: 111839.
- [2] PEI H Q, YANG Y Z, GU S N, et al. Study on Oxidation-Creep Behavior of a Ni-Based Single Crystal Superalloy Based on Crystal Plasticity Theory[J]. Mate-

- rials Science and Engineering: A, 2022, 839: 142834.
- [3] WANG G Y, ZHANG S, TIAN S G, et al. Microstructure Evolution and Deformation Mechanism of a [111]-Oriented Nickel-Based Single-Crystal Superalloy during High-Temperature Creep[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 495-504.
- [4] LI S F, CHEN S L, REN S Y. Structural Optimization of Single Crystal Turbine Blade Based on Recrystallization Critical Stress[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2364(1): 012015.
- [5] 陈景阳, 荆甫雷, 杨俊杰. 镍基单晶高温合金热机械疲劳行为与寿命建模[J]. 航空动力学报, 2021, 36(5): 897-906.
- CHEN J Y, JING F L, YANG J J. Thermo-Mechanical Fatigue Behavior and Life Modelling in Nickel Based Single Crystal Superalloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(5): 897-906.
- [6] 刘欢, 张开阔, 佟文伟, 等. DD6 合金涡轮叶片裂纹失效分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(6): 87-91.
- LIU H, ZHANG K K, TONG W W, et al. Crack Failure Analysis of Turbine Blade of DD6 Alloy[J]. Aeroengine, 2020, 46(6): 87-91.
- [7] ZHANG R G, WANG B J, WANG J B, et al. Wind Turbine Blade Failure Case Analysis and Control Measures[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2047(1): 012014.
- [8] KUMAR A, ENSHA S, IRVIN J F, et al. Liquid Metal Corrosion Fatigue (LMCF) Failure of Aircraft Engine Turbine Blades[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2018, 18(4): 939-947.
- [9] 初铭强, 丁仁根, 张书彦, 等. 航空零部件加工表面完整性[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7183-7189.
- CHU M Q, DING R G, ZHANG S Y, et al. Surface Integrity for Machining Aerospace Parts[J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7183-7189.
- [10] MOTTURA A, FINNIS M W, REED R C. On the Possibility of Rhenium Clustering in Nickel-Based Superalloys[J]. Acta Materialia, 2012, 60(6/7): 2866-2872.
- [11] CHEN L, WANG Z S, GAO S, et al. Investigation on Femtosecond Laser Shock Peening of Commercially Pure Copper without Ablative Layer and Confinement Layer in Air[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108207.
- [12] FU W J, HUANG Y J, SUN J F, et al. Strengthening CrFeCoNiMn<sub>0.75</sub>Cu<sub>0.25</sub> High Entropy Alloy via Laser Shock Peening[J]. International Journal of Plasticity, 2022, 154: 103296.
- [13] 孙银莎, 贾云飞, 苑光健, 等. 超声表面滚压加工纯钛梯度材料的力学性能反演与有限元分析[J]. 机械工程材料, 2021, 45(10): 58-65.
- SUN Y S, JIA Y F, YUAN G J, et al. Inversion and Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Pure Titanium Gradient Material by Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(10): 58-65.
- [14] DAI Y Z, KANG L X, HAN S, et al. Surface Hardening Behavior of Advanced Gear Steel C61 by a Novel Solid-Solution Carburizing Process[J]. Metals, 2022, 12(3): 379.
- [15] 高玉魁. 喷丸强化对 DD6 单晶高温合金高温旋转弯曲疲劳性能的影响[J]. 金属热处理, 2009, 34(8): 60-61.
- GAO Y K. Influence of Shot Peening on High Temperature Rotating Bending Fatigue Property of DD6 Single Crystal Superalloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(8): 60-61.
- [16] 王欣, 尤宏德, 赵金乾, 等. 喷丸对 DD6 单晶合金高温疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 21-24.
- WANG X, YOU H D, ZHAO J Q, et al. Influence of Shot-Peening on the High-Temperature Fatigue Property of DD6 Single Crystal Superalloy[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(3): 21-24.
- [17] BAO L, LI K, ZHENG J Y, et al. Surface Characteristics and Stress Corrosion Behavior of AA 7075-T6 Aluminum Alloys after Different Shot Peening Processes[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 440: 128481.
- [18] 梁志强, 陈一帆, 栾晓圣, 等. 超高强度钢强力滚压残余应力仿真与试验研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 413-421.
- LIANG Z Q, CHEN Y F, LUAN X S, et al. Simulation and Experimental Study on Residual Stress of Ultra-High Strength Steel under Powerful Rolling[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 413-421.
- [19] TEIMOURI R, AMINI S, GUAGLIANO M. Analytical Modeling of Ultrasonic Surface Burnishing Process: Evaluation of Residual Stress Field Distribution and Strip Deflection[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 747: 208-224.
- [20] DONG Z H, WANG F, QIAN D S, et al. Enhanced Wear Resistance of the Ultrastrong Ultrasonic Shot-Peened M50 Bearing Steel with Gradient Nanograins[J]. Metals, 2022, 12(3): 424.
- [21] TEIMOURI R. Optimization of Residual Stress Field in Ultrasonic Assisted Burnishing Process[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2019, 2(4): 346-354.
- [22] LI F Q, ZHAO B, LAN S L, et al. Experiment and Simulation of the Effect of Ultrasonic Rolling on the Surface Properties of Ti-6Al-4V[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5): 1893-1900.
- [23] JOHN M, RALLS A M, DOOLEY S C, et al. Ultrasonic Surface Rolling Process: Properties, Characterization, and Applications[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10986.
- [24] REN Z H, LI Z H, ZHOU S H, et al. Study on Surface Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy by Ultrasonic Rolling[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 121: 102643.
- [25] 席刚, 刘元铭, 张跃飞, 等. 超声振动滚压加工参数对 TC4 钛合金表面质量的影响[J]. 塑性工程学报, 2020,

- 27(4): 61-67.
- XI G, LIU Y M, ZHANG Y F, et al. Effect of Ultrasonic Vibration Rolling Processing Parameters on Surface Quality of TC4 Titanium Alloy[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(4): 61-67.
- [26] KHARCHENKO V, KATOK O, SEREDA A, et al. Determination of Strength Characteristics of High-Strength Sheet Steels by Hardness and Instrumented Indentation[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 36: 277-283.
- [27] MOHARRAMI R, SANAYEI M. Developing a Method in Measuring Residual Stress on Steel Alloys by Instrumented Indentation Technique[J]. *Measurement*, 2020, 158: 107718.
- [28] 屈盛官, 吴志兵, 张亚龙, 等. 超声表面滚压加工对 20CrMoH 钢摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(2): 211-222.
- QU S G, WU Z B, ZHANG Y L, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling on Friction and Wear Properties of 20CrMoH Steel[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(2): 211-222.
- [29] 陈蔚清, 徐观明, 崔紫依, 等. 超声滚压处理 7B85 合金的显微组织和力学性能[J]. *有色金属科学与工程*, 2021, 12(6): 80-87.
- CHEN W Q, XU G M, CUI Z Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 7B85 Alloy Ultrasonic Rolling Treated 7B85 Alloy[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2021, 12(6): 80-87.
- [30] REISER J, HARTMAIER A. Elucidating the Dual Role of Grain Boundaries as Dislocation Sources and Obstacles and Its Impact on Toughness and Brittle-to-Ductile Transition[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 2739.
- [31] 庄伟彬, 田宗伟, 刘广柱, 等. 原位自生 TiCp/6061 复合材料的组织、硬度及耐磨性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(22): 3762-3767.
- ZHUANG W B, TIAN Z W, LIU G Z, et al. Microstructure, Hardness and Wear Resistance Properties of In-Situ TiCp/6061 Composites[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(22): 3762-3767.
- [32] ZHANG J C, LU F, ZHANG C, et al. On the Tungsten Segregation at  $\gamma/\gamma'$  Interface in a Ni-Based Single-Crystal Superalloy[J]. *Vacuum*, 2022, 197: 110863.
- [33] LIU Z, WANG S H, FENG Y J, et al. Residual Stress Relaxation in the Carburized Case of Austenitic Stainless Steel under Alternating Loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 159: 106837.
- [34] 张聪惠, 宋薇, 朱姗姗, 等. 循环载荷下表面强化工业纯铝残余应力释放研究[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.
- [35] WAN J S, YUE Z F. A Low-Cycle Fatigue Life Model of Nickel-Based Single Crystal Superalloys under Multiaxial Stress State[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 392(1/2): 145-149.
- [36] ORGAN F E, GELL M. The Effect of Frequency on the Elevated Temperature Fatigue of a Nickel-Base Superalloy[J]. *Metallurgical Transactions*, 1971, 2(4): 943-952.
- [37] WELLS C H, SULLIVAN C P. The Low Cycle Fatigue Characteristics of a Nickel-Base Superalloy at Room Temperature[J]. *ASM-Trans*, 1964, 57: 841-855.
- [38] HEALY J C, GRABOWSKI L, BEEVERS C J. Monitoring Fatigue of a Nickel-Base Superalloy at Positive and Negative Stress Ratios Using an Optical System[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1992, 15(3): 309-321.