

表面强化及功能化

# TC17 钛合金激光冲击温强化机制的研究

陆莹, 赵吉宾, 乔红超, 孙博宇

(中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

**摘要:** **目的** 提高材料在交变载荷和高温下的疲劳性能, 稳定材料的位错结构, 增加位错的钉扎效果, 使激光诱导的残余压应力更加稳定, 有效地抑制强化效果的高温失稳。**方法** 通过提高温度发生动态应变时效 (DSA), 并与激光冲击温强化 (WLSP) 结合, 使得材料表面形成更深的残余应力层和纳米级沉淀相。对 TC17 钛合金温控激光冲击强化后的显微硬度、残余应力等性能进行了初步探索。**结果** 经 200 °C 的 WLSP 后, TC17 钛合金的显微硬度可达 385HV, 相比未强化时提高了 18.48%, 相比于室温的 LSP 提高了 4.62%。深度方向的残余压应力幅值呈现先增大后减小的趋势, 200 °C 时残余应力达到 -236 MPa, 相比于常温强化提高了 14.56%。观察微观组织发现, 位错结构的稳定性和位错密度得到提高。**结论** 激光冲击温强化 (WLSP) 技术提高了材料表面残余压应力层的高温稳定性, 有利于抑制疲劳裂纹的萌生和扩展, 有效地提高了高温条件下残余应力和表面强度的稳定性。该技术操作相对简单, 无污染, 残余应力高温维稳效果显著。

**关键词:** 激光冲击温强化; 残余应力; 位错; 动态应变时效; 疲劳; 热处理

**中图分类号:** TG174.4; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0001-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.001

## Strengthening Mechanism of TC17 Titanium Alloy Warm Laser Shock Peening

LU Ying, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, SUN Bo-yu

(Shenyang Institute of Automatic, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve fatigue properties of materials under alternating load and at high temperature, stabilize dislocation structure of materials. The pinning effect of dislocation was significantly enhanced, laser induced residual compressive stress was more stable, and high temperature instability of peening effect was effectively inhibited. Deeper residual stress layer and nanoscale precipitated phase were generated on the surface of materials by combining dynamic strain aging (DSA) (due to temperature rise) and warm laser shock peening (WLSP), which led to deeper residual stress layer and nanoscale precipitate. After WLSP at 200 °C, microhardness of TC17 titanium alloy could reach 385HV, increased by 18.48% compared with that of original alloy, and 4.62% compared with that of alloy receiving LSP at room temperature. Residual compressive stress amplitude in depth direction first increased and then decreased, residual stress reached -236 MPa at 200 °C, increased by 14.56%, compared with that receiving peening at normal temperature. Microstructure observation results showed that both stability and dislocation density of the dislocation structure were improved. High-temperature stability of residual compressive stress layer on the surface of materials is enhanced by WLSP technology, initiation and expansion inhibition of fatigue cracks are facilitated, stability of residual stress and surface strength at high temperature is effectively improved. Warm laser shock peening

收稿日期: 2017-09-16; 修订日期: 2017-10-25

Received: 2017-09-16; Revised: 2017-10-25

基金项目: 国家基金委-辽宁省联合基金 (U1608259)

Fund: NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259)

作者简介: 陆莹 (1987—), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为激光表面处理。

Biography: LU Ying (1987—), Female, Master, Assistant researcher, Research focus: laser surface treatment.

technology is relatively easily operated, pollution-free, and plays a significant role in maintaining stability of residual stress at high temperature.

**KEY WORDS:** warm laser shock peening (WLSP); residual stress; dislocation; dynamic strain aging; fatigue; heat treatment

据统计,我国航空发动机故障中 40%是由疲劳断裂引起的,其中大部分是由涡轮发动机失效以及抗异物损伤能力较差导致的。航空发动机零件(锻造钛风扇、压气机盘和叶片)一般处在高温和交变载荷的环境中,易出现蠕变损伤、疲劳断裂、应力腐蚀与摩擦磨损等失效情况,可能会造成严重的经济损失和人员伤亡。失效多数始于表面,因此高温状态下表面的状态决定了材料的整体服役性能。

激光冲击强化是一种提高金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀能力的高新技术,具有非接触、无热影响区、可控性强以及强化效果显著等突出优点。作为目前最先进、效果最好、效率最高的表面改性技术之一,激光冲击强化广泛地应用于航空航天、军事国防、汽车船舶、核工业、石油化工等领域,1998 年该技术被美国研发杂志评为全美 100 项最重要的先进技术之一。美国 20 世纪 90 年代开始的航空发动机高频疲劳研究计划,将激光冲击强化列为首位工艺技术措施。2005 年, MIC 公司通过研制激光冲击强化系统获得了美国国防制造最高成就奖。美国将激光冲击强化技术列为第四代战斗机发动机关键技术之一,足见该项技术的重大价值。

目前,激光冲击强化技术已经成功地应用在航空发动机冷端叶片的表面加工中,该技术使冷端处发动机的使用寿命提高了 3 倍以上,有效地增强了表面的抗异物损伤能力。但是通过大量的试验并结合发动机实际使用过程中存在的问题发现,在高温条件下(200℃以上)保温或者施加交变载荷时,激光冲击强化后形成的残余压应力会部分释放,若加载时间较长或温度较高,残余应力几乎全部消失。这就意味着,激光冲击强化技术很难实现航空发动机热端和交变载荷条件下叶片的长时间延寿。Altenberger 等<sup>[1]</sup>通过透射电镜研究激光冲击强化后 AISI304 钢和 Ti64 钛合金的微观组织演变后发现,550~600℃时表面的残余压应力与常温下的接近,疲劳寿命大幅下降。O. Vohringer 等<sup>[2]</sup>在 20~410℃时对 AISI4140 不锈钢进行了喷丸试验,不仅提高了残余应力的高温稳定性和疲劳强度,而且发现在 320℃下喷丸可以得到更加稳定的位错组态,在交变载荷条件下,循环屈服强度提高,疲劳性能更加优越,有效地抑制了疲劳裂纹的萌生和扩展。Harada 等<sup>[2]</sup>发现在 200℃条件下进行喷丸,弹簧钢的近表面残余压应力和显微硬度达到最高。2010 年美国普渡大学 Ye 等<sup>[3]</sup>提出了一种结合动态应变时

效激光冲击强化工艺,该工艺有效地增加了激光诱导残余压应力的高温稳定性,提高了交变载荷下的疲劳寿命。

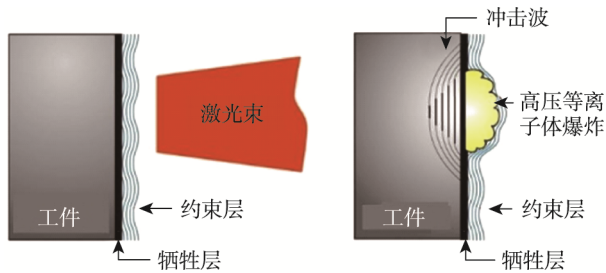
中国科学院沈阳自动化所多年致力于研究激光冲击强化成套装备和配套工艺,为中航工业沈阳黎明航空发动机有限责任公司开发的整体叶盘激光冲击强化设备已投入使用。强化的整体叶盘已经装机试用,这标志着中国激光冲击强化技术向工程化应用迈出了重要一步。考虑到黎明公司实际试用后反馈提出了航空发动机热端叶片(交变载荷)残余应力损耗等实际问题,并结合普渡大学的研究成果,我们开展了高温下激光冲击强化的试验研究。该研究通过提高温度来发生动态应变时效,在激光冲击过程中形成更深的残余应力层,高温环境下生成纳米级沉淀相,显著地增加位错的钉扎效果,提高位错结构的稳定性和位错密度。激光诱导残余压应力更加稳定,有效地抑制了强化效果的高温失稳,进而有效地提高了材料表面残余压应力层的高温稳定性。激光冲击温强化技术操作相对简单,无污染,残余应力高温维稳效果显著。

## 1 激光冲击温强化机理

激光冲击温强化(WLSP)是一种新型的热处理工艺,结合激光冲击强化(LSP)和动态应变时效(DSA),在金属表面生成纳米沉淀相,并引入高密度的位错排列,实现材料在高温和交变载荷下残余应力的维稳。

### 1.1 激光冲击强化机制

不同于喷丸、滚压、内挤压等多种表面强化工艺,激光冲击强化是利用高功率密度(GW 量级)、短脉冲(10 ns 量级)的激光束来通过金属靶材的透明约束层,约束层吸收激光能量产生等离子冲击波。当短脉冲、高能量密度的激光辐照金属表面时,金属表面的吸收层吸收激光能量,发生爆炸性汽化,形成高温、高压的等离子体冲击波(>1 GPa)。该冲击波的峰值压力大于材料本身的屈服强度,因此在材料表面发生局部塑性变形,塑性变形能积累作用于金属表面,并向内部传播。激光冲击强化原理示意图见图 1。冲击区域会产生平行于材料表面的拉应力,同时由于周围晶粒的限制,变形区域会产生 1~2 mm 有益的残余压应力层,该压应力层有效地缓解了由其他加工形式

图 1 激光冲击强化原理示意图<sup>[4]</sup>Fig.1 Schematic diagram of laser shock peening principle<sup>[4]</sup>

产生的有害拉应力。积累的残余压应力可以抵消交变载荷下拉应力作用,抑制疲劳裂纹的萌生,达到提高材料疲劳寿命的目的。残余压应力还可以诱发疲劳裂纹的闭合效应,降低裂纹扩展的驱动力<sup>[5]</sup>。

激光冲击强化起到了加工硬化的作用,导致微观组织和晶体结构发生了变化。通过对其微观结构进行透射电镜观察,并与未进行冲击的试样进行对比分析可以看出,激光冲击强化可以有效地提高受冲击表面的位错密度。激光冲击强化微观机制如图 2 所示。位错运动受阻,位错线塞积,导致位错缠结,位错受到晶界的阻碍后在晶界堆积,形成位错墙,位错墙与位错缠结,最终导致亚晶界的形成,从而有效地延长了零件的疲劳寿命<sup>[5,6]</sup>。

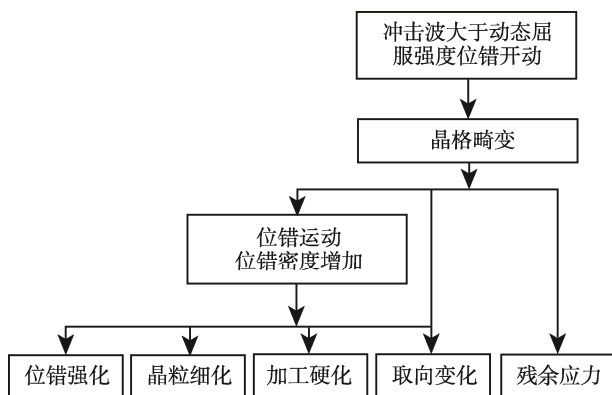


图 2 激光冲击强化微观机制

Fig.2 Micro-mechanism of laser shock peening

## 1.2 动态应变时效和动态析出

动态应变时效 (DSA) 和动态析出 (DP) 都能够有效提高金属材料的微观结构稳定性,其中 DSA 可增加由变形产生的位错密度。在 150~300 °C 时,钢中碳原子和氮原子的扩散有利于位错形核,动态应变时效过程中溶质原子对位错的钉扎作用会导致加工硬化。在 DSA 温度时,位错在 C 和 N 溶质原子处形核,形成所谓的 Cottrell 气团, Cottrell 气团可以对位错施加钉扎作用并抑制位错的运动。随着塑性变形的增加,形成新的位错,位错密度进一步提高。DSA 导致纳米级碳化物沉淀相的生成,位错的钉扎效果显著增加,位错结构的稳定性提高,激光诱导残余压应

力更加稳定,交变载荷下疲劳寿命提高。Chen 等<sup>[7]</sup>在 AISI304 钢的 DSA 温度下对其进行塑性变形,有效地提高了其疲劳寿命。Kerscher 等在接近 DSA 温度 (335 °C) 时将 SAE 52100 的疲劳极限大幅提高<sup>[8]</sup>。Juijerm 等发现铝合金较高温度下加工后,其疲劳性能较常温下提高更多。

与动态应变时效 (DSA) 不同,动态析出 (DP) 是指在高温塑性变形过程中会有大量的纳米级沉淀相析出。由塑性变形所产的位错会对沉淀相的析出产生积极作用,与静态析出相比,动态析出更加有利于加工硬化。反过来,较高的位错密度可以为动态沉淀相提供更多潜在的形核机会,也即是动态应变时效可以增强动态析出效果。

激光冲击强化过程本质上就是材料表面发生塑性变形的过程,其强化效果可以通过动态应变时效 (DSA) 和动态析出 (DP) 得到进一步优化。Liao 等<sup>[7]</sup>提出了一种可以解释 WLSP 中超高纳米沉淀相生成过程的理论,确定高应变速率和高温下位错组态变化是决定 WLSP 最重要的 2 个工艺参数。Ye 等<sup>[3]</sup>在对 AISI4140 钢进行 WLSP 强化后发现,相比于常温 LSP, WLSP 强化会产生更加稳定的位错结构,并在其周围发现大量纳米析出物,有效地抑制了残余应力在交变载荷作用下的释放,并且通过试验验证得到,激光功率密度和温度是影响 WLSP 最重要的 2 个工艺参数。

## 1.3 WLSP 位错组态变化

美国普渡大学 Ye 和 Liao 经过多年研究提出<sup>[7,8]</sup>,这种结合激光冲击强化 (LSP) 和动态应变时效 (DSA) 的强化工艺,可在金属表面生成纳米沉淀相,并引入高密度的位错排列,可以大幅度提高疲劳载荷条件下 6061-T6 铝合金的使用寿命,并提出了高温激光冲击强化诱导纳米析出物形核理论<sup>[8]</sup>。后又针对 AISI4140 钢进行激光冲击温强化,发现该过程引入了更为复杂的位错形态,高密度的位错和复杂的位错缠结导致表面发生了动态应变时效,该结果对强化过程中微观组织的变化和残余应力的维稳起到了积极作用,高温及交变载荷条件下的疲劳寿命得到了极大提高。这是因为 WLSP 增加了位错密度和起到钉扎作用的碳原子数,形成了稳定的位错结构。

由于材料的阻尼性能与位错密度成正比, WLSP 诱导产生更高的位错密度,材料内部的塑性变形可以消散更多的能量,因此 WLSP 可使材料的阻尼性能提高。在 WLSP 试样中,发现了更为复杂的位错结构,如位错线、位错孪晶、位错缠结、位错墙和亚晶界。

## 1.4 晶粒细化作用

激光冲击温强化可以导致大量纳米沉淀相的生

成,并且研究其晶粒组织发现, LSP 与 WLSP 都可以导致晶粒细化。根据霍尔-佩琪公式,晶粒越小,其屈服强度越高,因此材料的硬度和强度会随着晶粒的变小而增大。晶粒细化可以有效地抑制表面裂纹的萌生,疲劳裂纹扩展路径更加曲折,从而有助于提高材料的疲劳寿命。

### 1.5 残余应力与疲劳性能

相比于常温激光冲击强化, WLSP 过程中会产生纳米沉淀相和更为稳定的位错组态,以塑性变形能和弹性变性能的形式续存更多的能量<sup>[9]</sup>,这些能量便以残余应力的形式保存在材料表面。常温 LSP 得到的有效残余应力层大概在 1 mm 左右,而 WLSP 得到的有效残余应力层可达 1.4 mm<sup>[10]</sup>,这就意味着在交变载荷下, WLSP 的残余应力更难释放,从而可以有效地抑制疲劳载荷下的裂纹萌生。一般情况下,激光温强化得到的残余压应力的幅值会随着温度的上升呈现先升高后降低的趋势<sup>[11,12]</sup>,且温度对残余压应力释放的速度影响规律与之相同。

激光温强化后,交变载荷和高温条件下的疲劳寿命明显提高,通过观察疲劳断口发现,裂纹萌生的位置加深,裂纹扩展路径更为曲折<sup>[13]</sup>,疲劳条纹带间距变小,疲劳性能得到优化。

### 1.6 有限元模拟

激光温强化属于一个热力耦合瞬时动态过程,利用三维有限元模型分析强化后的应力应变行为,并形成强化后残余应力的分布。江苏大学周建忠等<sup>[14,15]</sup>利用 Abaqus 中动态 Explicit 模块分析,建立了激光冲击波与温度场的动态响应,通过增大阻尼的方法使动态分析趋于稳定,研究了激光功率密度和温度对表面残余应力的影响,得到一个稳定的残余应力场和应力的分布特征曲线。研究发现,模拟结构与试验结果基本一致,但是幅值略微降低。这主要是由于测试过程中存在必要的能量衰减,且激光温强化后得到的残余应力与显微硬度更大。

分子动力学(MD)可实现在原子尺度上对位错结构及其演变过程进行模拟分析,由于嵌入原子时考虑,不为零的堆垛层错更适合研究激光冲击强化过程中的冲击波动态响应,因此可以利用分子动力学对 WLSP 过程进行位错组态变化分析。孟宪凯等<sup>[16]</sup>利用分子动力学研究了激光温强化对单晶铜加工过程中位错的萌生和扩展的影响,并研究了变形量对位错扩展的影响,发现激光温强化过程中,塑性变形是以“空位簇—不全位错—对多层错”的方式诱导位错演变的,温度可以有效地促进冲击波作用下塑性变形的形核和扩展,塑性变形的增加直接导致温强化的加工硬化效果。利用数值模拟并结合试验的方法,可以为实

验提供依据和理论研究基础,降低科研成本,为实际工业生产提供依据。

本文对 TC17 钛合金进行温控冲击强化工艺探索,研究不同温度下强化后的显微硬度与残余应力,并对其微观组织位错变化过程进行分析。

## 2 实验材料和方法

### 2.1 材料预处理

用线切割将 TC17 钛合金分割,之后对表面进行机械研磨抛光(表面粗糙度  $Ra$  低于 0.2),然后放入 75%以上的酒精中超声清洗烘干。接着在抛光面上覆盖一层铝箔胶带作为吸收层,并固定在特制的高温激光冲击卡具上,在其表面施加一层约束层以阻碍冲击波向外扩散,增强激光等离子体冲击波的作用效果。

### 2.2 激光冲击温强化

本试验激光光源采用的是钕玻璃脉冲激光器,激光冲击温强化设备示意图见图 3。激光参数范围为:波长 1064 nm,脉冲宽度 5~20 ns,激光能量 0.5~10 J,重复频率 0.5~2 Hz,形成的光斑直径约为 0.5~3 mm。

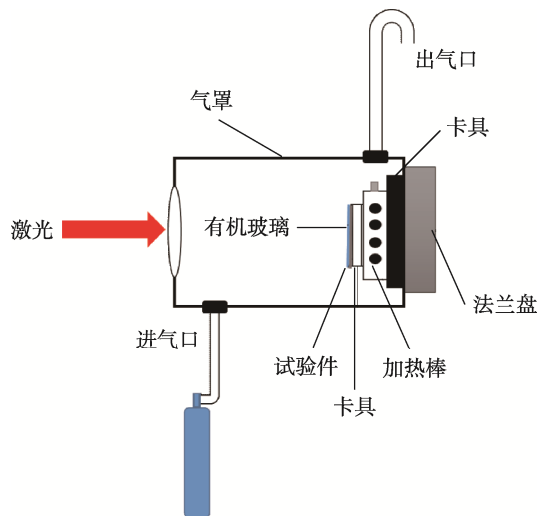


图3 激光冲击温强化设备示意图

Fig.3 Schematic diagram of warm laser shock peening equipment

试验中的约束层为耐高温 K9 光学玻璃,  $\Delta t$  为 200 °C,最高耐热温度为 1200 °C,熔点为 1700 °C,安全工作温度为 300 °C,纯度为 99.999,厚度为 1.5 mm。经测试,该高温玻璃对 1064 nm 波长的激光的透光性大于 99%,硬度高,耐压、耐温,平整度达到 0.002 mm。温控卡具由 4 组电热棒组成,温控范围为 25~300 °C,温度梯度为 1 °C,利用高温热像仪检测温度,温度控制精度为 0.1 °C。该试验选取的吸收层为铝箔,其对 1064 nm 的激光束不透明,且为热电良导体,当激光束辐照在铝箔表面时,铝箔能够吸收激



光能量, 瞬间产生高温高压的等离子体。铝箔最佳的厚度范围为 20~30  $\mu\text{m}$ , 这是因为若铝箔过薄, 冲击过程中则易发生烧蚀或破损, 影响试样表面的形貌; 若铝箔过厚, 则激光能量会衰减, 等离子体冲击波压力降低, 影响激光冲击强化的效果。粘贴时, 要求铝箔和试样紧密贴服, 两者之间无气泡和杂质。

卡具电热棒加热温度范围在 25~300  $^{\circ}\text{C}$  可调, 待温度稳定 1 min 后, 开始强化。强化过程中调节工艺参数, 利用轨迹机器人夹持试样, 完成加工过程轨迹的实现, 并且  $X$ 、 $Y$  方向的光斑搭接率达到 50% 左右。处理后将表面约束层和吸收层去掉, 用酒精清洗吹干, 待用。最后, 在同样条件下进行常温激光冲击强化, 作为对比试验。

### 2.3 激光冲击温强化时效

进行 WLSP 前, 试样的显微硬度为 325HV, 残余应力为 23 MPa。对强化后的试样进行显微硬度和残余应力测试, 结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 可以看出, 随着强化温度的升高, TC17 钛合金的表面硬度先增大后减小, 在 200  $^{\circ}\text{C}$  时达到 385HV, 相比未强化时提高了 18.48%, 相比于室温的 LSP 提高了

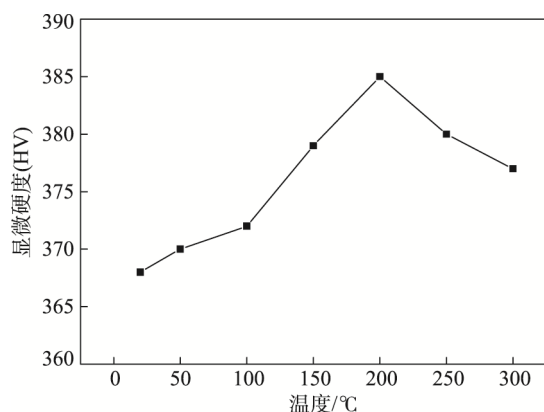


图 4 WLSP 与常温 LSP 显微硬度测试结果

Fig.4 Microhardness test results of WLSP and LSP at normal temperature

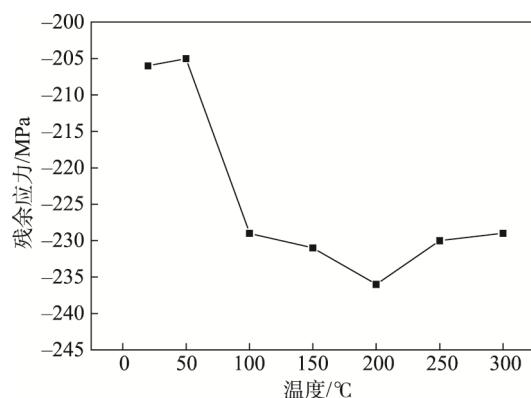


图 5 WLSP 与常温 LSP 残余应力测试结果

Fig.5 Residual stress test results of WLSP and LSP at normal temperature

4.62%。由图 5 可知, TC17 钛合金表面的残余压应力值呈现先增大后减小的趋势, 在 200  $^{\circ}\text{C}$  时最大, 为 -236 MPa, 相比于常温强化提高了 14.56%。

图 6 为未冲击试样位错组织的明场像, 图 7 为激光冲击强化后位错变化的明场像, 对比可知, 经过激光冲击后, 试样表面产生了大量的位错线, 位错线在冲击波的作用下运动, 晶粒内部布满大量的位错, 形成位错缠结 (Dislocations tangles, DTs), 大量的位错堆积交互形成网状结构, 此时位错密度明显提高 (见图 7a)。当位错运动受阻塞积时, 形成位错亚结构, 位错运动受到晶界的阻碍, 在晶界处堆积, 不仅形成位错缠结, 同时还形成了沿某一方向排列的位错堆积, 继而成为位错墙 (Dislocations walls, DWs), 如图 7b 所示。

激光冲击温强化过程涉及动态应变时效。动态应

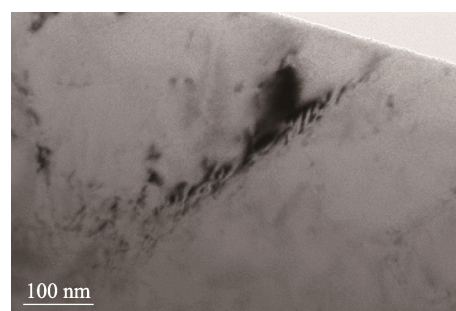
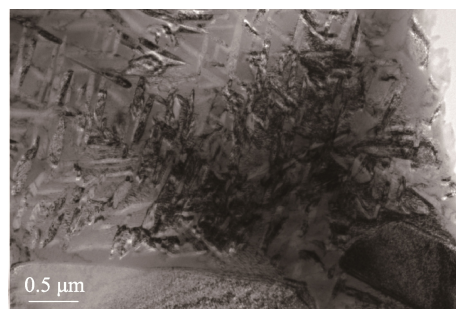
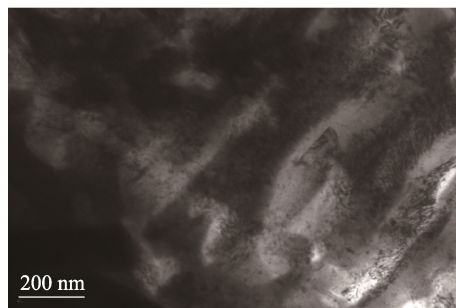


图 6 未冲击试样位错组织明场像

Fig.6 Bright field image of original specimen dislocation structure



a 位错墙



b 位错缠结

图 7 激光冲击强化后位错变化明场像

Fig.7 Bright field image of dislocation change after LSP: a) dislocations walls, b) dislocations tangles

变时效是指在一定的温度和应变率下,塑性变形和时效强化同时发生的现象<sup>[17]</sup>,其是由合金内部溶质原子与位错间的相互作用引起的。温度的升高会使溶质原子获得更大的能量,当溶质原子获得足够的激活能时,其运动速度与位错运动不尽相同,从而对位错胞产生钉扎效应,这会导致可动位错减少,从而引起位错的堆积增殖,导致 TC17 表层材料发生晶粒细化。动态时效应变过程中,材料的加工硬化效果比常温时单纯在冲击波力学效应作用下的晶粒细化更有效率。但温度升高也会引起材料的动态回复,其与动态应变时效的效果是相反的。通过热激活机制,溶质原子由高浓度区域向低浓度区域扩散,位错运动通过反向滑移或攀移相消。激光冲击温强化是在合金动态应变时效温度下进行加工的,其超高的应变率使材料表层晶粒细化程度更高,因此 TC17 表层的显微硬度随着强化温度的升高而增大,当温度达到 200 ℃ 时,合金的动态回复率增大,对表层晶粒影响逐渐增大,位错湮灭甚至出现再结晶现象,这会导致显微硬度下降。

与常温下的强化相比,高温环境使得材料发生软化,弹性模量变小,性能发生变化。在同样的应变率下,随着温度的升高,TC17 的流变应力会减小<sup>[18]</sup>。因此,在同样强度的激光诱导冲击波压力下,温度升高,材料的屈服极限减小,材料也更容易发生塑性应变,这也是 TC17 表面残余应力随着强化温度增大而增大的原因。温度升高,材料的热膨胀系数增大,且这种增大是非线性的。温度越高,热膨胀系数增大越快,这在一定程度上减缓了材料表面塑性变形的幅度,在 200 ℃ 时开始出现明显的影响,从而导致较高温度时 TC17 表面的残余应力出现降低。

### 3 结论

1) 动态应变时效(DSA)导致纳米级碳化物沉淀相的生成,因此对位错的钉扎效果显著增加,位错结构稳定性提高,激光诱导残余压应力更加稳定,交变载荷下的疲劳寿命提高。

2) 在 WLSP 试样中发现了更为复杂的位错结构,比如位错线、位错孪晶、位错缠结、位错墙和亚晶界。WLSP 内部更容易发生晶粒细化,因此可以有效地抑制表面裂纹的萌生,有助于提高材料的疲劳寿命。

3) 相比于 LSP, WLSP 残余应力幅值变大,残余应力层深度加深,极大地缓解了高温或者交变载荷下残余应力的释放,疲劳性能有所提高。

#### 参考文献:

[1] 孟宪凯,周建忠,黄舒,等.高周疲劳条件下激光温喷丸 TC4 钛合金的残余应力释放规律及疲劳特性[J].

稀有金属材料与工程,2015,44(5):1185-1190.

MENG X K, ZHOU J Z, HUANG S, et al. Residual Stress Relaxation and Fatigue Properties of TC4 Titanium Alloy Induced by Warm Laser Peening under High-cycle Fatigue[J]. Rare Metal-Materials and Engineering, 2015, 44(5): 1185-1190.

[2] ZHANG A, WANG Y, CHENG P, et al. Effect of Pulsing Parameters on Laser Ablative Cleaning of Copper Oxides[J]. Applied Phys, 2006, 99(6): 2217.

[3] YE C, SERGEY S, BONG J K, et al. Fatigue Performance Improvement in AISI 4140 Steel by Dynamic Strain Aging and Dynamic Precipitation during Warm Laser Shock Peening[J]. Acta Materialia, 2010, 59(3): 1014-1025.

[4] 乔红超,赵吉宾,陆莹.激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J].光学精密工程,2014,22(7):1766-1773.

QIAO H C, ZHAO J B, LU Y. Effect of Laser Peening on Microstructures and Properties of TiAl Alloy[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1766-1773.

[5] 陆莹,乔红超,赵吉宾. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J].中国激光,2014,41(10):119-124.

LU Y, QIAO H C, ZHAO J B. Investigation of Technical and Strengthening Mechanism Research of TiAl Alloy by Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 119-124.

[6] LU Y, QIAO H C, ZHAO J B, et al. Effects of Laser Peening on Micro-structure Distributions and Deformation Microstructure of TiAl[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34: 1-6.

[7] YE C, LIAO Y L, GARY J C. Warm Laser Shock Peening Driven Nanostructures and Their Effects on Fatigue Performance in Aluminium Alloy 6160[J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 12(4): 291-297.

[8] ZHOU J Z, MENG X K, HUANG S, et al. Effect of Warm Laser Peening at Elevated Temperature on the Low-cycle Fatigue Behavior of Ti6Al4V Alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2015, 634: 86-95.

[9] TIAN Q, ZHOU J Z, HUANG S, et al. Relation of Residual Stress on Laser-peened Surface During Cyclic Loading[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 081403.

[10] NIE X W, HE S, ZANG X, et al. Effect Study and Application to Improve High Cycle Fatigue Resistance of TC11 Titanium Alloy by Laser Shock Peening with Multiple Impacts[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 253(9): 68-75.

[11] PANT B, SUNDAR R, KUMAR H, et al. Studies towards Development of Laser Peening Technology for Martensitic Stainless Steel and Titanium Alloys for Steam Turbine Applications[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 587: 352-358.

- [12] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser Shock Processing of Aluminium Alloys[J]. Application to High Cycle Fatigue Behaviour, 1996, 210(1-2): 102-113.
- [13] 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.
- [14] JI Y, WU S. Study on Microstructure and Mechanical Behavior of Dissimilar Ti17 Friction Welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 596(3): 32-40.
- [15] CELLARD C, RETRAINT D, FRANÇOIS M, et al. Laser Shock Peening of Ti-17 Titanium Alloy: Influence of Process Parameters[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 532(1): 362-372.
- [16] 孟宪凯, 周建忠, 黄舒, 等. 激光温喷丸诱发单晶铜位错扩展的分子动力学模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 13-19.
- MENG X K, ZHOU J Z, HUANG S, et al. Molecular Dynamics Simulation of Dislocation Development in Monocrystalline Copper Induced by Warm Laser Peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 13-19.
- [17] 钱匡武, 李效琦, 萧林钢, 等. 金属和合金中的动态应变时效现象[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001(6): 8-23.
- QIAN KY, LI X Q, XIAO L G, et al. Dynamic Strain Aging Phenomenon in Metals and Alloys[J]. Journal of Fuzhou University (Nature Science), 2001(6): 8-23.
- [18] 王琛. TA19 和 TC17 合金高温变形行为及组织研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- WANG C. High Temperature Deformation Behavior and Tissue Study of TA19 and TC17 Alloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.