

激光冲击近 β 型钛合金的室温拉伸和高周疲劳性能及其断裂机理

史蒲英^{1,2}, 刘向宏², 王涛², 王凯旋², 李瑶²,
张丰收², 何卫锋¹, 李应红¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院 航空发动机研究所, 西安 710049;

2. 西部超导材料科技股份有限公司, 西安 710018)

摘要: 目的 提高近 β 钛合金的强度和高周疲劳性能。方法 对两相区固溶时效热处理后的 TB6 和 Ti55531 钛合金锻态材料表面进行了激光冲击强化 (LSP), 并对强化前后的试样进行室温拉伸和高周疲劳试验。采用扫描电镜 (SEM) 对拉伸和高周疲劳断口进行了观察和分析。结果 与未 LSP 的样品相比, LSP 后 TB6 和 Ti55531 钛合金的抗拉强度 (R_m) 分别提高了 25 MPa 和 25 MPa, 提高比例分别为 2.26% 和 2.02%; 屈服强度 ($R_{p0.2}$) 分别降低了 48 MPa 和 30 MPa, 降低比例分别为 4.58% 和 2.54%; 断面收缩率 (A)、延伸率 (Z) 和弹性模量略有提升。在低应力水平下, LSP 后 Ti55531 合金的疲劳寿命高于 TB6 合金, 而在高应力水平下, TB6 合金具有略高于 Ti55531 合金的疲劳寿命。结论 经过和未经 LSP 的 TB6 和 Ti55531 钛合金的拉伸断裂模式均为微孔聚集型韧性断裂与沿晶脆性断裂混合的断裂模式, 表面激光冲击不改变其拉伸断裂模式, 近 β 钛合金在不同应力状态的疲劳寿命差异与材料显微组织差异导致的疲劳裂纹萌生和扩展速率不同有关。

关键词: 激光冲击 (LSP); 近 β 型钛合金; 拉伸性能; 高周疲劳; 断裂机理

中图分类号: V261.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)10-0058-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.10.007

Tensile and High Cycle Fatigue Properties and Fracture Mechanism of Near β Titanium Alloy Strengthened by Laser Shock Peening

SHI Pu-ying^{1,2}, LIU Xiang-hong², WANG Tao², WANG Kai-xuan², LI Yao²,
ZHANG Feng-shou², HE Wei-feng¹, LI Ying-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

ABSTRACT: Advanced aircraft has put forward the requirements of lightweight, high strength and high reliability for the materials used in its key structural parts. Near- β titanium alloy has the characteristics of high strength, good fracture

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-09-15

Received: 2022-07-27; Revised: 2022-09-15

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2020GY-259)

Fund: Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2020GY-259)

作者简介: 史蒲英 (1984—), 女, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为钛合金材料组织性能关系、表面工程等。

Biography: SHI Pu-ying (1984-), Female, Ph. D. student, Senior engineer, Research focus: the relationship between microstructure and properties of titanium alloy materials, surface engineering, etc.

引文格式: 史蒲英, 刘向宏, 王涛, 等. 激光冲击近 β 型钛合金的室温拉伸和高周疲劳性能及其断裂机理[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 58-65.

SHI Pu-ying, LIU Xiang-hong, WANG Tao, et al. Tensile and High Cycle Fatigue Properties and Fracture Mechanism of Near β Titanium Alloy Strengthened by Laser Shock Peening[J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 58-65.

toughness, excellent fatigue resistance, large quenching depth and so on, is widely used in the manufacture of key bearing parts such as aircraft landing gear, helicopter rotor system central parts and connectors. TB6 (nominal composition Ti-10V-2Fe-3Al) and Ti55531 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr) are two typical near- β titanium alloys. Laser shock strengthening (LSP) is a surface treatment that can improve the fatigue life by inducing residual compressive stress (CRS), which cause change of microstructure and increase of dislocation density on the surface of the material, thus reduce the probability of fatigue crack initiation and propagation at surface.

In this study, laser shock processing (LSP) was carried out on the surface of as-forged TB6 and Ti5553 titanium alloy after solution aging treatment in two-phase region. X-ray diffractometer and Vickers hardness tester were used to measure the residual stress and Vickers micro-hardness on the surface and along the depth of the sample. The results display that surface residual stress of TB6 sample is -639.06 MPa, and that of Ti55531 sample is -588.24 MPa. The surface hardness of Ti55531 and TB6 after LSP reaches $452\text{HV}0.1/10$ and $400\text{HV}0.1/10$, respectively, the value increases by 11.3% and 12.1% respectively compared with that before LSP. The hardness of the TB6-LSP sample and Ti55531-LSP sample at the depth of $900\text{ }\mu\text{m}$ and $700\text{ }\mu\text{m}$ respectively is consistent with the hardness of the matrix material.

Tensile tests at room temperature and high cycle fatigue tests were carried out on the specimens before and after laser shock processing. The tensile and high cycle fatigue fractures were observed and analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Compared with the sample without LSP, the tensile strength (R_m) of LSP'ed TB6 and Ti55531 titanium alloys increased by 25 MPa (2.26%) and 25 MPa (2.02%), respectively. The yield strength ($R_{p0.2}$) decreased by 48 MPa (4.58%) and 30 MPa (2.54%), respectively. The percentage reduction of area (A), elongation (Z) and elastic modulus (E) were slightly improved. Fatigue life of Ti55531 alloy after LSP is higher than that of TB6 alloy at low stress level, while the fatigue life of TB6 alloy is slightly higher than that of Ti55531 alloy at high stress level.

The increase of micro-hardness can be attributed to the severe plastic deformation of the material caused by the high-intensity shock wave in the process of laser surface shot peening, and there are a lot of high-density dislocations in the plastic deformation region, which leads to the increase of the hardness of the material. The tensile fracture modes of TB6 and Ti55531 titanium alloys with and without LSP are microporous aggregated ductile fracture and inter-granular brittle fracture. Surface laser shock processing does not change the tensile fracture mode of the alloys in this study. The difference of fatigue life of near β titanium alloy under different stress states is related to the difference of fatigue crack initiation and propagation rate caused by the difference of material microstructure.

KEY WORDS: laser shock processing (LSP); near β titanium alloy; tensile properties; high cycle fatigue; fracture mechanism

近 β 型钛合金具有强度高、断裂韧性好、抗疲劳性能优异、淬透深度大等特点, 被广泛用于飞机起落架、发动机短舱接头、直升机旋翼系统中央件、连接件等关键承力零部件制造^[1-5]。TB6 (名义成分为 Ti-10V-2Fe-3Al) 和 Ti55531 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr) 钛合金是 2 种典型的近 β 钛合金^[6-7]。在两相区 ($\alpha+\beta$ 相区) 固溶和时效热处理 (STA) 过程中, 可以实现近 β 型钛合金良好的组织-性能匹配, 使其拥有优异的综合性能^[8-11]。但 TB6 合金中固有的 Fe 元素偏析易导致 β 斑的形成, β 斑的存在严重降低材料的塑性和疲劳性能, 因而在一定程度上限制了其在大型构件中的应用^[12-13]。而 Ti55531 合金的发明, 则很好地规避了 Fe 元素偏析问题, 且该合金在与 TB6 近似的组织状态下, 具有更高的静强度和更宽广的塑韧性匹配窗口。激光冲击强化 (LSP) 是近年来兴起的一种材料表面强化方式^[14-17], 被认为可以有效提高材料的抗高周疲劳性能^[18-22]。其通过诱导残余压应力 (CRS)、显微组织改变和位错密度的增加来实现的^[23-24]。通常

认为, 材料的抗拉强度和疲劳极限之间存在一定的关联。一般情况下, 材料抗拉强度越高, 其疲劳极限也越高^[25]。因此, 可以通过提高材料的抗拉强度来提高其疲劳性能。

本文以 2 种近 β 型钛合金 TB6 和 Ti55531 为研究对象, 对材料表面进行激光冲击强化, 通过对比 LSP 前后材料的拉伸和疲劳性能, 结合断口观察与分析, 揭示激光冲击强化对近 β 型钛合金性能及断裂机理的影响。

1 试验

本研究用 TB6 和 Ti55531 钛合金材料来自于西部超导材料科技股份有限公司生产的锻制棒材。本研究 TB6 钛合金主元素的化学成分 (质量分数) 为: V 9.0%~11.0%, Fe 1.6%~2.2%, Al 2.6%~3.4%, Ti 余量。Ti55531 合金主元素的化学成分 (质量分数) 为: Al 4.0%~6.0%, Mo 4.5%~6.0%, Cr 2.0%~3.6%, Fe 0.2%~0.5%,

Zr 0.3%~2.0%, Ti 余量。2 种材料在两相区固溶和时效热处理后的显微组织如图 1 所示。可以看到, 经固溶时效热处理后, 2 种材料均呈现等轴组织。等轴和棒状初生 α 相弥散分布在转变的 β 基体上。TB6

材料的初生 α 相含量约为 10%, Ti55531 材料的初生 α 含量约为 20%, TB6 材料的初生 α 相尺寸和 β 晶粒尺寸均略大于 Ti55531 合金。2 种材料的拉伸性能见表 1。

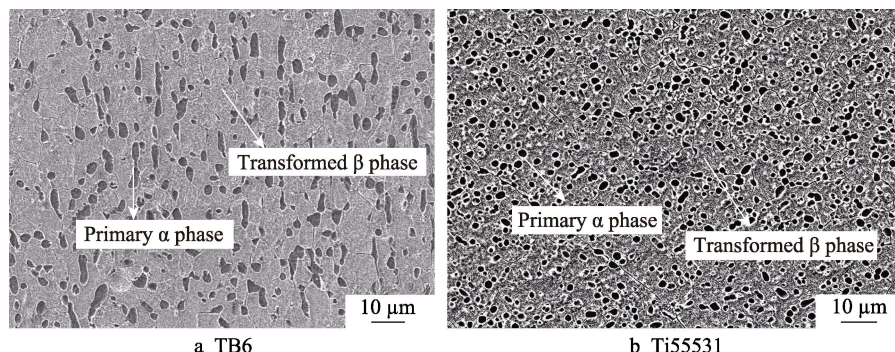


图 1 两相区固溶时效热处理后 TB6 和 Ti55531 合金的显微组织
Fig.1 Microstructure of TB6 and Ti55531 alloys after solution aging heat treatment (STA)

表 1 固溶时效热处理后 TB6 和 Ti55531 合金的拉伸性能
Tab.1 Tensile properties of TB6 and Ti55531 alloy after solution and aging treatment

Samples	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	E /GPa
TB6-1#	1 097	1 039	10.0	31	111
TB6-2#	1 111	1 056	13.7	32	101
TB6 average	1 104	1 048	11.9	32	106
Ti55531-1#	1 235	1 180	11.5	21	110
Ti55531-2#	1 239	1 186	11.5	23	107
Ti55531 average	1 237	1 183	11.5	22	109

切取自 2 种钛合金锻棒的试样坯在两相区固溶和时效热处理后, 分别按照 GB/T 228.1 和 HB5278 加工拉伸试样和高周疲劳试样, 并对加工样品表面进行激光冲击强化。样品强化区域示意图如图 2 所示。

激光冲击强化采用西安天睿达光电技术股份有限公司的 YS100-R200A 型激光冲击设备进行。激光冲击过程采用单路冲击, 激光能量为 (5 ± 0.2) J, 光斑直径为 (2.6 ± 0.1) mm, 光斑搭接率为 50%, 激光脉宽为 18~20 ns, 脉冲上升沿小于 6 ns, 约束层为水, 强化次数为 3 次。采用 X 射线衍射仪对激光冲击强化后的样品表面进行残余应力测试。采用 Zwick ZAVu-A 型显微维氏硬度仪按照 GB/T 4340.1 进行样品维氏硬度测试。采用 MTS 拉伸试验机进行室温拉伸试验, 拉伸速率为 0.015 mm/min。采用 QBG-100 型高频试验机进行高周疲劳试验, 高周疲劳试验选用 $\sigma_{\max} = 590$ MPa、 $R = -1$ 和 $\sigma_{\max} = 1\,040$ MPa、 $R = 0.5$ 两个应力水平和应力比组合进行。采用 ZEISS 扫描电镜对拉伸和疲劳断口形貌进行观察。

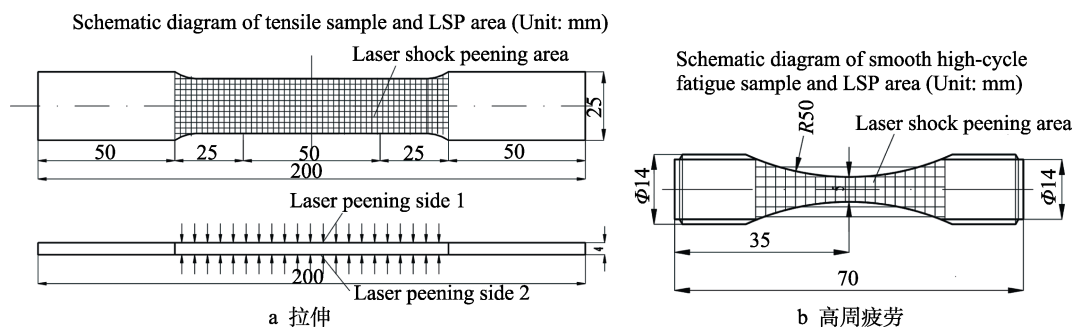


图 2 拉伸和高周疲劳试样及 LSP 强化区域示意图
Fig.2 Schematic diagram of tensile (a) and high cycle fatigue (b) specimens and LSP strengthening area

2 结果及分析

2.1 样品表面残余应力和维氏显微硬度

试验前对拉伸试样激光冲击区域的表面残余应力进行了测试, TB6 试样的表面残余应力为 -639.06 MPa,

Ti55531 试样的表面残余应力为 -588.24 MPa。可见, 经过 LSP 2 种材料表面均产生了残余压应力, TB6 试样表面的残余压应力大于 Ti55531 试样。测试了强化前后 2 种材料的维氏硬度, 维氏硬度测试结果见图 3。可以看出, 本研究 Ti55531 材料的初始硬度高于 TB6 样品的硬度。经 LSP 处理, 2 种材料的表面硬度均有

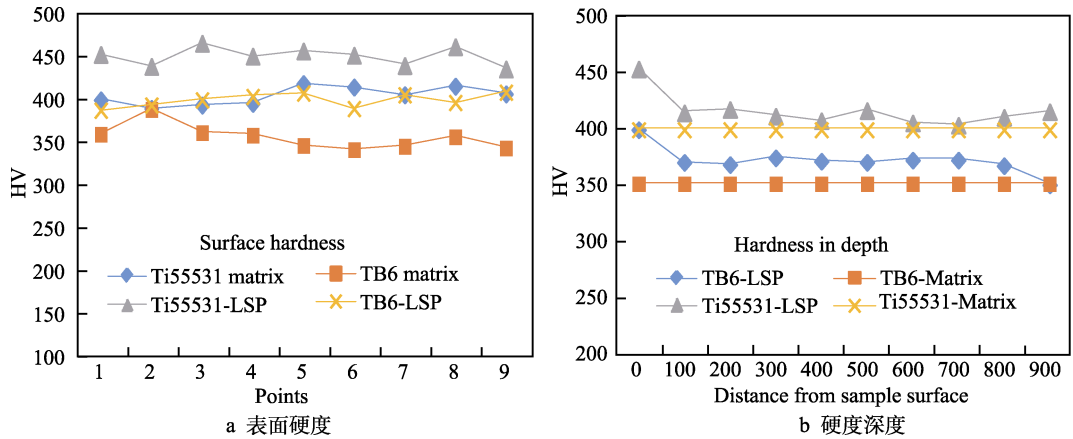


图 3 LSP 前后 TB6 和 Ti55531 材料的维氏硬度
Fig.3 Vickers hardness of TB6 and Ti55531 before and after tensile test LSP:
a) surface hardness; b) hardness in depth

所提高 (如图 3a 所示), LSP 后 Ti55531 和 TB6 材料的表面硬度分别达到 452HV0.1/10 和 400HV0.1/10, 较 LSP 前分别增加了 11.3% 和 12.1%。根据深度方向的硬度测试结果可以看出 (如图 3b 所示), 2 种材料的硬度在深度方向逐渐减小, TB6-LSP 样品和 Ti55531-LSP 样品分别在 900 μm 和 700 μm 深度处, 硬度与基体材料硬度一致。研究表明, 显微硬度的提高可归因于激光表面喷丸过程中高强度冲击波引起的材料严重塑性变形^[24-25], 而塑性变形区域内存在大量高密度位错, 导致材料的硬度升高。

2.2 拉伸性能与断裂机理

2.2.1 拉伸性能

LSP 前后 TB6 和 Ti55531 材料的室温拉伸性能见表 1 和表 2, LSP 前后 2 种材料拉伸性能的比较如图 4 所示。根据表 1、表 2 和图 4 可知, 经过 LSP, TB6 和 Ti55531 合金的抗拉强度 (R_m)、延伸率 (A)、

断面收缩率 (Z) 有不同程度的增加, 而屈服强度 ($R_{p0.2}$) 下降较明显。其中, TB6 合金的抗拉强度增加值为 25 MPa, 增加幅度为 2.26%, 屈服强度降低值为 48 MPa, 降低幅度为 4.58%; Ti55531 合金的抗拉强度增加值为 25 MPa, 增加幅度为 2.02%, 屈服

表 2 LSP 后 TB6 和 Ti55531 钛合金拉伸试验结果
Tab.2 Tensile test results of TB6 and Ti55531 titanium alloys after LSP

Samples	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$	E/GPa
TB6-LSP1#	1 129	999	13.2	31.6	110
TB6-LSP2#	1 128	1 000	13.1	31.5	112
Gain value after LSP (TB6)	25	-48	1	0.3	5
Ti55531-LSP1#	1 266	1 146	12.9	25.1	116
Ti55531-LSP2#	1 258	1 161	11.5	24.1	113
Gain value after LSP (Ti55531)	25	-30	0.7	2.6	6

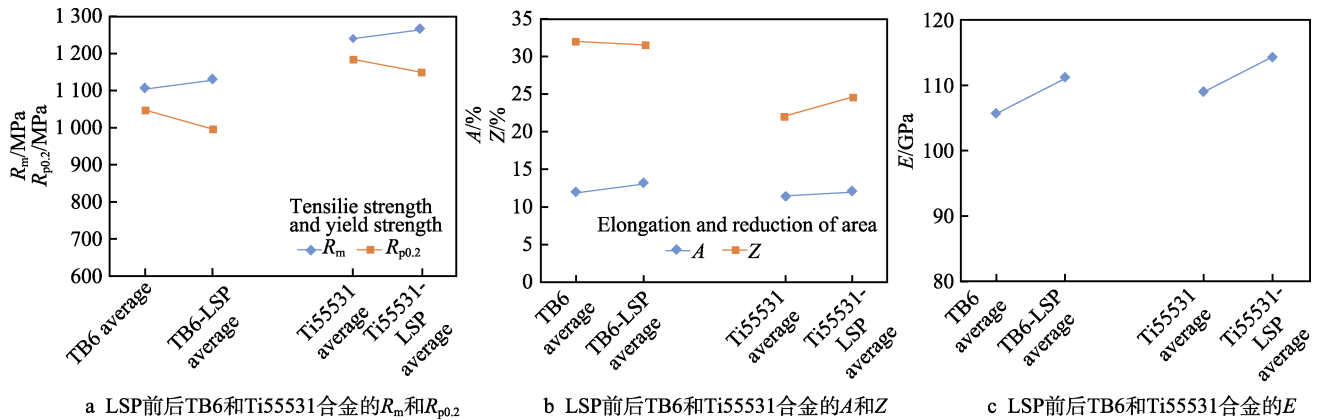


图 4 激光冲击强化前后 TB6 和 Ti55531 拉伸性能比较
Fig.4 Tensile properties of TB6 and Ti55531 titanium alloys before and after laser shock peening:
a) R_m and $R_{p0.2}$ of TB6 and Ti55531 alloy with and without LSP; b) A and Z of TB6 and Ti55531 alloy with and without LSP; c) E of TB6 and Ti55531 alloy with and without LSP

强度降低值为 30 MPa, 降低幅度为 2.54%。抗拉强度增加和屈服强度下降与激光冲击强化过程在材料表面引入的残余压应力, 导致材料表面和近表面组织与应力状态发生变化有关^[14,17-19]。研究发现, 激光冲击过程会在材料近表面几十到几百微米深度范围内形成压应力层, 压应力值随深度的增加而逐渐减小^[15,17,19]。图 5 为 LSP 处理后 TB6 材料的 OM 和 EBSD 图像。可以看到, OM 图像中存在明显的衬度差异区域, 距 LSP 表面深度 150~200 μm , 在距离表面约 50 μm 内, 初生 α 相形貌与其他区域存在显著差异, 这与 EBSD 观察到的组织差异类似, 推断均因 LSP 过程产生的残余压应力所致。而在材料内部, 为平衡该压应力, 则会出现拉应力区域。材料拉伸过程中, 内部拉应力水平最高的微区在外加应力尚未达到材料屈服极限时就提前发生屈服, 导致材料屈服强度降低^[28]。随着应变增加, 其他微区也相继发生屈服, 导致材料不断屈服并最终断裂。因此, 激光冲击强化试样内部残余应力的不均分布是影响拉伸屈服强度的主要原因。此外, 激光冲击过程会导致材料表面形成梯度组织层, 梯度组织带来的微区变形不协调也是导致微区提前屈服的原因^[29]。而 LSP 带来的抗拉强度增加, 是因为经过强化的表面层在拉伸过程中可以抵抗更高的

应力, 这一点从 LSP 样品断口表面更剧烈的变形可以看出。

2.2.2 拉伸断口观察与断裂机理分析

经过和未经 LSP 处理的 TB6 和 Ti55531 材料的拉伸断口宏观形貌如图 6 所示。可以看出, 经过激光冲击处理的试样断口均存在明显颈缩, 断口起伏明显, 如图 6a 和图 6b 所示。而未处理的试样, 颈缩不明显, 断口与正应力呈 45° 方向断裂, 断口相对平齐, 如图 6c 和图 6d 所示。这说明经过 LSP 的样品在断裂前经历了更大的塑性变形, 材料抵抗变形的能力更强, 刚度更高, 这与 LSP 后 2 种合金拉伸样品具有更大的延伸率 (A)、断面收缩率 (Z) 和弹性模量值 (E) 一致。

经过和未经 LSP 处理的 TB6 和 Ti55531 材料的拉伸断口微观形貌如图 7 所示。可以看出, 经过和未经 LSP 处理的 2 种钛合金材料断口均呈暗灰色, 经过 LSP 处理的断口表面处变形和撕裂痕迹明显, 如图 7a2、图 7a3、图 7c2、图 7c3 所示, 断面上的起伏也更明显。但断口均存在明显的撕裂棱与解理刻面, 说明经过和未经表面 LSP 处理的 TB6 和 Ti55531 合金均呈现韧性断裂和沿晶断裂混合的断裂特征, 表面 LSP 对 2 种材料的微观断裂机制没有明显影响。

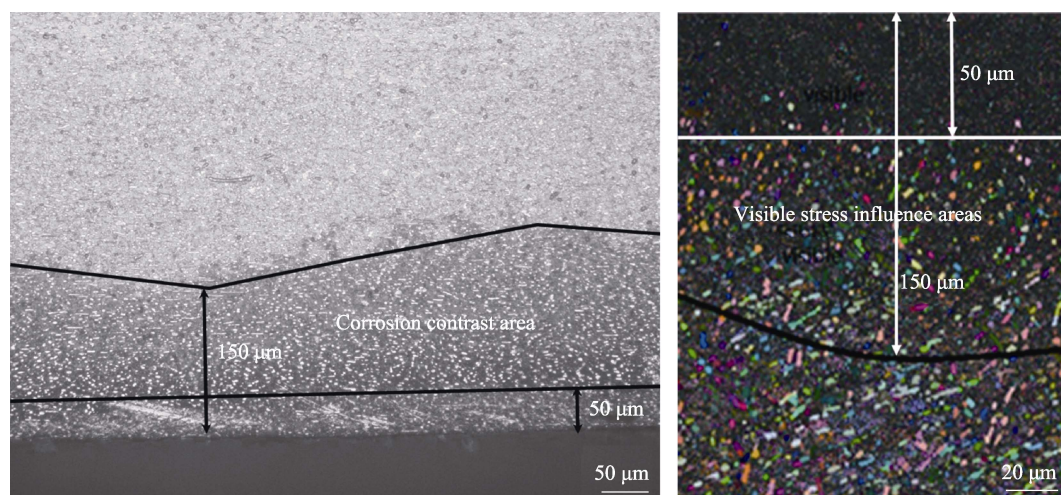


图 5 TB6 合金 LSP 试样表面的应力影响区域 OM 和 EBSD 图像
Fig.5 OM and EBSD image of TB6 alloy with LSP

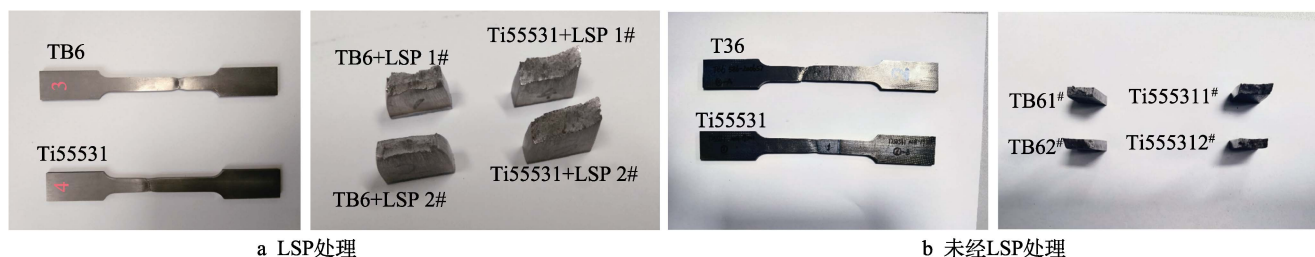


图 6 TB6 和 Ti55531 拉伸试样和断口宏观形貌

Fig.6 Macromorphology of tensile specimens and fracture of TB6 and Ti55531: a) LSP treated; b) non-LSP treated

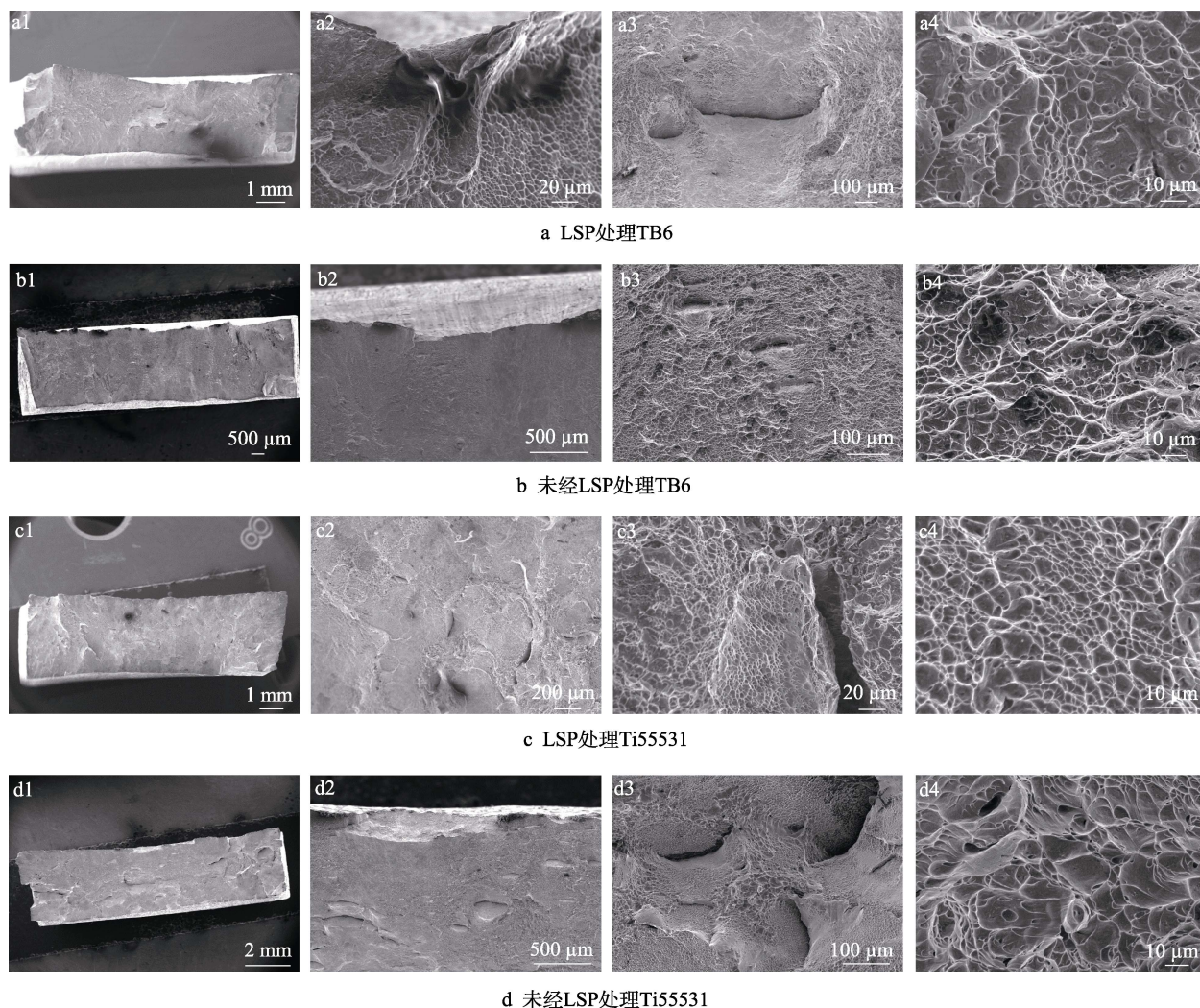


图 7 LSP 强化前后 TB6 和 Ti55531 拉伸断口显微组织形貌
Fig.7 Morphology of tensile fracture of TB6 (a, b) and Ti55531 (c, d)

2.3 高周疲劳性能与断裂机理

2.3.1 高周疲劳性能

经过 LSP 处理的 TB6 和 Ti55531 样品高周疲劳试验结果见表 3。可以看出, 在不同应力状态下, 2 种材料的疲劳寿命存在差异。随着应力水平的增加, TB6 和 Ti55531 合金的疲劳寿命均降低。在相对较低的应力水平 ($\sigma=590$ MPa, $R=-1$) 下, 强度更高的 Ti55531 合金具有更高的疲劳寿命, 两者的疲劳寿命分别达到 7.52×10^4 循环周次和 2.646×10^5 循环周次。而在较高的应力水平 ($\sigma=1050$ MPa, $R=0.5$) 下, 2 种材料具有近似的疲劳寿命, TB6 合金的疲劳寿命为 7.42×10^4 循环周次, 而 Ti55531 合金的疲劳寿命为 4.12×10^4 循环周次。这与材料疲劳裂纹扩展过程中裂纹萌生和扩展速率差异及其在疲劳寿命构成中的比例相关。高强韧钛合金的疲劳行为研究表明^[30-31], 疲劳裂纹萌生寿命占整体寿命的绝大部分。高周疲劳过程中, 疲劳裂纹萌生寿命甚至可能高达疲劳总寿命的 90%。钛合金疲劳微裂纹萌生机制主要有^[33-34]: 表面

驻留滑移带开裂; 晶界、亚晶界、相界、孪晶界等界面处堆积位错致使应力集中引起界面开裂, 以及相内滑移带界面处位错堆积引起裂纹萌生等。不同的显微组织特征对钛合金的高周疲劳裂纹萌生有显著的影响^[35]。对于 TB6 和 Ti55531 等亚稳定 β 钛合金, 细小晶粒的双态组织比晶粒粗大的片层组织有更高的高周疲劳裂纹萌生抗力。在低应力水平下, 裂纹萌生占疲劳寿命的绝大部分, 强度高且晶粒细小的等轴晶组织, 具有更好的抗裂纹萌生能力。而在高应力水平下, 疲劳裂纹扩展寿命是材料疲劳寿命的重要组成部分。晶粒粗大的细片层组织具有更高的抗疲劳裂纹扩展能力。

表 3 TB6 和 Ti55531 材料的高周疲劳性能测试结果
Tab.3 High cycle fatigue properties of TB6 and Ti55531 alloy

Samples	σ_{\max} /MPa	f /Hz	N (cycle)
TB6 LSP	590	108	7.52×10^4
TB6 LSP	1050	112	7.42×10^4
Ti55531 LSP	590	108	2.646×10^5
Ti55531 LSP	1050	109	4.12×10^4

2.3.2 高周疲劳断口观察与断裂机理分析

图8为经LSP处理的TB6和Ti55531材料疲劳断口形貌。可以看出,在不同应力状态下,2种材料的疲劳均起源于样品表面,且均为单源疲劳。在本研究中激光冲击强化并未实现材料的疲劳源从表面向近表面转移,这与强化后样品表面不完整性及强化参数的适宜性相关(对试样表面观察发现,LSP后的样品表面粗糙度增加,且存在少量烧蚀坑)。对2种材料疲劳扩展区微观形貌的观察可知,疲劳裂纹沿晶和穿晶扩展,并在扩展区形成明显的疲劳台阶和疲劳条带。普遍认为,高应力状态下,材料的疲劳寿命主要

取决于长裂纹的扩展寿命。对距离裂纹源0.5 mm处的疲劳条带宽度统计发现,Ti55531合金的疲劳条带平均宽度为0.2 μm ,TB6合金的疲劳条带平均宽度为0.16 μm 。TB6合金的疲劳裂纹扩展速率低于Ti55531合金,这与高应力水平下,TB6合金具有略长的疲劳寿命一致。进一步分析表明,含有等轴 α_p 相的等轴/双态组织在疲劳过程中会产生较为分散的孔洞,这些孔洞可能成为裂纹源。总的来说,由于疲劳损伤的影响因素很多,且高强韧钛合金具有特殊的成分及组织特征,所以高强韧钛合金的疲劳裂纹萌生机制也异常复杂。

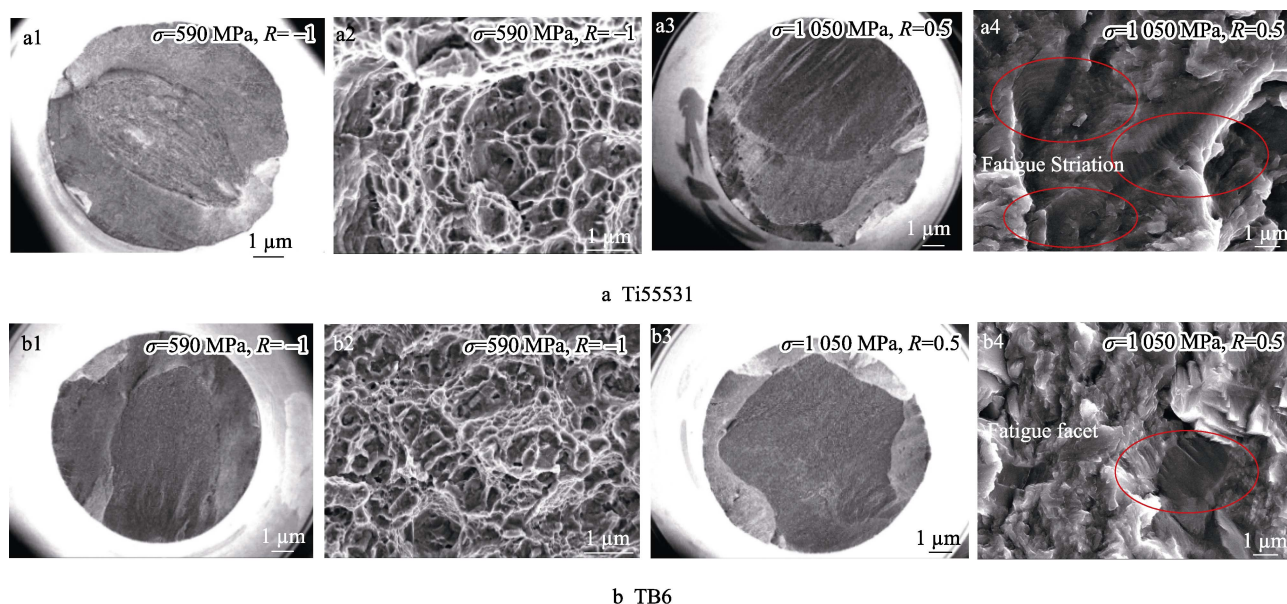


图8 LSP处理的TB6和Ti55531材料疲劳断口形貌

Fig.8 Morphology of HCF fracture of TB6 and Ti55531 after LSP

a.1,a.2 and b.1,b.2 lower stress state ($\sigma=590$ MPa, $R=-1$) a.3,a.4 and b.3,b.4 higher stress state ($\sigma=1050$ MPa, $R=0.5$)

3 结论

1) 激光冲击强化(LSP)导致近 β 型钛合金TB6和Ti55531的室温抗拉强度升高,屈服强度降低。LSP后TB6合金的抗拉强度较LSP前增加25 MPa,增加幅度为2.26%,屈服强度降低48 MPa,降低幅度为4.58%。LSP后Ti55531合金的抗拉强度较LSP前增加25 MPa,增加幅度为2.02%,屈服强度降低30 MPa,降低幅度为2.54%。LSP过程在材料表面引入的不均匀分布残余压应力和形成的表面梯度组织微区变形不协调是导致材料屈服强度下降的主要原因。

2) 经过和未经LSP的TB6和Ti55531钛合金的拉伸断裂模式为微孔聚集型韧性断裂与沿晶脆性断裂混合的断裂模式,本研究过程中LSP未改变材料的拉伸断裂模式。

3) 经过LSP的TB6和Ti55531材料在不同载荷条件下均呈现单源疲劳,疲劳裂纹均起始于样品表面。在低应力水平下,抗拉强度更高的Ti55531合金

具有较TB6钛合金更高的疲劳寿命。而在高应力水平下,晶粒更粗大的TB6钛合金的高周疲劳寿命略高于Ti55531合金,这与2种材料显微组织差异导致的疲劳裂纹萌生和扩展速率不同及其对疲劳寿命的贡献有关。

参考文献:

- [1] LEYENS C, PETERS M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [2] LÜTJERING G, WILLIAMS J C. Titanium[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] GASSON P C. Introduction to Aerospace Materials[J]. The Aeronautical Journal, 2013, 117(1194):866-867.
- [4] BOYER R R. An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 213(1-2): 103-114.

- [5] WILLIAMS J C, STARKE E A J. Progress in Structural Materials for Aerospace Systems[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(19): 5775-5799.
- [6] CHUAN Wu, LIANG Huang. Hot Deformation and Dynamic Recrystallization of a Near-Beta Titanium Alloy in the β Single Phase Region[J]. *Vacuum*, 2018, 156: 384-401.
- [7] IVASISHIN O M, MARKOVSKY P E, MATVIYCHUK Y V, et al. A Comparative Study of the Mechanical Properties of High-Strength β -Titanium Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 457(1-2): 296-309.
- [8] SHEKHAR S, SARKAR R, KAR S K, et al. Effect of Solution Treatment and Aging on Microstructure and Tensile Properties of High Strength β Titanium Alloy, Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr[J]. *Materials & Design*, 2015, 66: 596-610.
- [9] XU Sheng-hang, LIU Yong, LIU Bin, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr Alloy by Heat Treatment with Continuous Temperature Gradient[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(2): 273-281.
- [10] CHEN Zhao-qi, XU Li-juan, LIANG Zhen-quan, et al. Effect of Solution Treatment and Aging on Microstructure, Tensile Properties and Creep Behavior of a Hot-Rolled β High Strength Titanium Alloy with a Composition of Ti-3.5Al-5Mo-6V-3Cr-2Sn-0.5Fe-0.1B-0.1C[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 823: 141728.
- [11] 张崇乐, 包翔云, 张金钰, 等. 亚稳态 β 钛合金的成分设计、变形机制与力学性能研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(2): 717-724.
- ZHANG Chong-le, BAO Xiang-yun, ZHANG Jin-yu, et al. Research Progress on Composition Design, Deformation Mechanism and Mechanical Properties of Metastable β Titanium Alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(2): 717-724.
- [12] ZENG W D, ZHOU Y G. Effect of Beta Flecks on Mechanical Properties of Ti-10V-2Fe-3Al Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 260(1-2): 203-211.
- [13] ZENG Wei-dong, ZHOU Yi-gang, YU Han-qing. Effect of Beta Flecks on Low-Cycle Fatigue Properties of Ti-10V-2Fe-3Al[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, 9(2): 222-227.
- [14] CLAUSER A H. Laser Shock Peening, the Path to Production[J]. *Metals*, 2019, 9(6): 626.
- [15] SUNDAR R, GANESH P, GUPTA R K, et al. Laser Shock Peening and Its Applications: A Review[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 6(4): 424-463.
- [16] ZHANG Chao-yi, DONG Ya-lin, YE Chang. Recent Developments and Novel Applications of Laser Shock Peening: A Review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(7): 124.
- [17] WU Jia-jun, ZHAO Ji-bin, QIAO Hong-chao, et al. Research on the Technical Principle and Typical Applications of Laser Shock Processing[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 722-731.
- [18] SOYAMA H, KORSUNSKY A M. A Critical Comparative Review of Cavitation Peening and other Surface Peening Methods[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 305: 117586.
- [19] GUJBA A, MEDRAJ M. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening[J]. *Materials*, 2014, 7(12): 7925-7974.
- [20] ACOUSTICS Z Y I O, ACOUSTICS L O M, UNIVERSITY N, et al. Investigations on Laser shock-Processing (LSP) to Improve Fatigue Life of Small Hole in Aircraft Structures[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 1997, 10(1): 41-45.
- [21] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of Fatigue and Fretting on Residual Stresses Introduced by Laser Shock Peening[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 435-436: 12-18.
- [22] GAO Y K. 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.
- [23] GRUM J. Book Review: Modern Mechanical Surface Treatment States, Stability, Effects by Volker Schulze[J]. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2008, 3(1): 185.
- [24] DWIVEDI P K, VINJAMURI R, RAI A K, et al. Effect of Laser Shock Peening on Ratcheting Strain Accumulation, Fatigue Life and Bulk Texture Evolution in HSLA Steel[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 163: 107033.
- [25] 黄利军, 齐立春, 刘昌奎, 等. Ti-1023 钛合金的疲劳极限与拉伸强度的关系[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(S1): 54-57.
- HUANG Li-jun, QI Li-chun, LIU Chang-kui, et al. Relationship between Fatigue Limit and Tensile Strength of Ti-1023 Titanium Alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(S1): 54-57.
- [26] WU Jun-feng, ZOU Shi-kun, ZHANG Yong-kang, et al. Microstructures and Mechanical Properties of β Forging Ti17 Alloy under Combined Laser Shock Processing and Shot Peening[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 328: 283-291.
- [27] LOU S, LI Y, ZHOU L, et al. Surface Nanocrystallization of Metallic Alloys with Different Stacking Fault Energy Induced by Laser Shock Processing[J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 320-326.

(下转第 166 页)