DOI: 10.11883/bzycj-2017-0082
文章编号: 1001-1455(2018)05-1091-08

多次激光冲击导致的 Ti17 合金层裂*

吴俊峰[1,2],邹世坤[2],张永康[3],孙桂芳[1],倪中华[1],曹子文[2],车志刚[2]
(1. 东南大学机械工程学院,江苏 南京 211189;
2. 中国航空制造技术研究院高能束流加工技术国家级重点实验室,北京 100024;
3. 广东工业大学机电工程学院,广东 广州 510000)

摘要: 为研究激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂特性和层裂阈值,对样品(厚 5 mm)表面进行单点连续 1～8 次激光冲击,激光工艺参数为:频率 1 Hz,脉宽 15 ns,激光能量 30 J,方形光斑 4 mm × 4 mm。采用白光干涉仪、超声波无损检测技术和扫描电镜,分析和检测中厚样品冲击区域的表面形貌、内部损伤以及层裂形貌。实验结果表明,连续从 4 次到 5 次激光冲击中厚样品的表面凹坑深度增加值最大为 64.5%。连续 5 次激光冲击为中厚样品层裂阈值,层裂面积随冲击次数增加而增加。连续 5～8 次激光冲击中厚样品层裂厚度的实验值为 280～310 μm。层裂机理为韧性微孔洞的形核、增长和汇合,形成晶界失效和晶内失效。研究结果可为激光冲击强化整体叶盘改性提供工艺参考。

关键词: 连续多次激光冲击;Ti17 合金中厚样品;层裂特性;层裂阈值;超声波无损检
中图分类号: O346.1;TN249　　**国标学科代码**: 1301545　　**文献标志码**: A

激光冲击强化(laser shock peening, LSP)是一种诱导靶材表层深残余压应力、晶粒细化和低幅冷加工的先进表面处理技术[1-2],被广泛应用于改善金属材料的抗疲劳、抗腐蚀、抗摩擦磨损和抗外物损伤性能[3-6]。但 LSP 技术应用于金属材料改性的同时,仍存在一些问题,如影响叶片气动性能的粗糙强化表面形貌、LSP 薄壁件塑性变形约束击穿[7]和 LSP 薄壁件边缘弯曲变形等,特别是有可能损伤金属材料,即形成层裂[8-9]。当激光冲击卸载波与靶材背面反射稀疏波相互作用,形成的动态拉应力强度和持续时间达到一定阈值时,靶材内部产生累积损伤断裂,即层裂[10]。

对激光冲击波改性的整体叶盘,层裂损伤将迅速降低整体叶盘的疲劳性能,严重影响发动机寿命和可靠性。层裂损伤是材料微损伤的累积结果,与材料特性有关。避免激光冲击强化整体叶盘层裂损伤的发生,需要了解和掌握整体叶盘材料 Ti17 合金经激光冲击强化后的层裂特性以及激光冲击强化改性的临界条件,这样有利于这项技术更好地应用于整体叶盘改性。我们已将 LSP 技术应用于整体叶盘强化改性,而整体叶盘叶片叶根、叶尖和一弯节线处为中厚样品。为更好地实现工业应用,需要对激光冲击 Ti17 合金中厚样品进行层裂特性研究。而目前,主要研究的是激光冲击加载薄片样品的层裂特性,如:Lescoute 等[11]研究激光冲击铝、金和铁薄片(150～300 μm 厚)的层裂强度和层裂断口形貌;Dalton 等[12]研究基体微观组织对激光冲击铝合金(500 和 200 μm 厚)的层裂强度的影响。与薄片样品层裂相比,中厚样品的层裂损伤无法从样品背面进行观察和判别,存在更大的风险。当前,中厚样品的层裂损伤特性研究方法主要为平板冲击实验,如:翟少栋[13]采用平板冲击实验研究 6 mm 厚纯铝的层裂行为;Tyler 等[14]采用平板冲击实验研究 6 和 12 mm 厚 Ti64 的层裂强度和层裂形貌;Boidin 等[15]采用平板冲击实验研究 6～20 mm 厚 TC4 钛合金的层裂特性。但对激光冲击加载 Ti17 合金中厚样品的层裂损伤特性研究,却少有报道。因此,亟需开展激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂阈值及层裂特性研究。

* **收稿日期**: 2017-03-16; **修回日期**: 2017-07-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1102705);装备预研教育部联合基金项目(6141A02033103);中国博士后科学基金项目(2015M570395,2016T90400);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015070-05);江苏省博士后基金项目(1501028A);江苏省六大人才高峰高层次人才项目(2016-HKHT-001)
第一作者: 吴俊峰(1988—),男,硕士,博士研究生; **通信作者**: 孙桂芳,gfsun@seu.edu.cn。

本文中，以整体叶盘所用材料 Ti17 合金为研究对象，采用叶盘强化工艺参数对 Ti17 合金中厚样品表面进行单点连续多次激光冲击，研究不同激光冲击次数下 Ti17 合金的表面形貌和层裂损伤，获得激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂阈值、层裂大小和层裂厚度以及层裂机理。

1 实 验

1.1 实验材料和 LSP 实验

实验材料为热处理后的 β 锻 Ti17 合金，一种 α+β 型双相网篮组织，如图 1 所示。Ti17 合金材料的化学成分为：w(Al)=4.5%～5.5%，w(Sn)=1.6%～2.4%，w(Zr)=1.6%～2.4%，w(Mo)=3.5%～4.5%，w(Cr)=3.5%～4.5%，其余为 Ti。热处理条件为 800 ℃/4 h 固溶强化和 630 ℃ /8 h 时效处理，力学性能参数为：抗拉强度 R_m=956.05 MPa，屈服强度 $R_{p0.2}$=878.24 MPa，延伸率 A=18.19%，断面收缩率 Z=53.37%。从 β-Ti17 合金锻件，线切割中厚样品，样品尺寸 50 mm × 50 mm × 5 mm，样品表面依次进行 200#、400#、800#、1 000# 金相砂纸打磨和丙酮清洗，然后对中厚样品表面进行单点连续多次激光冲击。

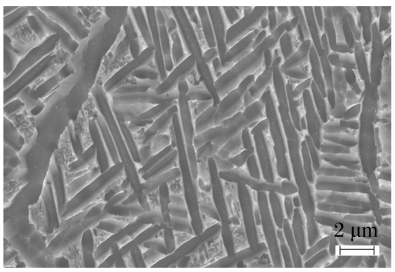


图 1 基体 Ti17 合金的微观组织

Fig. 1 Microstructure of as-received Ti17 alloy

采用能量稳定且空间均匀分布的 Nd:YAG 激光器及 LSP 设备(见图 2)，对 Ti17 合金中厚样品表面进行单点连续多次激光冲击。激光冲击频率为1 Hz，冲击次数为 1～8，每次激光冲击工艺参数为：脉冲能量 30 J，脉宽 15 ns，方形光斑尺寸 4 mm×4 mm。用光束整形镜将激光器输出的圆形光斑转换为辐射在样品表面的方形光斑。样品表面粘贴 0.12 mm 厚铝箔牺牲介质，避免激光冲击过程中样品表面烧蚀，喷嘴给样品表面冲击区域提供 1～2 mm 厚的去离子水帘约束层，提高冲击波峰值压力。

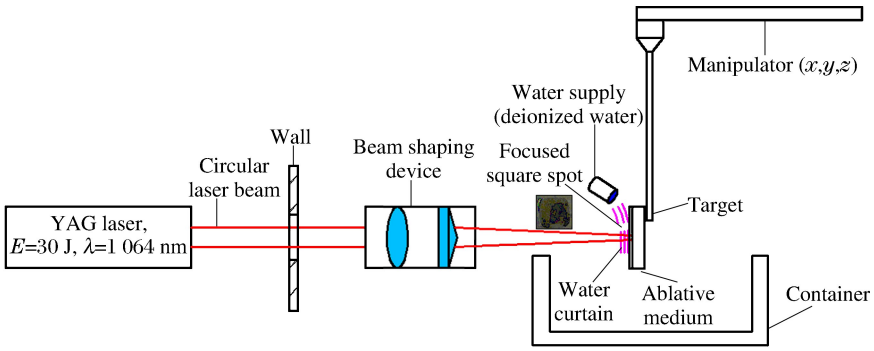


图 2 LSP 设备

Fig. 2 LSP setup

1.2 测试方法

采用 Veeco wykoNT 1100 非接触三维白光干涉表面轮廓仪，测试激光冲击中厚样品表面的三维形貌，仪器测试区域为 120 μm × 90 μm。每个光斑强化区域由 5 个测试区域拼接而成，取平均值。

采用 KSI 超声显微检测系统和超声纵波垂直反射法，对中厚样品进行水浸 C 扫描超声波无损检测，如图 3 所示。仪器参数为：50 MHz水浸聚焦探头，灵敏度 0.8～24 db，扫查成像×500(扫查间距 0.1 mm)。

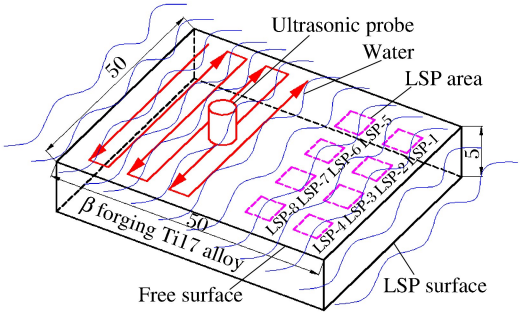


图 3 水浸法 C 扫描 Ti17 合金中厚样品示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a C-scan examination with water immersion for Ti17 alloy mid-thick sample

沿中厚样品冲击区域中心线进行线切割，获得冲击区域的横截面，然后依次对横截面样品进行镶嵌、研磨、抛光和腐蚀，最后采用扫描电镜（SEM）分析横截面特征形貌。腐蚀液质量比为：氢氟酸∶硝酸∶水＝1∶2∶7，腐蚀 10 s。

2　物理模型

2.1　冲击波峰值压力

激光器输出的高能激光束辐射在靶材表面吸收层上，吸收层迅速熔化、气化和电离，形成高温高压等离子体。等离子体继续吸收激光能量产生膨胀，膨胀的等离子体受到水约束层限制，发生爆炸，形成传向靶材内部的激光冲击波。激光冲击波峰值压力模型为[16]：

$$p_{\mathrm{m}}/\mathrm{GPa}=0.01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\sqrt{Z/(\mathrm{g\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}})}\sqrt{I_0/(\mathrm{GW\cdot cm^{-2}})} \tag{1}$$

式中：α 为内能转化为热能部分的系数，取 $\alpha=0.1$[17]。Z 为靶材和约束层的声折合阻抗：

$$\frac{2}{Z}=\frac{1}{Z_{\mathrm{target}}}+\frac{1}{Z_{\mathrm{water}}} \tag{2}$$

其中　　$Z_{\mathrm{water}}=0.165\times10^{6}\ \mathrm{g\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}}$，$Z_{\mathrm{target}}=1.8\times10^{6}\ \mathrm{g\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}}$，

因此　　$Z=3.02\times10^{5}\ \mathrm{g\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}}$。

激光功率密度为：

$$I_0=E/(\tau s) \tag{3}$$

式中：E 为激光能量，τ 为脉宽，s 为光斑面积。

2.2　层裂损伤准则

样品层裂损伤不是瞬时的，而是时间的累积过程。强激光冲击波加载下，定义一个与位置 r 和时间 t 有关的样品损伤函数 $f(r,t)$，其中损伤位置 r 与冲击波波形相关，损伤时间 t 与冲击波峰值压力、冲击次数和冲击波脉宽相关。单点连续多次激光冲击过程中，每次激光冲击采用的冲击波峰值压力、冲击波脉宽和靶材内部冲击波波形相同，仅激光冲击次数不同。因此，当某个位置 r 的损伤函数 f 关于激光冲击次数 t（t 次冲击波持续时间）的累积达到阈值 K_{s} 时，层裂形成。满足层裂损伤阈值的最小激光冲击次数 t 为[18]：

$$f(r,t)=f[\sigma(r,t)]=[\max(-\sigma-\sigma_{\mathrm{R}},0)]^{A} \tag{4}$$

$$\sum f(r,t)\Delta t\geqslant K_{\mathrm{s}} \tag{5}$$

式中：K_{s}、σ_{R} 和 A 为材料常数；σ_{R} 可视为材料动态或静态屈服强度；拉应力 $\sigma=\sigma(t)$。

3　结果与讨论

3.1　表面形貌

由式（1）～（3）可得，LSP 的激光功率密度和激光冲击波峰值压力分别为 12.5 GW/cm^2 和 3.62 GPa。激光冲击波峰值压力大于 Ti17 合金的动态屈服极限（2.8 GPa[19]），因此 Ti17 合金表层产生塑性变形。

图 4 为不同连续激光冲击次数下 Ti17 合金中厚样品的表面形貌。由图 4 可知，激光冲击 Ti17 合金表面产生方形凹坑，且凹坑中心凸起。单点 1～8 次连续激光冲击 Ti17 合金的表面凹坑深度分别为 7.10、8.87、13.2、20.0、32.9、38.1、40.6 和 45.3 μm，凹坑深度分别增加 24.9%、48.8%、51.5%、64.5%、15.8%、6.6%、11.6%。随着连续冲击次数增加，凹坑深度逐渐增加趋于饱和，其中单点 4 次到 5 次连续激光冲击，凹坑深度增加值最大为 64.5%。单点 1～8 次连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品的表面凹坑中心凸起高度分别为 6.00、6.87、11.0、18.0、22.1、27.4、30.4 和 31 μm，凹坑中心凸起高度分别增加 14.5%、60.1%、63.6%、22.8%、24.0%、10.9%、2.0%。随着连续激光冲击次数增加，凹坑中心凸起高度逐渐增加趋于饱和。

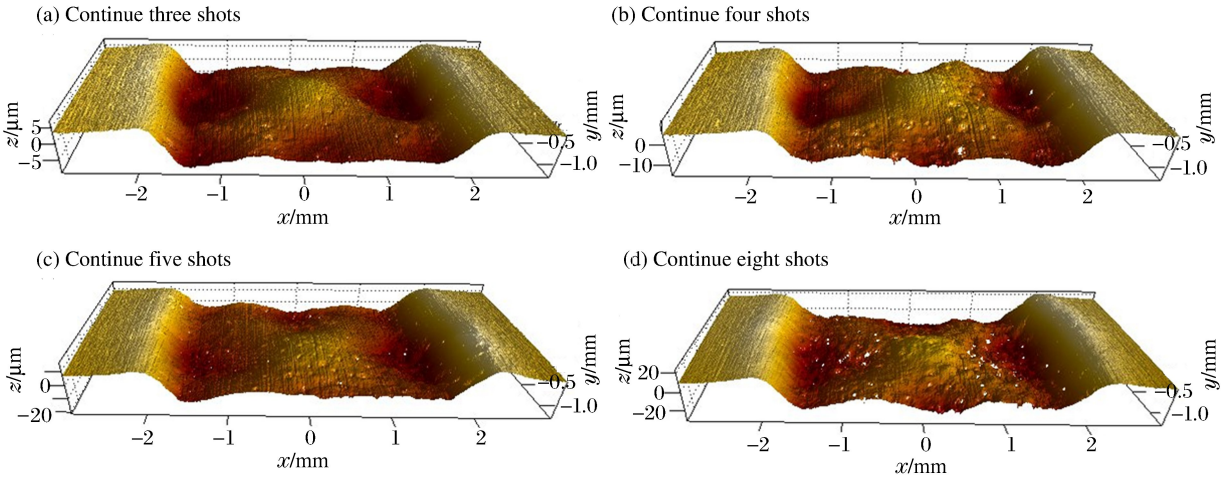


图 4 不同连续激光冲击次数下 Ti17 合金中厚样品的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of Ti17 alloy mid-thick sample with different continue LSP shots

3.2 层裂大小

不同连续激光冲击次数下 Ti17 合金中厚样品冲击区域的 C 扫描成像图，如图 5 所示。由图 5 可知，单点 1～4 次连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品冲击区域内部无层裂，单点 5～8 次连续激光冲击中厚样品冲击区域内部存在层裂，层裂尺寸为1.17 mm×0.84 mm、1.10 mm×0.68 mm、1.62 mm×1.44 mm 和 1.86 mm×1.68 mm。随着连续激光冲击次数增加，中厚样品层裂面积逐渐增大。层裂损伤扫描结果与激光冲击 Ti17 合金中厚样品的表面形貌（见图 4）相对应，即单点 4 次到 5 次连续激光冲击中厚样品的表面凹坑深度增加值最大、单点 5 次连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品存在层裂相对应。因此，单点连续 5 次激光冲击为 Ti17 合金中厚样品的层裂阈值。

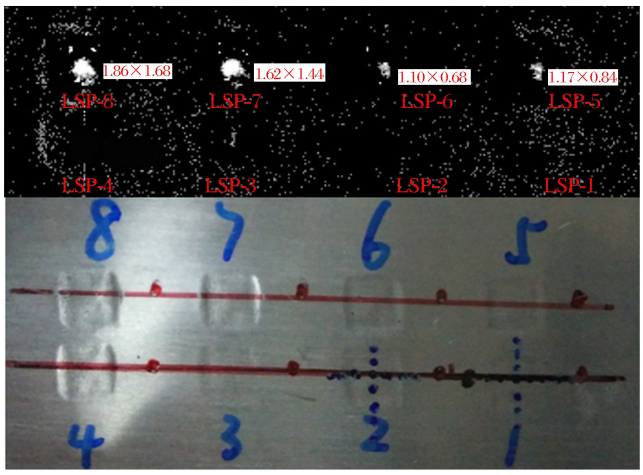


图 5 不同连续激光冲击次数下 Ti17 合金中厚样品冲击区域的 C 扫描成像图

Fig. 5 C-scan images of shot areas of Ti17 alloy mid-thick sample with different continue LSP shots

3.3 层裂位置

图 6 为 Ti17 合金中厚样品冲击区域中心的横截面特征形貌。由图 6 可知：单点 1～4 次连续激光冲击中厚样品的横截面无层裂；单点 5～8 次连续激光冲击中厚样品横截面存在层裂，并且单点 5、6、7 和 8 次连续激光冲击中厚样品的层裂位置（层裂厚度）分别约为 308、280、310 和 307 μm。

图 7 为靶材内部层裂形成原理图。由图 7 可知：LSP 过程中，靶材表面形成传向自由面的平面冲击波 C（见图 7(a)）；当平面冲击波 C 传至靶材自由面时，平面冲击波 C 反射形成传向靶材表面的平面稀疏波 R（见图 7(b)）；当 LSP 结束时，靶材表面立即形成传向自由面的平面卸载波 U；平面冲击波 C 为压力波，平面卸载波 U 为拉力波，平面稀疏波 R 为拉力波，当平面卸载波 U 与平面稀疏波 R 相互作用，形成一对反向拉力波时，作用区域形成动态拉应力；当动态拉应力幅值和持续时间达到一定值时，平面层裂形成（见图 7(c)）。

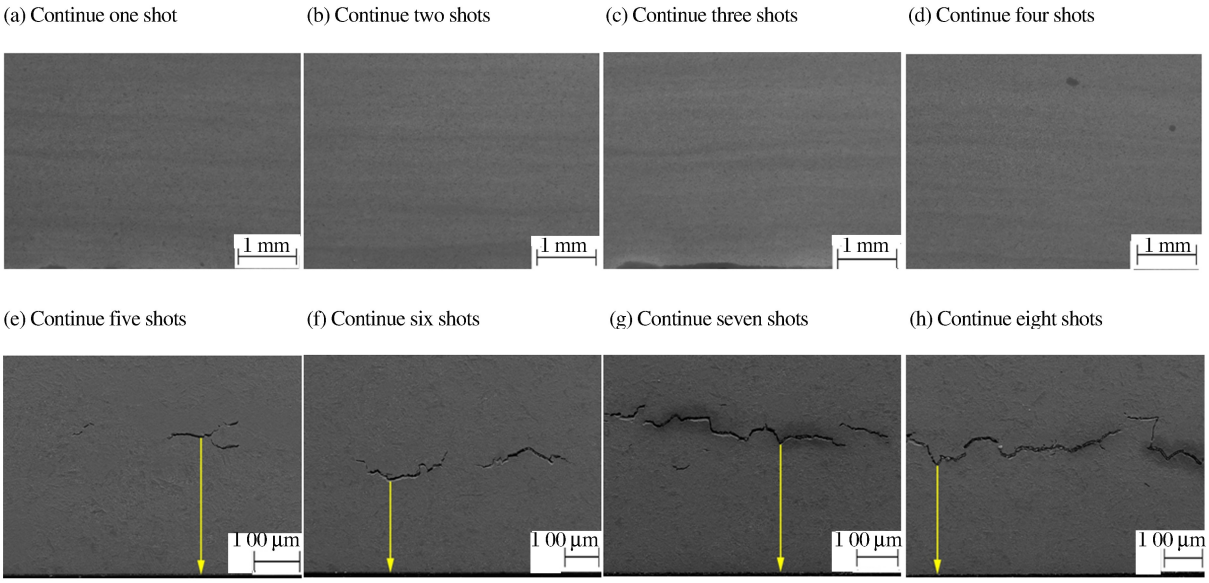


图 6　Ti17 合金中厚样品冲击区域中心的横截面特征形貌

Fig. 6　Cross-sectional characterization morphologies at center of LSP areas of Ti17 alloy mid-thick sample

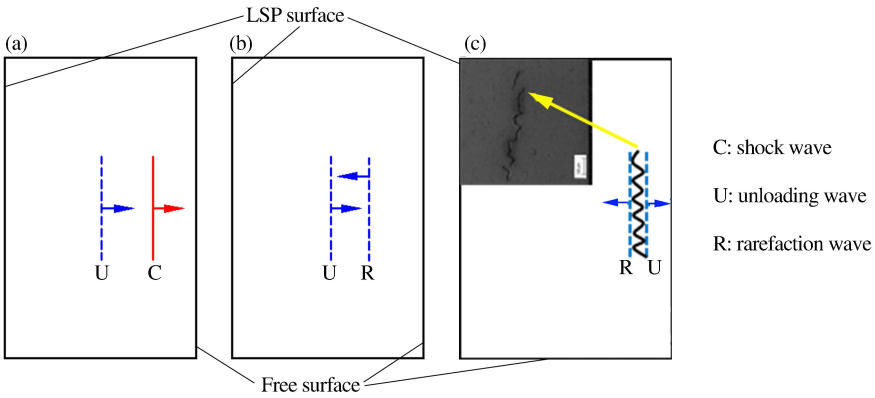


图 7　靶材内部层裂形成原理图

Fig. 7　Schematic diagram of interior spall formation of target

综上所述，当靶材内部动态拉应力幅值和持续时间满足层裂阈值条件时，靶材内形成层裂。动态拉应力幅值与冲击波峰值压力、靶材厚度和光斑大小相关，动态拉应力持续时间与激光脉宽和连续激光冲击次数相关。因此，只有在特定条件下，连续多次激光冲击金属材料才有可能产生层裂。实际应用中，我们采用专利技术在叶片边缘背面粘贴吸波层，从而有效地防止了激光冲击叶片产生层裂现象。

3.4　层裂机理

图 8 为单点 7 次连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂形貌，分别有晶界失效、晶内失效、微孔洞形核、微孔洞增长和微孔洞汇合。β 相基体上富集 β 稳定元素，所以 β 相的固有强度大于 α 相，且晶内 α 相强度稍大于晶界 α 相[20]，导致 Ti17 合金中厚样品的层裂微孔洞主要在晶界 α 相形核（见图 8(c)），也可能在晶内 α 相形核。随着连续激光冲击次数/动态拉应力持续时间增加，Ti17 合金内部的微孔洞增长和汇合（见图 8(d)～(e)），最终形成层裂，层裂失效模式为晶界失效和晶内失效（见图 8(a)～(b)）。图 8 所示的 Ti17 合金的层裂特性与 Boidin 等[15]的结果相似。因此，单点连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂为晶界失效和晶内失效的混合失效模式，但晶界失效模式起主要作用，层裂机理为韧性微孔洞的形核、增长和汇合。

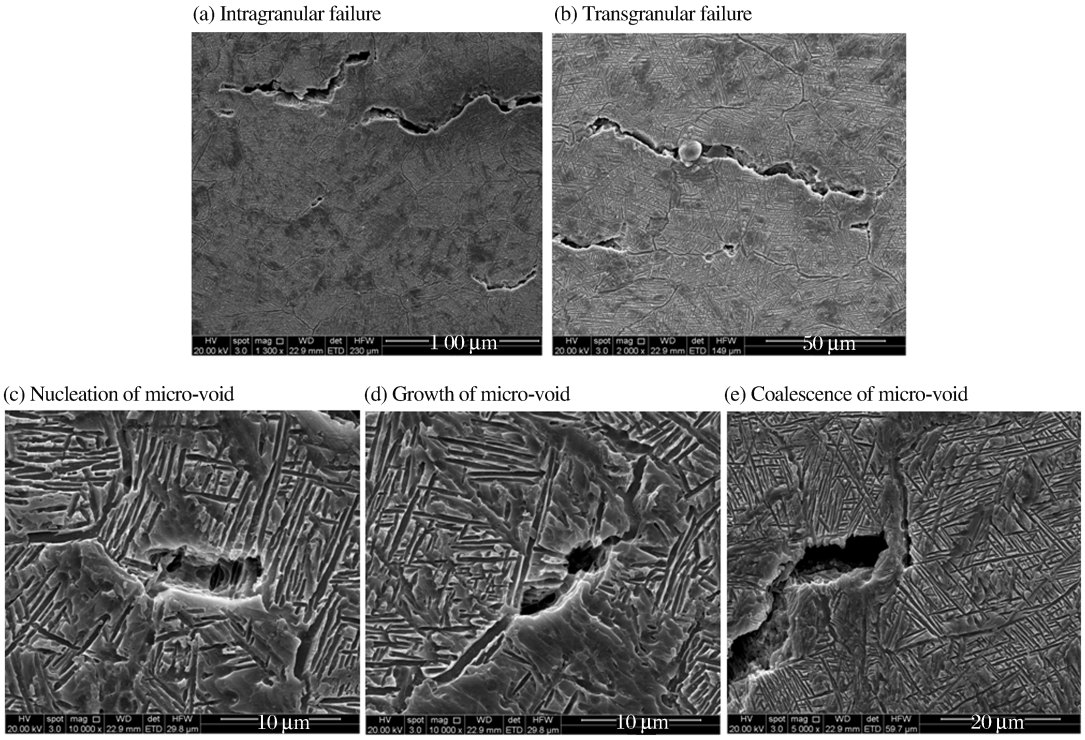


图 8 单点 7 次连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂形貌

Fig. 8 Spall morphology of Ti17 alloy mid-thickness sample with single spot and successive seven LSP shots

4 结 论

对 Ti17 合金中厚样品表面进行单点连续多次激光冲击，获得方形光斑单点 5 次连续激光冲击为 Ti17 合金的层裂阈值或改性临界值。实际应用中，激光冲击强化发动机叶片所用的单点连续激光冲击次数没有超过 5 次，且采用了防层裂措施，因此不会产生层裂现象。具体研究结论如下。

(1)随着连续激光冲击次数增加，Ti17 合金表面凹坑深度和凹坑中心凸起高度逐渐增加并趋于饱和。单点 1～8 次连续激光冲击中厚样品的表面凹坑深度分别为 7.10、8.87、13.2、20.0、32.9、38.1、40.6 和 45.3 μm。单点 1～8 次连续激光冲击中厚样品的表面凹坑中心凸起高度分别为 6.00、6.87、11.0、18.0、22.1、27.4、30.4 和 31.0 μm。单点从 4 次到 5 次连续激光冲击中厚样品表面凹坑深度增加值最大为 64.5%。

(2)单点 5 次连续激光冲击为 Ti17 合金中厚样品的层裂阈值，与表面凹坑深度增加值最大相对应。随着连续激光冲击次数增加，层裂面积逐渐增大。单点 5～8 次连续激光冲击中厚样品的层裂尺寸分别为 1.17 mm×0.84 mm、1.10 mm×0.68 mm、1.62 mm×1.44 mm 和 1.86 mm×1.68 mm。

(3)单点 5～8 次连续激光冲击 Ti17 合金中厚样品的层裂位置(层裂厚度)分别约为 308、280、310 和 307 μm。Ti17 合金中厚样品的层裂机理为韧性微孔洞形核、增长和汇合，最终形成晶界失效和晶内失效的层裂，且晶界失效起主要作用。

本文中，采用方形光斑单点连续多次激光冲击技术，对 Ti17 合金中厚样品进行层裂阈值和层裂特性研究，通过超声波无损检测技术检测出激光冲击中厚样品的层裂现象，研究结果对激光冲击强化金属材料改性工业应用具有重要价值。但针对不同厚度 Ti17 合金样品，在不同激光工艺参数下样品的层裂阈值，以及样品内部的应变分布有待进一步深入研究。基于激光冲击强化 Ti17 合金改性临界值/层裂阈值研究，可建立完善的激光冲击强化整体叶盘工艺数据库。

感谢中科院力学所等单位的大力支持和帮助！

参考文献：

[1] ZHANG Y K, LU J Z, REN X D, et al. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2009,30(5): 1697-1703. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.07.017.

[2] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys: Application to high cycle fatigue behaviour[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996,210(1/2):102-113. DOI: 10.1016/0921-5093(95)10084-9.

[3] BERGANT Z, TRDAN U, GRUM J. Effects of laser shock processing on high cycle fatigue crack growth rate and fracture toughness of aluminium alloy 6082-T651[J]. International Journal of Fatigue, 2016,87:444-455. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.02.027.

[4] LU J Z, QI H, LUO K Y, et al. Corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel subjected to massive laser shock peening impacts with different pulse energies[J]. Corrosion Science, 2014,80:53-59. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.11.003.

[5] LUO K Y, WANG C Y, LI Y M, et al. Effects of laser shock peening and groove spacing on the wear behavior of non-smooth surface fabricated by laser surface texturing[J]. Applied Surface Science, 2014,313:600-606. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.06.029.

[6] SPANRAD S, TONG J. Characterization of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6AL-4V aerofoil specimens[J]. Procedia Engineering, 2011,528(4):2128-2136. DOI: 10.1016/j.proeng.2010.03.188.

[7] 罗新民，马辉，张静文，等. 激光冲击中的“应变屏蔽”和“约束击穿”[J]. 材料导报，2010，24(5)：11-15.
LUO Xinmin, MA Hui, ZHANG Jingwen, et al. “Strain-screening” and “constraint-breakdown” in laser shock processing[J]. Materials Review, 2010,24(5):11-15.

[8] LIU Q, DING K, YE L, et al. Spallation-like phenomenon induced by laser shock peening surface treatment on 7050 aluminum alloy[C]// ATRENS A, BOLAND J N. Structural integrity and fracture: Proceedings of the International Conference, SIF 2004. Brisbane, Australia: School of Mechanical and Mining Engineering Publications, 2004:235-240. DOI: 10.1142/9789812777973_0024.

[9] LIU Q, YANG C H, DING K, et al. The effect of laser power density on the fatigue life of laser-shock-peened 7050 aluminium alloy[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2007,30(11):1110-1124. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2007.01180.x.

[10] JARMAKANI H, MADDOX B, WEI C T, et al. Laser shock-induced spalling and fragmentation in vanadium [J]. Acta Materialia, 2010,58(14):4604-4628. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.04.027.

[11] LESCOUTE E, DE RESSEGUIER T, CHEVALIER J M, et al. Ejection of spalled layers from laser shock-loaded metals[J]. Journal of Applied Physics, 2010,108(9):93510. DOI: 10.1063/1.3500317.

[12] DALTON D A, BREWER J L, BERNSTEIN A C, et al. Laser-induced spallation of aluminum and Al alloys at strain rates above 2×10^{6} s^{-1}[J]. Journal of Applied Physics, 2008,104(1):13526. DOI: 10.1063/1.2949276.

[13] 翟少栋，李英华，彭建祥，等. 平面碰撞与强激光加载下金属铝的层裂行为[J]. 爆炸与冲击，2016，36(6)：767-773. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0767-07.
ZHAI Shaodong, LI Yinghua, PENG Jianxiang, et al. Spall behavior of pure aluminum under plate-impact and high energy laser shock loadings[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(6):767-773. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0767-07.

[14] TYLER C, MILLETT J C F, BOURNE N K. Spallation in Ti-6Al-4V: Stress measurements and recovery[J]. AIP Conference Proceedings, 2006,845(1):674-677. DOI: 10.1063/1.2263412.

[15] BOIDIN X, CHEVRIER P, KLEPACZKO J R, et al. Identification of damage mechanism and validation of a fracture model based on mesoscale approach in spalling of titanium alloy[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006,43(14/15):4595-4615. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.06.039.

[16] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry

[J]. Journal of Applied Physics, 1990,68(2):775-784. DOI: 10.1063/1.346783.

[17] GE M Z, XIANG J Y. Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016,680:544-552. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.04.179.

[18] 张建泉,陈荣华,强希文,等.激光产生的激波在靶材中的传播及层裂效应[J].中国激光,2002,29(3):197-200. DOI: 10.3321/j.issn:0258-7025.2002.03.002.
ZHANG Jianquan, CHEN Ronghua, QIANG Xiwen, et al. Propagation and spall effect of shock wave induced by laser in targets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002,29(3):197-200. DOI: 10.3321/j.issn:0258-7025.2002.03.002.

[19] 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. DOI: 10.1016/j.msea.2011.10.104.

[20] HERASYMCHUK O M, KONONUCHENKO O V, MARKOVSKY P E, et al. Calculating the fatigue life of smooth specimens of two-phase titanium alloys subject to symmetric uniaxial cyclic load of constant amplitude[J]. International Journal of Fatigue, 2016,83:313-322. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.11.002.

Spall of Ti17 alloy induced by laser shock peening with multiple shots

WU Junfeng[1,2], ZOU Shikun[2], ZHANG Yongkang[3], SUN Guifang[1],
NI Zhonghua[1], CAO Ziwen[2], CHE Zhigang[2]

(1. *School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing* 211189, *Jiangsu, China*;
2. *Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing* 100024, *China*;
3. *School of Electro-mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou* 510000, *Guangdong, China*)

Abstract: In order to investigate spalling response and the spall threshold of Ti17 alloy under laser shock peening (LSP), the surface of a 5 mm-thick sample was shocked by multiple laser shots with the shot number ranging one to eight shots. The laser employed has a repetition rate of 1 Hz, the pulse width of 15 ns, the pulse energy of 30 J, and the spot size of 4 mm × 4 mm. The surface morphology, the internal damage and the spall morphology after LSP were characterized by non-contact optical profiler, ultrasonic nondestructive testing technique and scanning electron microscope, respectively. The results indicate that the increment of the shot number from four to five results in increasing the depression depth of the surface up to 64.5%. The spall threshold is reached by LSP with continuous five shots. The spall thickness observed after LSP with five to eight shots ranges from 280 μm to 310 μm. The spall mechanism is due to the nucleation, growth and coalescence of the ductile micro-voids, leading to intragranular failure and transgranular failure. This work may provide valuable information for the optimization of integrated blisk rotators with LSP.

Keywords: laser shock peening; Ti17 alloy sample; spall characteristic; spall threshold; ultrasonic nondestructive testing

(责任编辑 丁 峰)