

激光与光电子学进展

激光冲击 2050 铝锂合金残余应力及疲劳性能研究

孙汝剑^{1*}, 曹子文¹, 马晓光², 车志刚¹, 邹世坤¹, 吴俊峰¹¹中国航空制造技术研究院先进表面工程技术航空科技重点实验室, 北京 100024;²中国航空制造技术研究院材料应用研究部, 北京 100024

摘要 激光冲击强化是一种先进的材料表面抗疲劳制造技术, 本文采用正交试验方法研究了激光冲击 2050 铝锂合金表面残余应力分布规律, 获得了优化的激光冲击参数, 并在此参数下验证了疲劳寿命增益。研究结果表明: 激光冲击强化诱导的残余应力与试样的几何特性相关性较强, 而激光冲击参数本身搭接率对残余应力的影响大于激光能量、大于冲击次数, 最佳工艺参数为激光功率密度 $5.30 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击。采用此参数冲击后 260 MPa 和 200 MPa 应力水平下疲劳寿命分别提高了 22% 和 63%。

关键词 激光技术; 激光冲击强化; 2050 铝锂合金; 残余应力; 疲劳特性

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212826

Residual Stress and Fatigue Property of Laser Shock Peening 2050 Aluminum-Lithium Alloy

Sun Rujian^{1*}, Cao Ziwen¹, Ma Xiaoguang², Che Zhigang¹, Zou Shikun¹, Wu Junfeng¹¹Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Surface Engineering, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;²Material Research Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing, 100024, China

Abstract Laser shock peening (LSP) is an advanced surface modification technique for anti-fatigue manufacturing. In this paper, the orthogonal test method was employed to investigate the distribution of residual stress on the surface of 2050 aluminum-lithium alloy. The correspondingly optimal LSP parameters were obtained. Furthermore, the fatigue life extension was verified with these parameters. Results show that there is a strong correlation between the LSP-induced residual stress and the geometric characteristics of the specimen. For the LSP parameters which affected residual stress, the effect of overlapping rate is greater than laser energy, and further more significant than impact times. The optimal LSP parameters are laser power density of $5.30 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, overlapping rate of 50%, and peened twice. With the optimal LSP parameters, the fatigue life increased by 22% and 63% at 260 MPa and 200 MPa stress level, respectively.

Key words laser technique; laser shock peening; 2050 aluminum-lithium alloy; residual stress; fatigue property

1 引言

2050 铝锂合金是一种由美国 2004 年注册的三代铝锂合金, 是在 2098 铝合金的基础上通过调整 Mn、Mg、Li 等微合金元素的含量改性而成, 主要产品形式为厚板, 与 7050-T7451 铝合金厚板相比, 2050 铝锂合金具有密度低、弹性模量高、疲劳性及抗应力腐蚀性能优良的特点, 并能获得 5% 的减重效果^[1-2]。近年来, 采用 2050 铝锂合金替代 7050 铝合金制造飞机机身框、梁

等大型高应力结构体成为国内航空设计、制造单位关注的热点。而随着我国对新一代飞机长寿命、高可靠性服役要求的不断提高, 以激光为代表的高能束加工技术得到了长足的发展。激光冲击强化(LSP)即为此过程中发展起来的一种先进材料表面抗疲劳制造技术, 更具体的是一种利用激光诱导等离子体冲击力学效应进行材料表面强化的工艺方法^[3-4]。

激光冲击强化技术原理如下: 采用短脉冲(数十纳秒)的高峰值功率密度($\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$)激光辐照在覆盖有

收稿日期: 2021-10-28; 修回日期: 2021-11-10; 录用日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2021-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(52101103, 51875542)

通信作者: *rukingson@163.com

吸收层(黑胶带或铝箔)和约束层(玻璃或者水)的金属表面,激光能量被吸收层迅速吸收,形成高温(大于 10000 °C)、高压(大于 1 GPa)等离子体冲击波,由于约束层的约束作用,冲击波无法向外扩散,只可向材料内

部传递,材料以极高应变率(10^6 s^{-1})发生动态屈服,产生冷塑性变形,同时伴随位错、孪晶等微观组织演变,进而导致材料近表面的晶粒细化并在一定深度上形成残余压应力层^[5-7],如图 1^[8]所示。

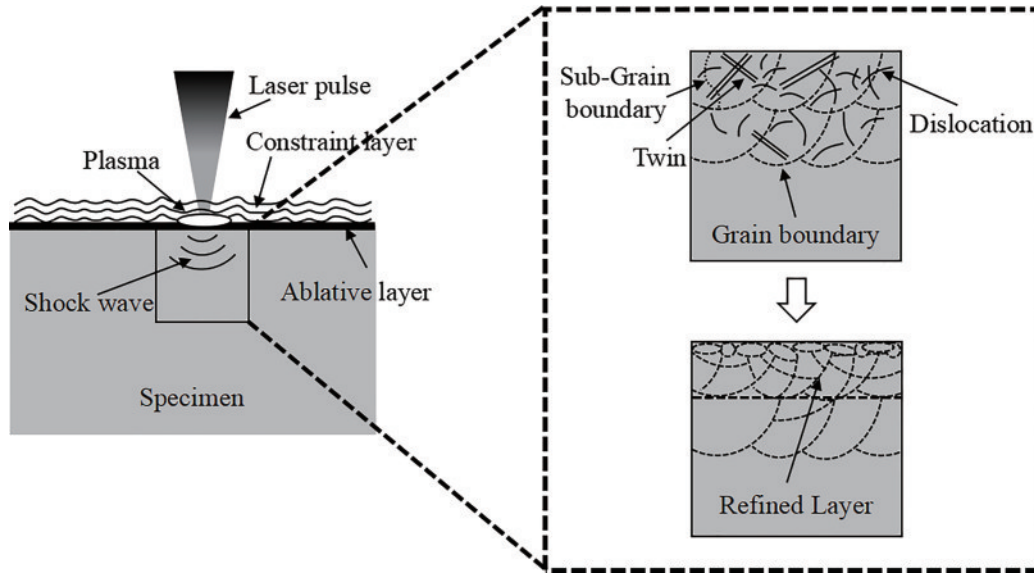


图 1 激光冲击强化及冲击区域材料微观组织演变示意图^[8]

Fig. 1 Schematic of laser shock peening and its microstructural evolution in the peened region^[8]

具体到铝锂合金激光冲击强化研究上,公开文献显示:中南大学 Yang 等^[9]研究了激光冲击强化对 2195 铝锂合金的微观组织及力学性能影响,他们发现强化层晶粒细化明显,出现了明显的纳米晶,一次冲击后晶粒尺寸约为 93 nm、三次冲击后纳米晶尺寸进一步细化至 70 nm 左右;在其另一篇报道中^[10],他们分析了激光冲击 2195 铝锂合金的表面梯度组织特征及其演化机制。此外,他们还指出激光冲击强化能够一定程度上提升 2195 铝锂合金的组织 and 力学性能的热稳定性^[11]。Karthik 等^[12]也研究了多次激光冲击 2060-T8 铝锂合金的组织、织构和点蚀性能演变特征。残余应力方面,Yang 等^[9]分别采用单次和三次冲击 2195 铝锂合金,在其表面分别获得了 199 MPa 和 266 MPa 的残余压应力。Zabeen 等^[13]采用激光冲击 2099 铝锂合金并对其残余应力演变特征进行了分析,发现激光冲击强化诱导产生了幅值约为 300 MPa 的残余压应力。Keller 等^[14]则从试验和有限元数值模拟两个维度研究了激光冲击 2198 铝锂合金的残余应力分布特征。Hatamleh 等^[15]则进一步研究了激光冲击 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接接头的残余应力分布规律,并探究了

其应力松弛行为。此外,他们还对比研究了机械喷丸与激光冲击强化对 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接接头的裂纹扩展特性的影响,发现喷丸后的裂纹扩展速率并未出现明显减低,而激光冲击强化后的裂纹扩展速率出现明显降低^[16]。然而公开文献仍未见关于 2050 铝锂合金的激光冲击强化的相关报道。

本文以 2050 铝锂合金为研究对象,通过设计正交试验探究激光冲击对 2050 铝锂合金表面残余应力的影响规律,获得优化的工艺参数。随后,采用优化的工艺参数对孔结构进行冲击,对比冲击前后孔结构高周疲劳性能,验证激光冲击强化效果,为激光冲击强化技术在 2050 铝锂合金上的工程化应用提供技术支撑。

2 试验及表征

2.1 材料及试样制备

本研究中所选用材料为西南铝业(集团)有限责任公司研制的 2050 铝锂合金轧制板,原始试板尺寸为 3000 mm × 1500 mm × 45 mm。其化学成分、物理及机械性能分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 2050 铝锂合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2050 aluminum-lithium alloy

Element	Cu	Li	Mg	Mn	Ag	Zr	Fe	Si	Ti	Al
Mass fraction / %	3.2-3.9	0.7-1.3	0.2-0.6	0.2-0.5	0.2-0.7	0.06-0.14	≤0.01	≤0.1	≤0.01	Bal.

根据 2050 铝锂合金未来应用零件典型特征厚度设计了厚度分别为 2.5 mm、4.0 mm、15 mm 三种试

样。试样具体加工步骤如下,首先采用线切割取 45 mm 厚的 2050 铝锂合金板表层切取 60 mm ×

表 2 2050 铝锂合金的物理及机械性能

Table 2 Physical and mechanical properties of 2050 aluminum-lithium alloy

2050 aluminum-lithium alloy	Value
Density / (g·cm ⁻³)	2.7
Yield strength /MPa	462
Ultimate tensile strength /MPa	551
Elongation /%	11
Young's modulus /GPa	76
Poisson's ratio	0.38

40 mm 的不同厚度的小块,随后采用机械铣削的方法对试样进行粗加工到相应厚度附近,随后采用磨床对待冲击强化表面机械磨抛,进而获得待强化的残余应力分析试样。

根据 GB/T 3075—2021《金属材料疲劳试验轴力控制方法》设计如图 2 所示的板状疲劳试样(厚度为 4 mm)。为了提高疲劳断口位置的一致性,本研究中在标准疲劳试样的中心加工了直径为 8 mm 的通孔,从而可以在应力集中的效应下准确获得激光冲击强化的疲劳增益。激光冲击强化采用异步双面冲击的方式进行,冲击区域大小为 20 mm×20 mm。此外,需要说明的是,试样的开孔是在完成双面激光冲击强化之后。

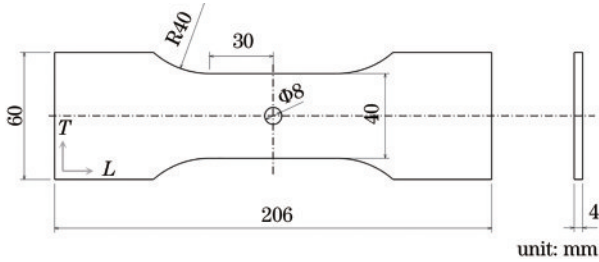


图 2 孔疲劳试样设计

Fig. 2 Design of hole fatigue specimen

表 3 残余应力分析正交试验因素与水平表

Table 3 Factors and levels of orthogonal experiment for residual stress analysis

Level	Factors			
	A	B	C	D
	Laser power density / (GW·cm ⁻²)	Overlapping rate /%	Impact times	Specimen thickness /mm
1	5.30	15%	1	2.5
2	10.61	33%	2	4.0
3	15.92	50%	3	15.0

图 3(a)和图 3(b)为按照设计的正交试验表分别采用圆形光斑和方形光斑冲击后的残余应力试样实物照片。

2.4 残余应力表征

残余应力测试方法为无损 X 射线衍射法,测试设备为 Proto 公司的 LXR D 型 X 射线衍射仪,测试标准

2.2 激光冲击强化

采用中国航空制造技术研究院装备的 LAMBER-H40 型激光冲击强化系统进行激光冲击强化试验。该系统由 Nd:YAG 脉冲激光器、激光外光路、外控程序、多轴机械手臂、水约束层装置以及反馈控制器等部分组成。主要技术参数包括:激光波长 1064 nm、激光脉冲宽度 15 ns、单脉冲最高能量 40 J、圆形或方形光斑,圆形光斑大小 φ4~6 mm、方形光斑边长 4~6 mm 可调。激光强度除了用单脉冲能量表示外,还可用功率密度(I)来表示,其表达式为

$$I = \frac{E}{S\tau}, \quad (1)$$

式中: E 为激光单脉冲能量; S 为光斑面积; τ 为脉冲宽度。工件运动采用外部机械手臂控制,通过机械手多轴联动实现试样的多自由度运动。激光冲击强化具体流程如下:首先选用厚度为 100 μm 的 3M 专用铝箔作为吸收层粘贴在试样表面(为保证强化效果,铝箔胶带与试样之间不能存在空气泡),采用 1~2 mm 去离子水流层作为约束层。激光经全反镜和聚焦透镜聚焦在工件表面。

2.3 正交试验设计

由于激光冲击强化参数之间具有独立性,且包含激光功率密度、冲击次数、光斑大小、搭接率等,同时残余应力还受材料自身属性、结构等特征的影响,因而本研究设计了正交试验来探究激光冲击强化对 2050 铝锂合金表面残余应力分布的影响规律。表 3 为根据参数数量设计的四因素三水平正交试验表头,四个因素依次为激光功率密度、搭接率、冲击次数和试样厚度,激光功率密度的三个水平分别为 5.30 GW·cm⁻²、10.61 GW·cm⁻²和 15.92 GW·cm⁻²,搭接率对应的三个水平分别为 15%、33%、50%,冲击次数对应的三个水平分别为 1 次、2 次、3 次,试样厚度对应的三个水平分别为 2.5 mm、4.0 mm、15 mm。表 4 为基于表 3 选定的因素及水平设计的正交试验表。

为 EN 15305—2008《Non-destructive Testing-Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction》,测试条件为 sin²ψ 法、Cu 靶、准直管直径 2 mm、衍射角数量 11 个。每个试样测上任意取 5 点测量,其平均值作为最终测试结果。

表 4 残余应力分析正交试验表设计

Table 4 Design of orthogonal experiment table for residual stress analysis

Number	Factors				Residual stress /MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	
2	1	2	2	2	
3	1	3	3	3	
4	2	2	1	3	
5	2	1	2	1	
6	2	3	3	2	
7	3	3	1	2	
8	3	1	2	3	
9	3	2	3	1	
K_1					
K_2					
K_3					
Range					

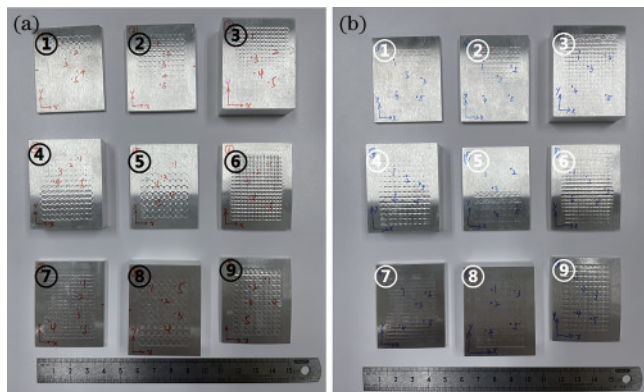


图 3 激光冲击强化后的残余应力试样实物。(a)圆形光斑冲击; (b)方形光斑冲击

Fig. 3 Residual stress specimen after laser shock strengthening. (a) Round spot peening; (b) square spot peening

2.5 疲劳寿命表征

采用 MTS-50 kN-5 型液压伺服疲劳试验机进行激光冲击强化前后的孔结构高周疲劳寿命测试,该试验系统由电源控制柜、疲劳试验机主机及疲劳测试系统组成。试验温度为室温,载荷形式为正弦波曲线加载,应力水平为 260 MPa 和 200 MPa、应力比为 0.1、频率为 8 Hz。测试前需保证试样装夹紧固不打滑,测试时先施加静载荷然后再施加动载荷,当试样破损后,疲劳试样机将运行断电保护程序,试验随即停止。

3 分析与讨论

3.1 残余应力

表 5 和表 6 为圆形光斑冲击后轧制方向(L 向)和

表 5 圆形光斑冲击后 L 向残余应力结果

Table 5 Residual stress along L direction in round spot peening case

Number	Factors				Residual stress /MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	-91.06
2	1	2	2	2	-204.66
3	1	3	3	3	-320.42
4	2	2	1	3	-246.42
5	2	1	2	1	-58.54
6	2	3	3	2	-140.54
7	3	3	1	2	-122.62
8	3	1	2	3	-241.40
9	3	2	3	1	-17.06
K_1	-616.14	-578.88	-460.10	-74.60	
K_2	-445.50	-280.26	-504.60	-467.82	
K_3	-381.08	-583.58	-478.02	-808.24	
Range	-235.06	-303.32	-44.50	-733.64	

表 6 圆形光斑冲击后 T 向残余应力结果

Table 6 Residual stress along T direction in round spot peening case

Number	Factors				Residual stress /MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	-50.50
2	1	2	2	2	-182.78
3	1	3	3	3	-317.08
4	2	2	1	3	-243.78
5	2	1	2	1	-68.40
6	2	3	3	2	-132.76
7	3	3	1	2	-142.60
8	3	1	2	3	-243.04
9	3	2	3	1	6.26
K_1	-550.36	-537.32	-436.88	-61.14	
K_2	-444.94	-244.92	-494.22	-458.14	
K_3	-379.38	-592.44	-443.58	-803.90	
Range	-170.98	-347.52	-57.34	-742.76	

宽度方向(T 向)的残余应力结果。由表 5 可知,激光冲击强化在 2050 铝锂合金表面 L 向诱导产生了明显的残余压应力,且由于冲击参数的不同,其残余应力的结果也明显不同。1~9 号试样的残余应力数值分别为 -91.06 MPa、-204.66 MPa、-320.42 MPa、-246.42 MPa、-58.54 MPa、-140.54 MPa、-122.62 MPa、-241.4 MPa、-17.06 MPa,其中,残余应力数值超过 200 MPa 的分别为 2 号、3 号、4 号和 8 号试样,而残余应力数值小于 100 MPa 的包括 1 号、

5号和9号试样。这说明激光冲击强化残余应力与激光冲击强化参数和试样的几何属性具有较强的相关性^[17-18]。

类似地,由表6可知,激光冲击强化后T向残余应力的数值与L向接近,但在数值上也存在一定的差异,这是由L向和T向微观组织差异引起的各向异性所致。从表面残余应力的数值上看,3号、4号和8号试样的表面残余应力数值超过了200 MPa,而2号试样的表面残余应力数值略有下降。此外值得注意的是,9号试样出现了少量拉应力,这是因为9号试样的厚度为2.5 mm,其冲击过程中的激光功率密度和冲击次数均为最高水平(即 $15.92 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、3次冲击),因而试样宏观上出现了明显的弯曲,表面的向外弯曲导致其压缩塑性变形减小,从而最终导致其表面残余应力由压应力状态转变为了拉应力。

图4为圆形光斑冲击条件下四种因素下的极值(R)演变规律,其反映了各个因素对表面残余应力影响程度的大小。从图4可以明显看出,试样厚度对表面残余应力的影响明显超过其他三个因素,这说明表面残余应力是一种严重依赖于几何结构的内应力^[18]。而从激光冲击参数方面还可看出,搭接率对表面残余应力的影响大于激光功率密度和冲击次数。这说明激光冲击强化参数选择时应当优先设计搭接率,进而调整激光功率密度和冲击次数。

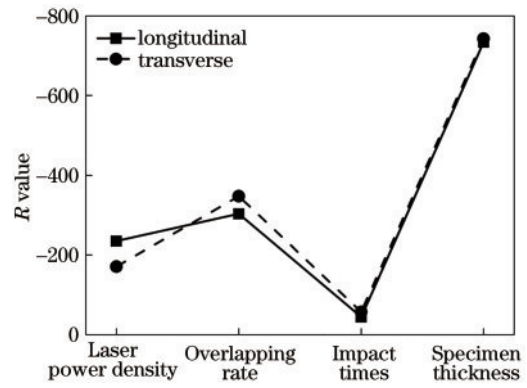


图4 圆形光斑冲击条件下四种因素下的极值演变规律
Fig. 4 Evolution of range value with four different factors in the round spot peening case

图5为圆形光斑冲击条件下四种因素在三种不同水平上K值结果,其反映了各参数在不同应力水平上的表面残余应力水平,其数值为同一因素在同一水平上的加和。由图5(a)可知,随着激光冲击强化能量的增加,残余应力在数值上不断减小,可见激光冲击能量的提高对表面残余应力并不一定产生正向作用。图5(b)展示了随着搭接率的增加其表面残余应力数值的变化规律,15%和50%搭接率下表面残余应力的水平相当,而在33%冲击时,其表面残余应力的数值则出现了一定程度的减小。而图5(c)则反映了冲击次数对

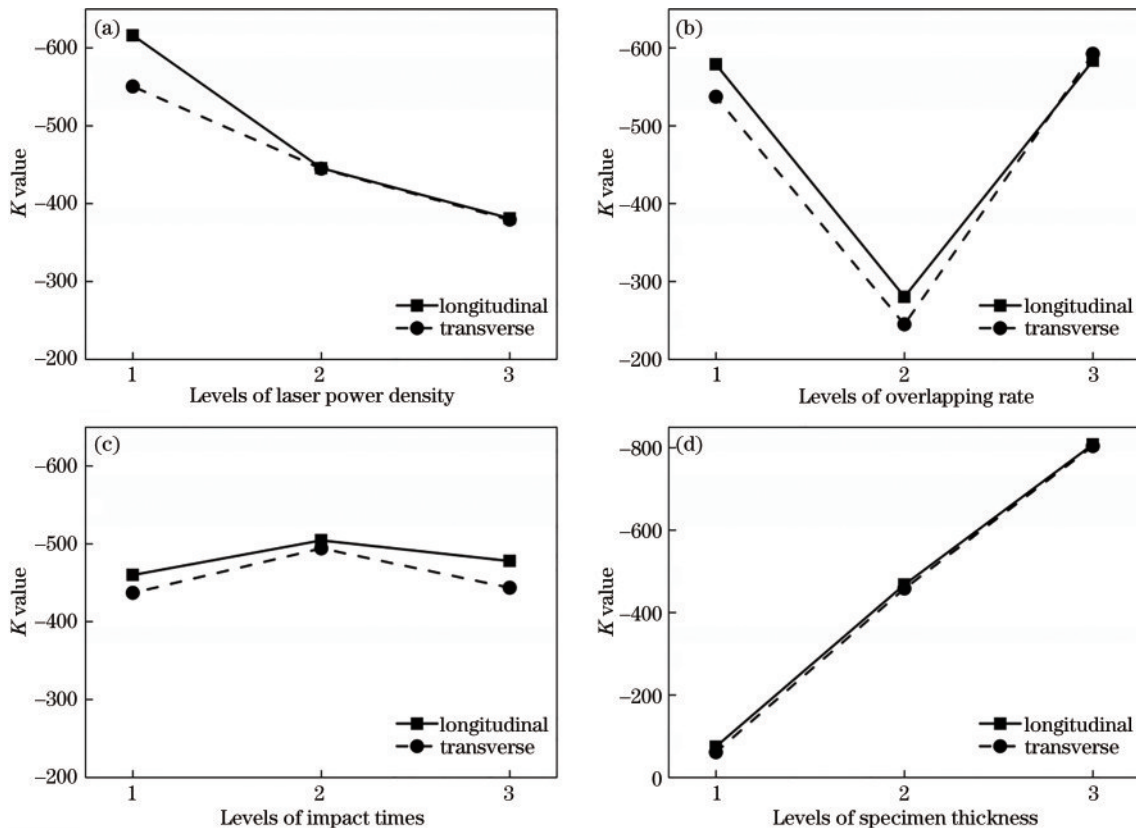


图5 圆形光斑冲击四种因素在三种不同水平上K值结果。(a)激光功率密度;(b)搭接率;(c)冲击次数;(d)试样厚度
Fig. 5 Changing of K values at three different levels with regards to four different factors in the round spot peening case. (a) Laser power density; (b) overlapping rate; (c) impact times; (d) specimen thickness

表面残余应力的影响,在冲击次数由一次增加到三次的过程中,整体上表面残余应力的数值变化不大,且发现冲击次数由二次增加到三次,表面残余应力的数值出现了一定程度的减小。而从图 5(d)中则可明显发现随着试样厚度的增加,表面残余应力数值几乎出现了线性增长。基于以上分析认为, L 和 T 向的残余应力数值差异性较小,圆形光斑冲击的最佳激光冲击强化参数为激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击。

表 7 和表 8 为方形光斑冲击后轧制方向(L 向)和宽度方向(T 向)的表面残余应力结果。与圆形光斑冲击结果不同的是,方形光斑冲击 2 号、3 号、4 号、6 号和 8 号试样的残余应力数值均超过 200 MPa,而残余应力数值小于 100 MPa 的仅有 9 号试样,这从一定程度上也反映了方形光斑冲击的残余应力的均匀性更好。

表 7 方形光斑冲击后 L 向残余应力结果

Table 7 Residual stress along L direction in square spot peening case

Number	Factors				Residual stress /MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	-124.66
2	1	2	2	2	-232.14
3	1	3	3	3	-326.20
4	2	2	1	3	-281.36
5	2	1	2	1	-93.06
6	2	3	3	2	-212.04
7	3	3	1	2	-185.04
8	3	1	2	3	-319.34
9	3	2	3	1	-18.72
K_1	-683.00	-725.36	-591.06	-110.78	
K_2	-586.46	-343.92	-644.54	-629.22	
K_3	-523.10	-723.28	-556.96	-926.90	
Range	-159.90	-379.36	-53.48	-816.12	

同样地,在方形光斑冲击的 T 向上(表 8),表面残余应力数值超过 200 MPa 的依然是 2 号、3 号、4 号和 8 号试样,6 号试样的表面残余应力略小于 200 MPa,而应力数值低于 100 MPa 的也仅为 9 号试样,与圆形光斑冲击结果不同的是,方形光斑冲击未检测出拉应力,这是因为方形光斑内部激光能量分布均匀,不存在圆形光斑因高斯分布导致的能量不均匀现象,使其峰值等效压力有所减小,因而其诱导的变形会相应地减小。

图 6 为方形光斑冲击条件下四种因素下的极值演变规律,其结果与圆形光斑(图 4)并无明显差异,这再次验证了试样厚度对表面残余应力的影响大于搭接率、激光能量、冲击次数。

图 7 为方形光斑冲击条件下四种因素在三种不同水平上 K 值结果。由图 7 可知,方形光斑冲击条件下

表 8 方形光斑冲击后 T 向残余应力结果

Table 8 Residual stress along T direction in square spot peening case

Number	Factors				Residual stress /MPa
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	-111.08
2	1	2	2	2	-263.44
3	1	3	3	3	-354.48
4	2	2	1	3	-270.24
5	2	1	2	1	-114.74
6	2	3	3	2	-193.16
7	3	3	1	2	-175.84
8	3	1	2	3	-322.26
9	3	2	3	1	-42.06
K_1	-729.00	-703.58	-557.16	-155.80	
K_2	-578.14	-420.24	-700.44	-632.44	
K_3	-540.16	-723.48	-589.70	-946.98	
Range	-188.84	-303.24	-143.28	-791.18	

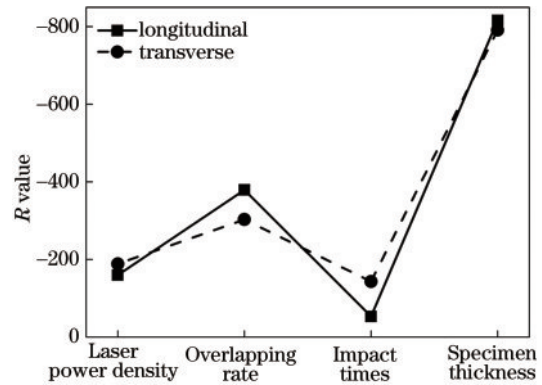


图 6 方形光斑冲击条件下四种因素下的极值演变规律

Fig. 6 Evolution of range value with four different factors in the square spot peening case

的因素对表面残余应力的影响规律与圆形光斑基本一致。其差异主要存在于 K 值数值的大小,但 K 值数值的大小不影响参数选优的过程。因此:从表面 L 向残余应力结果上最佳激光冲击强化参数应为激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 15%、2 次冲击;从表面 T 向残余应力结果上最佳激光冲击强化参数则为激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击。但实际上由于 L 向 15% 和 50% 冲击其 K 值差异极小,所以总体上可认为激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击的效果最佳。

图 8 为在 15 mm 厚度试样上采用圆形光斑激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击的残余应力结果。图中空心方形代表试验测量结果,实心圆形代表平均值,黑色虚线为误差带。由图 8 可知,冲击后试样表面的残余压应力数值为 313.8 MPa,0.1 mm 深度上的残余压应力为 270.7 MPa,0.3 mm 深度上的

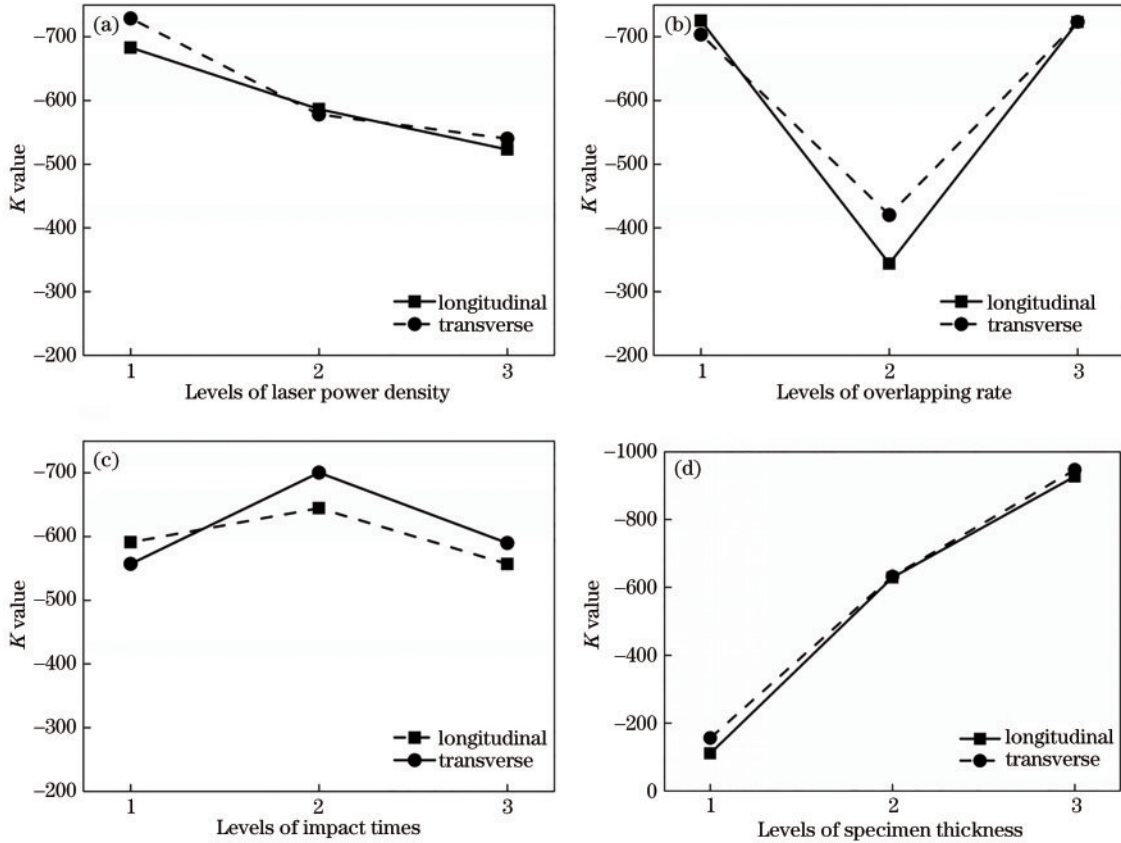


图 7 方形光斑冲击四种因素在三种不同水平上 K 值结果。(a)激光功率密度;(b)搭接率;(c)冲击次数;(d)试样厚度
Fig. 7 Changing of K values at three different levels with regards to four different factors in the square spot peening case. (a) Laser power density; (b) overlapping rate; (c) impact times; (d) specimen thickness

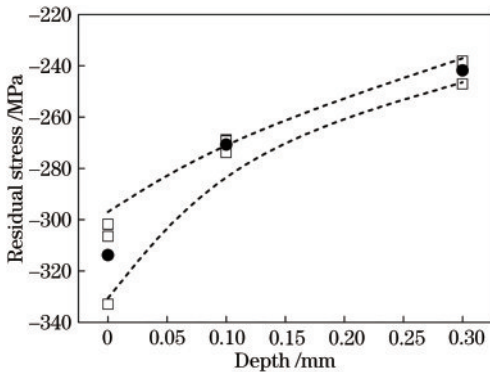


图 8 在激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击下,圆形光斑的残余应力测试结果
Fig. 8 Residual stress test results of round spot with laser power density of $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$, overlapping rate of 50%, and peened twice

残余压应力为 241.8 MPa,这说明经过正交试验选定的最佳冲击参数获得了高表面幅值,且具有应力梯度分布的残余压应力分布。

3.2 高周疲劳

图 9 为母材 (BM) 和圆形光斑激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、50% 搭接率、2 次冲击的疲劳试样在 260 MPa 和 200 MPa 应力水平下高周疲劳寿命对比图。从图 2 可以看出,260 MPa 应力水平下母材的平

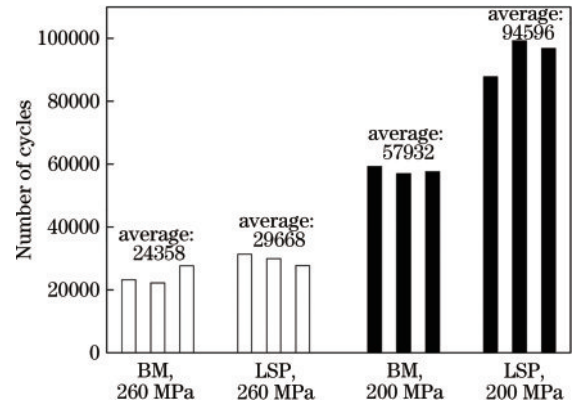


图 9 在激光功率密度 $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、2 次冲击下,圆形光斑的疲劳寿命结果
Fig. 9 Fatigue lives of round spot with laser power density of $5.30 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$, overlapping rate of 50%, and peened twice

均疲劳寿命为 24358 周次,而激光冲击强化试样的疲劳寿命周次为 29668,疲劳寿命提高为 22%。而在 200 MPa 应力水平下,母材的平均疲劳寿命提高到了 57932 周次,激光冲击强化后的疲劳寿命周次则进一步提高到了 94596,强化后的疲劳增益为 63%。这说明激光冲击强化后孔疲劳试样获得了良好的疲劳抗力。这是因为激光冲击强化诱导的残余压应力可在拉

拉疲劳过程中,减小孔边缘的局部应力大小,从而延长裂纹萌生过程。另外值得关注的是,200 MPa 应力水平下的疲劳寿命增益几乎为 260 MPa 应力水平下的 3 倍,这说明激光冲击强化获得的疲劳寿命增益在低应力水平更为明显。这是因为在低应力水平下,其局部应力的数值可以降到更低的水平,从而获得更长的疲劳裂纹萌生寿命。

4 结 论

本文通过正交试验方法研究激光冲击强化参数对 2050 铝锂合金残余应力的影响规律,并基于表面残余应力数值获得了最佳工艺参数,进而探究了其对应的高周疲劳寿命,主要发现如下:

1) 圆形光斑和方形光斑激光冲击在 2050 铝锂合金表面诱导产生了幅值超过 300 MPa 的残余应力,但随着激光能量、冲击次数、搭接率以及试样厚度的变化,残余应力的数值发生明显的改变,通过正交试验分析可知,试样几何特征对残余应力的影响最大,激光参数中搭接率的影响大于激光能量大于冲击次数。

2) 基于正交试验分析获得的圆形光斑和方形光斑最佳工艺参数均为激光功率密度 $5.30 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、冲击 2 次,该参数冲击后残余应力的表面残余压应力的数值为 313.8 MPa,0.3 mm 深度上的残余压应力仍可维持在 214.8 MPa。

3) 采用激光功率密度 $5.30 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、搭接率 50%、冲击 2 次后的高周疲劳结果显示,260 MPa 应力水平下母材后强化的疲劳寿命分别为 29668 和 29668 周次,激光冲击后疲劳寿命提升 22%,而在 200 MPa 下,母材后强化的疲劳寿命分别为 57932 和 94596 周次,疲劳寿命提升的幅度进一步提高到 63%。

参 考 文 献

- [1] 钟警. 2050 铝合金耐损伤性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 5-6.
Zhong J. Damage resistance behavior of 2050 aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013: 5-6.
- [2] 马晓光, 杨玉艳, 罗锐, 等. 航空航天 2050 Al-Cu-Li 合金的热变形行为[J]. 航空材料学报, 2021, 41(5): 44-50.
Ma X G, Yang Y Y, Luo R, et al. Investigation on hot deformation behavior of 2050 Al-Cu-Li alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(5): 44-50.
- [3] Clauer A H. Laser shock peening, the path to production [J]. Metals, 2019, 9(6): 626.
- [4] 刘亚鹏, 史志俊, 赵一昭, 等. 激光冲击与喷丸复合强化对 TC4 钛合金细节疲劳额定强度截止值 $\text{DFR}_{\text{cut-off}}$ 的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502006.
Liu Y P, Shi Z J, Zhao Y Z, et al. Cut-off value of detail fatigue rated strength of TC4 titanium alloy with compound strengthening treatment by laser shock peening and shot peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502006.
- [5] 周文, 葛茂忠, 王大明, 等. 激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0314001.

- Zhou W, Ge M Z, Wang T M, et al. Effect of laser shock peening on surface integrity of GH3039 superalloys[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0314001.
- [6] Ding K, Ye L. Laser shock peening Performance and process simulation[M]. Boston: CRC Press, 2006.
- [7] Sun R J, Li L H, Zhu Y, et al. Dynamic response and residual stress fields of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy under shock wave induced by laser shock peening[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2017, 25(6): 065016.
- [8] 孙汝剑, 李刘合, 朱颖, 等. 激光冲击强化对 TC17 钛合金微观组织及拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 491-499.
Sun R J, Li L H, Zhu Y, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and tensile properties of TC17 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(2): 491-499.
- [9] Yang Y, Lian X L, Zhou K, et al. Effects of laser shock peening on microstructures and properties of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 330-336.
- [10] Yang Y, Zhou K, Li G J. Surface gradient microstructural characteristics and evolution mechanism of 2195 aluminum lithium alloy induced by laser shock peening[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 1-7.
- [11] Yang Y, Wang H M, Zhou K, et al. Effect of laser shock peening and annealing temperatures on stability of AA2195 alloy near-surface microstructure[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105569.
- [12] Karthik D, Jiang J C, Hu Y X, et al. Effect of multiple laser shock peening on microstructure, crystallographic texture and pitting corrosion of aluminum-lithium alloy 2060-T8[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421: 127354.
- [13] Zabeen S, Langer K, Fitzpatrick M E. Effect of texture on the residual stress response from laser peening of an aluminium-lithium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 251: 317-329.
- [14] Keller S, Chupakhin S, Staron P, et al. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 294-307.
- [15] Hatamleh O, Rivero I V, Swain S E. An investigation of the residual stress characterization and relaxation in peened friction stir welded aluminum-lithium alloy joints [J]. Materials & Design, 2009, 30(9): 3367-3373.
- [16] Hatamleh O, Hill M, Forth S, et al. Fatigue crack growth performance of peened friction stir welded 2195 aluminum alloy joints at elevated and cryogenic temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 519(1/2): 61-69.
- [17] Cellard C, Reira 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: 362-372.
- [18] Vasu A, Grandhi R V. Effects of curved geometry on residual stress in laser peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 218: 71-79.