

表面强化及功能化

约束层材料对 7075 铝合金激光喷丸
表面强化的实验研究吴江¹, 程秀全², 夏琴香¹, 李家宇²

(1.华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640;

2.广州民航职业技术学院 飞机维修工程学院, 广州 510403)

摘要: **目的** 研究不同约束层材料对激光喷丸表面强化效果的影响。**方法** 将激光喷丸技术应用于 7075 航空铝合金的表面强化处理, 利用自制柔性约束层、K9 玻璃和水层作为激光喷丸的约束层材料, 对 7075-T6 铝合金进行激光喷丸处理, 通过测量不同约束层激光喷丸后的试样表面显微硬度值来衡量表面强化效果。

结果 在激光能量为 1.6 J、脉宽为 10 ns、波长为 1064 nm 的条件下进行单点单次冲击, 自制柔性约束层的表面强化效果最好, 能使 7075 铝合金靶材的表面显微硬度值有效提升了 11.62%, 并且进行连续激光冲击后, 其硬度值提升了 18.11%; 水层作为约束层的表面强化效果次之, 能使 7075 铝合金靶材的表面显微硬度值提升 6.99%, 容易造成水花飞溅; K9 玻璃作为约束层的表面强化效果最差, 其表面显微硬度值仅提升了 4.05%, K9 玻璃在激光喷丸试验中容易破裂。**结论** 通过对激光喷丸试验的结果进行分析和比较, 发现不同约束层材料对 7075 铝合金表面强化效果影响的机理不同, 自制柔性约束层对 7075 铝合金激光喷丸表面强化效果最显著, 且具有工程应用价值。

关键词: 激光喷丸强化; 表面显微硬度; K9 玻璃; 水层; 自制柔性约束层; 表面强化

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0124-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.019

Experimental Research on Influence of Restraint Layer Materials on
Surface Strengthening of 7075 Aluminum Alloy Laser Shot PeeningWU Jiang¹, CHENG Xiu-quan², XIA Qin-xiang¹, LI Jia-yu²

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2.School of Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of different restraint layer materials on surface strengthening effect of laser peening. Laser shot peening technology was applied to strengthen the surface of 7075 aluminum alloy, laser peening experiment of the 7075-T6 aluminum alloy was carried out with self-developed flexible restraint layer, K9 glass, water layer as restraint layer materials, and surface micro-hardness of the laser peened specimens were measured to study surface strengthening effect. Single-point single-pass impact was conducted provided with parameters as follows: laser energy of 1.6 J, pulse width 10 ns and wavelength 1064 nm. Under this circumstance, surface strengthening effect of the self-developed flexible restraint layer was the

收稿日期: 2016-12-08; 修订日期: 2016-12-26

Received: 2016-12-08; Revised: 2016-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51575117, 61179051)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51575117, 61179051)

作者简介: 吴江 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光喷丸表面强化。

Biography: WU Jiang (1991—), Male, Master, Research focus: surface strengthening of laser peening.

通讯作者: 程秀全 (1964—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为飞机结构修复及金属塑性工程。

Corresponding author: CHENG Xiu-quan (1964—), Male, Master, Professor, Research focus: aircraft structural repair and metal plastic engineering.

best, surface microhardness value of the laser peened specimens increased by 11.62%. After continuous laser peening, the surface microhardness increased by 18.11%. Surface strengthening effect of the restraint layer made of water layer took second place, surface micro-hardness value of the laser peened specimens increased by 6.99%, and water splash might easily be produced. Surface strengthening effect of the restraint layer made of K9 glass took second place was the worst, surface micro-hardness value increased by 4.05% only, and the K9 glass may be broken easily. Influence mechanism of different restraint layer materials on the strengthening effect of 7075 aluminium alloy is found to be different based on analysis and comparison of laser peening experiment results. The self-developed flexible restraint layer has the best surface strengthening effect on 750 aluminium alloy laser peening and is of engineering application value.

KEY WORDS: laser peening strengthening; surface microhardness; K9 glass; water layer; flexible restraint layer; surface strengthening

7075 铝合金具有强度高、韧性好等优点，被广泛应用于航空航天领域^[1]。在极端恶劣的服役环境中，7075 铝合金结构件会产生大量的腐蚀损伤，易对航空航天设备造成影响，从而带来安全隐患。目前国内外研究人员对 7075 铝合金结构件腐蚀损伤修复的方法主要是表面强化处理，例如机械喷丸、碳氮共渗、表面淬火、滚压和挤压等方法^[2]。随着激光技术的发展，激光喷丸强化越来越受重视，与其他表面强化处理技术相比，激光喷丸具有效果显著、可达性好、实施方便等优点^[3]。

激光喷丸技术，是利用高功率密度（GW/cm²）激光在金属靶材表面诱导产生冲击波来强化金属表面的新技术，激光冲击可以改善表面完整性^[4]。当短脉冲的高能量激光辐射在金属表面时，能量吸收涂层发生剧烈爆炸并产生高压（GPa 级）等离子体。等离子体在约束层的约束作用下产生冲击波，并向金属内部传播，金属表层产生应变硬化和残余应力，使金属材料的抗腐蚀性能得到显著提高^[5]。目前激光喷丸的理论研究已经逐渐成熟^[6]，但是实际应用到工程中的情况却非常少，排除成本原因，激光喷丸中所用的约束层技术也是限制其实际工程应用的主要原因之一^[7]。

国内外研究人员主要利用 K9 玻璃和水层作为激光喷丸的约束层材料^[8]。K9 玻璃具有声阻抗高、刚度好等优点，但对于非平面、拐角和微孔区域却无法应用，减弱了激光喷丸的优势。水层具有容易实现自动化的特点，但容易造成水花飞溅，损伤激光仪器，而且需要配备相应的自动化设备，在实际工程中的应用会受到一定的限制。

本文的研究对象为航空航天领域常用的 7075 铝合金材料，利用自制的柔性约束层材料作为激光喷丸的约束层材料，对几种典型的约束层材料进行激光喷丸试验，根据激光喷丸前后的硬度值，探讨约束层材料对激光喷丸表面强化效果的影响。

1 常用约束层材料的试验方案

使用型号为 Nimma-Extra 的激光喷丸设备，发散角 1 mrad。试验过程中使用相同的激光喷丸参数：激

光能量 1.6 J，脉冲宽度 10 ns，激光波长 1064 nm。试验材料为 7075-T6 航空铝合金材料，试样尺寸为 100 mm×25 mm×10 mm，利用砂纸逐级抛光，使试样表面保持光滑平整。其化学成分如表 1 所示。

表 1 7075-T6 铝合金化学成分表
Tab.1 Chemical composition of 7075-T6 aluminum alloy

Element	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Cu
Content/wt.%	0.22	0.37	0.12	2.21	5.99	0.04	1.44

能量吸收层材料分别为美国 3M 公司制造的黑色双面胶带和黑色 3M 无铅电工胶布。约束层材料分别采用 K9 光学玻璃和水约束层。硬度值使用 HVS-1000Z 自动转塔数显显微硬度计进行测量，使用同一载荷，保荷时间为 9 s。

第一组试验：首先利用工业酒精清洗 7075-T6 铝合金试样的待冲击表面，将黑色 3M 无铅电工胶布平整粘贴在光滑的 7075-T6 铝合金试样上，电工胶布的厚度为 0.12 mm，然后将 K9 玻璃覆盖在黑色 3M 无铅电工胶布上，K9 玻璃的厚度为 2.0 mm，如图 1 所示。

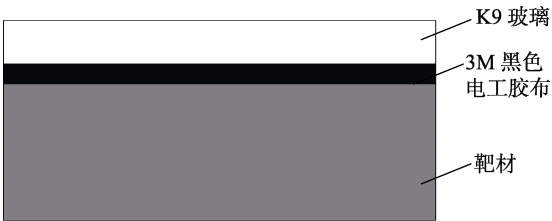


图 1 K9 玻璃作为约束层
Fig.1 K9 glass as the confining medium

第二组试验：试样表面经工业酒精清洗后，将厚度为 0.15 mm 的 3M 黑色双面胶带粘贴在金属靶材上，采用水层作为约束层，3M 黑色双面胶带作为吸收层，使水面覆盖 7075 铝合金试样表面的吸收层，调整激光器相关参数进行激光喷丸试验。

2 结果与分析

在第一组的激光喷丸试验中，K9 玻璃约束层容易发生碎裂现象，如图 2 所示。

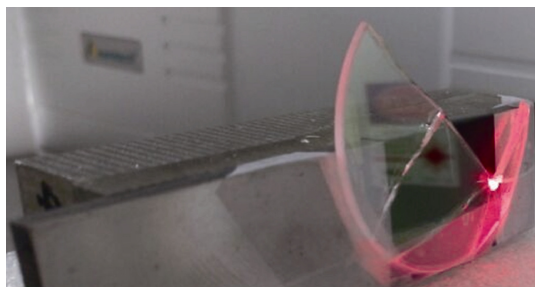


图2 K9玻璃碎裂
Fig.2 Broken K9 glass

江苏大学任旭东等研究^[9]表明,在实际的激光喷丸作业中,K9玻璃在强激光作用下容易发生碎裂,碎片会到处飞溅,对激光器和实验人员都会产生很大的危险。K9玻璃具有较高的冲击波阻抗,Fabbro研究表明^[10],冲击波阻抗越高,其获得的冲击波峰值压力越大,激光喷丸的强化效果越好。但K9玻璃的碎裂不利于激光冲击波峰值压力的提高和时间的延长,减弱了激光喷丸的强化效果。

强激光诱导等离子体爆炸产生冲击波,其中一部分冲击波从7075铝合金靶材表面向其内部传播,使靶材的力学性能、机械性能、表面材料性能均发生改变,发生不可恢复的塑性变形;而另一部分冲击波则从约束层底部向其内部反向传播,传入K9玻璃的冲击波能量会使K9玻璃发生碎裂。由于K9玻璃是脆性固体,承受冲击载荷的能力较弱,所以冲击波容易发生K9玻璃发生碎裂。

为了缓解上述碎裂现象,利用无痕透明胶将K9玻璃与金属靶材紧紧缠绕,以减小约束层与吸收层之间的间隙,结果部分K9玻璃在试验中没有碎裂。挑选试验中K9玻璃没有破裂的靶材试样,对激光喷丸处的试样表面进行硬度值测量,并与未激光喷丸处的硬度值进行比较,其硬度值提升4.05%,由此可知其激光喷丸强化效果不显著。这主要是因为约束层材料与吸收层材料之间,即K9玻璃与3M电工胶布之间仍然存在间隙,强激光在能量吸收层处诱导等离子体产生爆炸引起的冲击波压力,会通过过大的间隙得以释放,发生“泄压”现象,使冲击波压力大大降低,导致传入金属靶材内的冲击波能量大大减少,从而不能得到良好的激光喷丸强化效果,所以使7075铝合金试样表面的显微硬度值没有明显的提升。江苏大学温德平等^[11]利用水膜和K9玻璃复合约束层有效地抑制冲击波泄压,在该复合约束层中,水膜填充了K9玻璃与吸收层之间的间隙,在水分子范德华力的作用下,使K9玻璃与吸收层之间的粘结力更大,提升了激光喷丸的强化效果。

虽然利用3M黑色双面胶带可以使K9玻璃与约束层紧紧粘结,减少两者的间隙,但激光喷丸后K9玻璃表面粘有黑色胶带难以清除,导致K9玻璃的透明度降低,不能像水膜和K9玻璃复合约束层多次利

用,使成本昂贵。

在第二组的激光喷丸试验中,利用水层作为约束层,3M黑色双面胶带作为吸收层。强激光射入水层到达能量吸收层处诱导等离子体爆炸,导致水花飞溅,容易对激光器造成影响,飞溅的水花使试验环境不易清理。目前国内的研究人员用水层作为激光喷丸的约束层居多,主要是因为水较容易获得,且便于实现自动化控制。在激光能量为1.6 J、脉冲宽度为10 ns、激光波长为1064 nm的条件下进行单点单次冲击后,对激光喷丸前后的试样硬度值进行测量,结果如表2所示。

表2 显微硬度值测量(水层作为约束层)
Tab.2 Micro-hardness measurement (water overlay)

Area	1 st measured	2 nd measured	3 rd measured	Average
None laser peening area	173.0	171.0	175.0	173.0
Laser peening area	184.0	186.3	185.0	185.1

由表2可知,未冲击处的显微硬度值平均为173.0HV,冲击处的显微硬度值平均为185.1HV,硬度值提升6.99%。张凌峰等人^[12]利用水层作为约束层,激光喷丸后金属靶材的硬度值提升36.84%,这主要是因为其激光能量为25 J,远高于本次试验中的激光能量(1.6 J)。本文采用水层作为约束层可提高激光喷丸的强化效果,但效果不显著。这是因为除激光能量较低以外,水的刚度较小,等离子体会发生横向膨胀。约束层的刚性越好,等离子体爆炸产生的冲击波峰值压力越大,限制等离子体横向膨胀,激光喷丸强化效果越好^[13]。

试验结束后,3M黑色双面胶带粘在7075铝合金试样表面难以清理,利用3M黑色双面胶带作为能量吸收层虽然能达到较好的激光喷丸强化效果,但是难以清理,降低了激光喷丸的工程效率。

3 约束层材料的改进试验方案

在第1组试验中,约束层和吸收层间隙过大使冲击波压力产生泄压,导致激光喷丸强化效果不理想,且不能应用于非平面区域。在第2组试验中,水层作为约束层,其刚度较小,导致激光喷丸强化效果不显著,且3M黑色双面胶带不易清理。基于这2组试验,需要对激光喷丸中的约束层和吸收层进行改进。

利用自制的柔性约束层材料作为激光喷丸的约束层材料,其相关机械性能参数如表3所示。自制柔性约束层材料的刚度比水层好,且能够用于非平面区域。考虑到减小约束层与吸收层之间的间隙和试验后对7075铝合金试样表面进行清理,利用复合吸收层作为激光喷丸的能量吸收层。

表 3 自制柔性约束层的机械性能

Tab.3 Mechanical properties of flexible confining medium

Shear strength/ MPa	Shore hard- ness (HD)	Tensile strength/ MPa	Impact toughness/ (kJ·m ⁻²)	Elastic module/ GPa
16	75	24	8.52	5.1

与前 2 组试验的能量吸收层不同, 本组试验的能量吸收层为厚度 0.12 mm 的 3M 黑色电工胶布和厚度 0.15 mm 的 3M 黑色双面胶带的组合。而约束层材料则采用自制的柔性约束层材料, 厚度为 3.0 mm。铺层结构如图 3 所示, 激光喷丸前的试样如图 4 所示。完成激光喷丸试验后, 只需撕下 3M 黑色电工胶布, 使清理非常方便。



图 3 自制柔性约束层示意
Fig.3 The diagram of self-developed flexible confining medium

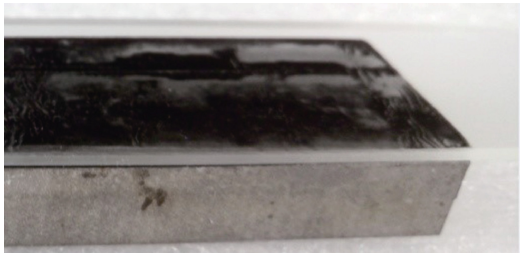


图 4 激光喷丸前的试样
Fig.4 The specimen before laser peening

激光喷丸处理后的柔性约束层表面没有发生破裂现象, 如图 5 所示。柔性约束层能够承受高能量的激光冲击。



图 5 激光喷丸后的柔性约束层表面
Fig.5 Surface of flexible confining medium after laser peening

调整激光工艺参数, 进行激光喷丸试验, 激光喷丸强化后 7075 铝合金试样表面如图 6 所示。

由图 6 可知, 利用自制的柔性约束层和复合吸收层进行激光喷丸试验可以取得明显的冲击坑。根据肖爱明等^[14]推出的冲击波峰压公式:

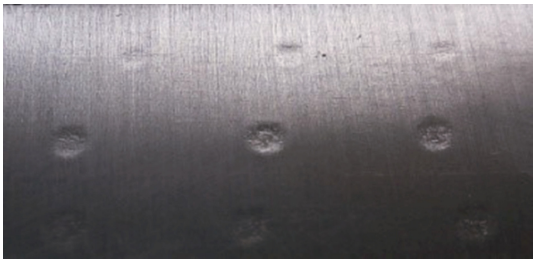


图 6 激光喷丸后的试样表面
Fig.6 The surface of specimen after laser peening

$$\rho = 0.1 \left[\frac{a}{a+2} \right]^{1/2} \left[\frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right]^{1/2} \rho_0^{1/2} I_0 \quad (1)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为金属靶材和约束层的密度。由公式 (1) 可知, 在保证 ρ_1 不变的情况下, 可以通过提升约束层密度 ρ_2 来提升冲击波的峰值压力, 从而提升激光喷丸强化效果。

在激光能量为 1.6 J、脉冲宽度为 10 ns、激光波长为 1064 nm 的条件下进行单点单次冲击后, 对激光喷丸前后的试样硬度值进行测量, 结果如表 4 所示。

表 4 显微硬度值测量 (自制柔性约束层)

Tab.4 Micro-hardness measurement (self-developed flexible confining medium)

Area	1 st measured	2 nd measured	3 rd measured	Average
None laser peening area	173.1	171.1	175.1	173.1
Laser peening area	193.7	195.3	190.2	193.1

由表 4 可知, 与未冲击处的 173.1HV 显微硬度相比, 冲击强化处的显微硬度值平均为 193.1HV, 硬度值提升 11.62%。在相同的激光喷丸工艺参数下, 自制柔性约束层的激光喷丸强化效果比水层和 K9 玻璃的效果更显著。

为了验证自制柔性约束层可以承受高激光能量的连续冲击, 实现连续激光喷丸作业。对自制约束层进行大面积搭接冲击, 完成激光喷丸试验后, 自制柔性约束层表面没有受到损坏, 这表明自制柔性约束层可以实现激光喷丸的连续作业, 在实际工程应用中可以大大提升激光喷丸的工作效率, 且成本更低。显微硬度测量的结果如表 5 所示。

表 5 显微硬度值测量 (大面积冲击)

Tab.5 Micro-hardness measurement (large area laser peening)

Area	1 st measured	2 nd measured	3 rd measured	Average
None laser peening area	172.9	172.7	172.8	172.8
Laser peening area	204.0	204.4	204.0	204.1

由表 5 可知, 未冲击处的显微硬度值平均为 172.8HV, 冲击处的显微硬度值平均为 204.1HV, 其

硬度值提升了 18.11%。试样经激光喷丸后, 表面的显微硬度提高主要有两个原因: 1) 在激光喷丸过程中, 试样表面经冲击波作用后晶粒尺寸减小, 导致材料的硬度上升; 2) 冲击波作用后, 位错密度增大, 加工硬化效果显著, 故硬度较高^[15]。

与水层相比, 自制柔性约束层材料的密度和刚度均有所提高, 所以在相同的激光喷丸工艺参数下, 柔性约束层可以诱导等离子体爆炸产生更高的冲击波峰值压力, 所以其激光喷丸强化效果比水层更好。在激光喷丸试验过程中, 不会出现类似水层的飞溅现象, 很好地保护了激光器件^[16]。

与自制的柔性约束层材料相比, 虽然 K9 玻璃的刚度更好, 理论上可以产生更高的冲击波峰值压力, 但是 K9 玻璃与吸收层之间的间隙过大, 容易产生泄压, 导致激光喷丸强化效果大大降低。由于 K9 玻璃是脆性固体, 其抗压性能比抗拉能力强, 因此拉伸波一般会轻易引起材料的破裂, 激光诱导的冲击波在约束层内表面产生压缩波, 当其传播到 K9 玻璃的自由表面(外表面)时, 压缩波反射为拉伸波, 易使 K9 玻璃发生碎裂现象^[9], 降低了冲击波峰值压力和保压时间, 飞溅的碎片容易造成试验人员的生命安全和激光器的损坏^[17]。3M 黑色双面胶带能使自制柔性约束层与吸收层紧紧地贴合在一起, 使两者之间的间隙很小, 可以有效防止泄压现象发生, 而且柔性约束层不是脆性材料, 在强激光冲击过程中, 能够承受高能量而不发生碎裂现象, 能够有效提升冲击波的峰值压力和保压时间, 提升了激光喷丸强化效果。

4 结论

1) 自制柔性约束层的冲击韧性为 8.52 kJ/m², 在激光喷丸过程中能承受高能量冲击, 不会发生类似 K9 玻璃的碎裂现象, 且能够进行连续激光冲击, 从而能有效提高冲击波的峰值压力和保压时间, 有效提升了激光喷丸后的试样表面的显微硬度。

2) 与水层相比, 柔性约束层具有更好的刚度, 其弹性模量为 5.1 GPa, 能够限制冲击波的横向膨胀, 使激光喷丸效果更加显著, 且不会发生飞溅现象使仪器造成损伤, 也不需要配备相应控制流水的自动化设备。

3) 复合吸收层既能够有效减小约束层与吸收层之间的间隙, 又能够在试验结束后方便清理, 利用复合吸收层的附着力可以使自制柔性约束层应用于非平面区域, 提升激光喷丸的工程应用价值。

参考文献:

[1] 王江涛, 张永康, 陈菊芳, 等. 强激光冲击对 7075 铝合金等离子弧焊接头电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激

光, 2015, 42(12): 1—10.

WANG Jiang-tao, ZHANG Yong-kang, CHEN Ju-fang, et al. Effect of Laser Shock Processing on Electrochemical Corrosion Behavior of 7075 Aluminum Alloy Plasma Arc Weldments[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1—10.

[2] 盛湘飞. 民用飞机结构件腐蚀损伤条件下喷丸强化机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

SHENG Xiang-fei. Research on Shot Peening Strengthening Mechanism of Civil Aircraft Structural Parts with Corrosion Damage[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.

[3] 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化技术的发展和应

用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15—19.

LI Wei, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Development and Application of Laser Shock Processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15—19.

[4] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

GAO Yu-kui. Surface Integrity Theory and Its Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[5] 周建忠, 黄舒, 赵建飞, 等. 激光喷丸强化铝合金疲劳特性的数字化分析[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1735—1740.

ZHOU Jian-zhong, HUANG Shu, ZHAO Jian-fei, et al. Numerical Analysis on Fatigue Properties of Aluminum Alloy Induced by Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(11): 1735—1740.

[6] CHU J P, RIGSBEE J M, BABAS G, et al. Laser Shock-processing Effects on Surface Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 260(1/2): 260—268.

[7] DEVAUX D, FABBRO R, TOLLIER L, et al. Generation of Shock Waves by Laser-induced Plasma in Confined Geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(4): 2268—2273.

[8] 朱向群. 高应变率下材料亚结构特征及其变化规律的研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2005.

ZHU Xiang-qun. A Study on the Substructural Characteristics and Evolutional Mechanisms of Materials Imposed by High Strain Rate Loading[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2005.

[9] 任旭东, 张永康, 叶云霞, 等. 激光冲击改性及延寿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

REN Xu-dong, ZHANG Yong-kang, YE Yun-xia, et al. Laser Shock Modification & Life extension Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011.

[10] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Laser Generation of High-amplitude Stress Waves in Materials[J]. Appl Phys, 1990, 68 (2): 755—784.

[11] 温德平, 王玓, 王昆, 等. 不同约束层材料对激光冲击强化表面完整性的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 150—153.

WEN De-ping, WANG Ding, WANG Kun, et al. Effects of Confinement Layers on Surface Integrity of Laser Shock Processing[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(24): 150—153.

[12] 张凌峰, 张永康. 激光冲击约束层和吸收层的研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 127—131.

- ZHANG Ling-feng, ZHANG Yong-kang. Study of Confinement Layer and Absorbing Layer in Laser Shock Processing[J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 127—131.
- [13] 周建忠, 杨继昌, 张永康, 等. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(11): 1041—1044.
- ZHOU Jian-zhong, YANG Ji-chang, ZHANG Yong-kang, et al. Experimental Study on the Effects of Overlay Properties on Laser-induced Shock Waves[J]. China Laser, 2002, 29(11): 1041—1044.
- [14] 张永康. 激光冲击强化提高航空材料疲劳寿命的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1995.
- ZHANG Yong-kang. Studies on Laser Shock Processing for Increasing Fatigue Lives of Aircraft Materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995.
- [15] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1536—1539.
- GAO Yu-kui. Effect of Shot Peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1536—1539.
- [16] 毕凤琴, 张春成, 李红翠, 等. 激光冲击强化技术的发展及应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1): 101—104.
- BI Feng-qin, ZHANG Chun-cheng, LI Hong-cui, et al. Development and Application of Laser Shock Processing[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1): 101—104.
- [17] 周益军, 张永康, 周建忠, 等. 激光冲击成形约束层性能的研究[J]. 激光技术, 2005, 29(6): 626—628.
- ZHOU Yi-jun, ZHANG Yong-kang, ZHOU Jian-zhong, et al. Study on Properties of Overlay in Laser Shock Forming[J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 626—628.