

基于应变速率的激光喷丸强化 6061-T6 铝合金力学性能分析

周建忠 左立党* 黄舒 徐增闯 杨晶 季杏露 谢小江

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为研究不同应变速率下激光喷丸对 6061-T6 铝合金力学性能的影响,对标准拉伸试样进行单面和双面激光喷丸强化处理,随后在 $0.0001\sim 0.1\text{ s}^{-1}$ 4 种连续应变速率加载条件下,对未喷丸、单面喷丸、双面喷丸 3 组试样进行了力学性能测试,同时测试了试样表面残余应力,分析了喷丸前后材料表面粗糙度变化及其对延伸率的影响,探讨了激光喷丸后力学性能变化的微观机理。结果表明,抗拉强度(UTS)及屈服强度随应变速率的增加而增大,延伸率随应变速率的增加略微减小;与未处理试样相比,单面激光喷丸后,铝合金的抗拉强度及屈服强度得到小幅提高,延伸率大约降低了 1%;双面激光喷丸后,铝合金抗拉强度最大提高了 10.8%,屈服强度最大提高了 12.5%,延伸率降低了 2%左右。激光喷丸区域晶粒得到细化,位错密度得以增加,6061-T6 铝合金的力学性能得到改善。

关键词 激光技术;激光喷丸;力学性能;应变速率;6061-T6 铝合金

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0503003

Analysis on Mechanical Property of 6061-T6 Aluminum Alloy by Laser Shot Peening Based on Strain Rate

Zhou Jianzhong Zuo Lidang Huang Shu Xu Zengchuang Yang Jing
Ji Xinglu Xie Xiaojiang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract In order to investigate the effects of laser shot peening (LSP) on mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy under different strain rates, standard tensile specimens are tested under different conditions like single-side LSP and two-side LSP, followed by the tensile property tests under four different strain rates from 0.0001 to 0.1 s^{-1} . The distribution of surface residual stress is measured, and surface roughness before and after LSP is observed. Furthermore, the relation between surface roughness and elongation is also investigated. The grain size and microstructure before and after LSP are analyzed. The results show that the ultimate tensile strength (UTS) and yield strength increases but the elongation decreases with the increment of strain rate. Compared with the untreated sample, the UTS and yield strength after single-side LSP increase slightly, and the elongation decreases by about 1%. After two-side LSP, the UTS increases by 10.8%, and the yield strength increases by 12.5%, the elongation decreases by about 2%. A large amount of grain is refined and the dislocation density also increases in the laser-peened area, which improves the mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy.

Key words laser technique; laser shot peening; mechanical property; strain rate; 6061-T6 aluminum alloy

OCIS codes 140.3440; 140.3538; 160.3900; 220.4610

1 引 言

6061-T6 铝合金强度高,具有良好的塑性、焊接

性和耐蚀性,无应力开裂倾向,目前广泛应用于航空
航天、船舶制造和铁道车辆等行业。通过对振动应

收稿日期: 2012-01-04; **收到修改稿日期**: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(51175236)、江苏省自然科学基金(BK2010351)、江苏省高校自然科学基金(10KJB460002)、江苏大学研究生创新基金(CX09B_07XZ)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: zuold@sina.cn

力加载下发生疲劳失效的 6061-T6 铝合金进行断口观察和分析发现,失效的主要原因是部件表面产生裂纹导致疲劳强度降低^[1,2]。因此,如何提高铝合金的力学性能,延长其疲劳寿命,提高铝合金零部件工作可靠性等关键问题正在逐渐引起科研人员的高度关注^[3~5]。激光喷丸强化(LSP)作为一种新型的表面处理技术,是利用高功率密度(大于 10^9 W/cm²)、短脉冲激光诱导的高幅冲击波压力对材料表面实施改性的一种技术。激光喷丸处理可获得优于传统机械喷丸的残余压应力层(影响深度为机械喷丸的 2~5 倍),从而有效提升零部件的力学性能及抗磨损、抗腐蚀和抗疲劳性能^[6,7]。

航空装备服役在复杂的工作环境中,在不同应变速率下,材料的拉伸性能表现出较为明显的差异,因此研究不同应变速率下铝合金部件表面处理后的拉伸性能对于确保航空装备的安全稳定工作,进而延长其服役寿命有着非常重要的意义。Boyce 等^[8]研究了应变速率($0.0002 \sim 200$ s⁻¹)对 4 种高强钢的屈服强度、延伸率的影响,实验结果表明随着应变速率的增加,屈服强度增加了 10%,延伸率降低了 3%~10%。Han 等^[9]研究了低温球磨 5083 铝合金在应变速率为 $10^{-6} \sim 10^{-1}$ s⁻¹ 范围时的塑性变形行为,研究结果显示拉伸应力应变对应变速率的变化更敏感,拉伸延展性随应变速率的降低而增加,而压缩应力应变几乎不受应变速率的影响。Lu 等^[10]研究了激光冲击

和应变速率($0.00001 \sim 0.1$ s⁻¹)对于 LY2 硬铝合金力学性能的影响,发现激光冲击可以提高 LY2 铝合金的抗拉强度及延伸率,使激光冲击区域的晶粒得到细化,同时,随着应变速率的增加,延伸率逐渐降低,抗拉强度逐渐增大,并且在应变速率较低时出现动态应变时效。

已有的文献主要集中在应变速率对金属结构件力学性能的影响,而对于不同应变速率下激光喷丸处理金属结构件的力学性能的研究却较少。本文以 6061-T6 铝合金材料为研究对象,采用未喷丸、单面激光喷丸、双面激光喷丸 3 组试验条件,在 MTS-810 系统上进行力学性能试验,分析不同应变速率加载条件下,激光喷丸对 6061-T6 铝合金力学性能的影响,探讨应变速率和力学性能之间的关系,为特定应用条件下材料力学性能测试中应变速率的选取提供一些借鉴。

2 试验步骤

2.1 试验材料与技术参数

6061-T6 铝合金具有加工性能和抗腐蚀性好、韧度高及加工后不易变形等特点,其化学成分和力学性能如表 1 所示,其中 σ_b 为抗拉强度, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, δ 指延伸率, E 为弹性模量, ρ 为密度, ν 为泊松比。按照材料拉伸力学性能测试的国家标准 GB 6397-1976,拉伸试样尺寸及喷丸轨迹如图 1 所示。

表 1 6061-T6 铝合金的化学成分和机械性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy

Component	Mg	Si	Fe	Cu	Cr	Mn	Ti	Zn	Al
Mass fraction / %	0.90	0.62	0.33	0.28	0.17	0.06	0.02	0.02	Bal.
Mechanical property	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	E / GPa	ρ / (kg/m ³)		ν		
	356	299	13.5	72.4	2672		0.33		

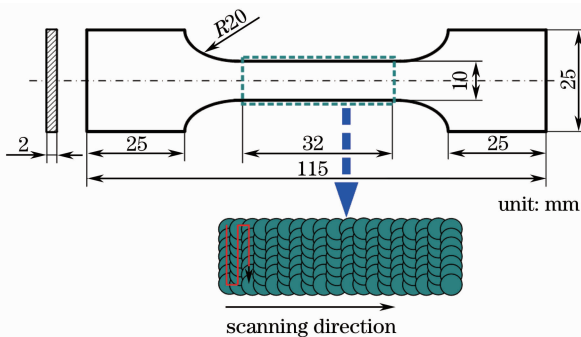


图 1 拉伸试样及喷丸区域

Fig. 1 Tensile sample and treated area

试验分为 3 组,未喷丸、单面喷丸、双面喷丸,每组采用 4 个试样。试验在江苏大学强激光实验室 GIGA 型激光冲击强化装置上进行,激光波长为

1064 nm,激光光斑直径为 3 mm,单脉冲能量 5 J,搭接率为 50%。采用 0.1 mm 厚铝箔作为能量吸收层,便于涂敷和清洗,采用流水作为激光喷丸时的约束层,流水厚度约为 2 mm。激光喷丸试验前,分别使用 500 # 到 2400 # 的 SiC 砂纸进行试样抛光,再用无水乙醇清洗。

喷丸结束后,将试样从夹具上卸下,发现单面喷丸的试样产生轻微的翘曲,这是由于激光喷丸产生的等离子体爆炸诱导的冲击波向金属内部传播,在其表面及次表面产生残余压应力,而在金属内部产生残余拉应力,残余应力释放导致试样产生了轻微的反向翘曲^[11]。双面喷丸的试样由于两面依次受到激光冲击波的作用,产生了综合效应,未发生翘曲

现象。

2.2 力学性能测试

在室温下采用 MTS-810 拉伸系统对不同应变速率下激光喷丸前后 6061-T6 铝合金拉伸试样的延伸率、屈服强度和抗拉强度进行测试,延伸率通过试验机夹具夹头位移计算得出,屈服强度和抗拉强度由试验直接得出。每组试样中的 4 个试样均分别选取 $0.0001\sim 0.1\text{ s}^{-1}$ 范围内 4 个不同的应变速率加载,研究不同应变速率下激光喷丸前后 6061-T6 铝合金力学性能的变化。

3 试验结果及讨论

3.1 激光喷丸对拉伸试样断裂位置的影响

进行拉伸试验前,采用 X-350A 型 X 射线衍射仪沿着图 2(a)中所示的试样表面路径,在单面喷丸试样和双面喷丸试样的 2 个面上每隔 5 mm 取点进行残余应力测试。拉伸试验结束后,发现试样断裂位置有如下规律:未喷丸试样的断裂位置均在试样的中部,如图 2(a)所示,而单面喷丸试样和双面喷丸试样的断裂位置则在喷丸区域与未喷丸区域的交界处,如图 2(b)和(c)所示,对比图 2(b)和(c),双面喷丸试样的断裂位置相对于单面喷丸试样的断裂位置更远离喷丸区域。单面喷丸试样的残余应力测试结果如图 3、4 所示,双面喷丸试样的残余应力测试结果如图 5、6 所示。图 3 表明喷丸面的未喷丸区域存在残余拉应力,而喷丸区域存在残余压应力,且最大残余压应力达到 178 MPa。图 4 表明未喷丸面的残余应力分布情况和喷丸面类似,残余压应力值较小,仅 50 MPa 左右,说明激光喷丸对材料起到了强化作用,激光喷丸区域的残余压应力与未喷丸区

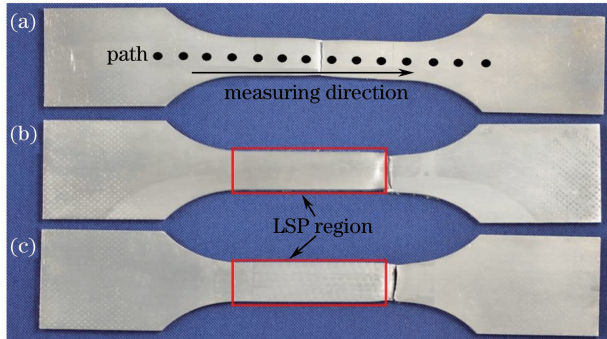


图 2 断裂位置及残余应力测试路径。(a)未喷丸试样;
(b)单面喷丸试样;(c)双面喷丸试样

Fig. 2 Crack positions and measuring path of residual stress. (a) Non LSP; (b) single-side LSP; (c) two-side LSP

域的残余拉应力相互作用,使得喷丸区域与未喷丸区域的交界处成为易发生断裂的区域。双面喷丸试样的断裂位置相对于单面喷丸试样的断裂位置更远离喷丸区域,这一现象主要是由于双面激光喷丸试样的喷丸区域的残余压应力值更大,且残余压应力的影响区域略大于单面喷丸。

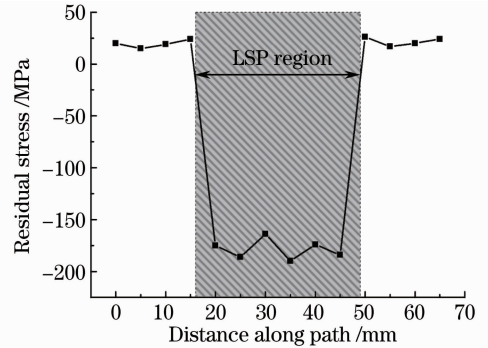


图 3 单面喷丸试样喷丸面沿路径残余应力分布
Fig. 3 Residual stress distribution of treated path for the single-side LSP specimen

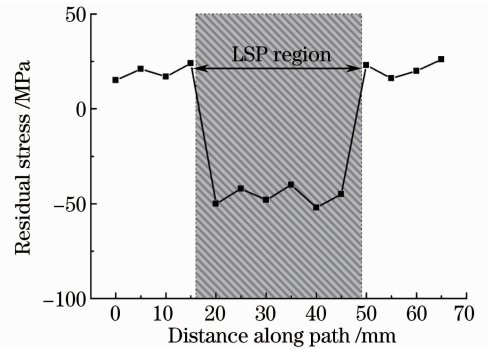


图 4 单面喷丸试样未喷丸面沿路径残余应力分布
Fig. 4 Residual stress distribution of untreated path for the single-side LSP specimen

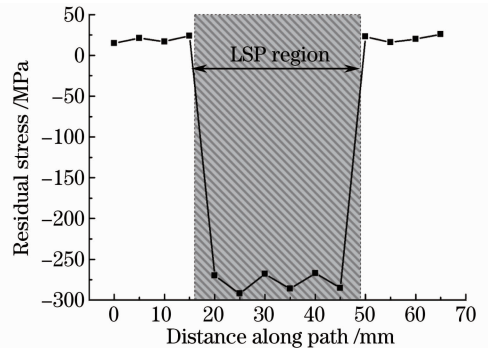


图 5 双面喷丸试样正面沿路径残余应力分布
Fig. 5 Residual stress distribution of top path for the two-side LSP specimen

3.2 应变速率对激光喷丸前后 6061-T6 铝合金延伸率的影响

未喷丸试样、单面喷丸试样、双面喷丸试样的延

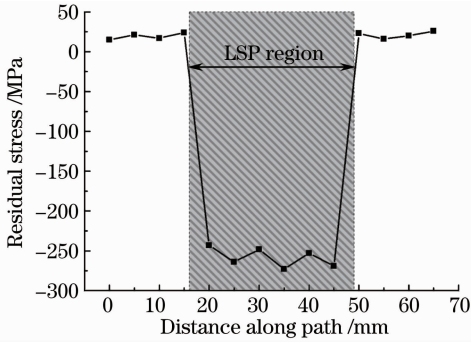


图 6 双面喷丸试样底面沿路径残余应力分布
Fig. 6 Residual stress distribution of bottom path for the two-side LSP specimen

伸率与应变速率的关系如图 7 所示。从图中可以看出,激光喷丸使得试样的延伸率降低,其中,双面喷丸试样的延伸率比单面喷丸试样的延伸率低。当应变速率在 $0.0001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 之间变化时,未喷丸试样的延伸率在 $16.5\% \sim 18.3\%$ 之间变化,延伸率随应变速率的增加而降低;单面喷丸试样及双面喷丸试样延伸率的变化趋势与未喷丸试样相同,均随应变速率的增加而降低,单面喷丸试样的延伸率在 $15.5\% \sim 18.0\%$ 之间,双面喷丸试样的延伸率在 $14.5\% \sim 16.7\%$ 之间。图 8 为激光喷丸前后试样表面的三维(3D)微观形貌对比图,激光喷丸后拉伸试样的延伸率略微降低,这是由于激光光斑搭接区域的存在使得材料表面塑性变形不均匀,喷丸区域整体粗糙度增大[如图 8(b)所示],从而使得延伸率下降;另外,试样经过激光喷丸后,抗拉强度虽有明显增加,但不如屈服强度敏感,进行拉伸试验时,将出现屈服之后很快发生颈缩及均匀硬化阶段缩短的现象,导致延伸率降低。

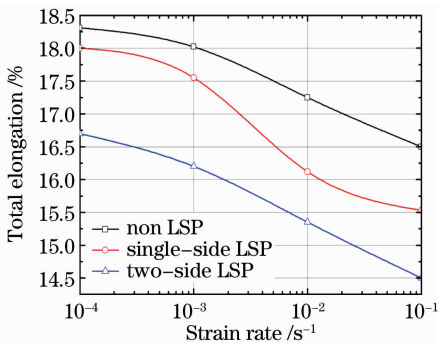


图 7 延伸率和应变速率的关系
Fig. 7 Relation between elongation and strain rate

3.3 应变速率对激光喷丸前后 6061-T6 铝合金抗拉强度及屈服强度的影响

图 9 为未喷丸、单面喷丸、双面喷丸试样的抗拉强度与应变速率的关系。可以看出,室温下,当应变

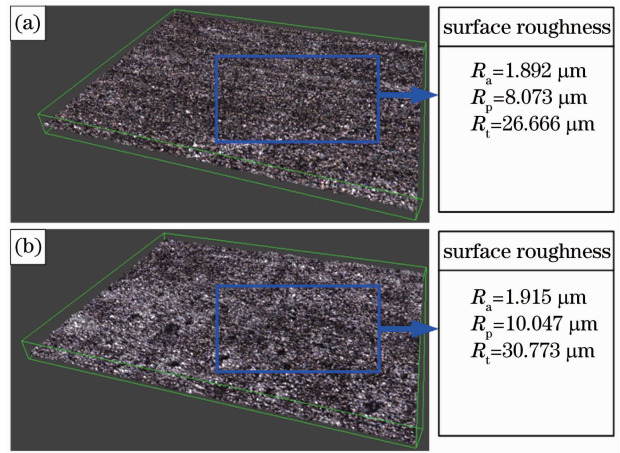


图 8 喷丸前后表面三维形貌。(a)喷丸前;(b)喷丸后
Fig. 8 3D morphology. (a) Before LSP; (b) after LSP
速率在 $0.0001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 之间变化时,未喷丸试样的抗拉强度在 $332 \sim 350 \text{ MPa}$ 之间变动。单面喷丸后,试样的抗拉强度有小幅提高,在 $338 \sim 352 \text{ MPa}$ 之间变动;双面喷丸后,试样的抗拉强度有较大幅度的提高,在 $368 \sim 385 \text{ MPa}$ 之间变动,较未喷丸试样最大时提高了约 10.8% ,3 组试样的抗拉强度都随着应变速率的增加而增大。图 10 为未喷丸、单面喷丸、双面喷丸试样的屈服强度与应变速率的关系,由

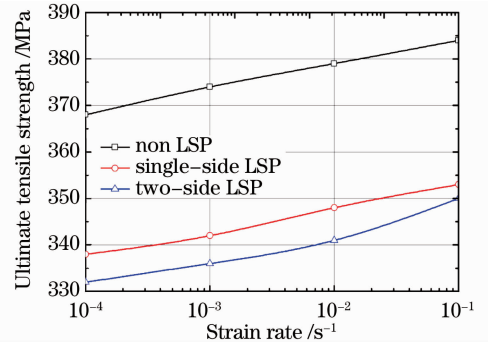


图 9 抗拉强度和应变速率的关系
Fig. 9 Relation between ultimate tensile strength and strain rate

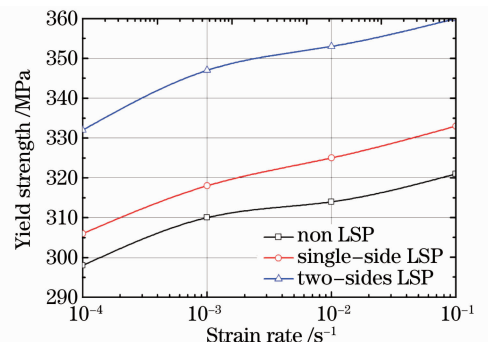


图 10 屈服强度和应变速率的关系
Fig. 10 Relation between yield strength and strain rate

图可见,激光喷丸使得铝合金试样的屈服强度明显提高,屈服强度与抗拉强度的变化趋势一致,双面喷丸相对于单面喷丸更大幅度地提高了试样的屈服强度,最大时提高了约 12.5%。由 3.1 节分析可以得出,单面喷丸和双面喷丸后,试样在喷丸区域均产生了残余压应力分布,残余压应力的存在使得被处理试样产生了应力强化效应。图 11 为光镜(OM)观测分析激光喷丸前后喷丸区域的晶粒大小情况,从图中可以明显看出,喷丸区域晶粒在喷丸后明显细化,比喷丸前晶粒尺寸小很多。此时由 Hall-Petch 公式:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}, \quad (1)$$

式中 σ 表示抗拉或屈服强度, σ_0 为初始强度, k 为 Hall-Petch 常数, d 为晶粒尺寸,可以看出,材料的抗拉强度或屈服强度与材料晶粒尺寸之间存在密切关系。大量研究表明^[12,13],材料的强度与晶粒大小

有关联,在一定范围内,晶粒尺寸越小,材料强度越大。图 12 为用透射电镜(TEM)分析 6061-T6 铝合金激光喷丸前后的微观组织。从图中可以看出,激光喷丸前铝合金的 TEM 图中仅有少量析出物,而激光喷丸后喷丸区域的晶粒明显细化,位错密度显著升高,并出现了位错缠结,这表明激光喷丸 6061-T6 铝合金能够细化塑性变形层的晶粒,在晶粒内部产生高密度的位错,从而使得塑性变形层材料的屈服强度明显增强,材料的力学性能得以提高。Lu 等^[14,15]对 LY2 铝合金激光喷丸后的微观组织性能研究也表明,激光喷丸后的材料位错密度显著提高,并出现缠结结构。由于材料屈服强度 σ 和位错密度 ρ 存在正比关系,即 $\sigma \propto \rho^{1/2}$,因而 ρ 的升高使材料屈服强度得到提高。

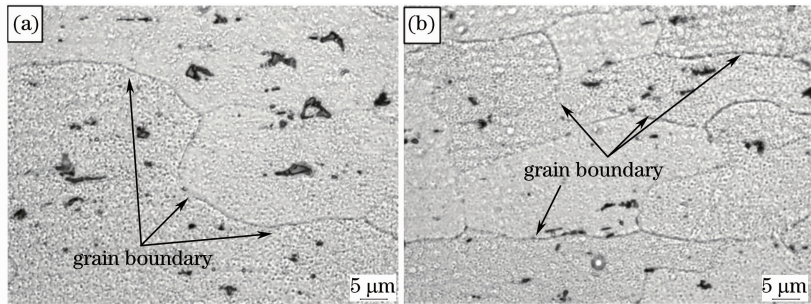


图 11 光镜观测下激光喷丸前后晶粒尺寸变化。(a)喷丸前;(b)喷丸后

Fig. 11 Variation of grain size under OM. (a) Before LSP; (b) after LSP

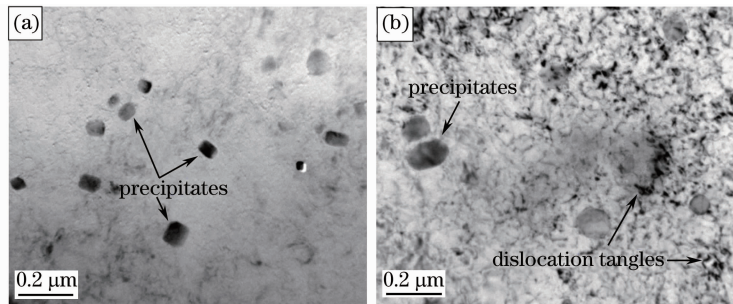


图 12 透射电镜下激光喷丸前后微观组织变化。(a)喷丸前;(b)喷丸后

Fig. 12 Microstructure of LSP under TEM. (a) Before LSP; (b) after LSP

4 结 论

试验研究了激光喷丸和应变速率对于 6061-T6 铝合金试样力学性能的影响,得到了以下主要结论:

1) 激光喷丸强化是高速高应变速率的塑性变形过程,试样喷丸区域产生了残余压应力,同时塑性变形层晶粒得到细化,应力强化和晶粒细化的共同作用使铝合金的屈服强度及抗拉强度得以提高。激光喷丸在试样表面产生了微凹坑,导致表面粗糙度增

大,从而使延伸率有所下降,成为了激光喷丸的弱化效应。

2) 应变速率在 $0.0001 \sim 0.1 \text{ s}^{-1}$ 之间变化时,所有试验试样的屈服强度和抗拉强度均随应变速率的增加呈增大趋势,而延伸率随着应变速率的增加呈降低趋势。

3) 6061-T6 铝合金拉伸试样双面喷丸力学效应的增益高于单面喷丸。屈服强度较未处理试样最

大提高了 12.5%，抗拉强度最大提高了 10.8%，说明应变速率对于激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的力学性能具有较大影响。

参 考 文 献

- 1 P. M. Pawer, R. Ganguli. On the effect of matrix cracks in composite helicopter rotor blade [J]. *Composites Science and Technology*, 2005, **65**(3-4): 581~594
- 2 N. Aretakis, K. Mathioudakis, V. Dedoussis. Derivation of signatures for faults in gas turbine compressor blading [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, **6**(8): 969~974
- 3 J. E. Rankin, M. R. Hill, L. A. Hackel. The effects of process variations on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **349**(1-2): 279~291
- 4 P. Zhang, J. Lindemann, C. Leyens. Influence of shot peening on notched fatigue strength of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80 [J]. *J. Alloys and Compounds*, 2010, **497**(1-2): 380~385
- 5 Zhang Yongkang, Zhou Lichun, Ren Xudong *et al.*. Experiment and finite element analysis on residual stress field in laser shock processing TC4 titanium alloy [J]. *Journal of Jiangsu University*, 2009, **30**(1): 10~13
张永康, 周立春, 任旭东等. 激光冲击 TC4 残余应力场的试验及有限元分析[J]. *江苏大学学报*, 2009, **30**(1): 10~13
- 6 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K147 material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201
李伟, 何卫峰, 李应红等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- 7 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Sun Yueqing *et al.*. Study on surface integrity of 6061-T6 aluminum alloy sheet after laser shot peening [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(6): 450~455
黄舒, 周建忠, 孙月庆等. 激光喷丸强化 6061-T6 铝合金板料的表面完整性研究[J]. *应用激光*, 2007, **27**(6): 450~455
- 8 B. L. Boyce, M. F. Dilmore. The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from 0.0002 s⁻¹ to 200 s⁻¹ [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, **36**(2): 263~271
- 9 B. Q. Han, J. Y. Huang, Y. T. Zhu *et al.*. Strain-rate dependence of properties of cryomilled bimodal 5083 Al alloys [J]. *Acta Materialia*, 2006, **54**(11): 3015~3024
- 10 J. Z. Lu, Y. K. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of laser shock processing and strain rate on tensile property of LY2 aluminum alloy [J]. *Mat. Sci. Eng. A*, 2010, **528**(2): 730~735
- 11 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 135~138
周建忠, 张永康, 周明等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 135~138
- 12 M. Hakamada, Y. Nakamoto, H. Matsumoto *et al.*. Relationship between hardness and grain size in electrodeposited copper films [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, **457**(1-2): 120~126
- 13 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2662~2666
鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2662~2666
- 14 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(11): 3984~3994
- 15 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(16): 5354~5362

栏目编辑: 宋梅梅