

圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟

张兴权 章 艳 段士伟 黄志来 冯建有 王 彪

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032

摘要 利用ABAQUS模拟2024铝制圆杆经激光冲击后的动态响应,研究了激光诱导的应力波沿纵向和横向的衰减特性,讨论了杆径对应应力波峰值随传播距离衰减的影响,对比分析了杆径对残余应力场的影响。结果表明:强激光诱导的应力波峰值在圆杆中沿纵向和横向均随传播距离的增大而逐渐减小,同时波形出现“弥散”现象。应力波峰值的衰减速度呈先快后慢的趋势。随着杆径增大,圆杆内部的残余应力场逐渐趋于均匀,残余压应力层深度增大并趋于饱和。

关键词 激光光学; 动态响应; 有限元分析; 圆杆; 残余应力场

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0903009

Numerical Simulation of Dynamic Response of Round Rod Subjected to Laser Shocking

Zhang Xingquan Zhang Yan Duan Shiwei Huang Zhilai Feng Jianyou Wang Biao

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

Abstract The dynamic response of 2024 aluminum alloy round rod subjected to laser shocking is investigated by ABAQUS numerical simulation software. The attenuation characteristics of stress waves propagating along longitudinal and transverse direction as a function of propagating distance are systematically investigated and the effects of rod diameters on the attenuation of the peak of stress waves with propagating distance are also discussed. The effects of rod diameters on residual stress field are analyzed. The results indicate that the peak values of stress waves along longitudinal and transverse direction gradually decrease with increasing propagating distance, and the phenomenon of wave diffusion appears with stress wave propagation. The peak values of the stress waves attenuate fast first and then slow. With the diameter of round rod increasing, the residual stress field in the rod becomes more uniform and regular, and the depth of residual compressive stress increases and gradually reaches saturation.

Key words laser optics; dynamic response; finite element method; round rod; residual stress field

OCIS codes 140.3390; 120.6650; 140.3430

1 引 言

激光强化技术是近年来迅速发展的一项新颖的表面强化技术,它是利用强激光在材料内部诱导强应力波,应力波和材料相互作用后,材料表层的机械性能得到改善,使材料的抗磨损、抗腐蚀和抗疲劳等性能得到提高^[1]。目前人们对激光诱导的应力波在材料中的传播特性和残余应力场的分布进行了较为广泛的研究。Braisted等^[2]和Peyre等^[3]在数值模拟中将板材边界设为非反射边界,模拟了激光驱动的应力波在无限大铝靶材中的传播特性。王薇等^[4]利用流体力学数值模拟程序也对激光应力波在靶板中的传播特性进行了研究。李志勇等^[5]试验研究了激光诱导的应力波在铝靶中的衰减规律。Singh等^[6]和Kim等^[7]建立了二维和三维模型来对激光冲击参数进行优化。胡永祥等^[8]模拟了在三维状态下激光单次和多次冲击下材料内部的残余应力场分布。这些研究对于认识激光冲击强化的机理和残余应力的分布规律非常有益,但是目前这些研究都集中在平面靶材,对于

收稿日期: 2015-04-10; 收到修改稿日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51175002)、安徽省自然科学基金(090414156)、安徽工业大学研究生创新研究基金(2013058)

作者简介: 张兴权(1970—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事激光冲击波加工等方面的研究。E-mail: zhxq@ahut.edu.cn

激光诱导的应力波在杆中的传播特性,以及杆的截面尺寸对残余应力的影响鲜有报道。

本文以 2024-T3 铝合金圆杆为研究对象,采用 ABAQUS 数值软件研究了强激光诱导的应力波在圆杆中沿纵向和横向的传播特性,讨论了杆径对应力波峰值随传播距离的影响,对比分析了杆径对残余应力场分布的影响,本文的研究结果可以丰富激光冲击理论。

2 激光冲击强化原理

激光冲击强化原理如图 1 所示。首先在工件表面覆盖一层不透明的吸收层(黑漆、铝箔等),然后在其上覆盖一层透明的约束层(流水、玻璃等)。当高功率(吉瓦量级)、短脉冲(纳秒量级)强激光通过透明的约束层辐照在工件表面的吸收层时,吸收层材料瞬间气化、电离产生等离子体,等离子体继续吸收激光能量后爆炸,对工件表面施加强激光应力波。当应力波的峰值压力超过了材料动态屈服极限时,材料在短时间内以极高的应变率发生变形,在材料表层形成一定深度的冷塑性强化层,材料的晶粒细化,硬度提高,并伴有残余应力场的形成,从而提高材料的抗磨损、抗腐蚀和抗疲劳性能^[9-10]。

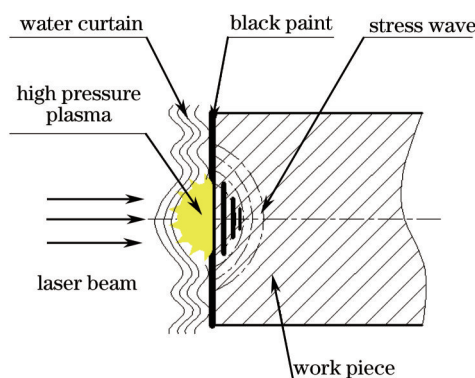


图 1 激光冲击强化原理图

Fig.1 Schematic of laser shock peening

3 试验

3.1 试验材料和设备

在车床上将 2024-T3 的棒料加工成尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 和 $\Phi 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆杆形试样。然后依次用 500#到 2400#的 SiC 砂纸对试样表面进行抛光,再用无水乙醇清洗、吹干。再在试样表面粘贴厚度为 0.1 mm 的铝箔作为激光烧蚀层,冲击过程中用流动的水作为激光冲击时的约束层,流水厚度约为 2 mm。激光冲击试验采用 Nd:YAG 型脉冲激光器,其激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 8 ns,脉冲频率为 8 Hz,光斑直径为 3 mm,单脉冲能量为 2 J。

激光冲击处理后,去除试样表面残留的铝箔,然后采用 X350A 型 X 射线应力仪测定冲击后试样表面和次表层的残余应力。测试方法采用侧倾固定 ψ 法,定相关法定峰方式;X 射线管电压 20 kV,X 射线管电流 5 mA,准直管直径 $\Phi 1.5 \text{ mm}$;Cr k_{α} 特征辐射,衍射晶面(211), 2θ 角扫描步距 0.10° ,计数时间 0.5 s,扫描的起始角和终止角为 $130^{\circ} \sim 142^{\circ}$ 。为了测定试样次表层的残余应力,采用 95% NH_4Cl +5% $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ 体积分数溶液以 $0.5 \sim 1 \mu\text{m/s}$ 的腐蚀速率对试样进行逐层电解抛光。

3.2 试验结果与分析

分别对上述制备的 4 种不同直径的圆杆端面进行激光冲击,冲击后去除表面残留的铝箔,然后用丙酮清洗表面。不同直径圆杆经激光冲击后的形貌如图 2 所示。从图 2 可以观察到不同直径的圆杆经激光冲击后,在其表面上都留下塑性变形形式的凹坑,凹坑形貌清晰可见,且表面没有任何被烧蚀的迹象。这是因为试验中采用铝箔作为能量吸收层,有效避免了激光直接辐照在工件表面造成的热损伤。当激光辐照在吸收层后加热、熔化、气化和电离产生高压等离子体,继而产生高压应力波使工件表面局部发生永久性冷塑性变形,应力波作用结束后,在圆杆表面形成同光斑直径大小的凹坑。

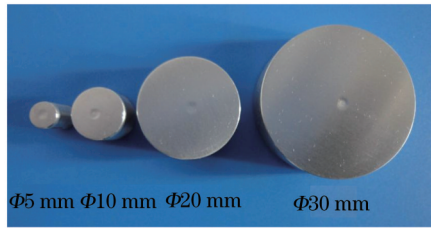


图2 激光冲击不同直径圆杆的形貌

Fig.2 Morphology of different diameters round rods treated by laser shocking

4 数值模拟

为了形象描述激光诱导的应力波在圆杆中的传播过程,在 ABAQUS 有限元软件中建立 3/4 的 2024-T3 铝合金圆杆,如图 3 所示, L 为圆杆的长度, R 为圆杆的半径。圆杆上端面的蓝色区域为冲击加载区,并对 XZ 平面、 YZ 平面施加对称约束,对圆杆底部施加全约束。

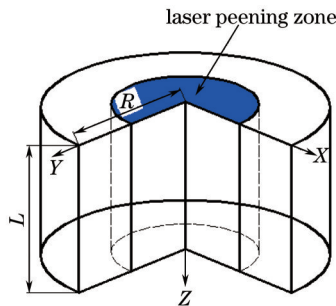


图3 模型示意图

Fig.3 Diagram of the model

冲击波压力时间历程是模拟激光冲击强化过程中重要的影响因素,Fabbro 等^[11]推导出激光在靶材表面诱导的冲击波峰值压力

$$P(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \cdot \sqrt{Z(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})} \cdot \sqrt{I_0(\text{GW} \cdot \text{cm}^2)}, \quad (1)$$

$$2/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2 \quad (2)$$

式中 α 为内能转化为热能部分的系数,一般取 0.1~0.2,本文中取 α 为 0.15, I_0 为激光功率密度, Z 为折合声阻抗, Z_1 和 Z_2 分别为吸收层和约束层的声阻抗,其中吸收层铝箔的声阻抗 $Z_1 = 1.41 \times 10^6 (\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,约束层水的声阻抗 $Z_2 = 0.165 \times 10^6 (\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

在试验时采用的激光脉冲宽度为 8 ns,已有研究^[12]表明在约束模型下,约束层可以将冲击波压力脉冲持续时间延长至激光脉冲宽度的 2~3 倍,则冲击波压力持续时间为 24 ns。根据冲击波峰值压力随时间的分布规律,模拟中采用的冲击波压力时程曲线如图 4 所示。

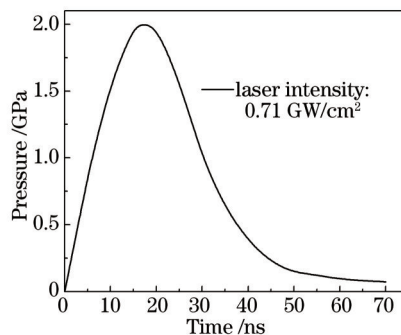


图4 冲击波压力时程曲线

Fig.4 Pressure-time history of laser shock wave

材料的本构模型采用 Johnson-Cook 模型,该模型能较好的描述应变率等因素对材料动态屈服应力的影响。在激光冲击强化中,铝箔作为烧蚀层有隔热作用,冲击强化过程中,工件材料受热影响较小,属于冷加工范畴,故采用不考虑温度影响的简化 Johnson-Cook 模型^[13]

$$\sigma = [A + B(\varepsilon)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right], \quad (3)$$

式中 σ 为 Von Mises 流动应力, A 为屈服强度, B 、 n 为应变强化参数, C 为应变率敏感系数, ε 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为准静态下的应变率。各参数值见表 1。

表 1 Johnson-Cook 式中 2024-T3 的主要参数值^[13]

Table 1 Critical parameters of 2024-T3 in the Johnson-Cook equation^[13]

Material	A /MPa	B /MPa	C	n	$\dot{\varepsilon}_0$
2024-T3	369	684	0.0083	0.73	1

5 模拟结果与分析

5.1 动态应力

图 5 显示杆径为 $\Phi 5$ mm,长度为 3 mm 圆杆中应力波的传播随时间变化的动态应力云图。从图 5 中可见,在开始 0 ns 时刻,杆件未受激光冲击波的冲击作用。在 50 ns 时刻,当圆杆上端面受到冲击波压力载荷后,在材料内部最先形成纵向传播的膨胀波,波形呈“平面”状。到 150 ns 时刻,随着应力波继续传播,可以观察到在光斑边界处形成一部分沿径向向外传播的 Rayleigh 波和一部分沿径向向光斑中心汇聚的剪切波,使得应力波波形呈现出“半球状”向材料内传播。并且在每一时刻,膨胀波的传播位置总是在剪切波和 Rayleigh 波的前方,说明其传播速度最快。在 250 ns 时刻,可以观察到向中心汇聚的剪切波的形状类似于—

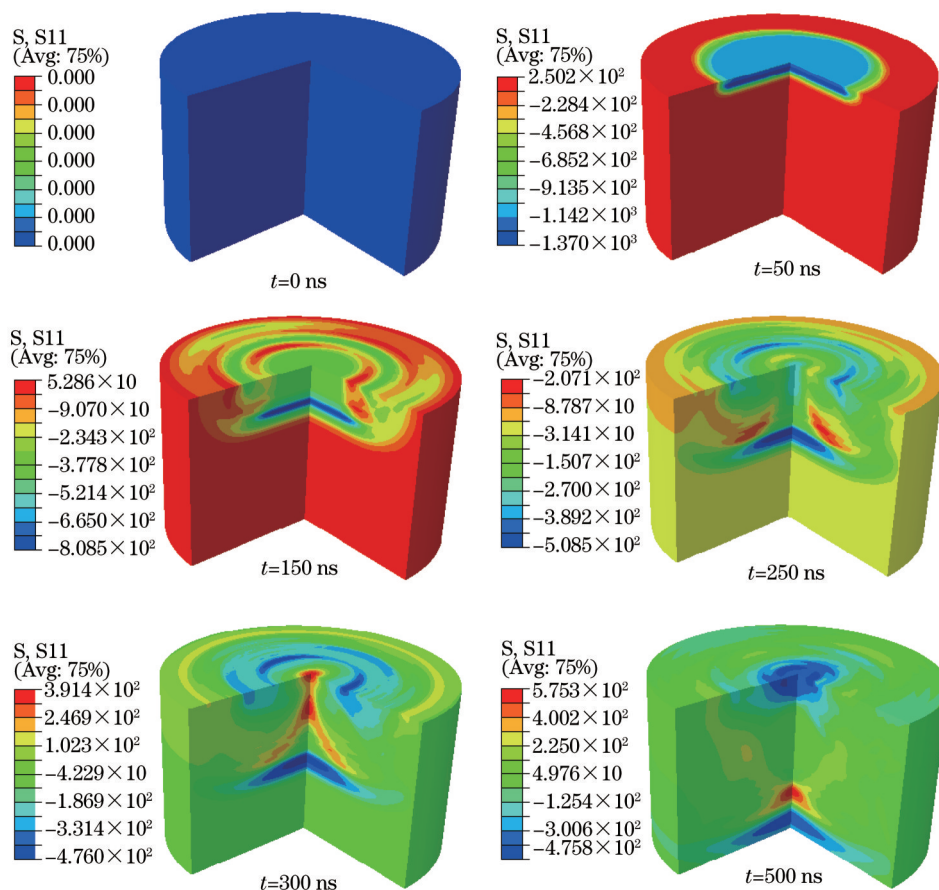


图 5 直径 5 mm 杆中不同时刻的应力波传播云图

Fig.5 Dynamic stress distribution contours at different time for the rod diameter with 5 mm

个“八”字形,而 Rayleigh波传播到圆杆边界后,发生反射也沿径向逐渐向光斑中心汇聚。在 300 ns 时刻,剪切波恰好在杆中心汇聚,此时剪切波的形状演化为一个“人”字形。随后汇聚起来的剪切波紧随膨胀波一起继续向杆件底部传播。

直径 $\Phi 5$ mm 杆中的应力波沿纵向和横向方向传播的动态应力如图 6 所示。由图 6(a)可见,对于给定杆径,应力波沿纵向传播时,由于金属表面发生塑性变形产生能耗,导致应力波的幅值不断衰减,并呈现出与传播距离近似按指数衰减的规律^[5];与此同时由于材料的硬化作用,应力波的波形逐渐被拉长^[14],即发生所谓波的“弥散”现象。由图 6(b)可见,应力波沿横向传播时,也观察到波的“弥散”现象。

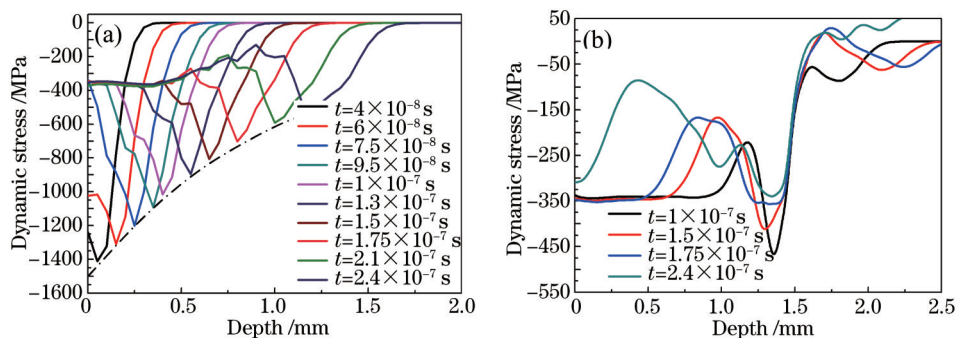


图 6 直径 5 mm 杆中动态应力的衰减曲线。(a) 沿纵向衰减; (b) 沿横向衰减

Fig.6 Attenuation of dynamic stress for rod diameter with 5 mm. (a) Attenuation along longitudinal direction; (b) attenuation along transverse direction

图 7 给出了杆径分别为 $\Phi 5$ mm、 $\Phi 10$ mm、 $\Phi 20$ mm 和 $\Phi 30$ mm 的 4 种情况下,不同直径圆杆中动态应力波峰值的衰减曲线。可以看出,对于 4 种不同的杆径,应力波峰值在材料内均呈指数衰减趋势。在 0~0.4 mm 深度范围内,杆径越小,应力波峰值的衰减速度越快,超过 0.4 mm 深度后,各杆径中应力波峰值的衰减速度减慢并趋于相同。

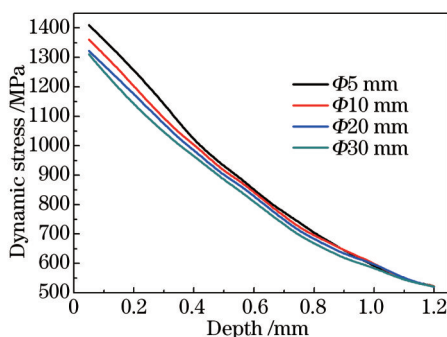


图 7 不同直径圆杆中动态应力波峰值的衰减曲线

Fig.7 Attenuation of dynamic stress waves peak values for different diameters rods

5.2 残余应力分布

图 8 分别为不同直径圆杆中沿表面和深度方向的残余应力分布图。从图 8(a)可以看出,直径为 5 mm 圆杆经激光冲击后的表面残余应力分布较为不均匀,起伏较大。光斑中心残余压应力的模拟值为 -99 MPa,采用 X 射线应力仪测得激光冲击中心的残余压应力值为 -90 MPa。而当杆径从 10 mm 逐渐增加到 30 mm 时,表面残余应力分布逐渐趋于均匀,且光斑中心残余压应力值分别减小至 -62、-52.5 和 -60 MPa,试验测得各对应直径圆杆的光斑中心残余压应力值分别为 -68、-65 和 -55 MPa。同时不同直径圆杆在沿表面方向残余应力的试验值与模拟值都能较好地吻合。

从图 8(b)的模拟结果可以看出,杆径为 5 mm 沿深度方向上的残余应力曲线与其他三种杆径的应力曲线有较大的差异,在杆长中部处呈现出压应力和拉应力交错,残余拉应力值高达 65 MPa,同时在试验中也测得杆长中部出现拉应力,幅值高达 60 MPa。这是由于光斑直径和圆杆直径相差较小时,激光诱导的应力波横向传播到圆杆边界的距离短,强度衰减的较少,经圆杆边界反射回杆的内部后,转化为拉应力波^[14],并保持较

高的强度,其幅值仍然超过材料的屈服极限,并在杆件的中心会聚和碰撞。横向应力波和材料的再次相互作用改变了它们之前相互作用形成的应力场,甚至可能在圆杆圆周界面上发生多次的反射,并与材料相互作用,使得杆件内部的残余应力场起伏较大。随着圆杆直径的增大,应力波传到圆杆边界的距离加大,应力衰减的强度增大,在杆件圆周界面反射回来后的强度很小,低于材料的动态屈服极限,和材料的再次相互作用,不能改变之前相互作用形成的残余应力场,圆杆直径增加到一定程度后,残余应力分布逐渐趋于均匀。直径为5 mm的圆杆经激光冲击后,诱导的残余压应力层深度大约为0.85 mm,当圆杆直径增大至 $\Phi 10$ mm时,残余压应力层深度增加至1 mm,继续增大圆杆直径到 $\Phi 20$ mm及以上,残余压应力层深度仍然稳定在1 mm左右不变^[15-16]。由应力波的相关理论可知,应力波传到杆的圆周界面时,被反射回来,形成拉应力波,圆杆直径较小时,反射回来的应力波强度大,传到杆件的中心部位时,形成的残余拉应力场抵消了原来形成的残余压应力场,所以圆杆直径较小时,残余压应力的深度较浅。试验测得4种直径圆杆的残余压应力层深度均在1.3 mm左右。虽然不同直径圆杆中残余压应力层深度的试验值均比模拟值稍大,但不同直径圆杆沿深度方向的残余应力分布趋势是一致的。

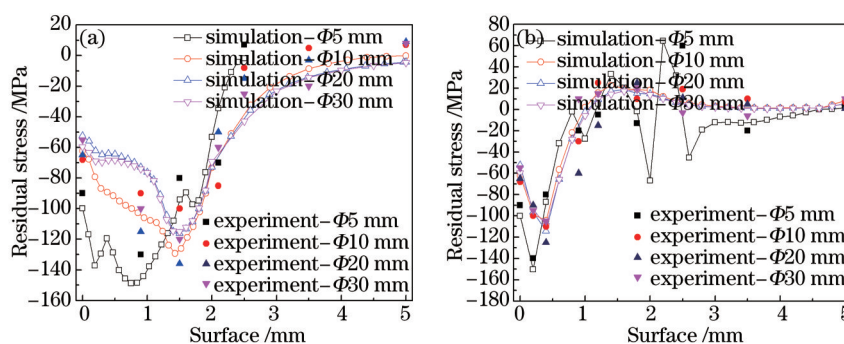


图8 不同直径圆杆中的残余应力分布。(a)沿表面方向;(b)沿深度方向

Fig.8 Residual stress distribution for different diameters rods. (a) Along surface direction; (b) along depth direction

6 结 论

1) 杆径 $\Phi 5$ mm和杆长为3 mm的圆杆在2 GPa峰值压力的冲击下,诱导的应力波峰值沿纵向和横向均随传播距离的增大而不断减小;同时应力波波形沿纵向和横向传播时均出现“弥散”现象。

2) 不同直径圆杆中应力波峰值的衰减速度均呈指数衰减趋势,且杆径越小,应力波峰值在0~0.4 mm范围内的衰减速度越大,随后衰减速度减慢并趋于一致。

3) 圆杆直径较小时,杆件内的残余应力场分布不均匀,且残余压应力层深度较浅;随着杆径增大,残余应力场分布趋于均匀,残余压应力层深度增大并趋于饱和。

参 考 文 献

- 1 Rodopoulos C A, Romero J S, Curtis S A. Effect of controlled shot peening and laser shock peening on the fatigue performance of 2024-T351 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003, 12(4): 414-419.
- 2 Braisted W, Brockman R. Finite element simulation of laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(7): 719-724.
- 3 Peyre P, Sollier A, Chaieb I, et al.. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2003, 23(2): 83-88.
- 4 Wang Wei, Zhang Jie, Senecha V K. Numerical simulation study of laser-driven shockwave propagation in planar Al foil targets[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(4): 741-747.
王 薇,张 杰, Senecha V K. 冲击波在铝靶中传播的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2001, 50(4): 741-747.
- 5 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Cheng Jingyi, et al.. Experimental study of high-power pulsed laser induced shock waves in aluminum targets[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(3): 259-262.
李志勇,朱文辉,程经毅,等. 实验研究脉冲强激光在铝靶中诱导的冲击波[J]. 中国激光, 1997, 24(3): 259-262.
- 6 Gulshan S, Ramana V G, David S S. Modeling and parameter design of a laser shock peening process[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2011, 12(5): 233-253.

- 7 Ju H K, Yun J K, Joung S K. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2025–2034.
- 8 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 846–851.
胡永祥, 姚振强, 胡 俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 846–851.
- 9 Cao Yupeng, Feng Aixin, Xue Wei, *et al.*. Experimental research and theoretical study of laser shock wave induced dynamic strain on 2024 aluminum alloy surface[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903004.
曹宇鹏, 冯爱新, 薛 伟, 等. 激光冲击诱导 2024 铝合金表面动态应变特性试验研究及理论分析[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903004.
- 10 Zhang Qinglai, Wang Rong, Zhang Bingxin, *et al.*. Effect of laser shock processing on mechanical properties and mesostructures of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303001.
张青来, 王 荣, 张冰昕, 等. 激光冲击强化对 AZ31 镁合金力学性能和组织结构的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303001.
- 11 Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. J Appl Phys, 1990, 68(2): 775–784.
- 12 Hong X, Wang S B, Guo D H, *et al.*. Confining medium and absorptive overlay: Their effects on a laser-induced shock wave[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1998, 29(6): 447–455.
- 13 Gordon R J, William H C. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, 1983: 541–547.
- 14 Wang Lili. Foundation of Stress Waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- 15 Zhang X Q, Chen L S, Yu X L, *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue life of fastener hole[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 969–974.
- 16 Zhang Xingquan, He Guangde, Qi Xiaoli, *et al.*. Investigation on contact fatigue strength of gear affected by laser shock processing [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3187–3191.
张兴权, 何广德, 戚晓利, 等. 激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3187–3191.

栏目编辑: 张浩佳