

激光冲击定量调控表面残余应力的研究进展

花国然¹ 周东呈¹ 曹宇鹏^{1,2*} 冯爱新² 陈浩天¹

¹南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

²江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 阐述了激光冲击强化(LSP)技术定量调控表面残余应力的最新研究动态,重点论述了激光冲击研究中的主要问题,指出激光与材料相互作用、表面残余应力、微观组织变化多尺度表征是激光冲击强化技术研究的新热点。在此基础上,对激光冲击强化技术在表面残余应力定量调控和海洋工程重型装备制造中的应用进行了展望。

关键词 激光光学; 激光冲击强化; 残余应力; 动态响应; 微观组织

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.100001

Research Progress of Quantitatively Controlling Surface Residual Stress by Laser Shock Processing

Hua Guoran¹ Zhou Dongcheng¹ Cao Yupeng^{1,2} Feng Aixin² Chen Haotian¹

¹School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

²School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhengjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract The newest research status of using laser shock processing (LSP) technology to quantitatively control the surface residual stress is elaborated, and the major problems in laser shock studies are specially discussed. It is pointed out that the laser interaction with materials, surface residual stress, and multi-scale characterization in microstructure changes are the research hot spots in the field of LSP technology. Based on these, the prospect for the application of LSP technology in the quantitative control of surface residual stress as well as in heavy marine equipment manufacturing is conducted.

Key words laser optics; laser shock processing; residual stress; dynamic response; microstructure

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

激光冲击强化技术将脉宽为纳秒量级、功率密度为吉瓦每平方厘米量级的高能激光束加载至金属表面的吸收层,诱导等离子体爆炸产生冲击波的力学效应,是一种可提高金属材料的强度、硬度、耐磨性和耐应力腐蚀等性能的表面强化技术^[1-2]。激光冲击强化技术与喷丸、喷砂等传统机械强化技术相比,具有应变影响层深、冲击区域和压力可控等优点,在实现定量调控表面残余应力方面有巨大的技术优势,在航空航天、海洋工程、汽车制造等行业具有广阔的应用前景。

本文从激光冲击波传播机制与动态响应、激光冲击与表面残余应力分布、激光冲击与微观组织变化多尺度表征三方面,阐述了利用激光冲击强化技术调控表面残余应力的最新研究动态,并就激光冲击强化技术在实现表面残余应力定量调控方面及在海洋工程重型装备制造中的应用进行了展望。

收稿日期: 2016-05-16; **收到修改稿日期:** 2016-06-06; **网络出版日期:** 2016-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(51505236)、江苏省科技成果转化项目(BA2013099)、江苏省光子制造重点实验室开放基金(GZ201108)、南通大学院级课题(jx2014001)

作者简介: 花国然(1964—),男,博士,教授,主要从事激光加工、海洋重型装备制造方面的研究。

E-mail: Huagr@ntu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: cyp19812004@ntu.edu.cn

2 激光冲击调控表面残余应力相关研究与进展

2.1 冲击波传播机制与动态响应

激光冲击强化技术通常使用纳秒量级的激光器,加载强度较高,很多测试手段的响应带宽过大,很难对处于瞬态变化状态的材料动态响应进行有效测量^[3]。科研工作者主要利用任意面速度干涉仪(VISAR)、聚偏二氟乙烯(PVDF)压电传感器,对铝合金、钛合金、镁合金试样背面的激光冲击波进行测量研究。

1998年,Berthe等^[4]利用VISAR实现了对20 ns激光诱导下冲击波压力的测量,但未能观察到数值计算模拟出的弹性前驱波。He等^[5]改进了VISAR测试技术,改进后的VISAR时间分辨率达到了亚纳秒量级,成功测量了激光高速驱动下金属薄片的速度。王永刚^[3,6-8]等采用速度干涉测试技术,测量和分析了纯铝、铝合金在强激光辐照下的动态力学响应,实验结果与模拟结果基本一致。

2000年,Peyre等^[9]采用PVDF压电薄膜实现了对脉宽为0.6~3 ns的激光诱导冲击波压力的准确测量。Morales等^[10]对纯铝、铝合金的动态力学响应进行了实验测量。吴边等^[11-13]利用PVDF压电薄膜完成了对强激光在铝合金、钛合金、镁合金中诱导冲击波的多点实时测量。目前,利用PVDF进行动态压力测试在国外已进入实用化阶段,国内仍需不断加强^[14]。张永康教授采用示波器与PVDF相连,装置示意图如图1所示,获取的激光冲击波图像如图2所示。示波器图像显示了激光诱导的冲击波引起的最大峰压值,相邻脉冲的时间间隔即为冲击波两次传播至靶材背面的时间差。根据冲击波压电波形可获得冲击波波速为 5.83×10^3 m/s。冲击波峰压不断衰减,根据数据拟合,冲击波峰压衰减规律为 $P_{\max} = 1.86 \times 10^{-0.08x}$,其中 P_{\max} 为冲击波的峰值压力, x 为冲击波的传播距离。

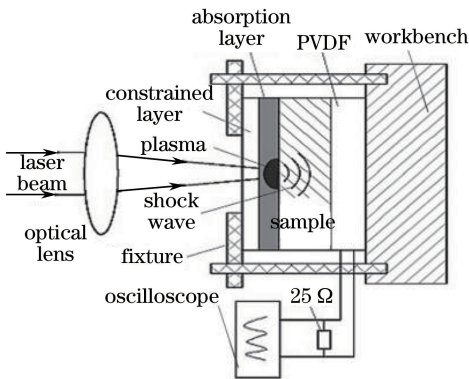


图1 激光冲击波测量装置示意图^[13]

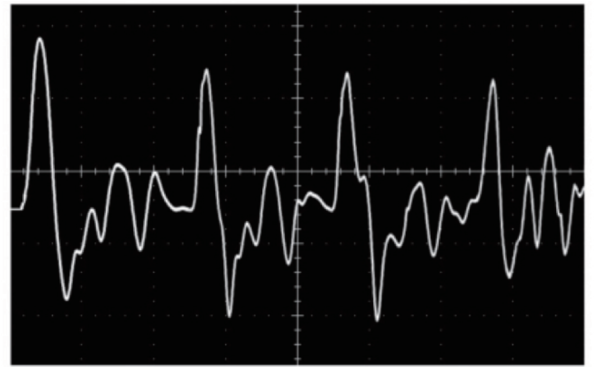


图2 镁合金中激光冲击波图像^[13]

Fig. 1 Schematic diagram of laser shock testing device^[13]

Fig. 2 Image of laser shock wave in magnesium alloy^[13]

科研工作者利用VISAR、PVDF,对铝合金、钛合金、镁合金试样背面的激光冲击波进行测量研究,研究主要集中于冲击波在材料中的衰减规律,在脉冲激光冲击波诱导试样表面动态应力-应变特性的相关研究较少。

冯爱新等^[15-19]对强激光在铝合金、镁合金背面与表面中诱导的冲击波进行了直接测量,分析了激光冲击波在金属材料中的衰减规律,并针对脉冲激光冲击波诱导试样表面产生的动态应力-应变特性进行了实验研究,测试方案如图3所示。图4、5、6给出了有无约束层和不同激光功率密度对7050铝合金表面动态应变的影响,其中图4(b)、5(b)、6(b)分别为图4(a)、5(a)、6(a)压电波形的5倍放大图, V_1 和 V_2 代表无约束层条件下材料的动态应变, W 代表Rayleigh波的出现时刻。在有约束层条件下,压电波形较为平滑,反之,压电波形呈锯齿形。同时,有约束层存在时材料表面动态应变压电信号 $V(\epsilon, t)$ 是无约束层条件的3~4倍,这说明约束层材料K9玻璃具有良好的导热和冷却效果,能够降低激光热效应对材料的影响,增强冲击波压力和延长作用时间。由图4和图6可知,在两种不同功率密度的激光冲击下,压电波形呈现相似的分段规律。在压电波形 $V(\epsilon, t)$ 的d~e段, $[\sigma_1(t)/\epsilon_1(t)]/[\sigma_2(t)/\epsilon_2(t)] \approx 1$,即 $\sigma(t)/\epsilon(t) = n$,其中 σ_1 和 σ_2 分别表示平行于PVDF传感器膜面的横向和纵向应力, ϵ_1 和 ϵ_2 分别表示平行于PVDF传感器膜面的横向和纵向应变, n 为常量;在e~f段,两者的曲线有相同的斜率,即此阶段应变显著增加而应力基本不变;f~g段与e~f段相比,斜率再次增加,且f~g末端为斜率逐步减小的光滑圆弧,与静力拉伸下强化阶段的应力-应变关系曲线类似,如图7所示。这说明7050铝合金在强激光冲击下的表面动态应力-应变曲线与静力拉伸条件下

的静态应力-应变关系曲线类似,均存在屈服阶段、弹性阶段、强化阶段。

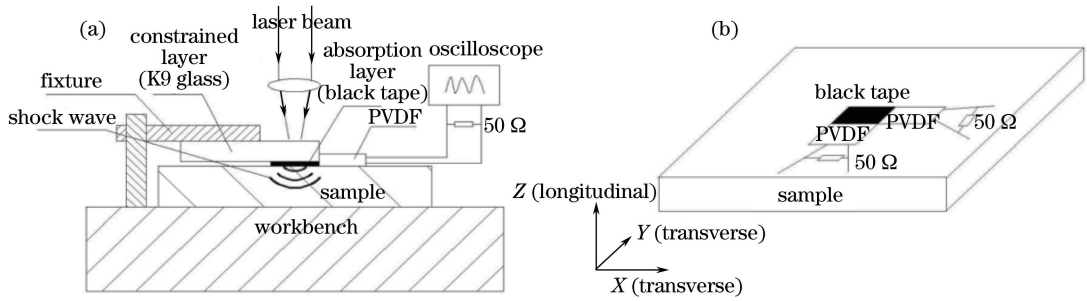


图3 动态应变检测示意图^[19]。(a) 整体图; (b) PVDF 传感器布局图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic strain detection^[19]. (a) Overall diagram; (b) local diagram of PVDF sensor arrangement

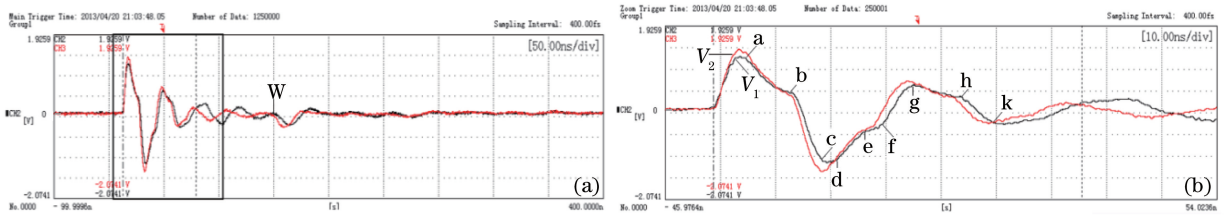


图4 有约束层、激光功率密度为 12.7 GW/cm^2 激光冲击加载时材料的动态应变^[19]

Fig. 4 Dynamic strain of laser-shock-loaded material with constrained layers at laser power density of 12.7 GW/cm^2 ^[19].

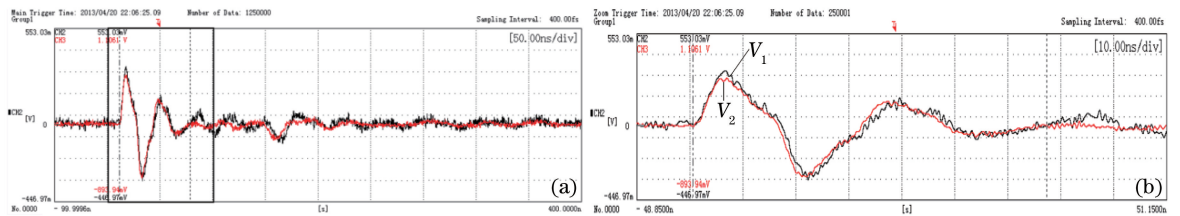


图5 无约束层、激光功率密度为 12.7 GW/cm^2 激光冲击加载时材料的动态应变^[19]

Fig. 5 Dynamic strain of laser-shock-loaded material without constrained layers at laser power density of 12.7 GW/cm^2 ^[19].

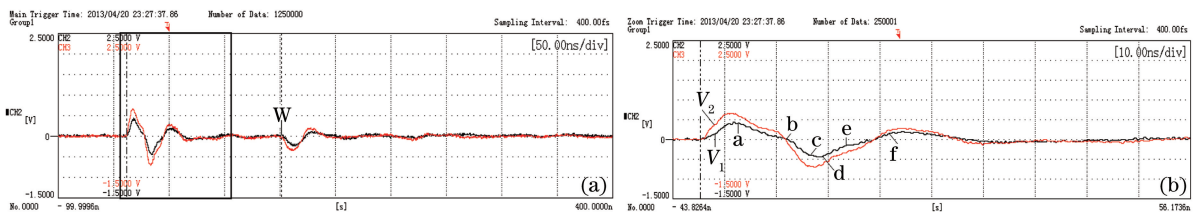


图6 激光功率密度为 3.2 GW/cm^2 激光冲击加载时材料的动态应变^[19]

Fig. 6 Dynamic strain of laser-shock-loaded material at laser power density of 3.2 GW/cm^2 ^[19].

2.2 激光冲击与表面残余应力分布

2004年, Ocana等^[20]通过建立数学模型,预测了激光冲击后的残余应力,并解释了激光冲击提高材料疲劳寿命的物理机制。2006年, Cheng等^[21]采用强激光冲击单晶硅材料,采用多尺度位错动力学来阐述强化机制,但研究止步于模拟阶段。

Feng等^[22-25]利用X射线衍射应力分析仪对激光冲击强化铝合金、弹簧钢等金属材料表面残余应力分布以及激光离散划痕区域表面残余应力分布进行了测试和研究。图8给出了不同激光功率密度对2024铝合金表面残余应力场的影响,其中光斑边界为测点位置的零点。聂贵锋等^[23]对不同功率密度激光冲击下2024铝合金表面残余应力的主应力、方向角等进行了数据比较,以应力场分布均匀和应力角趋于离散的原

则给出了针对 2024 铝合金的激光冲击参数的推荐值,但未对残余应力场分布规律进行实验性研究。

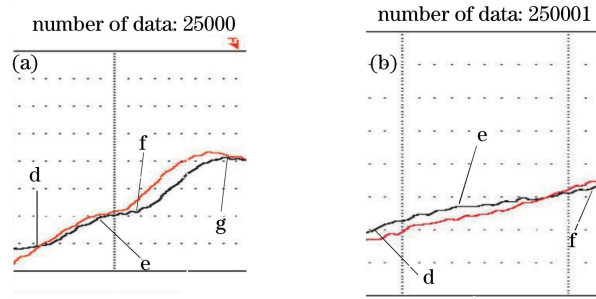


图 7 不同激光功率密度下的 7050 铝合金表面动态应变局部放大图^[19]。(a) 12.7 GW/cm²; (b) 3.2 GW/cm²
Fig. 7 Partial enlargement of dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface^[19] at different laser power densities.
(a) 12.7 GW/cm²; (b) 3.2 GW/cm²

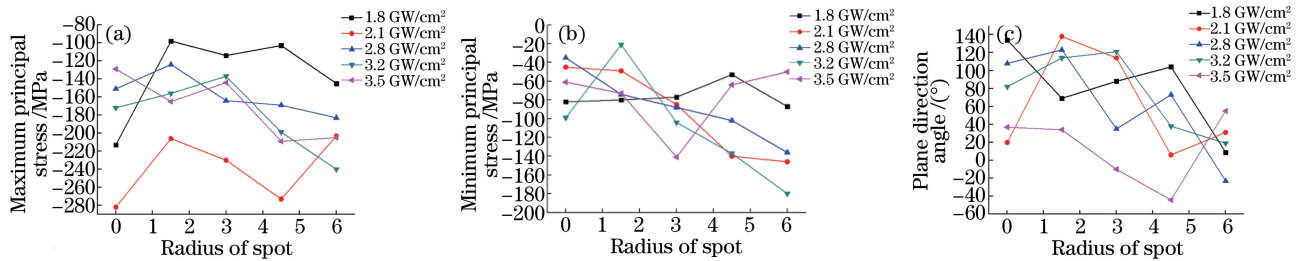


图 8 不同激光功率密度诱导 2024 铝合金的残余主应力分布^[23]。(a) 最大主应力; (b) 最小主应力; (c) 方向角
Fig. 8 Residual principal stress distributions of 2024 aluminum alloy induced by different laser power densities^[23].
(a) Maximum principal stress; (b) minimum principal stress; (c) directional angle

通过实验研究激光冲击强化对材料力学性能的影响,主要集中于对材料表面的残余应力分布的测量和研究。对于表面静态残余应力与动态应力应变的相关性研究有待加强。

经过多年研究,科研工作者根据大量实验结果提炼出了描述材料高应变率条件下的经验本构方程,如 EPP 模型、Z-A 模型、J-C 模型。其中,EPP 模型忽略了应变硬化;Z-A 模型考虑了应变率和温度的相互作用,其缺点为大量序数需要实验验证;J-C 模型可以较好地应用于高压、高速的冲击过程。国内外学者大多使用 J-C 模型定义激光冲击时材料的本构关系进行数值仿真。Peyre 等^[26]采用 J-C 模型对激光冲击不锈钢进行了研究。李小燕^[27]采用 J-C 模型通过测试实验研究了激光冲击条件下 Al-Mg-Sc 合金的本构关系。冯爱新等^[16,28]采用 J-C 模型对激光冲击条件下 2024 铝合金的本构关系进行了研究。但是 J-C 模型只考虑应变率和温度效应,忽略了变形历史和冲击波压力,适用的应变率须在 10^4 s^{-1} 以内,且应变强化项是采用较简单的对数关系,不能描述变形机制发生时的特征。

曹宇鹏等^[29]利用 PVDF 压电传感器对残余应力形成的机制进行了探究。测试获得 7050 铝合金在不同功率激光冲击下残余应力场分布,如图 9 所示。利用 PVDF 压电传感器得到不同能量激光冲击薄板试样时表面与背面的动态应变,如图 10 所示。当功率密度为 1.02 GW/cm^2 和 1.53 GW/cm^2 时,表面最大残余主应力变化曲线为等双轴分布。当功率密度为 1.98 GW/cm^2 和 2.77 GW/cm^2 时,冲击区表面的表面残余应力均为压应力,最大残余主应力曲线变化较小,应力分布相对均匀,但最大残余应力未出现在冲击中心,产生了残余应力洞。结合静态残余应力场分布与动态表面应力应变,对比图 9 和图 10 可知,当能量较小时,激光冲击引起的横向变形小,导致了试样最大残余主应力呈等双轴分布;随着加载激光能量的增大,在来回反射的冲击波与表面稀疏波的共同作用下,产生了残余应力洞。

2.3 激光冲击与微观组织变化

2005 年, Huang 等^[30]采用强激光冲击单晶铜,发现当冲击波压强为 $55 \sim 60 \text{ GPa}$ 时,沿 $\{100\}$ 晶格方向形成微孪晶。2006 年, Loomis 等^[31]用激光冲击单晶 NiAl,冲击压强为 15 GPa ,冲击区域形成大量位错结构和晶格旋转。崔新林等^[32-33]采用分子动力学模拟分别研究了强激光辐照下单晶铁的相变过程与双晶铜的激光冲

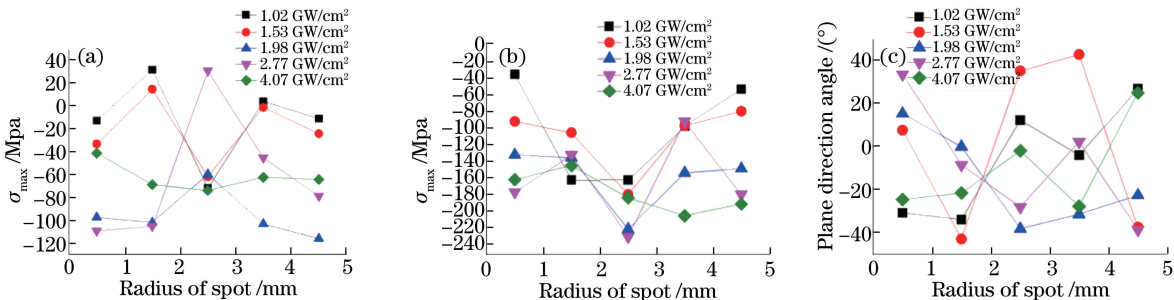


图 9 不同激光功率密度诱导 7050 铝合金的残余主应力分布 [29]。(a) 最大主应力；(b) 最小主应力；(c) 方向角
 Fig. 9 Residual principal stress distributions of 7050 aluminum alloy induced by different laser power densities [29].
 (a) Maximum principal stress; (b) minimum principal stress; (c) directional angle

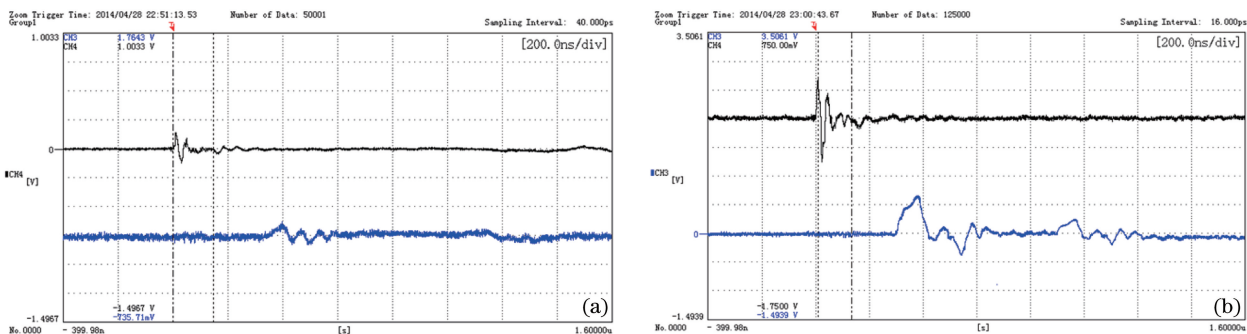


图 10 不同功率密度激光冲击加载 7050 铝合金的动态应变 [29]。(a) 1.53 GW/cm²；(b) 2.77 GW/cm²
 Fig. 10 Dynamic strain of laser-shock-loaded 7050 aluminum alloy with different laser power densities [29].
 (a) 1.53 GW/cm²；(b) 2.77 GW/cm²

击波加载过程, Luo 等 [33] 提出材料的晶粒和晶界特征会影响冲击波对各向异性材料晶界的冲击效果。

2011 年, Ye 等 [34] 等提出热激光冲击强化 (WLSP) 技术, 利用碳原子对位错的钉扎效产生的纳米级的沉淀碳化物, 增大了热激光冲击处理后 AISI4140 钢材的位错密度, 提高了位错结构的稳定性。之后他们又研究了 AISI304 不锈钢在 -196 °C 下的强化过程, 提出温度的降低更有利于 304 不锈钢产生相变和发生孪生变形 [35], 为微观组织研究提供了新思路。Lu 等 [36-41] 对铝合金、钛合金、ANSI304 钢等强激光冲击后的微观结构响应与金属相变过程及机理进行了分析。图 11 为多次激光冲击强化诱导的 LY2 铝合金微观结构的演化过程示意图。激光冲击 LY2 铝合金后, 位错行为导致了原始粗晶内位错线的形成, 位错线的不断堆积导致了位错墙和位错缠结的形成。随着应变进一步的增加, 位错胞逐渐细分原始晶粒。当应变积累至一定程度时, 位错开始湮灭和重排, 形成亚晶粒; 亚晶界的不断发展转化为细化后的晶粒, 甚至发展为纳米晶。

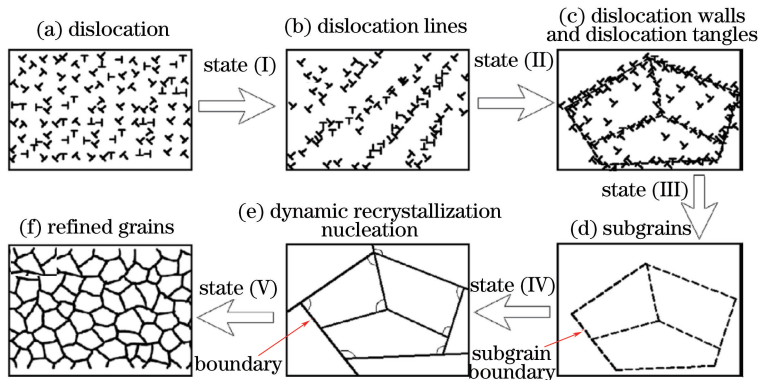


图 11 多次激光冲击强化诱导的 LY2 铝合金微观结构的演化过程示意图 [37]

Fig. 11 Schematic illustration of microstructural evolution process of LY2 aluminum alloy induced by multiple laser shock processing [37]

图 12(a)为 7075 铝合金在激光冲击后,其微观组织的透射电子显微镜(TEM)图像。从 TEM 图像可明显看出,激光冲击使基体产生了大量位错与位错缠结,基体呈现大量细小的点状组织。图 12(b)为该点状组织的高分辨率透射电子显微镜(HRTEM)图像。由于激光冲击强化的瞬态热过程,在超过过冷度下,在材料表层晶粒合金组员的重新分配和重结晶过程中,冲击层内合金原子的混乱度大幅提高,即体系处于熵增状态。

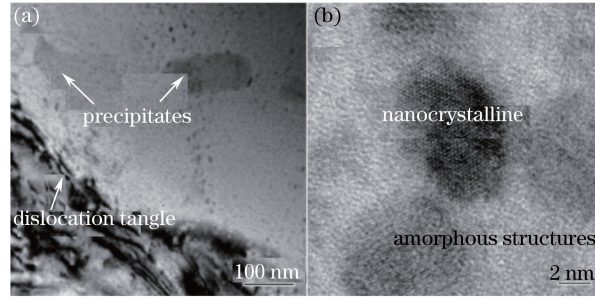


图 12 7075-T76 铝合金单次激光冲击的 (a) TEM 和 (b) HRTEM 像^[38]

Fig. 12 (a) TEM and (b) HRTEM images of 7075-T76 aluminum alloy after a single laser shock^[38]

国内外学者主要通过模拟和实验研究激光冲击强化对材料力学性能的影响,探究激光冲击对材料微观组织结构的影响,但对于微观组织结构与宏观残余应力分布的多尺度关系的研究较少。

3 结束语

随着国务院《中国制造 2025》规划的提出,海洋资源的开发与利用逐步成为国家战略。世界海洋油气开发已呈现出向深海和极地进军的趋势,这对海洋工程平台用钢的综合性能提出了更高的要求。激光冲击强化技术可以显著提高金属材料的综合机械性能,在海洋工程上具有广阔的应用前景。为解决海洋工程重型装备关键零部件的防腐蚀问题,花国然教授、冯爱新教授团队基于海洋工程材料开展了激光冲击强化定量调控表面残余应力、提高界面结合强度的实验研究,对激光冲击波在海洋工程材料中的传播机制、超高应变率下金属材料的动态力学性能进行了研究。激光冲击强化技术本身并不是新事物,如何进一步发展激光冲击定量调控表面残余应力技术,将其更好地运用于海洋工程重型装备制造、深海石油开采等相关产业还有待进一步研究。

参 考 文 献

- Zhang Y, Gu Y, Zhang X, *et al.* Study of the mechanism of overlays acting on laser shock waves[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(10): 103517.
- Lu J Z, Luo K Y, Dai F Z, *et al.* Effects of multiple laser shock processing (LSP) impacts on mechanical properties and wear behaviors of AISI 8620 steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 536(3): 57-63.
- Wang Yonggang, BOUSTIE M, He Hongliang, *et al.* Experimental study on mechanical behavior and tensile spallation of pure aluminium under laser shock loading[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7): 966-970.
王永刚, BOUSTIE M, 贺红亮, 等. 强激光辐照下纯铝的力学响应和层裂的实验测量与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(7): 966-970.
- Berthe L, Fabbro R, Peyre P, *et al.* Shock waves from a water-confined laser-generated plasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(6): 2826-2832.
- He H, Kobayashi T, Sekine T. Accurate measurement of the velocity history of a laser-driven foil plate with a push-pull-type VISAR[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6327-6333.
- Shu Hua, Fu Sizu, Huang Xiuguang, *et al.* Line-imaging optical recording velocity interferometer at “Shengguang- II ” laser facility and its applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 114102.
舒桦, 傅思祖, 黄秀光, 等. 神光 II 装置上速度干涉仪的研制及应用[J]. *物理学报*, 2012, 61(11): 114102.
- Shu H, Fu S, Huang X, *et al.* Plastic behavior of aluminum in high strain rate regime[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(3): 033506.
- Shu Hua, Fu Sizu, Ma Minxun, *et al.* Calculation on laser driven shock wave stability of propagation[J]. *High Power*

- Laser and Particle Beams, 2007, 19(2): 253-256.
- 舒 桦, 傅思祖, 马民勋, 等. 激光驱动冲击波传播稳定性的计算分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 253-256.
- 9 Peyre P, Berthe L, Fabbro R, *et al.* Experimental determination by PVDF and EMV techniques of shock amplitudes induced by 0.6-3 ns laser pulses in a confined regime with water[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(5): 498-503.
- 10 Morales M, Porro J A, Blasco, M, *et al.* Numerical simulation of plasma dynamics in laser shock processing experiments[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5181-5185.
- 11 Wu Bian, Wang Shengbo, Guo Dahao, *et al.* Research of material modification induced by laser shock processing on aluminum alloy[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(10): 1352-1356.
- 吴 边, 王声波, 郭大浩, 等. 强激光冲击铝合金改性处理研究[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1352-1356.
- 12 Yu Shuisheng, Yao Hongbing, Wang Fei, *et al.* Influence of interaction parameters on high power laser induced shockwave in magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1386-1390.
- 于水生, 姚红兵, 王 飞, 等. 作用参数对镁合金中强激光诱导冲击波的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1386-1390.
- 13 Zhang Yongkang, Yu Shuisheng, Yao Hongbing, *et al.* Experimental study of shock waves induced by high-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5602-5605.
- 张永康, 于水生, 姚红兵, 等. 强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中诱导冲击波的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5602-5605.
- 14 Hu Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- 胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- 15 Feng Aixin, Nie Guifeng, Xue Wei, *et al.* Experimental research on laser shock wave loading mechanism of 2024 aluminum alloy sheet[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2012, 48(2): 205-210.
- 冯爱新, 聂贵锋, 薛 伟, 等. 2024 铝合金薄板激光冲击波加载的实验研究[J]. 金属学报, 2012, 48(2): 205-210.
- 16 Feng Aixin, Han Zhenchun, Nie Guifeng, *et al.* Tests for dynamic stress-strain of 2024 aluminum alloy induced by laser shocking[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(14): 200-203.
- 冯爱新, 韩振春, 聂贵锋, 等. 激光冲击 2024 铝合金诱导动态应力应变实验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(14): 200-203.
- 17 Feng Aixin, Yin Cheng, Cao Yupeng, *et al.* Experimental research on laser-induced dynamic response of AZ31B magnesium alloy sheet[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(10): 109002.
- 冯爱新, 印 成, 曹宇鹏, 等. 激光诱导 AZ31B 镁合金薄板动态响应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(10): 109002.
- 18 Yin Cheng, Feng Aixin, Cao Yupeng, *et al.* Experimental research of dynamic and static respond of AZ31B magnesium alloy sheet by laser shock wave[J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 562-566.
- 印 成, 冯爱新, 曹宇鹏, 等. 激光冲击波加载 AZ31B 镁合金薄板动静态响应实验研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 562-566.
- 19 Cao Y, Feng A, Hua G. Influence of interaction parameters of laser shock wave induced dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(15): 153105.
- 20 Ocana J L, Morales M, Molpeceres C, *et al.* Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments[J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1-4): 242-248.
- 21 Cheng G J, Shehadeh M A. Multiscale dislocation dynamics analyses of laser shock peening in silicon single crystals[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(12): 2171-2194.
- 22 Feng A X, Sun H Y, Cao Y P, *et al.* Residual stress determination by X-ray diffraction with stress of two directions analysis method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 43: 569-572.
- 23 Nie Guifeng, Feng Aixin, Ren Xudong, *et al.* Effect of laser shock processing parameters on residual principal stresses and its directions of 2024 aluminum Alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103006.
- 聂贵锋, 冯爱新, 任旭东, 等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103006.
- 24 Feng Aixin, Li Bing, Guo Rucheng, *et al.* Analysis of residual stress state of spring steel wire induced by laser shock processing[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1635-1638.

- 冯爱新, 李 彬, 郭儒成, 等. 激光冲击诱导弹簧钢丝残余应力状态分析[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1635-1638.
- 25 Cao Yupeng, Xue Wei, Feng Aixin, *et al.* Measure and analysis the residual stress of the area of protective coating containing Ni by pulsed laser discrete scratching testing[J]. Applied Laser, 2013, 33(3): 294-298.
曹宇鹏, 薛 伟, 冯爱新, 等. 含 Ni 涂层激光离散划痕区域残余应力的测试分析[J]. 应用激光, 2013, 33(3): 294-298.
- 26 Peyre P, Chaieb I, Braham C. FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels[J]. Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering, 2007, 15(3): 205-221.
- 27 Li Xiaoyan. The experimental research on the laser shock forming of the sheet-metal and finite element analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
李 小 燕. 金属板料激光冲击成形实验研究及有限元模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- 28 Cao Yupeng, Feng Aixin, Hua Guoran, *et al.* Test for dynamic stress-strain of 2024 aluminum alloy surface under high strain rate by pulsed laser shock[J]. Applied Laser, 2015, 35(3): 324-329.
曹宇鹏, 冯爱新, 花国然. 激光冲击高应变率下 2024 铝合金表面动态应力-应变实验研究[J]. 应用激光, 2015, 35(3): 324-329.
- 29 Cao Yupeng, Xu Ying, Feng Aixin, *et al.* Experimental research of the residual principal stresses formation mechanism of 7050 aluminum alloy sheet by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0702008.
曹宇鹏, 徐 影, 冯爱新, 等. 激光冲击强化 7050 铝合金薄板表面残余应力形成机制的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702008.
- 30 Huang C X, Xu Y B, Kalantar D H. Effect of shock compression method on the defect substructure in monocrystalline copper[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 409(1): 270-281.
- 31 Loomis E, Peralta P, Swift D, *et al.* Cross-sectional TEM studies of plastic wave attenuation in shock loaded NiAl[J]. Materials Science & Engineering A, 2006, 437(2): 212-221.
- 32 Cui Xinlin, Zhu Wenjun, He Hongliang, *et al.* Effect of void volume on phase transformation of iron under laser shock loading[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(7): 1074-1078.
崔新林, 祝文军, 贺红亮, 等. 强激光辐照下孔洞尺寸对铁相变过程的影响[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(7): 1074-1078.
- 33 Luo S N, Germann T C, Tonks D L, *et al.* Shock wave loading and spallation of copper bicrystals with asymmetric $\Sigma 3\langle 110 \rangle$ tilt grain boundaries[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(9): 093526.
- 34 Ye C, Suslov S, Kim B J, *et al.* Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 1014-1025.
- 35 Ye C, Suslov S, Dong Lin, *et al.* Deformation-induced martensite and nanotwins by cryogenic laser shock peening of AISI 304 stainless steel and the effects on mechanical properties[J]. Philosophical Magazine, 2012, 92(11): 1-21.
- 36 Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K, *et al.* Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel[J]. Acta Materialia, 2010, 58(16): 5354-5362.
- 37 Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K, *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.
- 38 Luo Xinmin, Zhao Guangzhi, Zhang Yongkang, *et al.* Laser shock processing of Ti-6Al-4V and analysis of its microstructure response[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2012, 48(9): 1116-1122.
罗新民, 赵广志, 张永康, 等. Ti-6Al-4V 激光冲击强化及其微结构响应分析[J]. 金属学报, 2012, 48(9): 1116-1122.
- 39 Lu J Z, Qi H, Luo K Y, *et al.* Corrosion behavior of AISI 304 stainless steel subjected to massive laser shock peening impacts with different pulse energies[J]. Corrosion Science, 2014, 80: 53-59.
- 40 Lu J Z, Luo K Y, Zhang Y K, *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.
- 41 Luo Xinmin, Wang Xiang, Chen Kangmin, *et al.* Surface layer high-entropy structure and anti-corrosion performance of aero aluminum alloy induced by laser shock processing[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2015, 51(1): 57-66.
罗新民, 王 翔, 陈康敏, 等. 激光冲击诱导的航空铝合金表层高熵结构及其抗蚀性[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 57-66.