doi: 10.11933/j.issn.1007−9289.20181211001

E690 高强钢表面激光冲击微造型的模拟与试验

曹宇鹏[1,2,4]，蒋苏州[1]，施卫东[1]，花国然[1]，冯爱新[3]，王振刚[4]

(1. 南通大学 机械工程学院，南通 226019；2. 香港理工大学 机械工程系，红磡 100077；3. 温州大学 机电工程学院，温州 325035；4. 南通中远船务工程有限公司，南通 226006)

摘　要： 为研究冲击次数对 E690 高强钢表面激光冲击微造型、表面残余应力和微观组织的影响，采用有限元软件 ABAQUS 模拟试样表面成型过程，使用 7.96 GW/cm² 的脉冲激光冲击 E690 高强钢试样，采用光学轮廓仪测量试样表面三维形貌，利用 X 射线应力分析仪测量激光冲击微凹坑表面的残余应力并提取半高宽值，利用 TEM 观察冲击区域的微观组织形貌。结果表明，使用 7.96 GW/cm² 的脉冲激光冲击试样 1~4 次，深度在 10~40 μm 呈增加趋势，在深度方向对比试样表面三维形貌的模拟结果和测试结果，误差范围合理；激光冲击 2 次及以上，试样测点各方向残余压应力测试值趋于一致；半高宽值逐渐增大，冲击 4 次与冲击 3 次的半高宽值趋于相等；冲击 2 次后试样的 TEM 像和电子衍射图表明微凹坑表面形成了纳米晶。

关键词: 激光光学；激光冲击强化；残余应力；E690 高强钢；微观组织

中图分类号: TG174.44；TN249　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1007−9289(2019)05−0069−09

Numerical Simulation and Experiment Micro-dimple Array on E690 High-strength Steel Surface Induced by Laser Shock Processing

CAO Yupeng[1,2,4], JIANG Suzhou[1], SHI Weidong[1], HUA Guoran[1], FENG Aixin[3], WANG Zhengang[4]

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom 100077, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 4. NanTong COSCO Shipyard CO. LTD, Nantong 226006, China)

Abstract: To study how different times of laser shocks affect the micro-dimple, surface residual stress and microstructure of E690 high-strength steel, the finite element software ABAQUS was used to simulate the surface evolution process of the sample. E690 high-strength steel specimens were impacted by pulsed laser with a power density of 7.96 GW/cm². Three-dimensional surface morphology was measured by an optical profiler. The surface residual stress and FWHM values of laser-shocked zone were measured by an X-ray diffraction residual stress tester, and the microstructure and morphology of the impacted area were characterzal by using TEM. Results show that when pulse laser with a power density of 7.96 GW/cm² impacts 1−4 times, the resultant depths present an increasing trend between 10 and 40 μm. A comparison of the simulated and measured results of three-dimensional surface topography in depth-wise direction suggests that the error rate falls within a reasonable range. When pulse laser impacts 2 times and more, test values of residual compressive stress of the specimens tend to be consistent in all directions. FWHM values gradually increase and tended to be equal with the impact being performed 4 and 3 times. TEM images and electron diffraction patterns of specimens that has been impacted by pulse laser for 2 times show nanocrystals forming on the surface of the micro-dimple.

Keywords: laser optics; laser shock processing; residual stress; E690 high-strength steel; microstructure

---

收稿日期： 2019-06-20；**修回日期：** 2019-08-20

通信作者： 施卫东 (1964—)，男，研究员，博士；**研究方向：** 流体机械理论及海洋工程技术；**E-mail：** wdshi@ntu.edu.cn

基金项目： 国家自然科学基金 (51505236，51979138)；中国博士后科学基金 (2019M651931)；南通市基础科学研究 (JC2018029)

Fund： Supported by National Natural Science Foundation of China (51505236, 51979138), China Postdoctoral Science Foundation (2019M651931), Nantong Basic Science Research Project (JC2018029)

引用格式： 曹宇鹏, 蒋苏州, 施卫东, 等. E690 高强钢表面激光冲击微造型的模拟与试验[J]. 中国表面工程, 2019, 32(5): 69-77.
CAO Y P, JIANG S Z, SHI W D, et al. Numerical simulation and experiment micro-dimple array on E690 high-strength steel surface induced by laser shock processing[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(5): 69-77.

0 引 言

随着世界海洋油气开发向深海和极地进军，E690 高强钢作为重要的海工用钢，在海洋潮差的作用下极易发生腐蚀损伤甚至腐蚀疲劳断裂，将严重威胁海工平台的安全[1-2]。部分 E690 高强钢服役于抬升系统重载环境，在此极端条件下极易发生摩擦、磨损与应力腐蚀，降低抬升机构的服役寿命。激光冲击强化技术可显著提高金属材料的硬度、强度、耐磨性和耐腐蚀性等性能，其原理是利用 ns 量级脉宽、GW/cm^2 量级功率密度的高能脉冲激光束加载金属表面涂覆的吸收层，使之发生爆炸性气化进而产生等离子体，在约束层的作用下诱导金属表面产生冲击波力学效应，使材料表面发生塑性变形，产生残余压应力和晶粒细化，从而改善材料的表面综合性能[3-5]。

激光冲击微造型是一种在激光冲击强化基础上发展而成的微坑加工新技术。利用激光冲击波的力学效应加工微凹坑阵列，是用于改善摩擦副表面的摩擦学性能，延长摩擦副使用寿命的新方法[6-7]。目前，国内外主要围绕激光冲击微造型的可行性和工艺参数对微造型效果的影响展开研究[8-9]，但激光冲击微造型工艺参数对微凹坑三维形貌和物理性质的影响规律，以及激光冲击微造型工艺参数、残余应力与微观组织多尺度关系的研究还亟待加强。

利用有限元软件 ABAQUS 对同一能量、不同冲击次数作用下试样表面的成型过程建模仿真，对 E690 高强钢试样表面进行激光冲击微造型，用试验结果对模拟结果进行验证，探究激光冲击微造型机理，获取激光工艺参数与微凹坑几何特征的对应关系；通过 X 射线应力分析仪对未加工表面和激光冲击微凹坑表面残余应力分别进行测量，使用透射电镜观察冲击区域表面微观组织，探究激光工艺参数、表面残余应力分布与微观组织的相关性，获取激光冲击微凹坑表面纳米化的工艺参数，为激光冲击微造型工艺的参数优化提供理论和技术支持。

1 激光冲击微造型有限元模型的建立

为模拟多次激光冲击产生的塑性变形，在 ABAQUS 软件中建立 5 mm×5 mm×5 mm 的 1/4 激光冲击三维有限元模型，有限元的边界区域和内部均采用有限单元，单元类型选择 C3D8R，模拟中激光冲击区域采用符合高斯分布的面载荷，按照激光冲击波作用时间内的变化规律进行加载，在 XZ 和 YZ 平面施加对称约束，底部施加全约束。模拟计算精度取决于单元密度，越密则计算时间越长，为提高模拟精度并减少计算时间，Z 方向单元长度从上部分的 0.05 mm 逐渐增加到下部分的 0.1 mm，其余区域单元尺寸取 0.07 mm，总单元格数为 428 697 个。

采用 Fabbro 推导出脉冲激光峰值冲击压力公式[10]。其中能量转化效率系数α取 0.2，折合阻抗 Z 取0.455×10^6 g·cm^{-2}·s^{-1}，I_0为激光功率密度，GW·cm^{-2}，P 为功率，GPa。

$$P = 0.01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\sqrt{Z}\cdot\sqrt{I_0} \tag{1}$$

在有约束层情况下，脉冲激光诱导冲击波的作用时间大约为脉宽的 2~3 倍[11]，试验中脉宽采用 20 ns，冲击波加载曲线如图 1 所示。

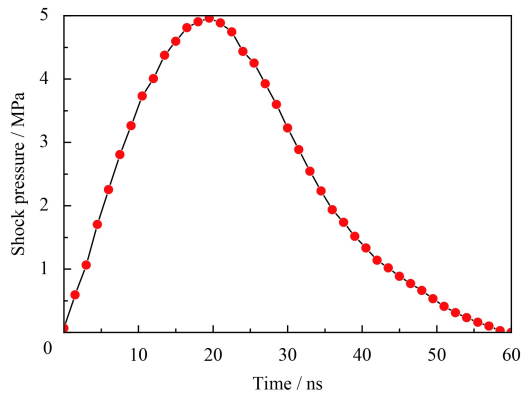


图 1 激光冲击波加载曲线

Fig.1 Curve of laser shock wave loading

激光冲击微造型过程中具有超高应变率，达10^6 s^{-1} 以上，国内外关于爆炸、高速冲击等高应变率的仿真模拟常使用 Johnson-Cook 本构模型，在表面吸收层和水约束层作用下，可忽略热效应造成的温度上升，故简化后的 Johnson-Cook 本构模型如公式 (2) 所示。

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})\right] \tag{2}$$

式中，σ表示等效应力，A、B、C 为模型参数，ε表示等效应变，$\dot{\varepsilon}$表示应变率，$\dot{\varepsilon}_0$表示准静

态载荷下的应变率。其中，E690 高强钢的力学性能参数如表 1 所示。

表 1　E690 高强钢的力学性能参数[12-13]

Table 1　Mechanical properties of E690 high-strength steel[12-13]

Parameter	Density / ($kg \cdot m^{-2}$)	v	E/ GPa	A/ MPa	B/ MPa	n	C
Value	7850	0.3	210	739	510	0.3	0.0147

2　材料及方法

采用进口美制 E690 高强钢，材料化学成分与机械性能见表 2。通过线切割将材料加工成 30 mm×25 mm×5 mm 的试样，依次采用 240~1200 号砂纸对试样表面打磨抛光，采用乙醇清洗并吹干。采用厚 0.1 mm 的 3M 铝膜作为吸收保护层，便于粘贴和清除，采用去离子水作为约束层。

激光器采用 YAG 固体脉冲激光器，型号为 YS80-M165，激光脉宽为 20 ns，输出能量为 5 J，波长为 1064 nm，频率范围为 1~4 Hz。激光器每发射一个光脉冲算一次冲击，试样采用不同冲击次数 (1、2、3 和 4 次) 对每个位置点进行冲击，面积占有率取 20%，激光冲击位置分布如图 2(a) 所示，激光冲击具体工艺参数如表 3 所示。

表 2　E690 高强钢化学成分与力学性能

Table 2　Chemical composites and mechanical capacity of E690 high-strength properties

Element and mechanical properties	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	σ_b / MPa	σ_s / MPa
Values	≤0.18%	≤0.50%	≤1.6%	≤0.02%	≤0.01%	≤1.5%	≤3.5%	≤0.7%	≤0.08%	≥690	835

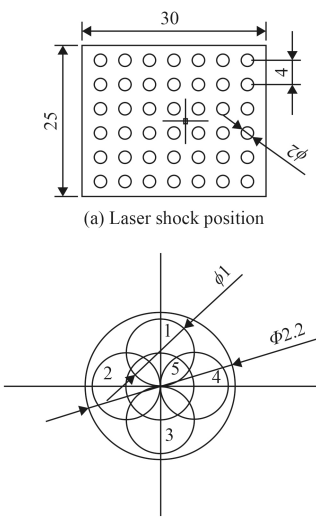


图 2　激光冲击位置分布和微凹坑检测点示意图

Fig.2　Schematic diagram of laser shock position distribution and micro-dimple detection points

表 3　试样表面激光冲击工艺参数

Table 3　Process parameters of laser shock on surface of the samples

Sample number	Laser power density/ ($GW \cdot cm^{-2}$)	Shock times	Diameter/ μm
1#	0	0	0
2#	7.96	1	2000
3#	7.96	2	2000
4#	7.96	3	2000
5#	7.96	4	2000

使用德国 NanoFocususurf 光学轮廓仪观测激光冲击区域的三维形貌，采用 X 射线应力分析仪 (Xstress 3000 G2R，STRESSTECH OY，芬兰) 测量激光冲击区域表面残余应力。每块试样冲击区域随机选取微凹坑，在微凹坑中按顺序测 5 个点，如图 2(b) 所示，通过测角仪在每个测点的 0°，45°以及 90°这 3 个方向各测 1 次。为使用方差表示残余应力数值的分散性，进而探究表面残余应力分布的均匀性，选用相同的测试参数将各试样的 5 号点测量方向增加为 5 个。测试参数选择如下：准直管直径 1 mm，材料选择 Fe Ferrite，Cr 靶，布拉格角 156.4°，晶面类型 (211)，管电流 6.7 mA，管电压 30 KV，曝光时间 15 s，测量方法选用侧倾法 (Modified X)。

使用 Tecnai G2 F20 场发式高分辨透射电子显微镜 (FEI 公司，美国) 观察激光冲击微造型凹坑底部的微观组织形貌。其中 TEM 薄膜试样先用线切割分离出激光冲击强化层，用手动研磨盘从基体一侧开始减薄，再经过凹坑珩磨，最后利用离子减薄的方法制备而成。

3　结果与分析

3.1　不同激光冲击次数对表面三维形貌的影响

通过 ABAQUS 中 Explicit 和 Standard 两个模块 (即冲击和回弹) 分析获得了 U3(沿 Z 方向的位移) 塑性变形情况，在不同冲击次数情况下，数值

模拟的塑性变形值 U3 随冲击次数增加呈线性增大趋势，其表面塑性变形模拟曲线如图 3 所示，深度范围约在 10~40 μm。由于其变形规律类似，取其中冲击 2 次和 4 次的模拟云图为例进行分析，如图 4 所示。

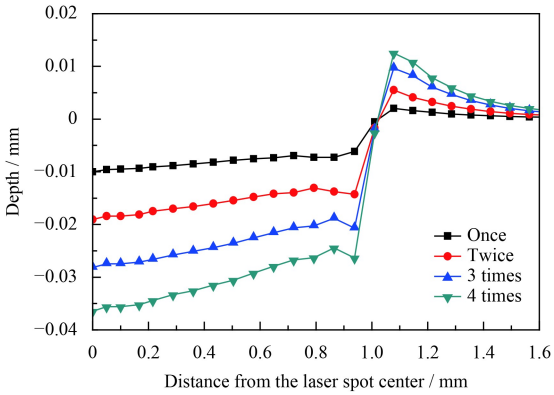
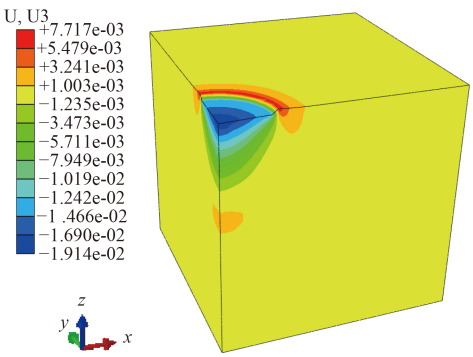


图 3 不同激光冲击次数表面塑性变形模拟曲线图

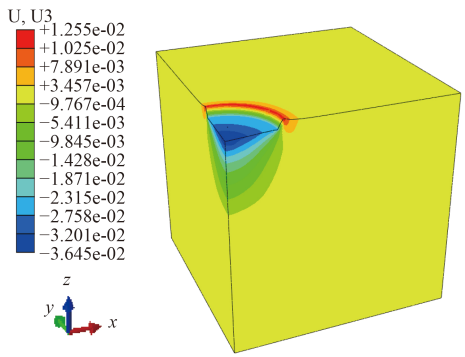
Fig.3 Simulation curves of surface plastic deformation with different laser shock times

由图 3 可知：冲击 2 次时，试样表面会形成一个与光斑大小相当的微凹坑，半径为 1078.59 μm，最大深度达 19.14 μm，同时因塑性流动在微凹坑的周围产生凸起，其凸起值达 7.72 μm；冲击 4 次时，表面微凹坑半径为 1087.42 μm，最大深度达 36.45 μm，凸起值达 12.55 μm。

当激光功率密度为 7.96 GW/cm^2 时，激光冲击加载使试样表面形成微凹坑阵列，采用德国 Nano Focususurf 光学轮廓仪对微凹坑进行测量。相同激光冲击次数下的微凹坑阵列具有良好的一致性和可重复性，有利于广泛应用；同时不同激光冲击次数下微凹坑直径相近，选择冲击 2 次和 4 次的测量结果为例，如图 5 所示，其中冲击 2 次的微凹坑表面形貌为图 5(a)、具体测量值为



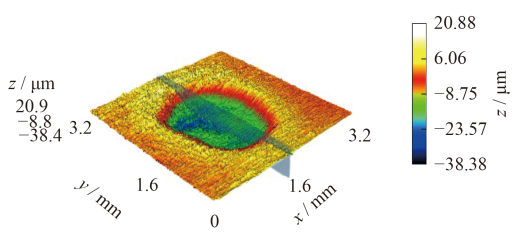
(a) Twice



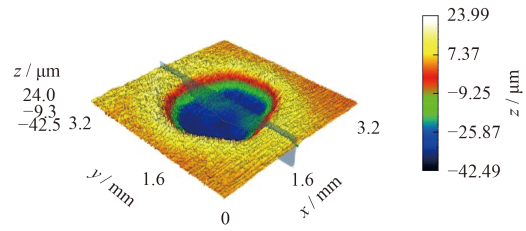
(b) 4 times

图 4 不同激光冲击次数表面塑性变形模拟云图

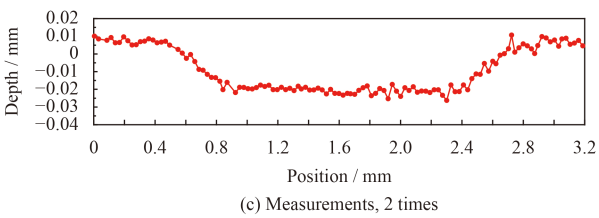
Fig.4 Simulated cloud images of plastic deformation with different laser shock times



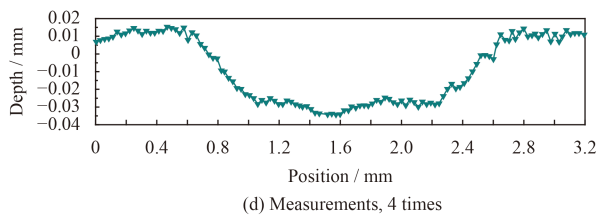
(a) Micro pit surface morphology with pulse laser impacted 2 times



(b) Micro pit surface morphology with pulse laser impacted 4 times



(c) Measurements, 2 times



(d) Measurements, 4 times

图 5 不同激光冲击次数表面塑性变形测量图

Fig.5 Measurement of surface plastic deformation with different laser shock times

图 5(c)；冲击 4 次的微凹坑表面形貌为图 5(b)、具体测量值为图 5(d)。为了进一步分析微凹坑，沿中心截取剖面数据，微凹坑均近似倒立圆台。圆台上底面直径约为 2200 μm，下底面直径约为 1200~1600 μm，而深度随着冲击次数增加呈增长趋势，其变化范围约在 10~40 μm。图 5(c)(d) 显示激光冲击 2、4 次后微凹坑分别深 25 和 40 μm，其深度受到试样材料的强度、硬度、弹性模量等机械和物理性能影响，材料抵抗局部变形的能力体现于微凹坑的深度值。

冲击 1~4 次的微凹坑具体测量值如图 6 所示，由图 6 可知：随着激光冲击次数由 1 次增至 4 次，微凹坑直径几乎保持不变，冲击次数对微凹坑直径变化的影响甚微；而冲击次数对深度的影响明显，这是塑性变形累积的结果。同时，微凹坑深度的增幅会随着冲击次数的增加而放缓，这是由于材料的应变硬化效应，材料的强度和硬度与冲击次数呈正相关，最终呈现饱和趋势，从而使深度增加减缓[14]。

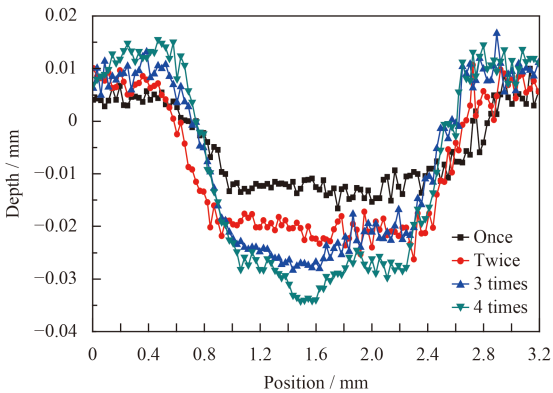


图 6　不同激光冲击次数表面塑性变形测量曲线图

Fig.6　Measurement curves of surface plastic deformation with different laser shock times

试验所测的微凹坑深度增幅随着冲击次数的增加逐渐放缓，其深度趋于定值，模拟结果与测量数据的误差随之增大，但其最大误差值仅为 18.4%，深度方向模拟结果和测试结果误差的范围合理，平均误差在 15% 以内。由于测量结果呈镜像对称，取图 6 一半测试值与图 3 的模拟值作对比分析，如图 7 所示。模拟与试验之间误差的主要原因：①模拟中材料模型使用各向同性的理想材料，实际上材料由于处理方式的不同和材料成分的不均匀，多呈现一定程度的各向异性；②建立的模型没有考虑吸收层铝箔对试样的保护作用，使光斑边界产生明显近似火山口的凸起。

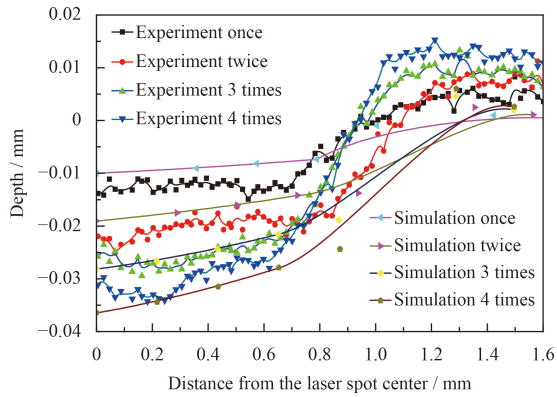


图 7　不同激光冲击次数表面塑性变形试验和模拟对比图

Fig.7　Comparison diagram of experimental and simulated surface plasticity with different laser shock times

3.2　不同激光冲击次数对残余应力和 FWHM 值的影响

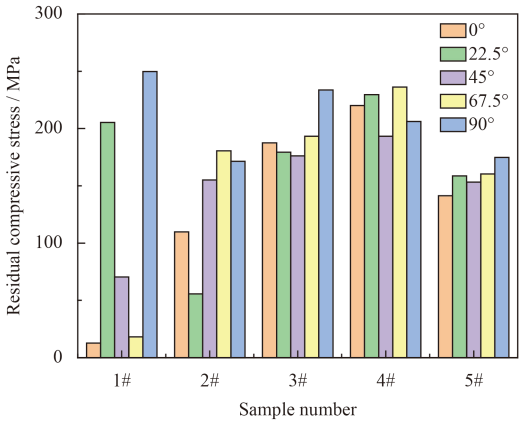
为研究激光冲击微造型区域内材料的物理性能，使用 X 射线应力分析仪测量 1~5 号试样测试点处的残余应力，同时获得半高宽 (FWHM) 值。1 号试样 (未冲击) 5 个不同测点 3 个方向的测量值差异明显；2 号试样 (冲击 1 次) 不同测点 3 个方向依然存在差异，但均匀性明显提高，其测量值见表 4。激光冲击 2 次及以上时各测点各个方向的测量值近似相等，为了对比激光冲击次数对材料表面残余应力和 FWHM 值的影响，可选取各试样光斑中点 (即 5 号点) 为例分析不同冲击次数下该点的残余应力和 FWHM 值的变化情况。

表 4　1#和 2#试样表面不同测点 3 个方向的残余应力值

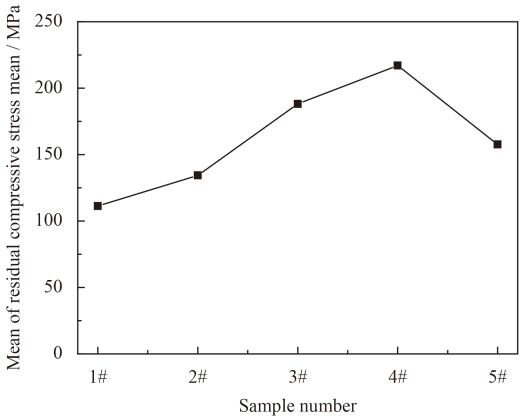
Table 4　Residual stress in three directions on the surface of 1# and 2# samples

Measuring points	Residual stress/MPa		
	0°	45°	90°
1#-1	54	−128.1	−267.7
1#-2	18.2	−155.1	−205.3
1#-3	−288.3	−171.9	17.6
1#-4	5.1	−172.4	−285.6
1#-5	−12.8	−70.5	−249.7
2#-1	−51.3	−125.8	−166.3
2#-2	−65.3	−125.3	−160.1
2#-3	−81	−109.1	−159
2#-4	−40.1	−151.3	−143.1
2#-5	−109.8	−155.5	−171.3

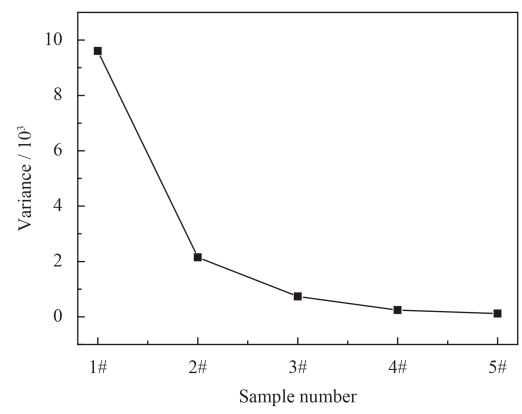
为研究表面残余应力分布的均匀性，测量了不同次数激光冲击加载后各试样 5 号点 5 个方向的表面残余应力，其残余应力分布如图 8 所示。1#试样同一测量位置不同方向的残余应力值相差显著，5 个方向的残余压应力平均值为 111.3 MPa，残余压应力值的方差为 9605，与其它 4 组相比方差最大。



(a) Residual compressive stress



(b) Mean



(c) Variance

图 8 不同激光冲击次数下 5 个方向的残余压应力值、均值和方差

Fig.8 Residual compressive stress, mean and variance in five directions with different laser shock times

当激光冲击 1、2 次后，平均残余压应力值增大，分别为 134.5 和 188.1 MPa，方差分别为 2145.9 和 735.6，激光冲击后残余压应力值的方差较 1#试样降低显著，分别下降了 77.7%、92.3%，均匀性明显提高。当激光冲击 3 次时，平均残余压应力值为 217 MPa，方差为 243.4，方差较第 2 次降低 66.9%，其方差较小且均匀性较好，平均残余压应力值最大。当激光冲击 4 次时，方差为 116.5，均匀性最好，但平均残余压应力值为 157.6 MPa，较 3 次冲击下降 59.4 MPa。随着激光冲击次数的增加，平均值先增大后减小，而方差呈现先显著减小后平稳减小的趋势，综合考虑平均压应力值和均匀性，可知在激光冲击 3 次时最优。

经过特殊处理的 E690 高强钢基样本身有残余压应力，但各方向残余压应力值相差较大，均匀性较差。经过激光冲击处理，激光加载区域材料各方向的残余压应力值方差减小，残余压应力均匀性变好，避免了应力集中现象，有利于提升材料的耐腐蚀、耐磨损性能。激光冲击达到 4 次时，表面残余压应力值不增反减，其原因可能为：试样表面受到激光冲击而产生晶粒细化，随着冲击次数的增加，材料内部组织发生变化，晶粒尺寸不断细化，当晶粒尺寸细化至某一范围时，其残余应力测量值减小[15-17]。

ABAQUS 在仿真过程中同时也可获得残余应力的变化情况，不同激光冲击次数下残余应力分布曲线如图 9 所示。模拟结果与试验数据的误差较大，主要是由于冲击波压力大，冲击区域材料会产生位错湮灭、重排形成亚晶粒，甚至晶粒细化形成纳米晶[18]，晶粒细化导致冲击区域材料的各种属性会发生很大变化 [17]。数值模拟所用模型设定的材料参数在仿真过程中不变，引发了模拟结果与试验结果的明显差异；同时，残余应力测量值是 X 射线应力分析仪准直器范围内测得的残余应力的平均值，准直器范围尺寸为 mm 量级，试验测量值为离散的点；数值模拟所用模型的单元尺寸比准直器范围尺寸小 1 个量级，数值模拟获得残余应力分布为连续曲线，两者最小尺寸的量级不一致，也是模拟结果与试验结果产生差异的原因。

FWHM 是衍射峰最大强度的 1/2 处所占的角度范围，研究表明，FWHM 值与位错密度存在正

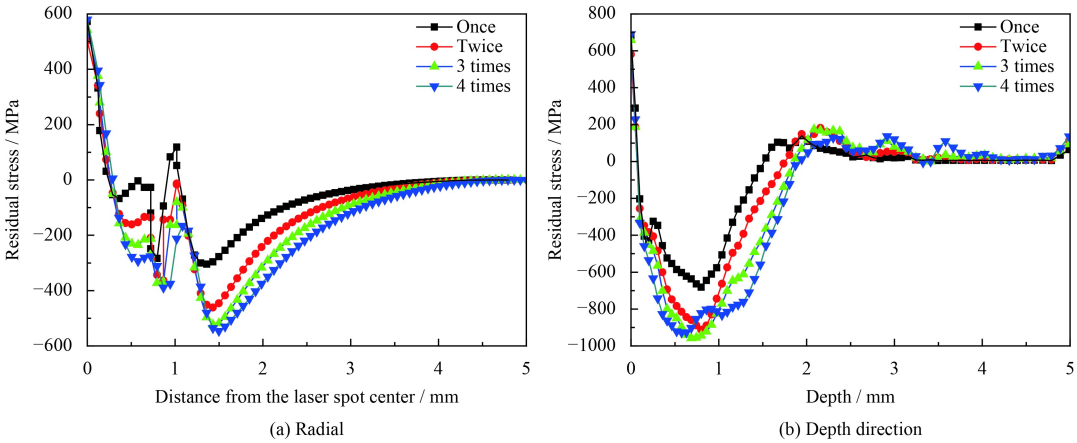


图 9　不同激光冲击次数下残余应力分布曲线

Fig.9　Residual stress distribution curves of radial and depth direction on surface with different laser shock times

相关关系，而与晶粒度存在负相关关系，即 FWHM 值越大，位错密度越大，晶粒度越小[19-20]。由图 10 可知，未冲击试样 3 个方向 (0°、45°和 90°) 的 FWHM 值相对于激光冲击过后 FWHM 值变化较大，随着激光冲击次数的增加，FWHM 均值逐渐增大，在激光冲击次数由 1 次增至 4 次时，FWHM 均值分别为 2.71°、2.78°、2.86°和 2.88°，均大于未冲击试样的 2.57°，但激光冲击 4 次相比于 3 次增幅较小。激光冲击后，FWHM 值得以显著提高，说明激光冲击可提高材料位错密度使晶粒细化，进而改善材料的综合力学性能，此情况与李应红团队研究结论一致，即晶粒细化和微观应变的协同作用导致 Bragg 衍射峰的宽化[21]。

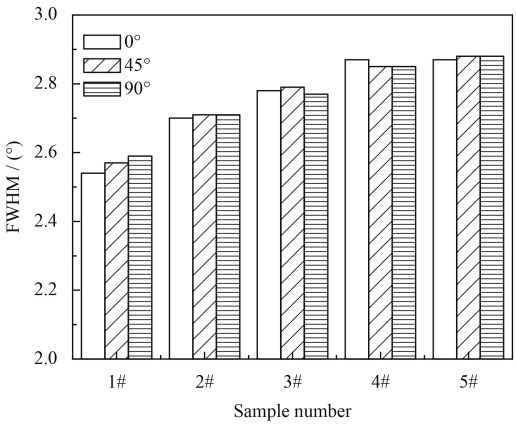


图 10　不同激光冲击次数下 3 个方向的 FWHM 值

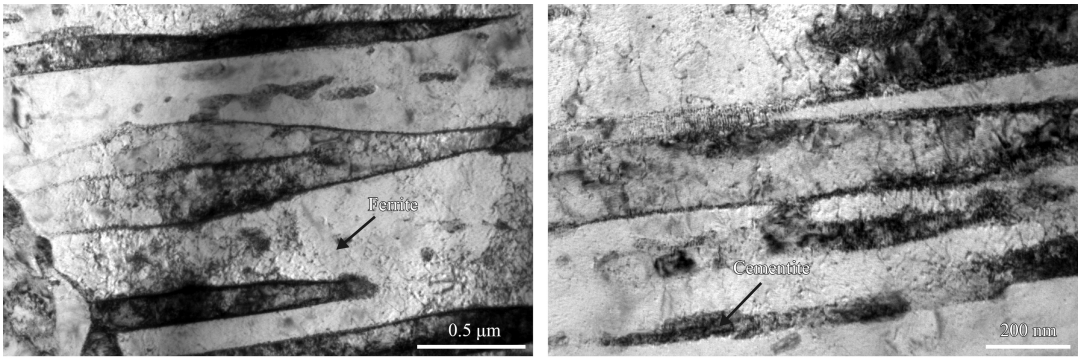
Fig.10　FWHM values in three directions with different laser shock times

3.3　微凹坑表面纳米化验证

由上述测试结果可知，随着激光冲击次数的增加，FWHM 值逐渐增大，晶粒持续细化。在激光冲击 2 次后，材料表面残余应力各个方向的测量值趋于相等，其原因可能为：在激光冲击过程时，E690 高强钢试样表层应变率较高，容易产生位错滑移，导致晶粒不断细化，甚至产生纳米量级的晶粒，其晶粒取向随机、分布均匀，使各方向残余应力相近。

结合前文分析，借助透射电镜观察未冲击试样 (1#) 和冲击 2 次试样 (3#) 微凹坑表面 TEM 像和电子衍射图，对材料表面微结构进行分析验证。E690 高强钢基体相为铁素体和渗碳体叠加的复相组织，基体相为片状珠光体。渗碳体的数量远小于铁素体，渗碳体层片与铁素体层片相比较薄，其片间距大约为 150~450 nm，在珠光体中能够明显发现平行排列分布的板条状铁素体和薄层渗碳体，图 11 所示为不同尺度下 E690 高强钢原始基体的形貌，其形貌保持为稳定的片状珠光体。

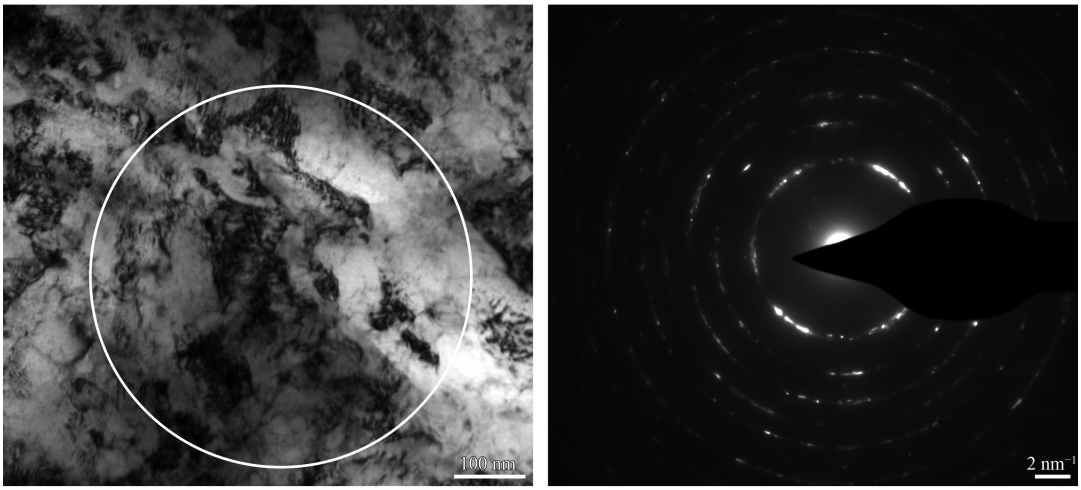
观察图 12(a)，E690 高强钢试样经功率密度为 7.96 GW/cm^2 的激光冲击 2 次后其组织形貌发生变化：在激光冲击 2 次后 E690 高强钢微凹坑表面原始的片状渗碳体完全消失，晶粒尺寸基本在 50~100 nm；结合图 12(b)，其衍射花样为连续的同心圆，表明晶粒取向随机，纳米晶分布均匀[18]，即在激光冲击 2 次后微凹坑表面形成了纳米晶。结合前文分析，随着激光冲击次数的增加，致使 E690 高强钢的微凹坑表面晶粒尺寸细化形成纳米晶，而纳米晶取向随机、分布均匀，导致材料表面 3 个方向残余应力的测量值趋于相等。



(a) 0.5 μm (b) 200 nm

图 11 不同尺度下 E690 高强钢原始基体表面 TEM 像

Fig.11 TEM images on the surface of the original matrix of E690 high-strength steel at different scales



(a) TEM image (b) Electron diffraction patterns

图 12 激光功率密度为 7.96 GW/cm^2 时的 E690 高强钢表面

Fig.12 Surface of E690 high-strength steel after laser shock with power density of 7.96 GW/cm^2

4 结 论

通过模拟和试验探究了 E690 高强钢激光冲击微造型时激光参数、残余应力和微观组织结构的相关性，得出以下主要结论：

(1) 功率密度为 7.96 GW/cm^2 的脉冲激光冲击作用下，冲击 1~4 次后直径不变，约 2200 μm，深度在 10~40 μm 呈增加趋势，深度方向模拟结果和测试结果误差的范围合理，平均误差在 15% 以内，得到激光工艺参数与微凹坑深度的对应关系。

(2) 激光冲击 2 次及以上时，冲击试样各方向残余压应力测量值趋于一致；FWHM 值逐渐增大，冲击 4 次后 FWHM 值与 3 次趋于相等；晶粒尺寸进一步细化使残余应力值由增大变为减小，其具体晶粒尺寸范围与残余应力减小机理仍需要借助 TEM 与 X 射线应力分析仪进行检测分析。

(3) 激光冲击 2 次后，产生纳米量级的晶粒，其晶粒取向随机，分布均匀，导致材料表面残余应力各个方向的测量值趋于相等，TEM 像和和电子衍射图表明微凹坑表面形成了纳米晶。

(4) 探明了激光工艺参数、残余应力与微观组织的多尺度关系，获得了激光对材料表面改形和改性规律，为研究激光冲击微凹坑阵列改善海工用钢摩擦副表面的摩擦学性能提供了技术支持。

参考文献

[1] 王定亚, 丁莉萍. 海洋钻井平台技术现状与发展趋势[J]. 石油机械, 2010, 38(4): 69-72.
WANG D Y, LI P. Current conditions and developing tendency of offshore drilling platform[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(4): 69-72 (in Chinese).

[2] HAO W, LIU Z, WU W, et al. Electrochemical characteriza-

tion and stress corrosion cracking of E690 high strength steel in wet-dry cyclic marine environments[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 710: 318-328.

[3] CAO Y, FENG A, HUA G. Influence of interaction parameters on laser shock wave induced dynamic strain on 7050 aluminum alloy surface[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 116(15): 153105.

[4] GRANADOS ALEJO V, RUBIO GONZÁLEZ C, VÁZQUEZ-JIMÉNEZ C A, et al. Influence of specimen thickness on the fatigue behavior of notched steel plates subjected to laser shock peening[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 531-544.

[5] REN X D, ZHOU W F, REN Y P, et al. Dislocation evolution and properties enhancement of GH2036 by laser shock processing: Dislocation dynamics simulation and experiment[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 654: 184-192.

[6] LI K, YAO Z, HU Y, et al. Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication[J]. Tribology International, 2014, 77(77): 97-105.

[7] GUO Y B, CASLARU R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti–6Al–4V surfaces[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2011, 211(4): 729-736.

[8] ZHENG L, ZHANG C, ZHANG C, et al. Performance of micro-dent array fabricated by laser shock peening on the surface of A304 stainless steel[J]. Vacuum, 2017, 138: 93-100.

[9] TONG Z, REN X, REN Y, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and hot corrosion of TC11 alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 335: 32-40.

[10] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.

[11] 曹宇鹏, 周东呈, 冯爱新, 等. 激光冲击波加载 690 高强钢薄板传播机制的模拟与实验[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102010.
CAO Y P, ZHOU D C, FENG A X, et al. Simulation and experiment of transmission mechanism on laser shock wave loading 690 high-strength steel sheet[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102010 (in Chinese).

[12] 郝文魁. 海洋工程用 E690 高强钢薄液环境应力腐蚀行为及机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2015: 159-161.
HAO W K. Stress corrosion cracking of E690 high strength Beijing: under thin electrolyte layer in offshore engineering[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015: 159-161(in Chinese).

[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] LI K, HU Y, YAO Z. Experimental study of micro dimple fabrication based on laser shock processing[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48(11): 216-225.

[15] CHEN M, LIU H, WANG L, et al. Evaluation of the residual stress and microstructure character in SAF 2507 duplex stainless steel after multiple shot peening process[J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 344: 132-140.

[16] 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.
CAO Y P, XU Y, FENG A X, et al. Experimental study of residual stress formation mechanism of 7050aluminum alloy sheet by laser shock processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702008 (in Chinese).

[17] X LI, Y WEI, L LU, et al. Dislocation nucleation governed softening and maximum strength in nano-twinned metals[J]. Nature, 2010, 464(7290): 877-880.

[18] 曹宇鹏, 陈浩天, 冯爱新, 等. 激光冲击 7050-T7451 铝合金表面的 X 射线衍射图谱与微结构的相关性[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0502003.
CAO Y P, CHEN H T, FENG A X, et al. Correlation between X-ray diffraction pattern and microstructure of laser shock processed 7050-T7451 aluminum alloy surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0502003 (in Chinese).

[19] 章海峰, 黄舒, 盛杰, 等. 激光喷丸 IN718 镍基合金残余应力高温松弛及晶粒演变特征[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0203008.
ZHANG H F, HUANG S, SHENG J, et al. Thermal relaxation of residual stress and grain evolution in laser peening IN718 alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0203008 (in Chinese).

[20] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.
HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

[21] 何卫锋, 李应红, 李启鹏, 等. LSP 提高 TC6 钛合金振动疲劳性能及强化机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(8): 1643-1648.
HE W, LI Y, LI Q, et al. Vibration fatigue performance and strengthening mechanism of TC6 titanium alloy by laser shock peening[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42(8): 1643-1648 (in Chinese).