

表面曲率对激光冲击曲面材料表面 残余应力场分布的影响

葛良辰, 曹宇鹏, 花国然, 王帅, 张悦, 曹晨

(南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘 要: **目的** 针对曲面材料在激光冲击作用下, 表面曲率对激光冲击波传播存在影响, 使其残余应力场分布情况不同于平面, 分析其形成机理。**方法** 将研究对象设置为凸模型, 借助有限元软件 ABAQUS, 模拟了 1500 MPa 冲击压力下, 激光冲击波分别加载 1/5、1/10、1/15 曲率的 7050 铝合金试样。设置相应的平面试样作为对照组, 并采用相同参数条件进行实验验证。**结果** 当曲率为 1/5 时, 冲击后的材料表面残余应力场分布不均匀, 在母线方向的光斑边缘处, 残余压应力仅为 -237.0 MPa, 塑性应变层深为 0.5878 μm ; 在圆周方向的光斑边缘处残余压应力为 -258.5 MPa, 较母线方向增加 9.07%, 塑性应变层深达到 1.235 μm , 较母线方向增加 110.11%。这一现象随着曲率的减小而逐渐消失, 当曲率小于 1/15 时, 表面残余应力场分布近似平面。**结论** 激光冲击凸模型时, 表面残余压应力场分布存在偏向现象, 即试样沿母线方向的残余压应力值小于圆周方向, 其对应的塑性应变深度也呈相同的规律。

关键词: 激光冲击; 表面强化; 残余应力; 曲率; 仿真模拟

中图分类号: TG156.99; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0284-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.033

The Effect of Surface Curvature on Surface Residual Stress Field Distribution of Laser Shock Materials

GE Liang-chen, CAO Yu-peng, HUA Guo-ran, WANG Shuai, ZHANG Yue, CAO Chen

(School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

ABSTRACT: The work aims to make the distribution of residual stress field different from that of plane and analyze its formation mechanism, aiming at the influence of surface curvature on laser shock wave propagation in the curved surface

收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2020-03-11

Received: 2019-07-09; Revised: 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51505236, 51579118); 江苏省研究生科研创新计划 (KYCX18_2417); 中国博士后科学基金面上项目 (2019M651931); 江苏省产学研合作项目 (BY2018323); 南通市基础科学研究项目 (JC2018029); 江苏省 3D 打印装备及应用技术重点实验室开放基金项目 (2018KFKT10)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51505236, 51579118), Jiangsu Postgraduate Research and Innovation Plan (KYCX18_2417), China Post-doctoral Science Foundation Project (2019M651931), Jiangsu Province Industry-University-Research Cooperation Project (BY2018323), Nantong Basic Science Research Project (JC2018029), Open Fund Project for Key Laboratory Construction of 3D Printing Equipment and Application Technology in Jiangsu Province (2018KFKT10)

作者简介: 葛良辰 (1994—), 女, 硕士生, 主要研究方向为材料表面改性、仿真模拟。

Biography: GE Liang-chen (1994—), Female, Master, Research focus: surface modification and simulation technology research.

通讯作者: 曹宇鹏 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光加工检测技术。邮箱: cyp19812004@ntu.edu.cn

Corresponding author: CAO Yu-peng (1981—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser processing and testing technology research. E-mail: cyp19812004@ntu.edu.cn

引文格式: 葛良辰, 曹宇鹏, 花国然, 等. 表面曲率对激光冲击材料表面残余应力场分布的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 284-291.

GE Liang-chen, CAO Yu-peng, HUA Guo-ran, et al. The Effect of surface curvature on surface residual stress field distribution of laser shock materials[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 284-291.

materials. Convex model was taken as the study object. With the help of finite element software ABAQUS, 7050 aluminum alloy specimens with 1/5, 1/10 and 1/15 curvatures were loaded by laser shock wave under 1500 MPa shock pressure. The corresponding plane specimens were set as control group, and the same parameters were used for experimental verification. When the curvature was 1/5, the distribution of residual stress field on the impact material surface was not uniform. At the edge of the spot in the bus direction, the residual compressive stress was only -237.0 MPa, and the plastic strain layer depth was 0.5878 μm . The residual compressive stress at the edge of the circular spot was -258.5 MPa, which was 9.07% higher than that of bus direction, and the depth of plastic strain layer reached 1.235 μm , which was 110.11% higher than that of bus direction. This phenomenon gradually disappeared with the decrease of curvature. When the curvature was less than 1/15, the distribution of surface residual stress field was approximately that of plane specimen. In the convex model subject to laser shock, the distribution of residual compressive stress field on the surface is biased, that is, the residual compressive stress value in the bus direction is less than that in the circumferential direction, and the corresponding plastic strain depth is consist with this result.

KEY WORDS: laser shock; surface strengthening; residual stress; curvature; simulation

激光冲击强化技术作用于金属材料能够有效提高其疲劳强度，强化效果好，可控性强^[1-8]。自激光冲击强化技术快速发展以来^[9-14]，国内外专家学者将研究焦点聚集在冲击强化的作用机理等方面，但其研究对象多为平面材料，针对实际工况中出现的大量曲面、异形表面的机理研究鲜见报道。2013 年，Vasu 等^[15]研究了二维弯曲表面形貌对激光冲击后残余应力的影响，模拟结果表明，二维凸模型中由于水平压缩分量的存在，能够在一定程度上抵抗变形，因此其残余应力总是小于同条件下的平面基材，并总结出表面残余压应力与曲率呈反比的线性关系。2018 年，曹宇鹏等^[16]研究了光斑直径与冲击压力的协同作用，结果表明，冲击波的传播方式受冲击压力、光斑直径等影响。2019 年，李博等^[17]对圆锯片进行激光冲击预应力处理，提高了圆锯片的运行稳定性。在实际生产中，无反射现象几乎不存在，且表面残余应力除受纵波影响外，表面波的传播、衰减也不可忽视。采用预应力处理的方式进行激光冲击强化仿真，更为贴近材料的实际情况，增加实验与仿真的契合度。

本文采取仿真实验结合的手段对激光冲击后三维凸模型的残余应力场、塑性应变深度等进行研究，分析了 7050 铝合金激光冲击波加载后的残余应力场分布情况、冲击波传播与衰减情况以及冲击过程中残

余应力的形成机理，对实际生产具有重要意义。

1 仿真建模

为与 AnoopVasu 等的研究进行对比，选用 J-C 模型应用于该仿真工况。J-C 模型常用于反映材料的动态性能，广泛应用于高速冲击、冲击爆炸等大应变率仿真，其经验公式为^[18]：

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + c \ln \varepsilon^*)[1 - (T^*)^m]$$
 (1)

式中， σ_y 为流动应力； A 为初始动态屈服强度； B 为应变硬化系数； n 为应变硬化指数； c 为应变硬化因子； m 为温升软化指数； ε 表示塑性应变； ε^* 是无量纲塑性应变率，其值为 $\varepsilon/\varepsilon_0$ ； T^* 表示无量纲温度， $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$ （其中 T_0 为室温， T_m 为材料熔点）。

由于激光冲击强化过程中，材料表面涂覆有吸收层和约束层，能有效屏蔽热影响，因此可认为材料在受激光作用过程中无明显的温升现象，故将 J-C 模型经验公式简化为^[19]：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + c \ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right]$$
 (2)

本仿真中 7050-T7451 铝合金 J-C 模型所涉及参数如表 1 所示。

表 1 7050 铝合金物理和力学性能
Tab.1 Physical and mechanical properties of 7050 aluminum alloys

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	Poisson ratio	A/MPa	B/MPa	n	c
7050-T7451	2780	72	0.33	435.7	534.624	0.504	0.019

图 1 所示为凸模型仿真示意图，激光冲击作用在圆周面上，由于光斑与模型均轴对称，在保证计算精度的前提下，选取 1/4 模型进行研究，并将相应边界设置为轴对称模式。由于表面曲率的变化，为保证纵波传播距离一致，将光斑中心点的厚度设置为 5 mm，表面曲率分别为 1/5、1/10 和 1/15，底面设置为全约

束。设置平面对照组进行对比，其厚度为 5 mm，其他边界条件与凸模型保持一致。采用 0.1 mm 的全局种子对整个模型进行划分，获得 270 000 个网格。在设计分析步时，考虑到激光与材料相互作用机理的需求，将分析步分为冲击分析步和回弹分析步。其中，冲击分析步设置为 4000 ns，每 5 ns 将仿真结

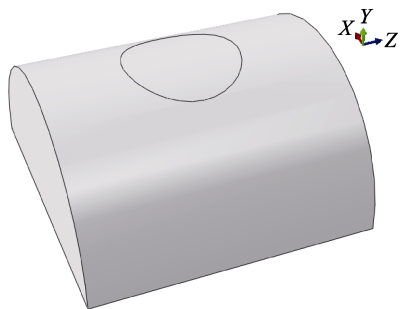


图 1 凸模型仿真示意图

Fig.1 Simulation diagram of convex model

果反馈一次, 1~60 ns 为加载过程, 加载时间一般为激光器脉宽的 2~3 倍, 加载曲线根据激光冲击波特性设置。4000 ns 后, 应力波仍没有衰减结束, 但此时的应力波仅能使材料产生弹性形变。为准确地观察到应力波衰减结束后的残余应力场, 采用隐式分析法设置回弹分析步。

激光冲击波加载压力根据 Hugoniot 弹性极限进行设置, 即当加载压力 $P > \sigma_{\text{HEL}}$ 时, 材料产生塑性形变, 并伴随有弹性回复; 当 $P = 2 \sim 2.5 \sigma_{\text{HEL}}$ 时, 激光冲击强化效果最佳^[20]。Hugoniot 弹性极限计算公式如下:

$$\sigma_{\text{HEL}} = \left(1 + \frac{\lambda}{2\mu} \right) (\sigma_Y^{\text{dyn}} - \sigma_0) = \frac{1-\nu}{1-2\nu} (\sigma_Y^{\text{dyn}} - \sigma_0) \approx 1.7 \sim 1.0 (\sigma_Y^{\text{dyn}} - \sigma_0) \quad (3)$$

式中, σ_{HEL} 为许贡纽弹性极限; λ 、 μ 为拉曼系数; ν 为泊松比; σ_0 为材料表面初始残余应力水平; σ_Y^{dyn} 为材料在高应变率下的动态屈服强度。

材料在高应变率下的动态屈服强度对 7050 铝合金有近似关系^[21], 其计算公式为:

$$\sigma_Y^{\text{dyn}} = (6.32 - 1.89 \log \sigma_Y^{\text{sta}}) \sigma_Y^{\text{sta}} \quad (4)$$

式中, σ_Y^{sta} 为 7050 铝合金静载拉伸屈服强度, 根据(4)式进行计算, 得到 7050 铝合金在高应变率下的动态屈服强度为 612 MPa。将该结果代入(3)式, 得 $\sigma_{\text{HEL}} = 615.4 \sim 687.8$ MPa, 取其中间值 651.6 MPa。根据

曹宇鹏等^[16]研究光斑直径对冲击波传播方式的影响可知, 大光斑在冲击时, 其冲击波传播方式更接近平面波, 衰减速度慢, 获得的表面强化效果好, 因此本仿真的光斑直径选择 4 mm。

对于 7050 铝合金, 最佳峰值压力范围为 1303.2~1629 MPa, 在仿真过程中, 选用 1500 MPa 作为冲击压力, 光斑直径为 4 mm, 分别对不同曲率的凸模型及平面对照样进行仿真分析。

塑性形变量也可用 Hugoniot 弹性极限理论进行预测, 其公式为^[22]:

$$\varepsilon_p = \frac{-2\sigma_{\text{HEL}}}{3\lambda + 2\mu} \left(\frac{P}{\sigma_{\text{HEL}}} - 1 \right) \quad (5)$$

式中, ε_p 为塑性变形量; λ 、 μ 为拉曼系数; P 为峰值压力。拉曼系数的计算公式为:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6)$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

因此, 计算得到 1500 MPa 冲击压力下, 理论塑性变形量为 0.9388 μm 。

2 实验方案设计

实验用铝合金为爱励铝业(镇江)有限公司生产的 7050-T7451 铝合金, 其化学成分如表 2 所示。考虑与模拟工况保持一致, 即保证光斑中心位置厚度为 5 mm, 长度为 30 mm, 曲面样为相应曲率的半圆柱, 平面对照样尺寸为 30 mm×30 mm×5 mm。1#~4#试样分别为 1/5 曲率样、1/10 曲率样、1/15 曲率样和平面对照样。平面试样采用型号为 MP-2T 的金相试样磨抛机进行抛光, 其余曲面试样均采用手工打磨的方式, 选用 80~2000 目砂纸依次打磨, 再选用粒度为 0.5 μm 的金刚石抛磨剂抛光, 经无水乙醇清洗后, 冷风吹干, 备用。

表 2 7050-T7451 铝合金成分表

Tab.2 Composition table of 7050-T7451 aluminum alloys

										wt%
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al	
0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6	0.04	5.7~6.7	0.06	0.08~0.15	Bal.	

实验使用的激光器为西安天瑞达公司的 YAG 固体脉冲激光器 YS80-M165, 该激光器波长为 1064 nm, 脉宽为 20 ns。由于仿真冲击压力为 1500 MPa, 采用简化公式^[23], 将其转换为激光功率密度:

$$P = 1.02 \sqrt{I_0} \quad (8)$$

式中, P 为冲击波峰值压力, GPa; I_0 为功率密度, GW/cm^2 。经计算可知, 实验采用能量冲击为 $2.04 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 、直径为 4 mm 的光斑, 冲击次数为一次。根据过渡线理论, 基于提高材料疲劳强度的需求,

将冲击位置设置在凸模型曲面中心。

用 X 射线应力衍射仪 (Xstress 3000 G2R STRESSTECH OY, 芬兰) 分析残余应力。其原理是用电子束轰击金属靶材(包含与靶材中物质对应的特定波长 X 射线), 当 X 射线穿过晶体时, 出现衍射现象, 通过测定点阵平面在不同方向上间距的变化, 能够对物质的应力进行定性定量分析。实验中, 每个光斑测量 8 个点, 如图 2 所示, 每个测点分别测量 0°、45°和 90°三个方向的应力情况。选用直径为 1 mm 的

准直管,靶材为 Cr 靶,布拉格角为 156.4° ,晶面类型(311),管电压 30 kV,管电流 6.7 mA,曝光时间 20 s,采用侧倾法 (Modified x) 进行测量。

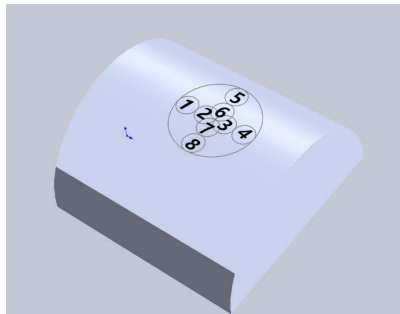


图 2 测量方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement scheme

3 结果与分析

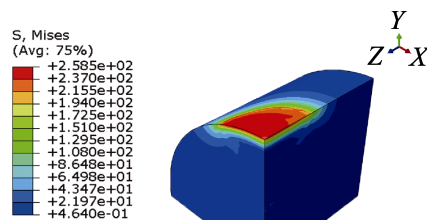
3.1 仿真结果分析

图 3 所示为 4 mm 光斑受 1500 MPa 激光冲击波作用后的应力波云图。图 3d 为平面对照组模拟结果,其表面最大残余应力值为 -295.1 MPa,表面残余应力分布均匀,从光斑中心向光斑边缘逐渐减小,最大残余应力值出现在光斑中心位置。图 3a 为 1/5 曲率试

样进行模拟的结果,其表面最大残余应力值仅为 -258.5 MPa,较平面对照样下降 12.4%,表面残余应力分布不均,具有偏向性。观察图 3a 还可知,残余应力在穿过光斑中心的圆周方向较母线方向大。图 3b 为 1/10 曲率试样的模拟结果,其表面最大残余应力值为 -232.3 MPa,较平面对照样下降 21.39%,表面残余应力仍存在分布不均匀的现象,规律与 1/5 曲率模型一致。图 3c 为 1/15 曲率试样模拟结果,其表面的最大残余应力值为 -236.9 MPa,较平面对照组下降 19.83%,该模型的表面残余应力场分布情况近似于平面对照样。

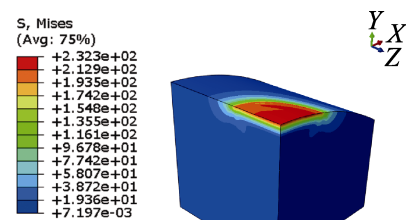
Vasu 等^[15]的研究结果表明了二维建模、无底面反射时,材料内部水平压缩分量与残余应力值之间的关系,但在三维模型、实际工况中,除受材料内部水平压缩分量的影响外,纵波的反射和表面波的传播也对残余应力场的分布产生了重大影响。由于水平压缩分量能够在一定程度上抵抗变形,因此存在水平压缩分量的材料受激光冲击波作用时,残余应力值总小于平面试样的情况。模拟结果与这一理论吻合。

为进一步探究残余应力的偏向问题,分析应力波在第一波程中的传播情况,选取偏向现象最为明显的 1/5 曲率模型进行分析,图 4 所示为 1500 MPa 冲击波作用于 4 mm 光斑时 1/5 曲率试样的动态响应。观察图 4b 可知,在 80 ns 时,材料表面即出现了偏向现象,



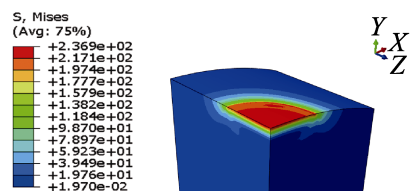
ODB: 1500-R2-r2.odb
Thu Oct 11 15:30:01 GMT+08:00 2018
Step: Step-1
Increment 1: Step Time=1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

a 1/5曲率



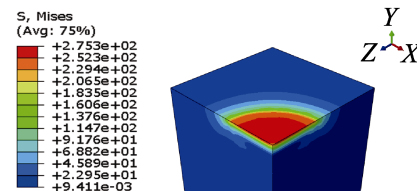
ODB: 1500-R10-r2.odb
Thu Oct 11 20:10:46 GMT+08:00 2018
Step: Step-1
Increment 1: Step Time=1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

b 1/10曲率



ODB: 1500-R10-r2.odb
Tri Oct 12 09:11:21 GMT+08:00 2018
Step: Step-1
Increment 1: Step Time=1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

c 1/15曲率



ODB: 1500-r2-h.odb
Fri Mar 08 09:34:35 GMT+08:00 2018
Step: Step-1
Increment 1: Step Time=1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

d 平面

图 3 1500 MPa 冲击波作用于 4 mm 光斑的应力波云图

Fig.3 Stress wave nephogram of 4 mm spot under the action of 1500 MPa shock wave:

a) 1/5 curvature; b) 1/10 curvature; c) 1/15 curvature; d) plane

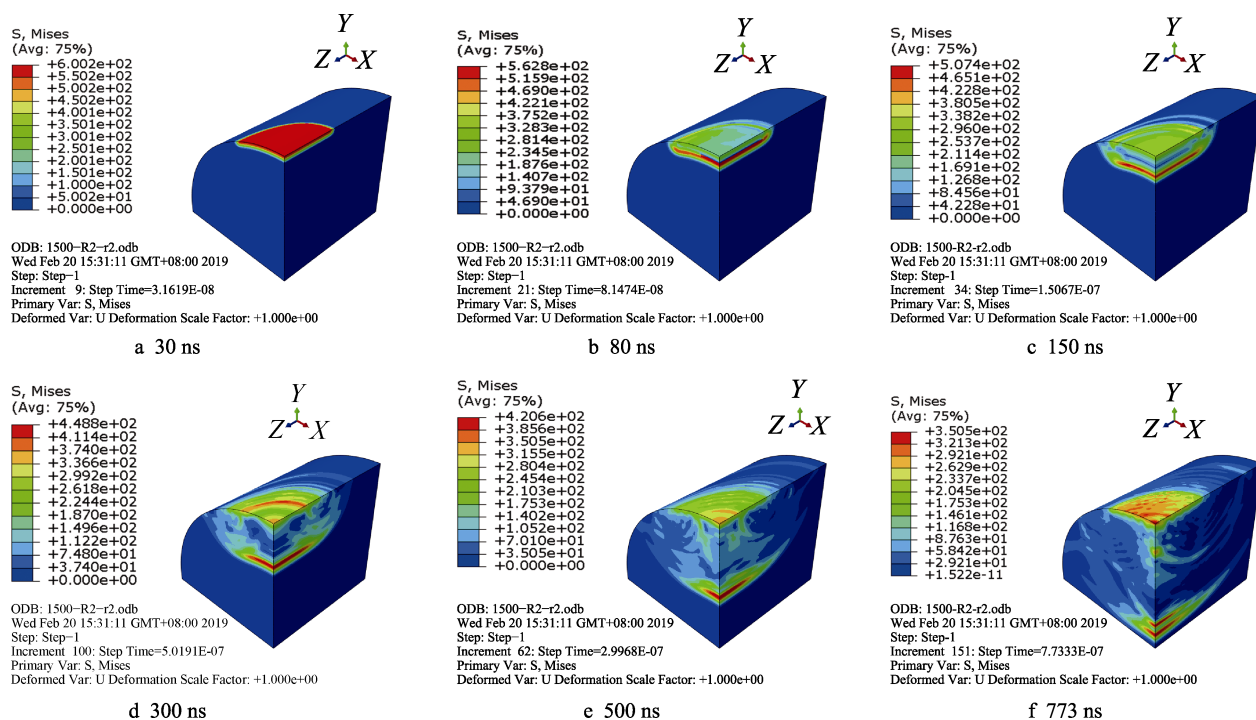


图4 1500 MPa冲击4 mm光斑时1/5曲率试样动态响应

Fig.4 Dynamic response of specimens with 1/5 curvature when 4 mm spot is under the action of 1500 MPa shock wave

此时激光冲击波加载已经完成,但纵波尚未传至底部,因此该偏向现象的出现受表面波传播的影响。773 ns时(图4f),纵波传至材料底部。观察图4b—f可知,表面波在传播过程中受表面曲率影响,沿穿过光斑中心的母线方向向光斑中心汇聚,沿穿过光斑中心的圆周方向汇聚程度较低。

为更加清晰地观察模型的偏向现象,将1/4模型进行对称处理,得到4 mm光斑在1500 MPa冲击下1/5曲率试样全模型的应力波云图(图5)。观察图5可知,凸模型经激光冲击作用后,残余应力场分布不均匀,残余应力沿穿过光斑中心的母线方向较小,沿穿过光斑中心的圆周方向明显增大。

进一步对偏向现象进行分析,如图6所示为

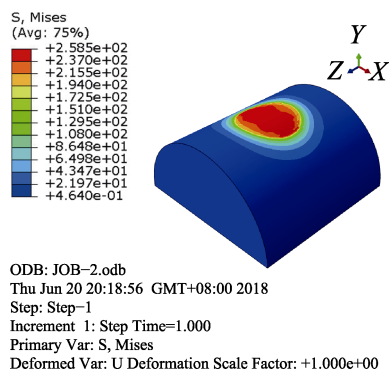


图5 4 mm光斑在1500 MPa冲击压力下1/5曲率试样全模型应力波云图

Fig.5 Stress wave nephogram of the whole model for the specimens with 1/5 curvature when 4 mm spot is under the 1500 MPa shock wave

1500 MPa冲击压力下凸模型垂直方向的塑性应变情况。由Hugoniot弹性极限理论^[18]可知, $2\sigma_{\text{HEL}} < 1500 \text{ MPa} < 2.5\sigma_{\text{HEL}}$, 此时的塑性应变层深能够达到并保持最大值,塑性应变层深与残余应力场分布呈正相关^[20]。图6d所示为平面对照组在垂直方向上的塑性应变情况,光斑边缘处塑性应变深度最大,为 $0.9044 \mu\text{m}$,光斑内其他位置塑性应变深度均为 $0.7822 \mu\text{m}$ 。图6a所示为曲率1/5的凸模型经激光冲击后的塑性应变情况,其塑性应变深度与残余应力的分布情况吻合,塑性应变深度在穿过光斑中心圆周方向的光斑边缘处最大,为 $1.235 \mu\text{m}$,较平面对照样增加了36.55%;光斑内部塑性应变深度在 $0.5878 \sim 0.7495 \mu\text{m}$ 范围内,较平面对照样出现小幅下降。图6b所示为曲率1/10的凸模型经激光冲击后的塑性应变情况,塑性应变深度最大值出现在穿过光斑中心圆周方向的光斑边缘处,为 $0.9558 \mu\text{m}$,较平面对照样增加5.68%;光斑内部塑性应变深度在 $0.4651 \sim 0.5877 \mu\text{m}$ 范围内,较平面对照样小,降幅为24.87%~40.54%。图6c所示为曲率1/15的凸模型经激光冲击后的塑性应变情况,其塑性应变深度趋于均匀,最大值出现在光斑边缘位置,为 $0.9731 \mu\text{m}$,较平面对照样增加7.60%;光斑内部塑性应变深度为 $0.5966 \mu\text{m}$,较平面对照样下降27.64%。

表面曲率对塑性应变深度的影响与对残余应力场的影响一致,在光斑边缘位置,表面残余应力场及应变深度均高于平面;靠近光斑中心位置的塑性应变深度均小于平面。但在观察表面残余应力的变化规律时,与Anoop Vasu等所得出的线性规律不符,这是由于三维模型在进行仿真时,不仅考虑了材料内部的水

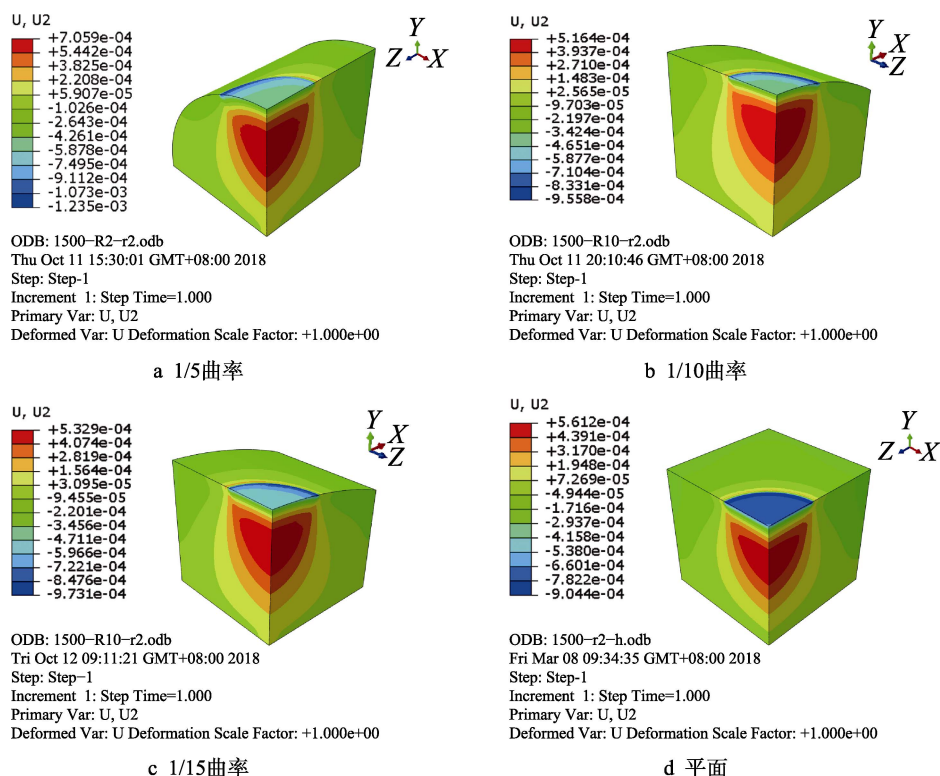


图 6 1500 MPa 冲击压力下 4 mm 光斑垂直方向塑性应变深度

Fig.6 Depth of plastic strain in vertical direction of 4 mm spot under 1500 MPa shock wave:

a) 1/5 curvature; b) 1/10 curvature; c) 1/15 curvature; d) plane

平压缩分量, 还将冲击波的反射、衰减、表面波的汇聚纳入考量。从仿真数据可知, 在 1/5~1/10 曲率范围内, 材料表面残余应力、塑性应变深度均随曲率的减小而减小; 但当曲率在 1/10~1/15 范围内时, 表面残余应力及塑性应变深度出现小幅度回升。这是因为受曲率减小的影响, 材料内部水平压缩分量减小, 表面波汇聚程度上升。

图 7 所示为不同曲率凸模型沿穿过光斑中心圆周方向的残余应力。观察图 7 可知, 当 1500 MPa 冲击压力加载 4 mm 光斑时, 平面对照样与 1/5 曲率凸

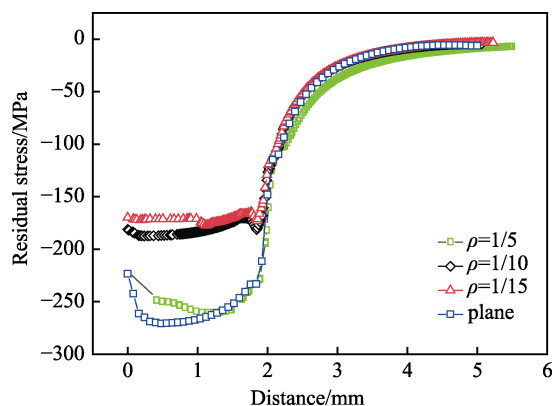


图 7 不同曲率下沿穿过光斑中心圆周方向的残余应力分布

Fig.7 Distribution of residual stress along the direction of circumference which goes through the center of spot with different curvature

模型表面出现小幅残余应力洞, 1/10 与 1/15 曲率凸模型无明显残余应力洞, 但表面残余压应力值较小。

当曲率小于 1/5 时, 表面波汇聚程度低, 水平压缩分量; 当曲率在 1/5~1/10 时, 表面波汇聚程度逐渐上升, 与水平压缩分量协同作用; 当曲率在 1/10~1/15 时, 表面波汇聚程度进一步上升, 水平压缩分量逐渐减小, 残余压应力主要受汇聚程度影响。

3.2 实验结果分析

实验获得了 4 组残余应力数据, 每个测点均测量 0°、45°和 90°三个方向上的应力情况, 每个方向进行七次测量。在测量软件中, 选择最小主应力对上述测量结果进行计算, 由此获得每个测点的最小主应力值。本实验分析均使用最小主应力值。

图 8 所示为 1#~4#试样不同测点的最小主应力值, 与仿真结果相比, 其值仅有仿真结果的 60%~70%。根据 Peyre 等^[24]的研究, 在对金属材料进行表面强化处理, 引入残余压应力的过程中, 其能够引入的最大残余压应力值为其屈服极限的 60%~70%。对于 7050 铝合金材料, 其杨氏模量较小, 抗变形能力差, 刚性小, 因此对塑性变形的限制能力较小, 形成的实际残余压应力数值则较理论值进一步减小^[25]。根据该理论, 仿真结果与实验结果具有较好的一致性, 予以采信。

4#试样为平面对照样, 其分布规律遵循光斑中心位置残余压应力集中, 光斑边缘位置残余压应力较

小, 1~4号测点与5~8号测点一一对应, 其差值不超过5%。1#试样为1/5曲率凸模型, 其2、3、6、7号测点测值较接近, 最大值为-181.4 MPa, 最小值为-178.6 MPa, 表明光斑中心位置圆周方向与母线方向残余压应力值无明显差别; 1、4号测点, 位于穿过光斑中心母线方向光斑边缘位置, 其测值分别为-164.3、-156.3 MPa, 较位于穿过光斑中心圆周方向边缘位置的测点5、8, 减小9.86%。2#试样为1/10曲率凸模型, 其规律与1#试样一致, 光斑中心位置的四个测点测值相近, 1、4号测点较5、8号测点减小8.63%。3#试样中8个测点的分布规律也与1#、2#试样保持一致。该偏向现象与仿真结果一致。

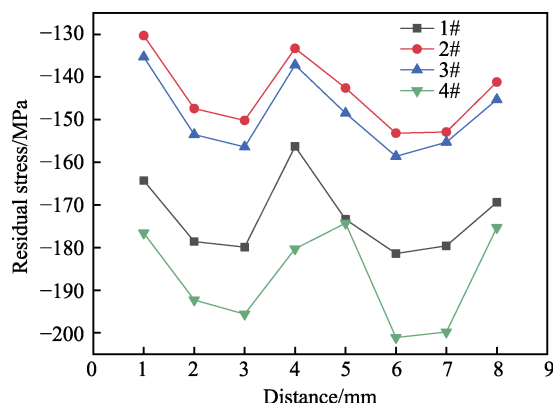


图8 1#~4#试样表面不同测点的最小主应力
Fig.8 Minimum principal stress of different measuring points on the surface of 1#~4# samples

4#试样光斑中心位置的四个测点2、3、6、7数值分别为-192.3、-195.6、-201.1、-199.8 MPa, 取其平均值为-197.2 MPa。采用同样的方法估算1#~3#试样光斑中心位置的残余压应力值, 分别为-179.875、-150.925、-155.95 MPa, 均较4#试样小。由于材料内部存在水平压缩分量, 且水平压缩分量随半径的增加而减小, 即随曲率的减小而减小。在水平压缩分量的作用下, 凸模型表面残余压应力值均小于平面对照样。但随着曲率的减小, 表面趋于平缓, 表面波汇聚程度上升, 表面残余压应力值相应发生变化。由光斑边缘位置向光斑中心汇聚的表面波在中心附近相遇, 且由于作用方向的不同, 一部分表面波发生卸载现象, 使表面残余压应力值减小。当曲率为1/5时, 表面波的汇聚程度较低, 材料内部的水平压缩分量占主导地位, 使表面残余压应力值小于平面对照样。当曲率为1/10时, 表面波的汇聚程度上升, 材料内部仍存在较大的水平压缩分量, 这两者的协同作用使表面残余压应力进一步减小。当曲率为1/15时, 表面波的汇聚作用占主导地位, 材料内部的水平压缩分量较小, 其表面残余压应力值出现小幅上升。这也解释了偏向现象: 当表面波沿母线方向传播时, 表面波汇聚程度较高; 当表面波沿圆周方向传播时, 则难以汇聚。因此, 圆周方向的表面波停留在光斑边缘位置,

造成光斑边缘位置的残余压应力增大, 塑性应变深度增加。

4 结论

1) 当激光冲击波加载凸模型表面时, 沿穿过光斑中心母线方向传播的表面波较易汇聚; 沿穿过光斑中心圆周方向的表面波受曲率影响, 难以汇聚。因此, 圆周方向的光斑边缘位置残余压应力增大, 塑性应变深度增加, 母线方向的残余压应力及塑性应变深度均较圆周方向小。

2) 凸模型表面残余应力场受材料内部的水平压缩分量和表面波汇聚程度的协同作用, 当曲率大于1/5时, 表面波汇聚程度较低, 材料内部的水平压缩分量起主导作用; 当曲率在1/5~1/10之间时, 表面波汇聚程度上升, 材料内部的水平压缩分量减少; 当曲率在1/10~1/15时, 材料内部的水平压缩分量进一步减小, 表面波的汇聚程度接近平面情况。

3) 激光冲击加载凸模型时, 材料内部各向异性的作用, 影响了表面残余应力场的分布, 也影响了实验与仿真的吻合度。因此, 将仿真模型进行预应力处理, 对进一步理清表面曲率对残余应力场分布的影响具有重要意义。

参考文献:

- [1] YANG Yang, LIAN Xiao-long, ZHOU Kai, et al. Effects of laser shock peening on microstructures and properties of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 781: 330-336.
- [2] 邓仲华, 刘其斌, 徐鹏, 等. 方形光斑激光冲击强化金属表面的耐腐蚀性能及机理[J]. 材料工程, 2018, 423(8): 144-151.
DENG Zhong-hua, LIU Qi-bin, XU Peng, et al. Corrosion resistance and mechanism of metallic surface processed by square-spot laser shock peening[J]. Journal of materials engineering, 2018, 423(8): 144-151.
- [3] PEREIRA S A A. Influence of anisotropy generated by rolling on the stress measurement; by ultrasound in 7050 T7451 aluminum[J]. Experimental mechanics, 2013, 53(3): 415-425.
- [4] HU Y X, YANG R Y, WANG D Y, et al. Geometry distortion and residual stress of alternate double-sided laser peening of thin section component[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 25: 197-204.
- [5] WANG H, HUANG Y, ZHANG W, et al. Investigation of multiple laser shock peening on the mechanical property and corrosion resistance of shipbuilding 5083 Al alloy under a simulated seawater environment: publisher's note[J]. Applied optics, 2018, 57(25): 7352.

- [6] 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.
- [7] CORREA C, PERAL D, PORRO J A, et al. Random-type scanning patterns in laser shock peening without absorbing coating in 2024-T351 Al alloy: A solution to reduce residual stress anisotropy[J]. *Optics & laser technology*, 2015, 73: 179-187.
- [8] REN Zhen-cheng, WANG Guo-xiang, YE Chang, et al. A fokker-planck code for laser plasma interaction in femto-second-laser shock peening[J]. *Journal of physics D: Applied physics*, 2016, 49: 1-7.
- [9] 卢国鑫, 金涛, 周亦胄, 等. 激光冲击强化在高温合金材料应用上的研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(9): 51-60.
- LU Guo-xin, JIN Tao, ZHOU Yi-zhou, et al. Research progress of applications of laser shock processing on superalloys[J]. *The Chinese journal of nonferrous metals*, 2018, 28(9): 51-60.
- [10] EISENSMITH D L A, PALAZOTTO A N, LANGER K, et al. Effects of laser shock peening over minimally detectable partial through thickness surface cracks[J]. *Materials performance and characterization*, 2018, 7(4): 759-778.
- [11] SAMUEL A G, REN X D, ASUAKO L E, et al. The effects of laser shock peening scanning patterns on residual stress distribution and fatigue life of AA2024 aluminium alloy[J]. *Optics & laser technology*, 2018, 108: 177-185.
- [12] MAO B, LIAO Y L, LI B. Gradient twinning microstructure generated by laser shock peening in an AZ31B magnesium alloy[J]. *Applied surface science*, 2018, 457: 342-351.
- [13] YIN Mei-gui, WANG Wen-jian, HE Wei-feng, et al. Impact-sliding tribology behavior of TC17 alloy treated by laser shock peening[J]. *Materials*, 2018, 11(7): 1229-1237.
- [14] LU G X, LIU J D, QIAO H C, et al. Surface nano-hardness and microstructure of a single crystal nickel base super alloy after laser shock peening[J]. *Optics & laser technology*, 2017, 91: 116-119.
- [15] VASU A, GRANDHI R V. Effects of curved geometry on residual stress in laser peening[J]. *Surface & coatings technology*, 2013, 218(1): 71-79.
- [16] 曹宇鹏, 葛良辰, 冯爱新, 等. 冲击波传播方式对激光冲击 7050 铝合金残余应力分布的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 195-220.
- CAO Yu-peng, GE Liang-chen, FENG Ai-xin, et al. Effect of shock wave propagation mode on residual stress distribution of laser shock 7050 aluminum alloy[J]. *Surface technology*, 2019, 48(6): 195-220.
- [17] 李博, 张占宽. 圆锯片激光冲击适张预应力场的生成与调控[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(17): 207-214.
- LI Bo, ZHANG Zhan-kuan. Generation and regulation of prestress field of circular saw blade after laser shock process[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2019, 55(17): 207-214.
- [18] 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.
- [19] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- LI Ying-hong. Theory and technology of laser shock processing[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [20] JOHNSON J N, ROHDE R W. Dynamic deformation twinning in shock-loaded iron[J]. *Journal of applied physics*, 1971, 42(11): 4171-4182.
- [21] FABBRO R, PEYRE P, BERTHE L, et al. Physics and applications of laser-shock processing[J]. *Journal of laser applications*, 1998, 10(6): 155-164.
- [22] BALLARD P, FOURNIER J, FABBRO R. Residual stresses induced by laser-shock[J]. *Journal de physique IV*, 1991, 1(C3): 132.
- [23] LIU Q, YANG C H, DING K, et al. The effect of laser power density on the fatigue life of laser-shock-peened 7050 aluminium alloy[J]. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2010, 30(11): 1110-1124.
- [24] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminum alloys. Applications to high cycle fatigue behavior[J]. *Materials science & engineering A*, 1996, 210(1-2): 102-113.
- [25] ZHENG C, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Effects of laser power density and initial grain size in laser shock punching of pure copper foil[J]. *Optics & lasers in engineering*, 2018, 105: 35-42.