

单侧激光喷丸处理对 7050-T7451 铝合金薄板变形影响的数值模拟与实验分析

丁兆群

山东建筑大学, 山东 济南 250101

摘 要： 本文利用有限元分析方法对 7050-T7451 铝合金薄板在激光喷丸过程中的变形进行了数值模拟。基于显式动力学模块模拟激光喷丸冲击过程。通过使用 Johnson-Cook 本构模型，考虑了高应变率对材料行为的影响，提取冲击波的峰值压力及其时间、空间分布，使用平顶光束设置进行了相应的模拟。结果表明，冲击波峰值压力的增加显著提高了薄板的变形。在不同的峰值压力下，铝合金薄板中心区域的鼓包变形量与试验结果展现了良好的吻合。通过非线性回归分析，得出了鼓包高度与冲击波峰值压力之间的关系模型，进一步验证了数值模拟的可靠性，为优化激光喷丸工艺提供了理论依据。

关 键 词： 激光喷丸；7050-T7451 铝合金；有限元模拟；冲击波峰值压力；变形分析

Numerical Simulation and Experimental Analysis of Effect of Unilateral Laser Shot Peening on Deformation of 7050-T7451 Aluminum Alloy Sheet

Ding Zhaoqun

Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101

Abstract： The deformation of 7050-T7451 aluminum alloy sheet during laser shot peening is numerically simulated by finite element method. Simulation of laser shot peening process based on explicit dynamics module. By using Johnson-Cook constitutive model, the effect of high strain rate on material behavior is considered, the peak pressure of shock wave and its temporal and spatial distribution are extracted, and the corresponding simulation is carried out using the flat-top beam setting. The results show that the increase of peak pressure of shock wave significantly increases the deformation of thin plate. Under different peak pressures, the bulging deformation in the central area of the aluminum alloy sheet is in good agreement with the experimental results. Through nonlinear regression analysis, the relationship model between the height of the bulge and the peak pressure of the shock wave is obtained, which further verifies the reliability of the numerical simulation and provides a theoretical basis for optimizing the laser shot peening process.

Keywords： laser shot peening; 7050-T7451 aluminum alloy; finite element simulation; shock wave peak pressure; deformation analysis

引言

激光喷丸作为一种表面强化技术被广泛应用。其原理是采用高功率密度、短脉冲时间的激光作为工具，诱导覆盖在材料表面的吸收层产生等离子体冲击波，在材料表层及浅表层引入具有梯度变化的塑性变形。在此基础上，将激光喷丸应用到板材类零件的成形过程，形成了激光喷丸成形原理和方法^[1]。研究表明，激光喷丸塑性层厚度是传统机械喷丸的 5-10 倍，成形能力大幅提高，而且采用激光作为工具，通过设计光路扫描策略达到工艺控制的目的，从而避免机械喷丸成形弹丸随机与形状精度保证困难的缺点，在复杂型面壁板成形方面具有独特优势，已在美国波音、中国商飞等公司的机型上应用。

在激光喷丸成形的研究领域，Jian 构建了本征矩与曲面曲率关系的解析模型，直接从几何形状中反演本征矩场，避免了复杂的优化迭代过程。Kong 对激光强化成形规律进行了深入研究，发现垂直于激光路径的最大弯曲变形可达 12.5 mm，当激光路径相对于水平方向倾斜时，观察到了扭转变形^[2]。国内学者，如惠丁丁提出了以合力最大为依据的动态诱导应力提取方法，并成功应用于单筋结构的激光喷丸成形模拟。解宇飞研究了单曲率圆柱面板件的激光喷丸成形，发现了变形偏差与轴线长度、截面半径、弧长和板材厚度的关系。胡永祥基于圆弧轴线梁变形假设，创建了轴线几何效应解析模型，研究指出，轴线初始半径显著影响弯曲变形，且半径增大时几何效应逐渐减弱^[3]。这些研究为激光喷丸成形技术的进一步完善和应用提供了坚实的理论基础和实践指导。

作者简介：丁兆群（1999.07-），男，汉族，山东省日照市，硕士研究生，从事的研究方向：机械工程—激光喷丸变形校正。

然而，在激光喷丸过程中，由于高应变率和高动态响应的复杂性，精确预测和控制材料的变形行为仍然是一个挑战。本文旨在通过有限元分析方法，系统研究激光喷丸过程中的材料变形机理，揭示冲击波作用下铝合金薄板的变形规律。采用显式动力学模块对激光喷丸冲击过程进行数值模拟，利用 Johnson-Cook 本构模型考虑高应变率效应，并通过非线性回归分析得出了鼓包高度与冲击波峰值压力之间的关系模型。这一研究不仅为激光喷丸工艺提供了理论指导，也为优化实际生产中的工艺参数提供了科学依据。

一、有限元分析过程

（一）材料性能和本构模型

本文所用铝合金薄板材料为 7050-T7451，薄板尺寸为 30x30x2mm。利用显式动力学 ABAQUS/Explicit 求解模块模拟激光喷丸的冲击过程。将上一步得到的结果导入静力学通用 ABAQUS/standard 静力学通用模块对激光喷丸后铝合金薄板的回弹进行分析，从而观察和研究铝合金薄板的残余应力场和最终变形。

金属材料在进行激光喷丸时，由于冲击作用时间极短，其应变率高达 10^6s^{-1} 。在准静态条件下建立的材料本构关系已不再适用，国内外学者广泛采用 J-C 模型定义材料的本构关系^[3]，其关系式如下：

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left[1 - (T - T_0)^m / (T_m - T_0)^m \right] \quad (1)$$

式中： ε 为塑性应变， $\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率， A 为屈服强度， B 、 n 为应变强化参数， C 为应变敏感系数， T_0 为室温， T_m 为材料熔点， m 反应温度软化效应。激光喷丸为机械效应无明显升温现象，可忽略温度效应，公式（1）可简化为：

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \quad (2)$$

本文中试验和数值模拟选用的材料为 7050-T7451 铝合金，其材料参数见表 1：

表 1 7050-T7451 铝合金材料性能参数表

Material	A (MPa)	B (MPa)	n	C	E (GPa)	ν	ρ Kg/m ³
7050-T7451	400	300	0.13	0.019	71.7	0.33	2830

（二）冲击波峰值压力的计算

冲击波的形成和传播过程极其复杂，包括激光诱导等离子体爆炸、冲击动力学、波-固耦合、冲击波的传播及其衰减。这使得激光冲击波峰值压力的估算成为研究人员关注的焦点^[4]。Fabbro 等人最早对约束模型下的冲击波进行了理论研究，建立了经典的一维模型，并给出了约束模式中等离子体行为的宏观方程式^[10]。这个模型简化了一定程度的计算，其公式如下：

$$P_{max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (3)$$

其中， P_{max} 是冲击波峰值压力， α 是内能系数（取值为 0.25）， Z 为折合声阻抗， $1/Z = 1/Z_{target} + 1/Z_{water}$ ， Z_{water} 为约束层声阻抗， Z_{target} 为金属靶材声阻抗。对于 7050-T7451 铝合金， $Z_{water} = 0.165 \times 10^6 \text{g/cm}^2$ ， $Z_{target} = 1.45 \times 10^6 \text{g/cm}^2$ 。将参数代入公式（1），可以得到峰值压力与功率密度的关系：

$$P_{max} = 1.45 \sqrt{I_0 (GW / cm^2)} \quad (4)$$

尽管这一模型在一定程度上简化了计算，但在有约束层的情

况下，其估算的冲击波峰值压力往往偏高。为了提高估算的准确性，周建忠人考虑了激光冲击波在约束层和吸收层的传播衰减问题^[11]，提出了新的估算公式。

$$P_{max} = \sqrt{\frac{A(\gamma - 1)I_0 Z_{t0} Z_{c0} \rho}{(2\gamma - 1)(K_a Z_{c0} + K_c Z_{t0})}} \quad (5)$$

该公式包含吸收系数 A 和激光功率密度的影响，同时考虑了工件和约束层材料的声阻抗 Z_{t0} ， Z_{c0} ，以及其他相关参量 K_a ， K_c ， ρ 。

（三）冲击波的时间和空间分布

激光冲击载荷的施加，需要同时考虑冲击波压力的时间和空间分布，试验采用平顶光束进行冲击强化模拟，冲击波压力的三维模型表达式为：

$$P = P_{max} \cdot P(t) \cdot P(x, y) \quad (6)$$

$P(t)$ 为时间函数，根据以往研究，在有约束层的条件下，约束层可以将冲击波压力作用时间延长至激光脉冲宽度的 2~3 倍^[4]，试验采用激光脉宽为 20ns，则仿真设置冲击波作用时间设置为 60ns，冲击波压力加载曲线采用简化的三角波，如图 1 所示。

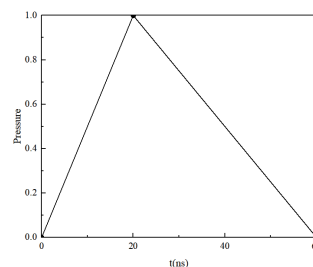


图 1 冲击波压力加载曲线

$P(x, y)$ 为空间函数，Zhang 的研究表明，激光喷丸产生的冲击波在空间上满足高斯分布，其三维模型表达式为：

$$P(x, y) = \exp \left(-\frac{r^2}{2R^2} \right) \quad (7)$$

其中 r 为激光喷丸区域任意位置到光斑中心的径向距离，且 $r^2 = x^2 + y^2$ ， R 为光斑半径，试验采用光斑直径为 3mm，故公式可表示为：

$$P(x, y) = \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{4.5^2} \right) \quad (8)$$

（四）分析步时长和网格尺寸的选取

激光喷丸冲击波作用时间为 60ns，用于模拟冲击过程的显式动力学分析步时长设为 $1.5 \times 10^{-6} \text{s}$ ，可以使光斑作用时材料的塑性变形趋于饱和。用于回弹分析的静力学通用分析步时长保持默认胡永洋等人的研究表明当网格尺寸为光斑直径的 2.5 时，仿真分析结果与试验结果接近，而网格尺寸过大又会增加运算负担。本试验光斑尺寸为 3mm，故激光喷丸区域网格尺寸细化为 0.1mm。

二、仿真结果与试验结果对比分析

(一) 激光喷丸试验

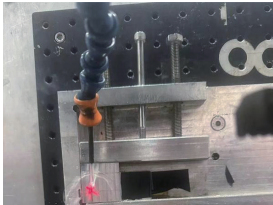
试验使用了7050-T7451铝合金预拉伸板材,其化学成分见表2。试验前,材料被加工成30mm x 30mm x 2mm的方形薄板试样,喷丸表面经过铣削处理。数控加工使用直径为20mm的硬质合金铣刀,参数为切深2mm,切宽12mm,进给0.1mm/zd,转速800r/min。激光喷丸试验使用 Procudo® 200系统,该系统配备 YLF 激光器,其性能参数如表3所示,光斑直径3mm,重叠率30%,每个点冲击1次,脉冲宽度20ns^[6]。薄板试样使用2GW/cm²~5.5GW/cm²的激光功率密度,包括多个梯度,以评估不同功率密度下的强化效果。喷丸路径采用“S”形。激光喷丸过程如图2所示,激光喷丸后的铝合金薄板试样如图3所示。

表2 7050-T7451 铝合金的化学成分 (Wt%)

Element	Zn	Mg	Cu	Zr	Fe	Fe	Si	Cr	Mn	Al
Content	6.34	2.2	2.23	0.11	0.09	0.03	0.04	0.01	0.01	margin

表3 激光器性能参数

Wavelength (nm)	pulse energy(J)	pulse width(ns)	spot size(mm)	overlapping ratio(%)	energy density
Content	0.42	0.5	0.17	0.25	0.035



> 图2 激光喷丸过程

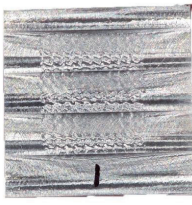
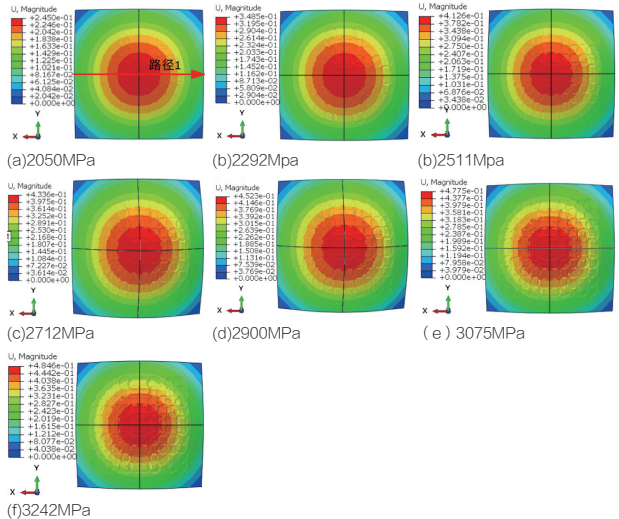


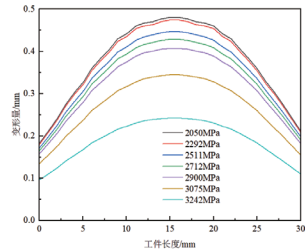
图3 激光喷丸后的试样

(二) 仿真结果概述

试验采用激光功率密度为2GW/cm²、2.5GW/cm²、3GW/cm²、3.5GW/cm²、4GW/cm²、4.5GW/cm²、5GW/cm²,根据公式(4),其对应的峰值压力分别为2050Mpa、2292Mpa、2511Mpa、2712Mpa、2900Mpa、3075Mpa、3242Mpa。不同峰值压力下工件的仿真变形结果如图4所示。提取工件中心处变形量,提取路径如图4(a)所示,绘制变形曲线如图5所示。



> 图4 不同峰值压力下仿真变形结果

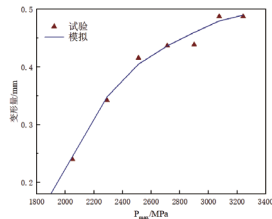


> 图5 路径1工件变形曲线

根据仿真运行结果,如图4所示,铝合金薄板在激光喷丸后,中心区域产生了不同程度的鼓包变形现象。图5显示,在路径1上,变形形式为关于工件中心呈轴对称的弯曲变形。随着冲击波峰值压力的增大,工件各处的变形量也不断增加。然而,当功率密度达到试样4的3.5GW/cm²时,鼓包变形的大小基本稳定在0.43mm左右。这一现象主要是由于激光喷丸引起的应力波已经达到饱和状态,喷丸区域的塑性变形也已达到极限,同时残余压应力也已达到其极限值。在这种情况下,即使进一步增加功率密度,残余压应力也不会继续增加^[6]。因此,最大鼓包变形量也不再增加,保持在一个稳定的值,约为0.43mm左右。

(三) 工件鼓包变形量的模拟值与实测值对比

如图6所示,工件最大鼓包变形量的模拟值分别为0.245mm、0.348mm、0.412mm、0.433mm、0.452mm、0.477mm、0.486mm。这些仿真值与激光喷丸试验得到的鼓包变形量0.249mm、0.342mm、0.416mm、0.437mm、0.439mm、0.488mm、0.488mm相差不大,误差均在0.05mm之内。通过对比工件表面变形量的模拟值与实测值,可以观察到两者之间的变化趋势是一致的:随着激光功率密度的增大,冲击波峰值压力相应增加,最终导致鼓包变形量增大。数值模拟值与实测值在整个试验范围内均取得了较好的一致性,这表明仿真模型能够较为准确地预测激光喷丸工艺对工件变形的影响,进一步验证了仿真模型的有效性和可靠性。



> 图6 最大鼓包变形量模拟值与实测值对比

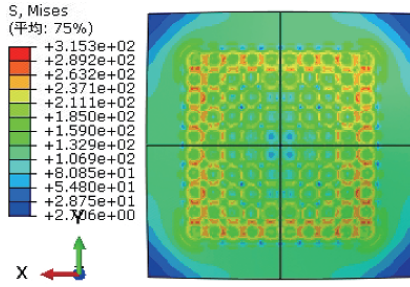
三、激光喷丸过程的力学分析

(一) 冲击波峰值压力与均布压强的关系

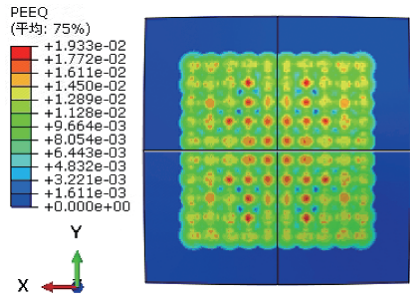
在激光喷丸过程中,冲击波峰值压力是关键参数之一,他直接影响材料表面的等效塑性应变和残余应力的分布。而激光喷丸后试样表层的残余应力和等效塑性应变(PEEQ)则主要集中经过激光喷丸的中心区域,如图7图8所示^[7]。故将单个激光喷丸点引起的塑性变形和残余应力所对应的工件变形效果等效为作用在工件表面的均布压强 p 。则冲击波峰值压力 P_{max} 与均布压强 p 之间存在定量关系,可表示为:

$$p = \beta P_{max} \quad (9)$$

其中, p 是均布压强, β 是一个与材料特性与激光参数相关的系数。



> 图7 激光喷丸后试样表面的残余应力



> 图8 激光喷丸后试样表面等效塑性应变

(二) 总力与激光作用面积的关系

在激光喷丸过程中, 总力是导致材料变形的主要因素。总力的大小取决于均布压强 p 和激光作用面积 A 。单个光斑的激光作用区域近似是圆形的, 其面积可表示为:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

其中, A 是单个光斑的激光作用面积, D 是光斑直径^[8]。由于激光喷丸试验中喷丸区域为 10×10 的 100 个点的区域, 结合公式 (9)(10) 总力可以表示为:

$$F = 100F_1 = 100p \cdot A = 100 \cdot \beta \cdot P_{max} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 25\beta\pi d^2 P_{max} \quad (11)$$

这个公式表明, 总力与激光功率密度和光斑直径的平方成正比。

(三) 鼓包高度与总力的关系

鼓包变形是激光喷丸过程中材料表面变形的一个直观表现^[9]。根据图, 鼓包高度与总力之间呈正相关, 其关系可表示为:

$$\Delta h = aF^b \quad (12)$$

其中 a , b 是待定系数。结合公式 (11)、(12) 可得:

$$\Delta h = cP_{max}^b \quad (13)$$

其中 $c = a \cdot (25\beta\pi d^2)^b$ 为待定系数。为了确定系数 c 和 b , 进行了非线性回归分析。使用 Python 的 scipy 库中的 curve_fit 函数, 对试验数据进行了拟合。

通过拟合得到系数 c 和 d 的值:

$$c \approx 2.28e^{-5}, d \approx 1.24$$

因此, 鼓包高度 Δh 与峰值压力 P_{max} 之间的关系可表示为:

$$\Delta h = 2.28e^{-5} P_{max}^{1.24}$$

至此, 通过非线性回归分析, 确定了鼓包高度 Δh 与峰值压力 P_{max} 之间的关系, 并对薄壁件单侧激光喷丸引起的变形形式进行了描述。这为进一步分析薄壁件的双侧激光喷丸变形形式奠定了基础, 进而为确定不同位置的激光喷丸参数提供了依据, 最终为优化激光喷丸工艺提供了理论支持^[10]。

四、结论

(1) 利用有限元分析方法对激光喷丸过程进行了数值模拟, 结果与实验数据高度吻合, 验证了模型的有效性和准确性。这一发现表明数值模拟能够准确预测激光喷丸对 7050-T7451 铝合金薄板变形的影响。

(2) 通过对比工件表面变形量的模拟值与实测值, 发现随着激光功率密度的增大, 冲击波峰值压力相应增加, 最终导致鼓包变形量增大。模拟值与实测值在整个试验范围内均取得了较好的一致性。

(3) 通过非线性回归分析, 建立了鼓包高度与冲击波峰值压力之间的关系模型, 进一步验证了数值模拟的可靠性。该模型为激光喷丸工艺参数的设定提供了理论依据。

参考文献

- [1] 曾元松, 尚建勤, 许春林, 乔明杰, 王俊彪, 董锦亮. ARJ21 飞机大型超临界机翼整体壁板喷丸成形技术 [J]. 航空制造技术, 2007, (3): 38-41.
- [2] 惠丁丁, 闻家阳, 王永军, 高国强, 王强, 王俊彪. 典型单筋结构激光喷丸成形模拟 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28(8): 64-74.
- [3] 解宇飞, 胡永祥, 姚振强. 激光喷丸成形单曲率几何效应研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(23): 59-63.
- [4] 胡永祥, 罗明生, 解宇飞, 姚振强. 激光喷丸成形轴线几何效应解析建模 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50 (3) : 65-73.
- [5] 孟莹, 付秀丽, 潘永智, 徐念伟. 考虑成形方向的航空铝合金修正本构模型的构建 [J]. 机械工程学报, 2018, (22): 78-85.
- [6] 唐鑫森, 江剑成, 胡永祥. 带筋壁板筋条双侧激光喷丸弯曲变形特性 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30(09): 180-187.
- [7] 张俊豪. 典型飞机受损件激光喷丸残余应力调控及等疲劳寿命设计研究 [D]. 华南理工大学, 2021.
- [8] 韩培培, 权纯逸, 焦清洋, 等. 激光冲击强化对 7050-T7451 铝合金残余应力和力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2021, 46(02): 190-195.
- [9] 王彬文, 陈先民, 苏运来, 等. 中国航空工业疲劳与结构完整性研究进展与展望 [J]. 航空学报, 2021, 42(05): 6-44.
- [10] 周文, 葛茂忠, 王大明, 等. 激光冲击处理对 GH3039 高温合金表面完整性的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(03): 203-210.