

涡轮盘榫槽激光冲击强化数值模拟与试验验证

肖值兴¹, 毛建兴^{2, 3, 4}, 田腾跃¹, 汪文君^{4, 5}, 胡殿印^{2, 3, 4}, 王荣桥^{1, 3, 4}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100191;

4. 中小型航空发动机联合研究中心, 北京 100191;

5. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 提出了基于离散化思想的曲面结构激光冲击强化数值模拟方法, 通过空间几何关系和能量守恒原理实现受冲击区域、压力的精准定义, 可实现任意曲面、任意角度的激光冲击强化数值模拟, 并依据网格无关性要求确定了靶材网格尺寸。利用该方法, 探究了激光冲击强化后涡轮盘榫槽结构特征部位的残余应力分布规律, 与试验结果相比预测误差在 20% 以内。研究表明: 激光冲击强化后涡轮盘榫槽部位引入一定深度范围内的残余压应力, 但因曲面结构特征导致的工艺可达性影响, 残余应力数值低于相同工艺水平下的平面结构, 且在不同方向上存在差异性。

关 键 词: 激光冲击强化; 曲面结构; 涡轮盘榫槽; GH4720Li 合金; 残余应力

中图分类号: V261.8

文献标志码: A

Numerical simulation and experimental verification on laser shock peening for turbine mortise

XIAO Zhixing¹, MAO Jianxing^{2, 3, 4}, TIAN Tengyue¹, WANG Wenjun^{4, 5},

HU Dianyin^{2, 3, 4}, WANG Rongqiao^{1, 3, 4}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Beijing Key Laboratory of Aero-Engine Structure and Strength,

Beihang University, Beijing 100191, China;

4. United Research Center of Mid-Small Aero-Engine, Beijing 100191, China;

5. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A numerical simulation method of laser shock peening of curved structure based on the idea of discretization was proposed. The precise definition of the impacted area and pressure was realized through the spatial geometric relationship and the principle of energy conservation, and the numerical simulation of laser shock peening of any curved surface and any angle can be realized. Then the target mesh size was determined according to the requirements of mesh independence. Using this method, the

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51875020, 52022007); 国家科技重大专项(J2019-IV-0009-0077)

作者简介: 肖值兴(1997—), 男, 硕士生, 主要从事金属疲劳及表面强化研究。

通信作者: 胡殿印(1980—), 女, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度与可靠性研究。E-mail: hdy@buaa.edu.cn

引用格式: 肖值兴, 毛建兴, 田腾跃, 等. 涡轮盘榫槽激光冲击强化数值模拟与试验验证[J]. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2448-2454. XIAO Zhixing, MAO Jianxing, TIAN Tengyue, et al. Numerical simulation and experimental verification on laser shock peening for turbine mortise[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(11): 2448-2454.

residual stress distribution law of the characteristic for the turbine mortise structure after laser shock peening was explored. Compared with the experimental results, the prediction error was less than 20%. The research showed that the residual compressive stress in a certain depth range was introduced into the mortise of the turbine disk after laser shock peening, but due to the process accessibility caused by the structural characteristics of the curved surface, the residual stress value was lower than the plane structure at the same process level, and there were differences in different directions.

Keywords: laser shock peening; curved surface structure; turbine mortise; GH4720Li superalloy; residual stress

航空发动机涡轮盘采用枞树形榫槽这一多通道传力结构来确保与涡轮叶片榫头的高效联接。服役过程中长期承受高速旋转导致的离心载荷、非均匀温度分布导致的热载荷,以及气流激振作用下叶片产生的振动载荷,极易在结构表面萌生疲劳裂纹^[1]。为此,通常采用表面强化等改性技术提高其抗疲劳性能^[2]。激光冲击强化利用大功率激光器产生高能激光,将覆盖在材料表面的吸收层在短时间内气化、电离,产生等离子冲击波,诱发材料产生塑性形变,形成一定深度的残余压应力层,从而达到对金属材料表面进行改性的目的^[3-4]。相比常用的喷丸强化,激光冲击强化具有残余应力层深、残余压应力大、可控性高等优点,在涡轮盘榫槽等特征部位开始得到关注和初步应用。

目前国内外已开展的激光冲击强化研究多针对铝合金等轻金属材料^[5-9],通过在激光投影区域设置动态压力实现了激光冲击的数值模拟。然而,针对镍基高温合金的研究仍相对初步。Gill 等^[10]、汪璐^[11]分别针对 GH4169、GH4720Li 高温合金开展试验研究,结果表明激光冲击强化同样能引入残余压应力层,并在热松弛后保持一定水平。朱然^[12]开展了激光强化 GH4169 合金的试验和仿真研究,建立了适用于平板件的数值模拟方法。

近年来,研究学者尝试开展复杂结构的激光冲击强化数值模拟研究。例如, Yang 等^[13]分析了曲面几何效应对动态应力场以及残余应力场的影响。周建忠等^[14]将紧固孔结构抽象成三维小孔模型进行了激光冲击强化模拟研究,其结果与平面结构存在有明显差别。葛良辰等^[15]针对单面凸模型的激光冲击强化进行了研究,结果表明其表面残余压应力场分布存在偏向现象。以上研究多针对圆棒、孔等曲率较小的简单曲面结构,曲率半径均在 4 mm 以上,数值模拟时并未考虑激光冲击压力作用在曲面上的压力方向变化和能

量密度降低。涡轮盘榫槽结构复杂,齿根、槽底等应力集中部位具有尺寸小、曲率大的几何特征,导致激光冲击压力在方向和大小上存在较大差异,采用现有针对小曲率结构的模拟方法将产生较大误差。

鉴于此,本文以 GH4720Li 高温合金涡轮盘榫槽结构为研究对象,建立了激光冲击强化复杂曲面结构的数值模拟方法,并通过试验验证方法的准确性。研究作为激光冲击强化涡轮盘榫槽结构设计提供技术支持。

1 试验方法

1.1 涡轮盘榫槽激光冲击强化工艺

以某型涡轴发动机涡轮盘榫槽为对象,采用美国 LSP Technologies 公司的 PROCUNDO200 进行激光冲击强化,材料为 GH4720Li 高温合金。激光冲击强化系统包括激光发生器、外部光路、机器臂和输水喷口。

选取圆形激光束进行强化,激光能量为 8 J,脉冲宽度为 22 ns,光斑直径为 2 mm。考虑到榫槽的曲面特征会对激光路径有一定遮挡,榫槽的上齿面强化时选择垂直入射的激光波,而在下齿面强化时选择 45°斜入射的激光波,如图 1 所示,覆盖整个涡轮盘榫齿曲面,榫槽厚度为 10 mm。

具体试验步骤如下:

- 1) 使用酒精对冲击表面进行清洁;

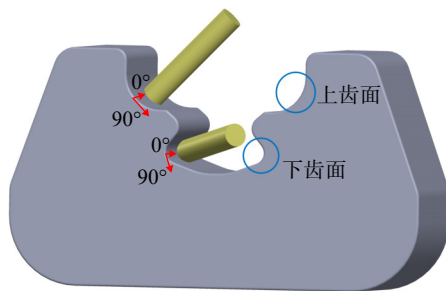


图 1 榫槽激光冲击强化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mortise laser shock peening

- 2) 在冲击表面粘贴 3M 黑色胶布;
- 3) 试验件装夹及激光参数设定;
- 4) 激光冲击强化。

1.2 表面残余应力测试

激光冲击强化后,对涡轮盘榫槽结构进行切割,获取包含强化区域的 4 个小块试验件,使用 XL-640 型 X 射线残余应力测试仪进行测试。在冲击区域内随机选取 2 个点进行测量。由于榫槽结构的复杂性,强化后的残余应力会在不同方向上存在差异。定义残余应力测量方向角度为 φ ,本文分别测量 $\varphi=0^\circ$ (榫槽轴向)和 $\varphi=90^\circ$ (齿面切向)两个方向的残余应力,如图 1 所示,测量 3 次取平均值作为最终结果。

2 数值模拟方法

2.1 本构模型与压力模型

激光冲击强化具有峰值压力大,作用时间短的特点,受冲击材料的应变率可达到 10^6 s^{-1} 以上。因此本文选用适用于高应变率的 Johnson-Cook (J-C) 模型^[16]来描述材料变形行为,其表达式为

$$\sigma_{\text{eq}} = \left(A + B \varepsilon_{\text{eq}}^n \right) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

其中 σ_{eq} 为等效应力, A 为屈服应力, B 为硬化模量, C 为反映应变率硬化行为的材料参数, m 为温度软化指数, n 为应变强化指数, $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率, T^* 为无量纲温度。由于激光冲击强化作用时间短,过程中温度变化程度极小,因此忽略温度项的影响,即 $T^*=0$ 。

针对 GH4720Li 高温合金, J-C 模型中的参数如表 1^[17]所示。

表 1 GH4720Li 材料参数^[17]

Table 1 Material parameters of GH4720Li^[17]

E/GPa	ν	A/MPa	B/MPa	C	n
219	0.31	1 142	1 947	0.026	0.882

选用 Fabbro 模型^[18]计算激光冲击强化的峰值压力,结合试验所得冲击压力时空分布,获取激光冲击压力模型。Fabbro 模型如式(2)所示:

$$p_0 = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I} \quad (2)$$

其中 p_0 为峰值压力,单位 GPa; α 为内能中热能占比,通常取 0.1~0.2,本文 α 选取 0.1^[19-20]; Z 为折合声阻抗,单位 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,可通过式(3)计算; I 为

激光功率密度,单位 GW/cm^2 ,可通过式(4)计算。

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (3)$$

$$I = \frac{E_0}{t_0 \cdot S} \quad (4)$$

其中 Z_1 为约束层声阻抗,对于流水,其值为 $2.393 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ^[20]; Z_2 为靶材声阻抗,对于 GH4720Li 高温合金,可通过式(5)^[21]计算; E_0 为激光能量; S 为光斑面积; t_0 为脉冲宽度。

$$Z_2 = \rho \cdot c = \rho \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

其中 c 为声速; ρ 为材料密度,其值为 $8.14 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[22]; E 为弹性模量,参数见表 1。

试验选用平顶激光器,激光能量在空间上均匀分布,时间上变化规律通过平面冲击试验获得,如图 2 所示,其中 p 为冲击压力, t 为时间。

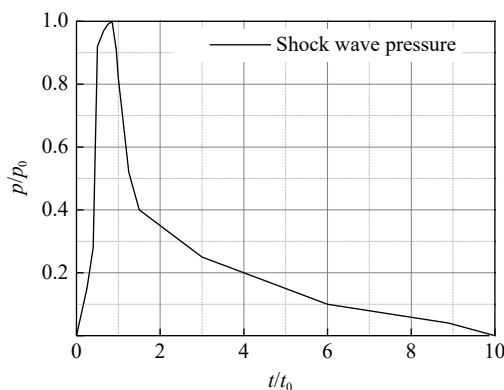


图 2 激光冲击压力时间曲线

Fig. 2 Laser shock pressure time curve

2.2 激光冲击区域判断

在激光冲击数值仿真中,通过在激光投影区域上添加时变压力,以模拟激光冲击这一过程。在平面结构激光冲击强化时,其激光投影面积在一个平面上,且为规则的椭圆形或多边形,较容易进行判断或定义。但是对于曲面结构,其投影区域是一个沿曲面表面的空间几何形状,尤其当曲面形状复杂、入射角度较偏时,其投影形状愈发不规则,直接判断投影区域较为困难。

为解决该问题,本文采用离散化的思想,将曲面分解成大量的小曲面,每一个小曲面相对整体尺寸极小,可近似成小的平面,这些小平面的集合可近似反映曲面的全部特征。将激光以向量的形式进行定义,定义激光束中心线所经过的一坐

标点 $A_0(x_0, y_0, z_0)$ 、中心线法向 (x_l, y_l, z_l) 和激光束半径 r 。

对于激光冲击曲面离散所得的某一小平面, 提取其面积分点坐标 $A_i(x_i, y_i, z_i)$, 计算该点与激光中心线之间的距离 r_i , 如图 3 所示。若 $r_i < r$, 则该平面在激光冲击范围内。遍历所有小平面, 激光区域内的平面合集即为激光投影区域。

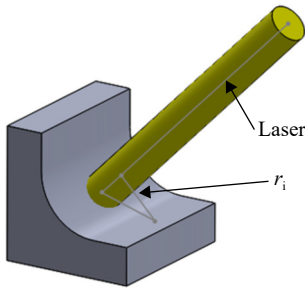


图 3 激光冲击区域判断

Fig. 3 Laser shock area judgment

r_i 可通过如下空间几何关系计算

$$r_i = l_i \cdot \sin(\theta_i) \quad (6)$$

其中 l_i 为线段 A_0A_i 的长度, θ_i 为射线 A_0A_i 与激光中心线之间的夹角, 可分别通过式(7)、式(8)计算。

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (7)$$

$$\theta_i = \arccos \left[\frac{(x_{A_0A_i}x_l + y_{A_0A_i}y_l + z_{A_0A_i}z_l)}{\sqrt{x_{A_0A_i}^2 + y_{A_0A_i}^2 + z_{A_0A_i}^2} \cdot \sqrt{x_l^2 + y_l^2 + z_l^2}} \right] \quad (8)$$

其中 $x_{A_0A_i}$ 、 $y_{A_0A_i}$ 、 $z_{A_0A_i}$ 为射线 A_0A_i 的向量表达, 可通过点坐标计算得到。

2.3 激光冲击压力定义

除冲击区域外, 曲面结构的激光冲击压力也与平面有所区别。激光冲击的压力是由等离子体膨胀产生的, 王瑞荣等^[23]对斜入射激光的研究结果表明, 等离子体流方向与激光入射方向无关, 而是垂直于靶面。因此, 激光冲击强化时所产生的压力始终垂直于靶材表面。对于曲面结构的激光冲击强化, 激光冲击的压力沿着曲面不断变化, 可通过面压力来实现。

另一方面, 根据 Fabbro 模型, 激光冲击时产生的峰值压力与靶材表面上的激光功率密度相关。当激光照射到曲面上时, 由于激光与曲面不同位置处法向夹角的差异性, 表面的功率密度不再是均匀的, 即作用在曲面表面的激光压力不再是相等的。为此, 在本文第 2.2 节基础上, 继续利用离

散的小平面, 对激光冲击区域内的平面进行压力定义。

对于单一小平面, 其面积与投影到该平面的激光束面积之间的关系仅与入射角度有关, 其关系如式(9)所示。

$$S_i = \cos \theta \cdot S_0 \quad (9)$$

其中 S_0 为激光横截面积, S_i 为平面面积, θ 为激光与平面法向的夹角。记 p_0 为激光垂直冲击到平面上所产生的峰值压力, 将该式代入式(2)、式(4)中得到

$$p_i = \sqrt{\cos \theta} \cdot p_0 \quad (10)$$

其中 p_i 为平面上的实际作用压力。

利用该式对冲击区域内的每一个平面分别计算并赋予激光压力, 以实现曲面上不均匀激光冲击压力的模拟。设定好压力后进行动态分析, 再对结果进行静态回弹得到稳定的残余应力场, 从而实现曲面结构的激光冲击强化数值模拟。

与现有激光冲击数值模拟方法相比, 本方法考虑了激光冲击曲面时压力方向与大小的变化, 通过离散的方式, 判断激光冲击区域, 并依据能量守恒定律计算了冲击压力, 可实现任意曲面任意角度的精准模拟, 更加符合实际冲击情况。

3 结果与讨论

3.1 网格尺寸分析

由于曲面结构的激光冲击强化数值模拟是采取有限元网格进行离散的, 因此, 模拟结果将直接依赖于表面网格尺寸。本文采用如图 4 所示的平面和曲面模型首先进行网格依赖性分析, 其中模型厚度设置为 4 mm。

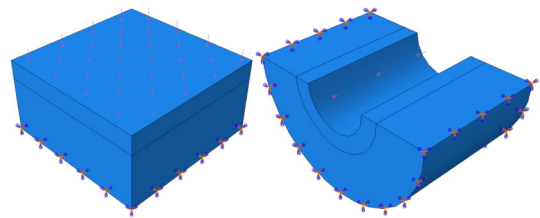


图 4 激光冲击强化模型

Fig. 4 Laser shock peening model

激光峰值压力设置为 4 000 MPa, 脉冲宽度 20 ns, 光斑直径 2 mm, 搭接率为 50%, 进行 3×3 的冲击。记网格尺寸为 l , 冲击曲面的曲率半径为 ρ_0 。采用不同网格尺寸进行表面网格划分, 进行激光冲击强化的数值模拟, 提取冲击区域中心 1 mm×

1 mm 内的表面平均应力, 结果如图 5 所示, 其中 d/l 为激光光斑直径与表面网格尺寸的比值, σ_r 为表面残余应力。

可以发现, 对于平面结构的激光冲击强化, 当 $d/l=15$ 时表面残余应力趋于稳定, 然而对于曲面结构的激光冲击强化, 当 $\rho_0=4$ mm 时, $d/l=15$ 时表面残余应力收敛; 但当 ρ_0 减小到 3 mm 时, 该网格尺寸的残余应力仍偏大。这说明曲率半径对网格收敛性有一定影响。当曲率半径较大时, 激光冲击强化数值仿真的网格依赖性主要取决于光斑直径, 但当曲率半径较小时, 网格尺寸主要受曲率半径影响。根据不同曲率下不同网格尺寸的计算结果, 得到激光冲击强化网格收敛性曲线如图 6 所示。

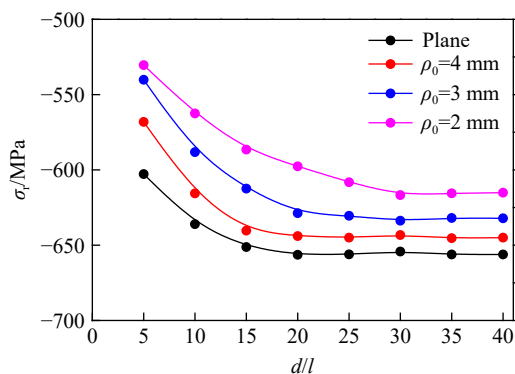


图 5 不同网格尺寸下的残余应力

Fig. 5 Residual stress under different grid sizes

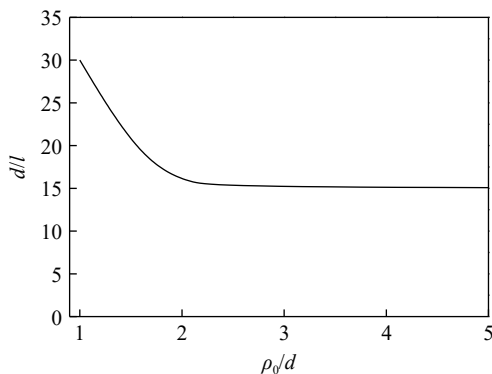


图 6 曲面激光冲击强化网格收敛曲线

Fig. 6 Mesh convergence curve of laser shock peening on curved surface

3.2 涡轮盘榫槽的激光冲击强化研究

采用与本文第 1 节中试验相同的参数, 利用本文提出的激光冲击强化数值模拟方法, 进行涡轮盘榫槽结构的激光冲击强化模拟。

在 ABAQUS 中建立半榫槽有限元模型如图 7

所示。考虑到榫槽结构的对称性, 建立一半的榫槽模型, 并添加对称性边界条件; 在榫槽底面添加全约束以固定模型。在激光冲击区域进行局部网格细化, 以满足激光冲击强化模拟要求; 为提高计算精度, 深度方向通常选取 0.1 mm, 随深度增加尺寸逐渐增大。

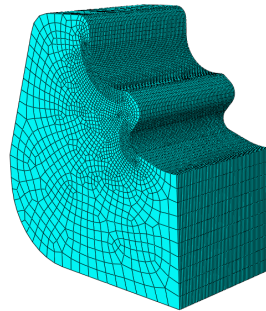


图 7 半榫槽有限元模型及网格划分

Fig. 7 Finite element model and mesh generation of half mortise

利用 VDLOAD 子程序定义冲击面压力。利用该子程序读取冲击曲面网格积分点, 判断其与激光的距离确定冲击区域; 读取网格法向并计算其余激光的夹角, 在结合式(10)计算该网格平面激光冲击压力, 遍历整个冲击平面以完成冲击压力的设置。通过 ABAQUS 动态分析模块计算模拟激光冲击的过程, 并将结果以预定场的方式导入静态分析模块以模拟静态回弹过程, 加速收敛, 得到稳定的残余应力场。

数值模拟结果如图 8 所示。分别提取强化区域中 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 两个方向的表面残余应力 (分别为 S_{22} 和 S_{11}), 并与试验结果进行对比, 结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 上榫齿 0° 和 90° 方向的数值模拟结果相对误差分别为 15.47%、10.78%; 下榫齿 0° 和 90° 方向的数值模拟结果相对误差分别为 8.49%、10.41%。模拟结果与试验值吻合结果, 证明了曲面结构激光冲击强化数值模拟方法的有效性。

3.3 不同结构激光冲击强化对比分析

采用与涡轮盘榫槽结构激光强化相同的工艺参数进行平面结构的数值模拟, 对比结果如表 2 所示。

对于平板结构, 其强化具有中心对称特性, 两个方向上残余应力几乎一致, 且强化得到的残余应力较大。

对于上榫齿而言, 其 0° 方向残余应力大于 90° 方向残余应力, 但相差不多。造成该差距的原

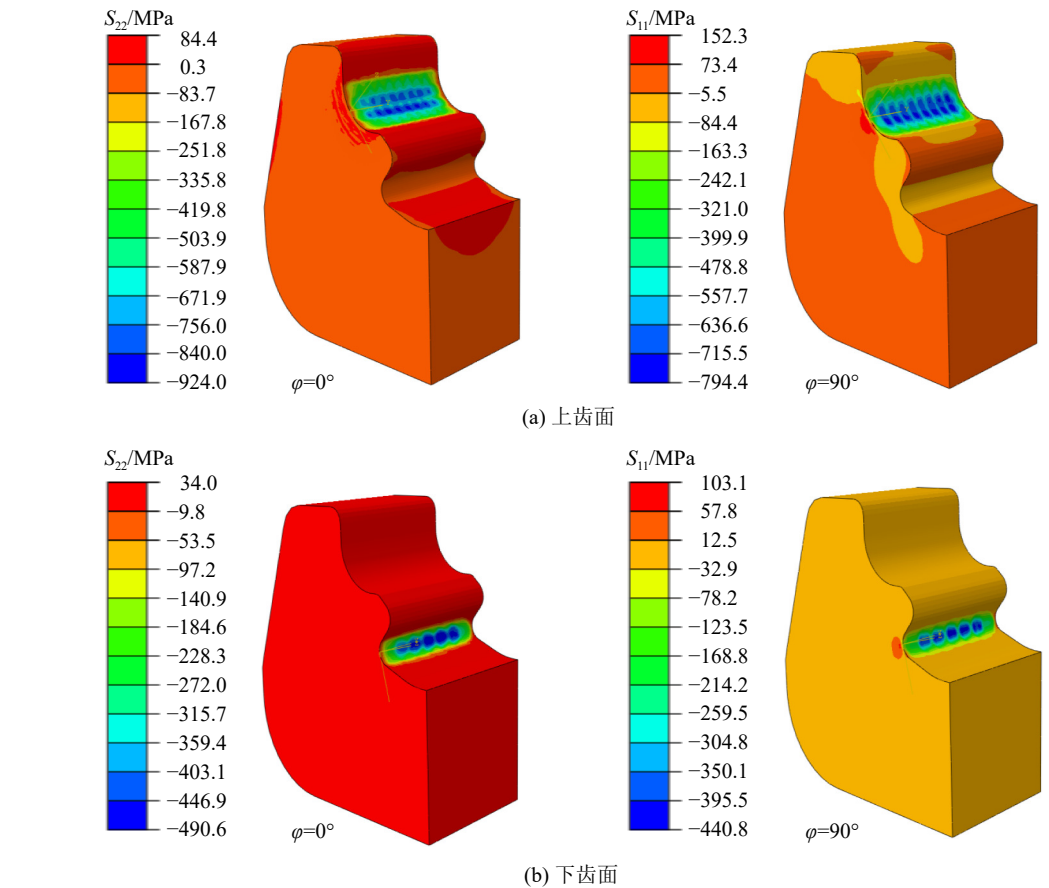


图 8 榫槽激光冲击强化残余应力场

Fig. 8 Mortise laser shock peening residual stress field

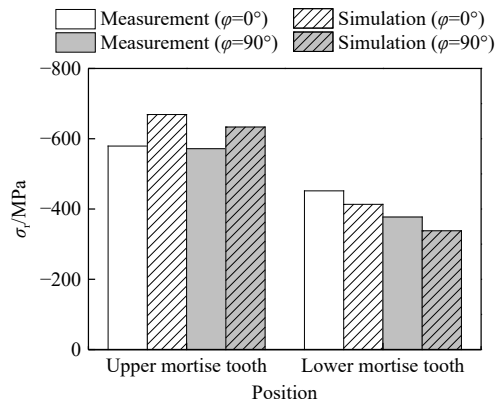


图 9 榫槽激光冲击强化模拟及试验结果

Fig. 9 Simulation and experimental results of mortise laser shock peening

表 2 不同结构表面残余应力

Table 2 Surface residual stress of different structures

φ	残余应力/MPa		
	平面	上齿面	下齿面
0°	-678.51	-668.89	-413.42
90°	-677.93	-633.42	-338.03

因有两方面：一是因为强化时，随强化位置偏离弧面中心，其激光与平面法向夹角逐渐增大，功率密度降低，冲击压力减小，导致在 90° 方向上的残余应力弱于 0° 方向。另一方面， 90° 方向上强化时，其冲击压力呈扇形向外扩张，根据激光冲击强化原理，残余应力形成的主要原因是强化区外材料对强化区材料的反向挤压，其挤压量主要源于强化区材料的塑性变形量。对于扇形扩散的冲击波，其作用于更广泛的材料，产生的塑性变形相对于平行扩散冲击波所产生的塑性变形。

对于下榫齿而言，其 0° 方向残余应力同样大于 90° 方向残余应力，与上榫齿具有一致性。另一方面，下榫齿强化后的 90° 方向残余应力仅为 0° 方向的 80%。对该现象，主要是由于下榫齿曲率更大，冲击压力减小的幅度和冲击波扩散的现象更加明显。除此以外，由于强化时考虑激光光路的可达性，对下榫齿使用 45° 斜入射冲击，导致冲击压力减小，使下榫齿的强化后残余应力低于上榫齿。

4 结 论

本文提出了一种适用于曲面结构的激光冲击强化数值模拟方法,并应用于某型发动机涡轮盘榫槽结构。研究得到以下结论:

1) 对于曲面结构的激光冲击强化数值仿真,要求冲击区域网格尺寸应小于激光直径的 1/10 且小于曲率半径的 3/40。

2) 通过离散的方法将曲面转化成平面集合、利用空间几何关系和冲击压力的折算可实现涡轮盘榫槽结构的激光冲击强化模拟,与试验结果进行对比,误差在 20% 以内。

3) 对于弧面激光冲击强化,由于激光功率密度的降低和冲击波扩散的影响,其 90°方向残余应力弱于 0°方向残余应力。且弧面曲率越大,两个方向的残余应力差异越明显。

参考文献:

- [1] 江涛. 发动机叶片榫槽爬波原位检测系统研制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
JIANG Tao. Engine blade groove creeping wave detection system developed in situ[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [2] 孙希泰. 材料表面强化技术[M]. 北京: 化学工业出版社材料科学与工程出版中心, 2005.
- [3] 段志勇. 激光冲击波及激光冲击处理技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000.
DUAN Zhiyong. Study on laser shock wave and laser shock processing technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2000. (in Chinese)
- [4] LI Songxia, QIAO Hongchao, ZHAO Jibin, et al. Research and development of laser shock processing technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(6): 569-576.
- [5] MONTROSS C S, WEI T, LIN Y, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [6] OCANA J L, MORALES M, MOLPECERS C, et al. Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments[J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1/2/3/4): 242-248.
- [7] HU Yongxiang, YAO Zhenqiang, HU Jun. 3-D FEM simulation of laser shock processing[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1426-1435.
- [8] 张永康, 高立. 钛合金板料激光冲击变形的数值模拟和实验[J]. 中国机械工程, 2006, 17(17): 1813-1817.
ZHANG Yongkang, GAO Li. Numerical simulation and experimental study on the deformation of TA2 sheet metal by laser shock[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(17): 1813-1817. (in Chinese)
- [9] 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.
HU Yongxiang. Research on the numerical simulation and impact effects of laser shock processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese)
- [10] GILL A S, TELANG A, VASUDEVAN V K. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2015, 225: 463-472.
- [11] 汪璐. 激光冲击强化对GH4720Li力学性能的影响及热稳定性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
WANG Lu. Study on effect of laser shock processing on mechanical properties and thermal stability of GH4720Li[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [12] 朱然. 平顶光束多点激光冲击薄壁件的强化与变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHU Ran. Study on strengthening and deformation of thin-walled components under flattened beam multiple laser shock processing [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [13] YANG Chunhui, HODGSON P D, LIU Qianchu, et al. Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1): 303-309.
- [14] 周建忠, 杨小东, 黄舒, 等. 双面激光喷丸强化ZK60镁合金的残余应力数值研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1850-1855.
ZHOU Jianzhong, YANG Xiaodong, HUANG Shu, et al. Residual stress field of ZK60 specimen with central hole induced by both-side laser shot peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1850-1855. (in Chinese)
- [15] 葛良辰, 曹宇鹏, 花国然, 等. 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[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 284-291.
GE Liangchen, CAO Yupeng, HUA Guoran, 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. (in Chinese)
- [16] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[R]. Hague, Netherlands: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, 1983.
- [17] HU Dianyin, TIAN Tengyue, WANG Xin, et al. Surface hardening analysis for shot peened GH4720Li superalloy using a DEM-FEM coupling RV simulation method[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 209: 106689.1-106689.11.
- [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] XU Gaofeng, LUO Kaiyu, DAI Fengze, et al. Effects of scanning path and overlapping rate on residual stress of 316L stainless steel blade subjected to massive laser shock peening treatment with square spots[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 1053-1063.
- [20] SUN Boyu, ZHAO Jibin, QIAO Hongchao, et al. Effects of square spot size and beam quality on residual stress of 7050 aluminum alloy by laser shock peening[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 284: 126023.1-126023.10.
- [21] 杨玉致. 机械噪声控制技术[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- [22] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [23] 王瑞荣, 陈伟民, 谢东珠. 斜辐照激光等离子体辐射X光子特性[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(3): 387-390.
WANG Ruirong, CHEN Weimin, XIE Dongzhu. Characteristics of X-ray photons in tilted incident laser-produced plasma[J]. High Power Laser and Particles Beams, 2008, 20(3): 387-390. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)