

# 激光强化数值模拟中加载区域精确设置方法

纪啸天, 张兴权\*, 左立生, 王涛, 裴善报, 张国涛

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243032

**摘要** 提出一种新的加载区域设置方法——面嵌入式加载区域设置方法, 阐述其设置原理和操作步骤, 并与现有的加载区域设置方法进行比较, 最后进行实验验证。研究表明: 面嵌入式加载区域设置方法所得加载区域可以更好地拟合实际问题中的光斑形状和大小, 其精确性不以牺牲零件模型网格质量为代价, 同时, 该方法在多点冲击中可以通过加载区域的平移及复制实现多个冲击面加载, 大大缩短建模过程中的加载区域设置时间, 提高建模效率及模拟精度, 是一种高效的精密加载区域设置方法。

**关键词** 激光技术; 冲击强化; 数值模拟; 面单元; 嵌入单元

**中图分类号** TN249; O242.21

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.051404

## Precise Set for Loading Region in Numerical Simulation of Laser Shocking Peening

Ji Xiaotian, Zhang Xingquan\*, Zuo Lisheng, Wang Tao, Pei Shanbao, Zhang Guotao

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China

**Abstract** In this study, a novel loading set, the set of loading region based on embedded surface, is implemented using the ABAQUS finite element package. When determining the parameters and operations, a comparison is made among the current loading sets, validating the effects of these on the resulting solution. According to our investigations, the loading set based on embedded surface possesses high efficiency. This technique has the ability to predict loads with precision, increasing the efficiency of the loading set under conditions where target elements are of high quality.

**Key words** laser technique; laser shock processing; numerical simulation; surface element; embedded element

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 140.3540; 000.4430

## 1 引言

激光冲击强化是一种新型材料表面处理技术, 它利用强激光辐照工件产生的冲击波细化工件材料表层的晶粒<sup>[1]</sup>, 使工件表面产生冷塑性变形和残余压应力<sup>[2-3]</sup>, 并借此提高工件表层材料硬度、屈服强度等力学性能, 增强其抗疲劳性能和抗应力腐蚀性<sup>[4-5]</sup>。与传统强化技术相比, 激光冲击强化技术能够在工件表面诱导高幅残余压应力并在表层形成更深的残余压应力层, 因而可以大大推迟裂纹萌生的时间, 降低疲劳裂纹的扩展速率<sup>[6-9]</sup>, 增强材料抗击

外物损伤的能力<sup>[10]</sup>, 有效提高工件的疲劳寿命<sup>[11-12]</sup>。

激光冲击强化涉及到激光的脉冲能量、脉冲宽度、光斑大小、材料的力学特性等参数。如果采用试错法来选择合适的参数, 则需要进行大量实验, 不仅要花费大量的时间和金钱, 而且激光器的过度使用会缩短其使用寿命。通过数值模拟并结合典型的实验验证来选择参数不失为一种高效方法。目前, 人们对激光冲击强化数值模拟进行了大量研究, 取得了丰硕的成果<sup>[13-15]</sup>。在数值模拟中, 把冲击波载荷施加到建立的模型表面是必要步骤, 它不仅影响了

**收稿日期:** 2019-08-11; **修回日期:** 2019-08-23; **录用日期:** 2019-09-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(51675002)、安徽省自然科学基金(1708085ME110)、安徽省重点研究与开发计划(201904a05020065)、安徽省高校科学研究项目(KJ2019A0084)

\* **E-mail:** zhxq@ahut.edu.cn

建模过程的效率,还影响了计算结果的精度。目前,将冲击波施加到模型中的方法主要有模型划分法、框选法和单元面拟合法。模型划分法是根据加载区域的形状特征对模型进行分割,使加载区域被划分为独立的几何元素,以方便选择区域。框选法利用软件中的框选功能对单元面进行框选,并通过删减边缘单元面,以实现加载区域定义。单元面拟合法是通过连续选取模型中的单元面来形成特定形状的加载区域,以拟合实际冲击的加载区域。由于模型划分法会导致后续的网格划分时产生不规整的网格,框选法在选取区域时难以确定加载区域的中心,而且还要对所选区域的边缘处单元进行多次删减才能实现,因此,这两种方法在有限元建模时没有得到广泛的应用。目前,使用最为广泛的方法是单元面拟合法<sup>[16]</sup>,该方法在建模时操作简单,但需要连续选择多个单元面,较为繁琐。当模型中单元尺寸等参数发生变化时,必须重新选择加载区域。特别是对多个位置进行多次冲击数值模拟时,需要在多个不同位置依次加载<sup>[17-18]</sup>,每一个冲击位置都需要选择大量单元面,操作过程将变得更加繁杂。在数值模拟中,模拟的精度依赖于网格密度与网格形状。模拟的精度越高,所需要的网格密度就越高,通过拟合法选取的单元面数也就越多,选取的操作就越繁杂。例如,在模拟冲击强化过程中,为了更好地捕捉表面应力波,采用的有限单元的网格长度约为 $0.05\text{ mm}$ <sup>[8]</sup>。对于直径 $\phi 3\text{ mm}$ 的光斑,需要选择约2830个单元面以形成冲击加载区域;而对于直径

$\phi 7\text{ mm}$ 光斑<sup>[19]</sup>,则选取的单元面多达15394个,大量选取操作会导致建模效率降低。在有限元模拟时,为了更好地模拟激光冲击诱导的残余应力场,单元的类型常常选择为三维砖形的C3D8R单元<sup>[18]</sup>,以显示厚度方向上应力梯度。当选取多个三维砖形单元表面的矩形网格以拟合圆形加载区域时,在加载区域的边界处不可避免地产生锯齿状边线,它很难与圆形光斑的边界完全重合,这就降低了加载区域的几何精度,降低了数值模拟结果对实验的参考价值。

本文基于有限元模拟软件ABAQUS提出一种新型加载区域的设置方法——面嵌入式加载法。该方法首先建立一个与光斑大小相同、无厚度无质量的膜面,然后将加载的膜面嵌入零件模型中,再在膜面上施加冲击波载荷,以取代将冲击波的压力直接加载到模型的方法。与传统的拟合法相比,该方法具有较高的精度,特别是在模拟多个位置实施的激光冲击时,加载面在建模过程中可以移动、复制、阵列等,降低模拟的操作复杂性,提高建模效率和数值模拟精度。

## 2 面嵌入式加载法

面嵌入式加载法是将加载的无质量、零厚度的膜面嵌入零件模型加载区域的方法,其原理如图1所示。它主要包括以下4个步骤:建立加载面和零件的模型、划分模型网格、对面区域施加载荷,以及加载面嵌入到指定的区域。

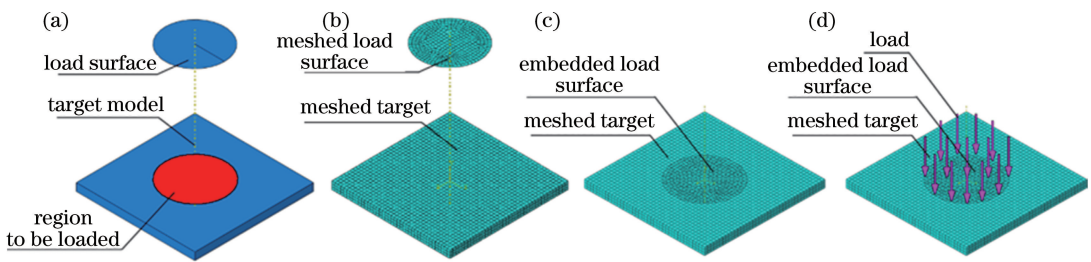


图1 面嵌入式加载法的原理图。(a)模型建立;(b)网格划分;(c)加载面的嵌入;(d)载荷的施加

Fig. 1 Principle of load region set with embedded surface. (a) Establishment of model; (b) mesh partitioning; (c) embedment of load surface; (d) embedment of load

在建立有限元模型时,首先按照靶板零件和激光光斑的几何尺寸,分别建立零件的几何模型和一个与光斑大小相同的加载平面,如图1(a)所示。随后需要对零件和加载的圆平面模型进行网格划分。其中,使用三维实体单元C3D8或C3D20R对零件模型进行网格划分<sup>[16]</sup>,网格单元的大小与文献<sup>[16]</sup>中使用的单元大小相同。加载面的单元类型可以根

据加载的要求选择,但必须能够嵌入到零件实体模型的表面。ABAQUS软件提供面单元(surface element),该单元属于特殊功能单元,与膜单元(membrane element)相似,可以设置面的网格密度;单元行为与无厚度膜单元相同,可以嵌入到零件的实体单元(solid element)。面单元又可以分为通用面单元、圆柱面单元和轴对称面单元3类。其中,通

用面单元用于三维模型,圆柱面单元用于圆柱体圆周曲面的模型,轴对称面单元则用于轴对称模型中。因此,根据强化零件表面的几何特征,选择相应的面单元类型,平面激光冲击强化模拟中的单元一般选用通用面单元<sup>[16-17]</sup>;而曲面冲击强化的单元则要选择圆柱单元。在有限单元中,三维六面体单元的棱边通常包含含有中间节点与无中间节点两种类型,相应的二维四边形单元也包括含有中间节点与不含有中间节点两种类型,如图2所示。在数值模拟中,零件实体模型的单元类型通常是C3D8R,它是一个三维六面体八节点缩减积分单元,其每个单元面存在4个节点,单元棱边上无中间节点。因此,通用面单元应与之对应,也选用无中间节点的四节点缩减积分单元,面单元代号为SFM3D4R。采用上述的单元类型分别对零件的几何模型和加载面进行网格划分,如图1(b)所示。随后,通过ABAQUS软件中的嵌入(embedded)功能把加载面嵌入到零件模型表面的指定区域,如图1(c)所示。最后,将冲击波的载荷施加到加载面上,如图1(d)所示。由于设置的加载面零厚度、无质量,能够传递载荷,这种面嵌入式加载法不会干扰原始模型受载,不影响原始模型的变形等行为。因此,面嵌入式加载法在嵌入时不对原始模型的几何结构产生破坏,不需要针对加载而改变原始模型的拓扑结构,也不需要针对加载面进行厚度与密度设置,仅需要单独选取加载面的单元类型,通过嵌入功能建立加载面与零件模型之间的关系。

在嵌入加载面时,软件会自动对零件基体模型的单元与嵌入面的单元进行检测,确定二者节点之间的几何关系。倘若嵌入单元的某一节点处于基体

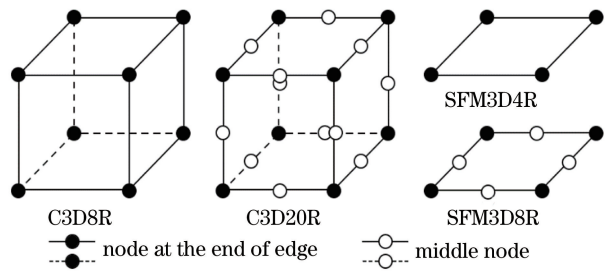


图2 三维实体单元与面单元的节点分布示意图  
Fig. 2 Distribution of nodes in three-dimensional solid element and surface element

单元之中,该节点将会被消除平动自由度并成为嵌入节点。软件会对该节点对应的基体单元节点自由度进行插值运算,以代替嵌入节点被消除的平动自由度。嵌入单元允许存在转动自由度,但转动自由度不会因单元的嵌入而被消除或替代。单元的嵌入允许在不同的单元类型之间进行。因此,加载面的单元可以通过单元嵌入技术嵌入到零件模型表面。当加载面单元嵌入到零件模型表层单元时,如图3所示,系统会根据单元的类型构建“形函数”,实现将分节点集中力等效至节点上。零件的三维实体单元存在8个节点,定义节点某一位移结果分量的形函数  $N$  为

$$N = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4 \quad N_5 \quad N_6 \quad N_7 \quad N_8], \quad (1)$$

单元内每个点均有  $x, y, z$  3 个方向的位移,所以单元内任意一点  $i$  的形函数为

$$[N]_i = \begin{bmatrix} N_{ix} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & N_{iy} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & N_{iz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:下标  $i$  为点的代号;下标  $x, y, z$  代表位移方向。 $[N]_i$  是一个  $3 \times 24$  的矩阵,且

$$\begin{cases} N_{ix} = [N_{1x} & N_{2x} & N_{3x} & N_{4x} & N_{5x} & N_{6x} & N_{7x} & N_{8x}] \\ N_{iy} = [N_{1y} & N_{2y} & N_{3y} & N_{4y} & N_{5y} & N_{6y} & N_{7y} & N_{8y}] \\ N_{iz} = [N_{1z} & N_{2z} & N_{3z} & N_{4z} & N_{5z} & N_{6z} & N_{7z} & N_{8z}] \end{cases} \quad (3)$$

在有限单元法中,均采用等效方法对体积力、面力、集中力进行处理。假设单元内  $c$  点存在一个微小位移  $\delta_c$  和一个集中载荷  $P_c$ ,则在单元节点上存在等效微小位移  $\delta_c^e$  和一个等效载荷  $P_c^e$ 。其中,  $\delta_c$  和  $P_c$  均是三维向量,  $\delta_c^e$  和  $P_c^e$  均是 24 维向量。根据虚功原理可得:

$$(\delta_c^e)^T P_c^e = (\delta_c)^T P_c. \quad (4)$$

单元内任意一点的位移均可用节点位移线性表示,

因此

$$[N]\delta_c^e = \delta_c^e. \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,可得

$$P_c^e = [N]^T P_c. \quad (6)$$

若单元内存在  $n$  个集中载荷,则节点的等效载荷为各集中载荷在节点等效载荷的叠加。

对于面嵌入式加载法,在将载荷施加到加载面后,系统会自动将载荷离散到加载面单元的节点上,

而零件模型单元中加载面节点上的载荷等价于作用在非节点位置的集中力,假设该集中力为  $\mathbf{P}_c = [0 \ 0 \ F]^T$ ,作用在  $c$  点  $(x_c, y_c, z_c)$  上,根据(6)式,等效载荷  $\mathbf{P}_c^e$  可表示为

$$\mathbf{P}_c^e = \begin{bmatrix} N_{cx} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & N_{cy} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & N_{cz} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$x=x_c$   
 $y=y_c$   
 $z=z_c$

解得

$$\begin{cases} \mathbf{P}_c^e = [\mathbf{P}_{cx}^e & \mathbf{P}_{cy}^e & \mathbf{P}_{cz}^e]^T \\ \mathbf{P}_{cx}^e = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{P}_{cy}^e = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{P}_{cz}^e = [N_{1z}F \ N_{2z}F \ N_{3z}F \ N_{4z}F \ N_{5z}F \ N_{6z}F \ N_{7z}F \ N_{8z}F]^T_{z=z_c} \end{cases} \quad (8)$$

由此,等效载荷被计算出来,并被加载到零件模型的节点上,如图 3(c)所示。由于加载面的密度预

先设置为零,其单元没有质量属性而不承担力学作用,这使得载荷的作用被完全传递到零件模型上。

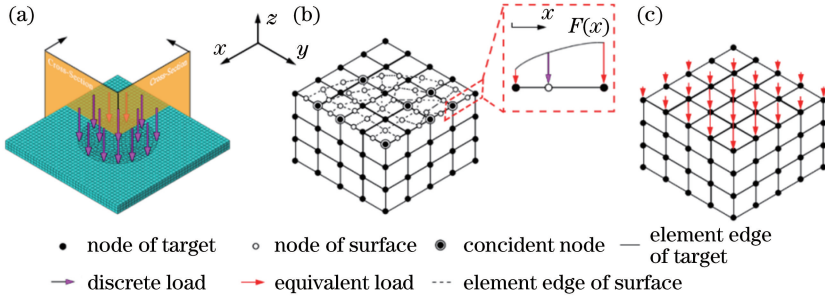


图 3 加载面单元的嵌入。(a)模型、截面与载荷;(b)节点分布与载荷等效;(c)零件等效载荷分布

Fig. 3 Embedding elements of load surface and loading. (a) Model, cross-sections, and loads; (b) distribution of nodes and equivalence of load; (d) distribution of equivalent load on target

在激光冲击强化中,使用的光斑通常是圆形光斑,加载区域是一个圆形区域。采用拟合法和面嵌入式加载法的设置结果如图 4 所示,它可以直观地反映出设置方法在设置精度上的差异。从图 4 可以看到,通过单元面拟合法所得加载区域存在明显的锯齿状边界,加载区域的几何精度不高。相比之下,通过面嵌入式加载法所得加载区域与实际加载区域完全重合,加载区域具有较高的几何精度。

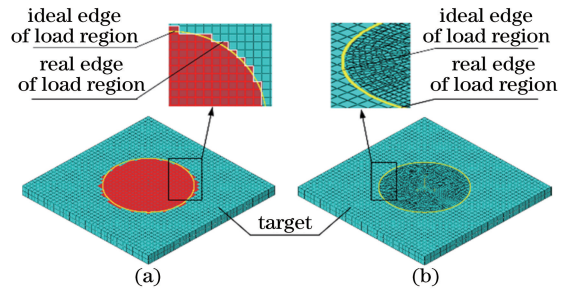


图 4 两种设置方法的比较。(a)单元面拟合法;  
(b)面嵌入式加载法

Fig. 4 Comparison between two sets for load region. (a) The set based on fitting with element surfaces; (b) the set based on embedded surface

在激光多点冲击强化中,需要采用多个激光脉冲对多个位置依次冲击,其对应的数值模拟也需要相继对各个位置进行模拟才能完成。在多次冲击模拟的建模过程中,零件实体和加载面的建模与上述单点冲击数值模拟的建模相同,如图 5(a)、(b)所示。当嵌入加载面时,可以通过复制的方法将加载面连续嵌入到模型需要冲击的多个位置,也可以根据零件加载位置的要求通过阵列的方法建立多个加载面,一次性嵌入到零件实体模型加载位置中去,如图 5(c)所示。在载荷施加的过程中,只需要根据模型所对应的冲击位置的加载面加载,当该位置的数值模拟完成后,再顺次对下一个位置的加载面进行

加载和计算,直至完成所有位置的数值模拟为止,如图 5(d)~(f)所示。从上述过程可以看出,加载面仅需要建立一次,各个冲击区域的加载面可以通过复制而得。但采用单元面拟合法模拟多点冲击时,则需要对多个冲击点的每个位置连续选择多个单元面以拟合加载区域,再进行加载,操作非常繁琐。显然,面嵌入式加载法操作简单,具有较高的加载效率,而且冲击的点数越多,优势越明显。

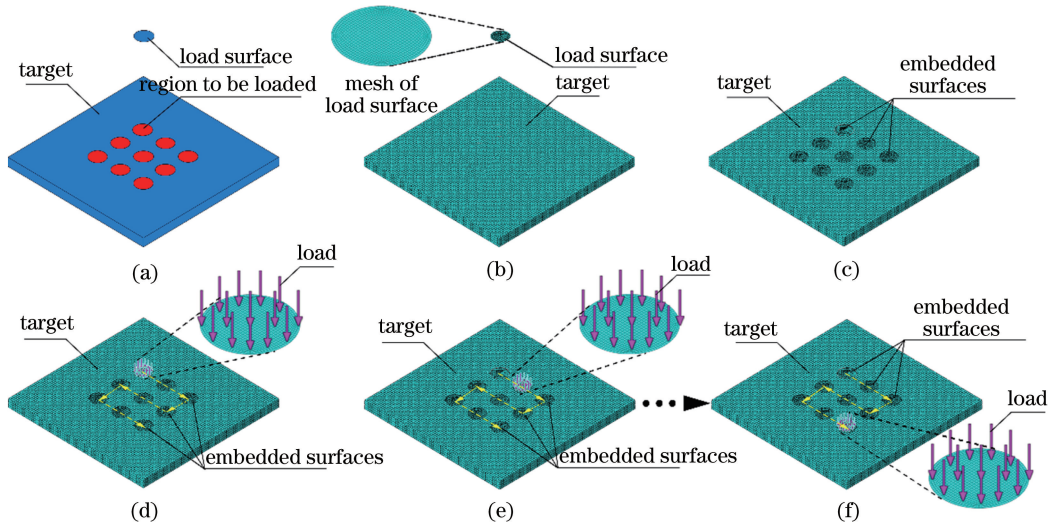


图5 多点冲击加载过程示意图。(a)零件及加载面几何模型;(b)网格划分;(c)加载面嵌入;(d)第1点冲击;(e)第2点冲击;(f)第9点冲击

Fig. 5 Process of loading in multi-spot laser shocking. (a) Geometrical model of target and load surface; (b) mesh for target and load surface; (c) embedding the loading surface; (d) load on spot 1; (e) load on spot 2; (f) load on spot 9

### 3 模拟算例

为了验证加载面的影响和面嵌入方法的计算精度,将本文方法模拟得到的结果与单元面拟合法得到的结果进行对比。首先利用有限元分析软件 ABAQUS 建立  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  零件的几何模型,在零件上表面中心实施冲击的光斑直径为  $\phi 2.5\text{ mm}$ 。零件的材料选用 2024-T351 铝合金,其密度为  $2780\text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量为  $72\text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.33$ 。材料本构模型选用适应于高应变率条件下的 J-C 本构模型<sup>[20]</sup>。材料参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$ 、 $\dot{\epsilon}$  分别为  $360\text{ MPa}$ 、 $684\text{ MPa}$ 、 $0.0083$ 、 $0.73$  和  $1$ 。采用 Fabbro 载荷模型<sup>[21]</sup>,峰值压力选取  $4.6\text{ GPa}$ ,载荷服从高斯分布,载荷曲线如图 6 所示。

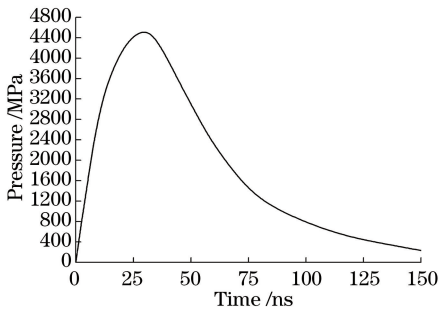


图6 算例使用的载荷曲线

Fig. 6 Load curve for simulation example

采用面嵌入式加载法设定加载区域,经过数值计算,输出 Mises 等效应力云图如图 7(a)所示。

可以看到,冲击区域的应力云图中出现一大块白色区域。在 ABAQUS 软件的结果可视化模块中,软件默认无结果输出的实体显示为白色<sup>[22]</sup>,且无结果实体不能在隐藏有结果实体的条件下显示。通过图 7(a)的放大图可以发现白色区域恰与加载面嵌入区域完全重合,因此认为,白色区域是由加载面的嵌入引起,加载面没有应力结果的输出,这也意味着加载面在模拟的求解过程中没有承受任何力学效应,密度为 0 的设置求解过程中起到了作用。移除加载面,零件实体上的残余应力如图 7(b)所示,可以看出,在冲击载荷作用下,工件表面产生了残余压应力,残余压应力的最大值为  $338.6\text{ MPa}$ 。冲击载荷作用下的位移变形云图如图 8 所示。可以看出,有加载面 and 没有加载面的位移云图完全相同,变形完全相同,最大位移值均为  $0.0339\text{ mm}$ 。这再次验证了加载面的嵌入对模拟结果的精度没有影响,同时也说明加载面能够随着实体表面的变形而变形,可满足多点冲击模型搭建的要求。

采用单元面拟合法得到的应力和变形的结果分别如图 9 和图 10 所示。从图 9 可以观察到,单元面拟合法所得的最大 Mises 应力为  $326.2\text{ MPa}$ ,应力大小以冲击点为中心沿径向递减。从图 10 可以看出,激光冲击区域发生了变形,变形的最大值位于激光冲击区域中心,沿半径方向递减,变形的最大值为  $0.03179\text{ mm}$ 。

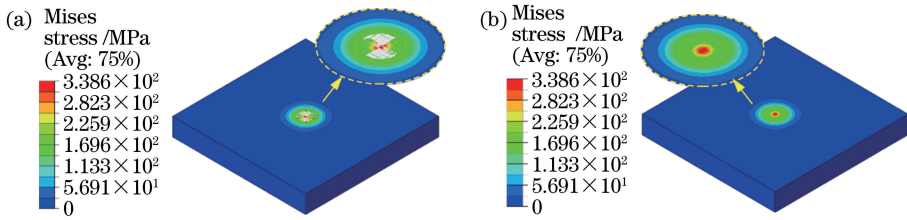


图 7 面嵌入式加载法的 Mises 应力云图。(a)带有加载面;(b)移除加载面

Fig. 7 Mises stress nephogram of the set based on embedded surface. (a) Accompanied with load surface; (b) removing load surface

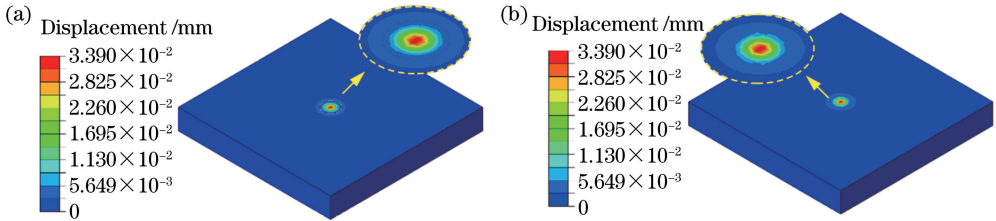


图 8 面嵌入式加载法的位移结果。(a)嵌入加载面;(b)移除加载面

Fig. 8 Results of displacements of the set based on embedded surface. (a) Accompanied with load surface; (b) removing load surface

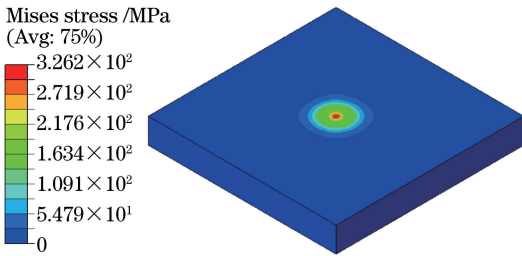


图 9 单元面拟合加载法的 Mises 应力

Fig. 9 Mises stress of the set of fitting with element surfaces

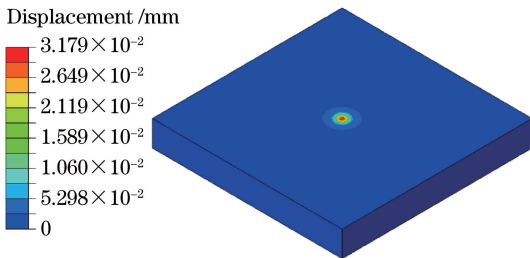


图 10 单元面拟合加载法的位移

Fig. 10 Displacement of the set of fitting with element surfaces

比较面嵌入式加载法和单元面拟合法的结果可以发现,二者存在稍许差异。对于 Mises 应力,面嵌入式加载法所得的最大值为 338.6 MPa,单元面拟合法所得的最大值为 326.2 MPa,两者相差 12.4 MPa。对于位移结果,面嵌入式加载法所得最大的大值为 0.0339 mm,单元面拟合加载法所得的最大值为 0.03179 mm,两者仅相差 0.00211 mm。这

些差异主要是由加载的差异引起的。在面嵌入式加载法中,载荷的施加有离散及等效两个步骤,而单元面拟合加载法仅有离散步骤。

#### 4 模拟精度的实验验证

为了确认面嵌入式加载区域设置的计算精度,将面嵌入式加载法的计算结果、单元面拟合法的计算结果与对应的实验结果进行比较。

对外形尺寸为 30 mm×30 mm×4 mm 的强化表面涂覆有吸收层的 2024-T351 铝合金试样进行无搭接 9 点冲击,冲击点中心距为 5 mm,激光类型为 Q 转换脉冲激光、波长为 1064 nm、半峰全宽为 15~20 ns、光斑直径为  $\phi 3$  mm、频率为 1 Hz。

冲击完成后试样的表面如图 11(a)所示,去除吸收层后的工件表面如图 11(b)所示。从图 11(a)、(b)可以看出,在激光辐照下,吸收层的表面被烧蚀,工件的表面在冲击波的作用下发生了明显的塑性变形。取中心冲击点作为研究对象,测出其变形的形貌如图 11(c)所示。

根据冲击微坑形貌测量结果,导出零件中心冲击点的形貌曲线,如图 12 所示。从图 12(b)可以看到,零件中心冲击点的最大深度约为 0.035 mm。

将上述两种不同加载区域设置方法得到的模拟结果与实验结果进行对比,结果如图 13 所示。可以发现:两模拟结果与实验结果基本相同。其中,实验结果变形最大深度约 0.035 mm,单元面拟合法得到

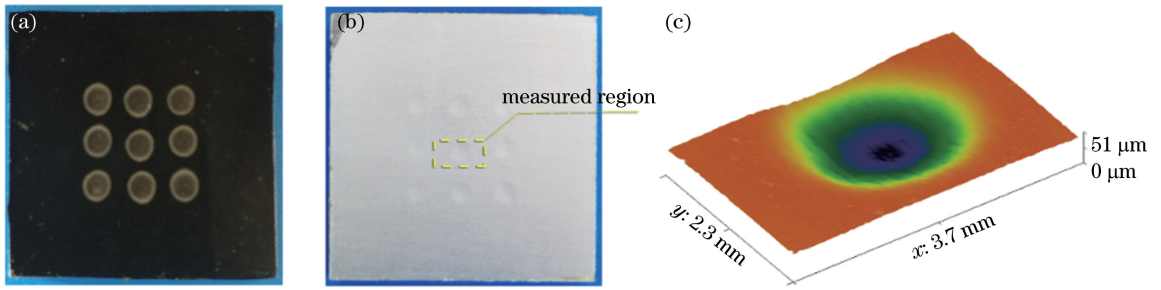


图 11 冲击完成后的零件。(a)吸收层表面;(b)工件试样表面;(c)所选冲击微坑的形貌

Fig. 11 Shocked sample. (a) Photograph of absorbed layer; (b) photograph of sample surface; (c) morphology of selected crater

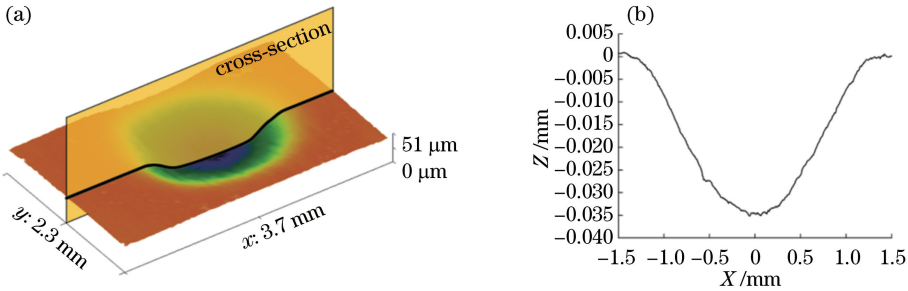


图 12 冲击微坑形貌测量结果。(a)测量位置;(b)剖面轮廓线

Fig. 12 Morphology and its curve of crater. (a) Measuring location; (b) cross-section profile

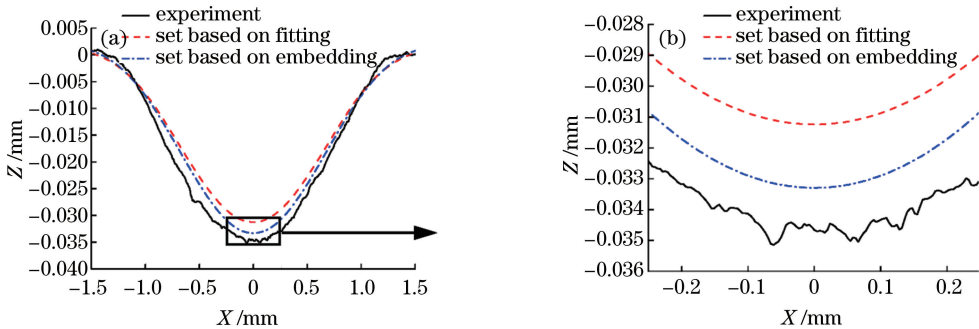


图 13 实验与模拟得到的形貌曲线。(a)整体曲线;(b)局部放大图

Fig. 13 Comparison of profiles between experiment and simulation. (a) Whole profile; (b) partial enlargement

的最大深度约 0.031 mm,平面嵌入式加载法达到的最大深度约 0.033 mm。由此可见,面嵌入式加载法所得形貌结果与实验结果更为接近,因此该方法具有更高的精度。

## 5 结 论

利用在零件模型受载表面上嵌入平面并将其定义为加载区域的方法,实现了激光冲击强化过程中所需冲击载荷的施加。通过对其加载原理的分析、加载区域设置方法的比较、算例验证以及实验验证可以得到:面嵌入式加载区域设置方法仅通过节点自由度的替换将加载面与零件模型融为一体,不影响零件模型的几何结构,在保证零件模型网格质量的前提下,避免模型建立与网格划分的误差,提高加

载区域的设置精度。同时,面嵌入加载区域设置方法能够在模拟过程中因单元面拟合而产生的误差,提高了冲击区域的加载精度和计算精度,特别是在多点冲击的数值模拟中,面嵌入式加载法所用的加载面可以通过阵列等方式完成,具有较高的建模效率,因而在多光斑或多冲击区域的数值模拟中有较好的应用前景。

## 参 考 文 献

[1] Sun R J, Li L H, Zhu Y, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and tensile properties of TC17 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(2): 491-499.  
孙汝剑, 李刘合, 朱颖, 等. 激光冲击强化对 TC17

- 钛合金微观组织及拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(2): 491-499.
- [2] Sun R J, Zhu Y, Guo W, et al. Effect of laser shock processing on surface morphology and residual stress field of TC17 titanium alloy by FEM method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(1): 187-193.  
孙汝剑, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面形貌及残余应力场影响的有限元数值模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 187-193.
- [3] Li X, He W F, Nie X F, et al. Regularity of residual stress distribution in titanium alloys induced by laser shock peening with different energy spatial distributions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061402.  
李翔, 何卫锋, 聂祥樊, 等. 不同能量空间分布激光冲击钛合金残余应力的分布规律 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061402.
- [4] Jiang C Y, Wang C Y, Luo K Y, et al. Effects of laser shock layer number and Cl-concentration on anticorrosion behaviors of AM50 Mg alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0902004.  
江崇远, 王长雨, 罗开玉, 等. 激光冲击层数和氯离子浓度对 AM50 镁合金耐腐蚀性能的影响 [J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0902004.
- [5] Ning C Y, Huang Y H, Zhang G Y, et al. Wear resistance and electrochemical properties of 6061 aluminum alloys treated by laser shock peening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061403.  
宁成义, 黄亿辉, 张广义, 等. 激光冲击强化 6061 铝合金的耐磨性能及电化学性能 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061403.
- [6] Ren X D, Zhang Y K, Yongzhuo H F, et al. Effect of laser shock processing on the fatigue crack initiation and propagation of 7050-T7451 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(6): 2899-2903.
- [7] Zhang X, Li L, Qi X, et al. Experimental and numerical investigation of fatigue crack growth in the cracked gear tooth [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2017, 40(7): 1037-1047.
- [8] Huang S, Zhou J Z, Sheng J, et al. Effects of laser peening with different coverage areas on fatigue crack growth properties of 6061-T6 aluminum alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 47: 292-299.
- [9] Zhang X Q, Li H, Yu X L, et al. Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate [J]. Materials & Design (1980-2015), 2015, 65: 425-431.
- [10] Li D L, He W F, You X, et al. Experimental research on improving fatigue strength of wounded TC4 titanium alloy by laser shock peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0702006.  
李东霖, 何卫锋, 游熙, 等. 激光冲击强化提高外物打伤 TC4 钛合金疲劳强度的试验研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0702006.
- [11] Chai Y, Ren J, He W F, et al. Effect of laser shock processing on the fatigue property of K4030 alloy blade [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011405.  
柴艳, 任军, 何卫锋, 等. 激光冲击强化对 K4030 合金叶片疲劳性能的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011405.
- [12] Zhang J, Gu X, Zhu L, et al. Numerical simulation of fatigue life of 7050 aluminum alloy processed by laser shock processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3192-3195.  
张洁, 顾祥, 祝乐, 等. 激光冲击强化后 7050 铝合金疲劳寿命的数值模拟 [J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3192-3195.
- [13] Wu W, Liang N G, Yu G, et al. Numerical simulation of pulsed laser surface hardening and the influence of material thermophysical parameters on hardened zone [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(5): 707-712.  
吴炜, 梁乃刚, 虞钢, 等. 脉冲激光表面强化数值模拟及热物性参量影响 [J]. 中国激光, 2005, 32(5): 707-712.
- [14] Zhang X Q, Huang Z W, Chen B, et al. Investigation on residual stress distribution in thin plate subjected to two sided laser shock processing [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 146-155.
- [15] Zhou J Z, Yang X D, Huang S, 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.  
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.
- [16] Zhang X Q, Li H, Duan S W, et al. Modeling of residual stress field induced in Ti-6Al-4V alloy plate by two sided laser shock processing [J]. Surface and



- Coatings Technology, 2015, 280: 163-173.
- [17] Brockman R A, Braisted W R, Olson S E, et al. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 36(1): 96-108.
- [18] Hu Y, 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, 251: 197-204.
- [19] Liu S W, Guo D H, Wang S B, et al. Effects of experimental parameters on LSP[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(10): 937-940.  
刘世伟, 郭大浩, 王声波, 等. 实验参数对激光冲击强化效果的影响[J]. 中国激光, 2000, 27(10): 937-940.
- [20] Johnson G R. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, April 19-21, 1983, The Hague, Netherlands. [S. l.: s. n.], 1983: 541-547.
- [21] 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.
- [22] Dassault Systèmes<sup>®</sup>. Abaqus analysis user's guide [EB/OL]. [2019-08-20] <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/usb/default.htm>.