

激光与光电子学进展

UO₂陶瓷芯块-316Ti 不锈钢复合结构激光切割
温度场仿真研究史新灵^{1,2}, 肖魏魏^{1**}, 宋妮妮¹, 陈志勇³, 王湘江¹, 王新林^{1,2*}¹南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001;²超快微纳技术与激光先进制造湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001;³南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001

摘要 为了研究激光切割 UO₂ 陶瓷芯块-316Ti 不锈钢复合结构温度场的分布, 考虑了材料的热物性参数与温度的关系, 运用 ANSYS 有限元软件模拟了该复合结构的激光切割过程, 通过 ANSYS 的 Fluent 模块实现激光热源 C 语言程序的 UDF 加载与编译。研究了不同激光切割工艺参数下的温度分布云图, 结果表明: 温度分布主要呈现为类彗尾状; 最高温度集中在切割热源中心处, 工件表面的最高温度随着激光功率的增加和切割速度的降低而升高; 当激光功率过小或切割速度过大时, 工件会因热量输入不足而切不透; 当激光功率过大或切割速度过小时, 切缝会因材料熔化区域变大而变宽。仿真结果可以对实际切割过程的工艺参数优化提供参考。

关键词 激光技术; 激光切割; UO₂ 陶瓷芯块-316Ti 不锈钢复合结构; 温度场; 切割工艺参数

中图分类号 TG485

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714011

Temperature-Field Simulation of UO₂ Ceramic Pellets-316Ti Stainless
Steel Composite Structure During Laser CuttingShi Xinling^{1,2}, Xiao Weiwei^{1**}, Song Nini¹, Chen Zhiyong³, Wang Xiangjiang¹, Wang Xinlin^{1,2*}¹School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;²Hunan Provincial Key Laboratory of Ultra-Fast Micro-Nano Technology and Advanced Laser Manufacturing, Hengyang, Hunan 421001, China;³School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China

Abstract To investigate the temperature-field distribution of UO₂ ceramic pellets-316Ti stainless steel composite structure during laser cutting processes, considering the relationship between thermal physical parameters and the temperature of materials, we simulated the laser cutting process for the composite structure using ANSYS finite-element software. User defined function loading and compiling of laser heat source C language program was realized using the Fluent module of ANSYS. The temperature distribution cloud maps were studied at different cutting parameters. The results show that temperature distribution is mainly expressed as comet-like state. Maximum temperature is concentrated at the center of the cutting heat source, and it increases with increasing laser power and decreasing cutting speed. When the laser power is too low or cutting speed is too high, the workpiece due to insufficient heat input will not be cut through. If the laser power is too high or cutting speed is too low, the kerf width widens due to the larger material melting area. The simulation results can be used to optimize the parameters of the actual cutting process.

收稿日期: 2020-10-17; 修回日期: 2020-11-19; 录用日期: 2020-12-17

通信作者: *wxl_ly000@aliyun.com; **xiaowei_tw618@sina.com

Key words laser technique; laser cutting; UO_2 ceramic pellets-316Ti stainless steel composite structure; temperature-field; cutting parameters

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 140.6810

1 引言

核燃料元件不仅是反应堆的核心部件,还是反应堆的能量来源,也是包容放射性裂变产物的第一道安全屏障^[1]。乏燃料后处理是核燃料循环中重要的一环,其中的首端处理是后处理流程中技术难度最大的部分,包括机械处理和化学溶解两个步骤^[2-4]。机械处理就是使包壳中的轴芯块暴露出来,以便于下一步的化学溶解乏燃料芯块,进而实现分离和再回收利用乏燃料中未裂变的铀以及新产生的超铀和裂变元素的目的。现阶段,国内外投入使用的后处理厂大多数采用机械剪切的方式实现乏燃料组件的切割,比如:法国 UP3 后处理厂采用水平进料、整束切割的剪切机^[3],英国的 THORP 厂选用剪切刀具及夹紧装置运动方向与水平送料方向垂直的立式剪切机^[4],俄罗斯采用卧式剪切机^[4]。但是,机械剪切的方式存在剪切开口率的问题,开口率 $<30\%$ 时会影响下一步的溶解率,而且存在噪声大、振动大以及刀具磨损、刀具更换困难等问题。

激光作为 20 世纪新兴的产物,已被广泛应用于切割、焊接和表面熔覆等领域。激光切割技术可以实现对复合材料^[5-7]、高硬脆性金属^[8-10]、非金属^[11-12]、陶瓷^[13-15]等材料的快速切割,该技术属于非接触式加工,在硬件(机床)和软件(切割工艺)方面都在不断完善。激光切割技术与传统加工方式相比具有去除速度快、加工效率高以及不存在刀具磨损、机械振动等优点。

激光切割温度场是一个非线性瞬态导热问题,切割过程伴随着相变的发生,而且热传导微分方程的求解较为困难,常规手段无法解决,需要用计算机仿真进行研究。叶圣麟等^[16]基于 ANSYS 软件对激光切割脆性材料的温度场进行了模拟研究,讨论了激光切割玻璃和陶瓷过程中温度场的变化规律。袁伟^[17]利用 ANSYS 有限元软件对脉冲激光切割 Q235A 钢板过程中温度场的变化进行了仿真分析,结果发现:随着激光功率的增大,工件温度升高;随着切割速度的增大,工件温度降低,切割效率提高。Saternus 等^[18]通过 Abaqus 软件对钢板激光切割过程进行了数值分析,分析了所选参数对热源能效和切割速度的影响。任宁等^[19]利用 ANSYS 有限元软

件实现了钕铁硼材料在脉冲激光辐射下的三维瞬态仿真,然后对切割过程进行了数值模拟研究,得到了温度场的分布情况;探究了激光功率、脉冲宽度和切割速度对试样温度场分布的影响;同时结合试验研究了激光切割工艺参数对温度场的影响规律,验证了所建模型的准确性。于冬洋等^[20]根据复合材料混合定律设定材料的物性参数,建立了单层碳纤维复合材料(CFRP)的三维有限元模型,模拟了不同碳纤维铺设角度和树脂含量的单层 CFRP 的激光切割过程,研究了碳纤维铺设角度和树脂含量对激光能量传递方向及切割质量的影响,并进行了相应的试验验证,结果表明误差在 10% 左右。

区别于常用 ANSYS 软件通过 APDL 语言实现激光热源加载,本文通过 ANSYS 软件的 Fluent 模块,利用 UDF 功能实现了双椭圆激光热源的加载,采用分层、分块的方式进行建模、网格划分,模拟了激光切割 UO_2 陶瓷芯块-316Ti 不锈钢复合结构过程中温度场的演变,分析了不同激光功率和切割速度下的温度分布,对实际切割过程中工艺参数的选择提供了参考。

2 温度场分析

2.1 模型假设

- 1) 工件固定不动,激光束沿 y 轴正方向匀速移动;
- 2) 温度场只受热输入方式和热物性参数的影响;
- 3) 被加工材料各向同性,即材料的热物理性能与位置无关,但与温度呈分段线性关系。

2.2 几何模型及网格划分

模拟使用的材料为 UO_2 陶瓷芯块-316Ti 不锈钢包壳管,激光以恒定速率沿 y 轴正方向进行切割。考虑到在激光切割过程中上下两部分材料性能不同,因此采用分层、分块的方式在 Workbench 中建立了如图 1 所示的有限元分析模型。在不影响考察温度场的情况下,同时为了节省软件的求解时间,用尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3.25\text{ mm}$ 的长方体简化模型代替原有工件,图 1 中上部分表示 316Ti 不锈钢包壳管,其尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1.25\text{ mm}$,下部分

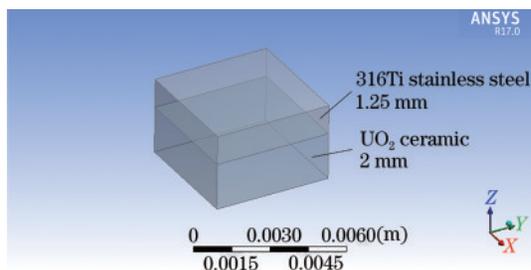


图 1 工件的几何模型

Fig. 1 A geometric model of workpiece

表示 UO_2 陶瓷芯块, 其尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。

将在 Workbench 中建好的几何模型导入 ICEM CFD 中, 划分网格, 如图 2 所示。网格划分的原则为六面体网格划分, 以便于对模型中不同位置的网格进行灵活处理。在激光切割路径左右宽 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的区域内采用网格均分的方式进行网格的细化, 网

格单元尺寸为 $10\text{ }\mu\text{m}$; 远离激光扫描区域采用不均匀的网格划分, 网格单元尺寸由 $10\text{ }\mu\text{m}$ 到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 向两侧过渡; 在厚度方向上, 对 316Ti 不锈钢区域采用较细的网格进行均分, 网格单元尺寸为 $10\text{ }\mu\text{m}$; 对 UO_2 陶瓷芯块区域采用不均匀的网格进行划分, UO_2 陶瓷芯块近 316Ti 不锈钢区域最小网格的单元尺寸为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 网格单元尺寸向 UO_2 陶瓷芯块底部区域过渡, 最大网格单元尺寸为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。网格划分所用网格单元的尺寸皆小于激光光斑尺寸。

2.3 材料的热物性参数

在激光切割过程中, 被加工材料的温度随时间、空间急剧变化, 材料的热物性参数也会相应发生较大变化。ANSYS 软件需要输入材料在不同温度下的热物性参数来建立相应的材料性能数据库。近年来, 出现了多款用于计算材料性能的模拟软

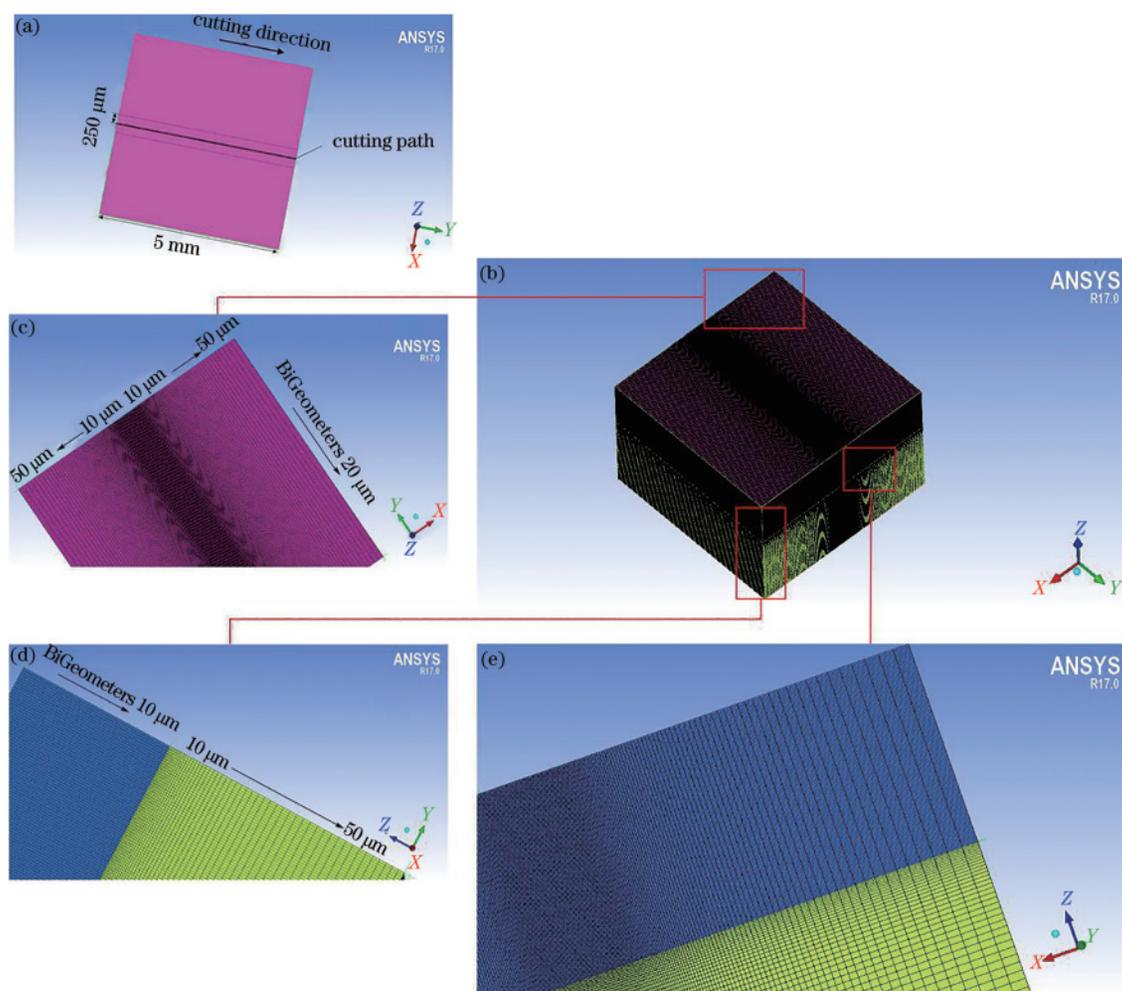


图 2 网格划分模型。(a) 切割路径示意图; (b) 整体网格划分; (c) 上表面局部网格划分; (d) Y-Z 侧面局部网格划分; (e) X-Z 侧面局部网格划分

Fig. 2 Meshing of model. (a) Schematic of cutting path; (b) overall meshing; (c) local meshing on upper surface; (d) local meshing on Y-Z side; (e) local meshing on X-Z side

件,比如 Thermo-Calc、JMat Pro、Pandat、Fact Sage 等,且很多研究已证明了这类软件的可靠性与准确性。基于表 1 所示的 316Ti 不锈钢的化学成分,本

文选用 JMat Pro 来得到其热物性参数(比热容 c 、热导率 λ),结果如图 3 所示。316Ti 不锈钢的密度为 7995 kg/m^3 ,熔点为 $1434 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 1 316Ti 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316Ti stainless steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
Mass fraction / %	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.035	≤ 0.03	16.0–19.0	11.0–14.0	1.80–2.50	$5 \times w_c\% - 0.7$

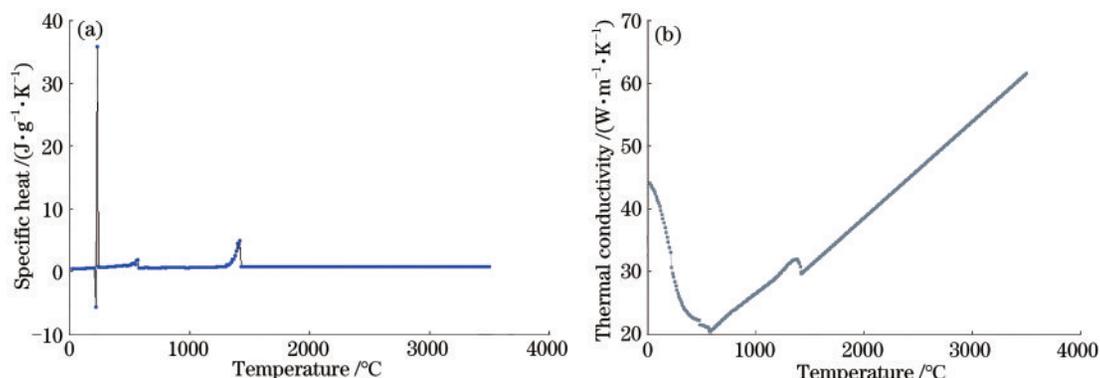


图 3 316Ti 不锈钢热物性参数随温度的变化。(a)比热容;(b)热导率

Fig. 3 Variation of thermophysical parameters of 316Ti stainless steel with temperature. (a) Specific heat; (b) thermal conductivity

UO_2 陶瓷芯块的密度为 10960 kg/m^3 ,熔点为 $2847 \text{ }^\circ\text{C}$,通过文献[21-22]可得其比热容 c 、热导率 λ 随温度变化的公式。当 $298.15 \text{ K} \leq T \leq 3120 \text{ K}$ 时,比热容为

$$c_p(T) = 52.1743 + 87.951s - 84.2411s^2 + 31.542s^3 - 2.6334s^4 - 0.71391s^{-2}; \quad (1)$$

当 $3120 \text{ K} < T \leq 4500 \text{ K}$ 时,比热容为

$$c_p(T) = 0.25136 + \frac{1.3288 \times 10^9}{T^2}, \quad (2)$$

式中: $s = T/1000$; T 为温度,单位是 K; c_p 为比热容,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

致密度为 95% 的 UO_2 的热导率 λ_p 为

$$\lambda_p = \frac{100}{6.548 + 23.533s} + \frac{6400}{s^{5/2}} \exp\left(\frac{-16.35}{s}\right), \quad (3)$$

完全致密的 UO_2 (孔隙率为 0) 的热导率为

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_p}{1 - \alpha p}, \quad \alpha = 2.6 - 0.5s, \quad (4)$$

式中: $s = T/1000$; T 为温度; p 为孔隙率。由 (3)、(4) 式可以得到完全致密的 UO_2 的热导率 λ_0 。

2.4 移动热源加载

在对激光热源的处理上,本文选择双椭球体热源模型,通过体热源的方式将激光热源加载在相应的网格单元上。该模型描述的热流分布在一定的体积内,热流密度峰值和热源有效作用半径沿厚度

方向均呈衰减特性,移动方向前方的热流密度梯度较大,而移动方向后方的热流密度梯度较小,如图 4 所示。

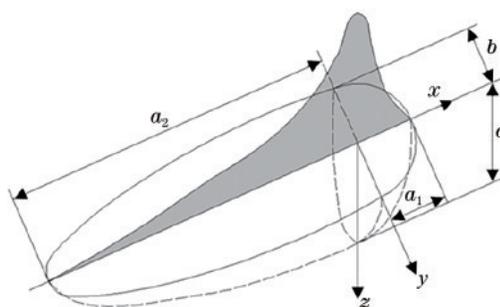


图 4 双椭球体热源模型

Fig. 4 Double ellipsoid body heat source model

在利用 ANSYS 的 Fluent 模块进行热分析过程中,采用瞬态分析方法模拟激光切割过程中的温度分布及变化。因此,对于激光热源的移动过程,可将其在空间域的变化离散到时间域的变化上,并通过设定合适的时间步长和循环加载的方式来实现激光热源的移动。由于激光热源模型是随着空间和时间变化的,因此在 ANSYS 的 Fluent 模块中可先将其数学模型编写为软件可以识别的 C 语言程序,然后通过 Fluent 中的 UDF 功能进行 C 语言程序的加载和编译,最后以源项的形式将其添加到能量方程中。激光热源 q 在三维坐标下的数学表达式为

$$q_1(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3} f_1 Q}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0, \quad (5)$$

$$q_2(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3} f_2 Q}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0, \quad (6)$$

式中： f_1, f_2 分别为热源前后两部分的能量分布系数； a_1, a_2, b, c 为热源模型的分布参数，其中 a_1 为前 1/4 椭球的长半轴， a_2 为后 1/4 椭球的长半轴。部分参数具有以下关系：

$$f_1 + f_2 = 2, f_1 = \frac{2a_1}{a_1 + a_2}, f_2 = \frac{2a_2}{a_1 + a_2}. \quad (7)$$

2.5 边界条件

对于激光切割温度场模拟中工件各个表面的边界条件，作如下介绍：

1) 对于工件的上表面，其温度不仅受激光热源和不锈钢材料热传导的影响，还受空气自然对流换热和辐射换热这两种散热方式的影响，故其边界条件的数学表达式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -Q(x, y, z, t) + h(T_w - T_0) + \varepsilon_0 \sigma (T_w^4 - T_0^4), \quad (8)$$

式中： $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度变化率； λ 为材料的热导率； Q 为不锈钢上表面的热生成率（即激光热源）； h 为空气的自然对流换热系数，其值取 10，单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ ； T_w 为工件表面某一单元在某时刻的绝对温度（单位为 K）； T_0 为工件表面的初始绝对温度，其值为 300（单位为 K）； ε_0 为不锈钢的热辐射率，通过查阅文献可知其值取 0.23； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数，其值可近似为 5.67×10^{-8} ，单位为 $W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

2) 对于不锈钢的侧面与陶瓷的侧面，主要考虑材料的热传导、空气自然对流和辐射传热，其边界

条件的数学表达式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_0) + \varepsilon_0 \sigma (T_w^4 - T_0^4). \quad (9)$$

3) 对于工件的底面，由于其热量传导较少，故可视为绝热状态，其边界条件的表达式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (10)$$

3 仿真结果及分析

在温度场数值模拟中，本文所采用的激光工艺参数及软件环境设置如下：

1) 采用的激光功率为 3 kW，焦距为 125 mm，激光光斑直径为 200 μm ，保持正离焦 1 mm，辅助气压为 1.4 MPa，激光切割速度为 600 mm/min，激光扫描位置为沿工件 Y 轴中心线的位置；

2) 在 ANSYS 中使用 Fluent 模块进行热分析，求解器设置如下：类型为压力求解器，坐标系采用绝对坐标系，分析方法为瞬态分析法；选择分析模型时，激活能量方程，并在求解设置中取消流动方程；对于求解方面的设定，均采用软件的默认设置，能量和密度的松弛因子均设为 1，在运行计算中将时间步长设为 0.001 s，计算 400 步，最大迭代次数设为 50。

图 5 为激光辐照过程中工件关于 Y-Z 平面的对称面以及其余外表面在不同时刻的温度分布云图。从图中可以看出，与静止的激光热源所形成的近圆形温度分布云图不同，移动激光热源所形成的温度

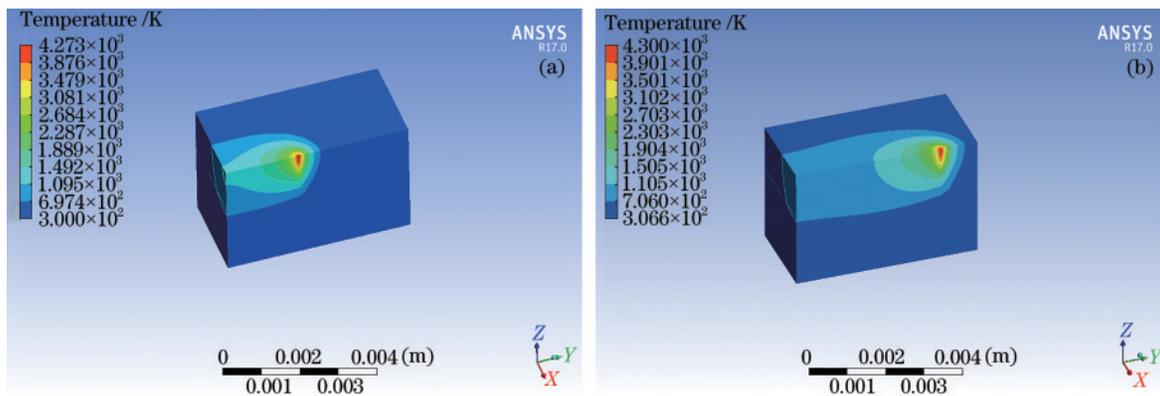


图 5 工件在不同时刻的温度分布云图。(a) $t=0.2$ s；(b) $t=0.4$ s

Fig. 5 Temperature distribution cloud maps of workpiece at different time. (a) $t=0.2$ s；(b) $t=0.4$ s

分布云图整体上呈现出一种类似彗尾的形状。这表明激光热源使材料经历着快速加热和快速冷却的过程。同时,激光辐照区域的温度明显高于未辐照区域和已辐照区域的温度。当 $t=0.2\text{ s}$ 时,工件表面的最高温度为 4273 K ; 当 $t=0.4\text{ s}$ 时,工件表面的最高温度为 4300 K 。随着激光扫描时间的延长,工件上表面的最高温度具有上升趋势,说明移动激光热源对前方待辐照材料具有预热效果。

图 6 为 $t=0.4\text{ s}$ 时,工件不同区域的温度分布情况。从图 6(a) 所示的工件上表面的温度分布云图中可以看出,在激光热源对材料表面进行移动扫描时,靠近熔池前端的等温线的分布比较密集,而靠近熔池后端的等温线的分布相对稀疏一点。这表明激光热源不是一种均匀热源,并且激光热源的

快速移动会使温度梯度在靠近熔化区域前端的区域较大,而在靠近熔池后端的区域较小。从图 6(b) 可以看出,不锈钢与陶瓷结合面的温度分布与上表面的温度分布相似,但温度值在整体上低于工件上表面的温度值,这与工件厚度方向上发生的热传导有关。从图 6(c) 可以看出,工件关于 $Y-Z$ 平面的对称面上的温度场形状类似于半勺状。从图 6(d) 可以看出,工件在 $Y=4\text{ mm}$ 处横截面的温度场形状近似于半椭圆形。这是因为不锈钢的热导率远高于陶瓷,能量趋向于沿不锈钢水平方向传递,结合激光热源的能量分布特点,光斑边缘部分的热量将以发散的方式向四周的材料传导,而靠近光斑中心位置的热量将会集中向更深处的工作方向传导。因此,整体的温度场近似椭圆形。

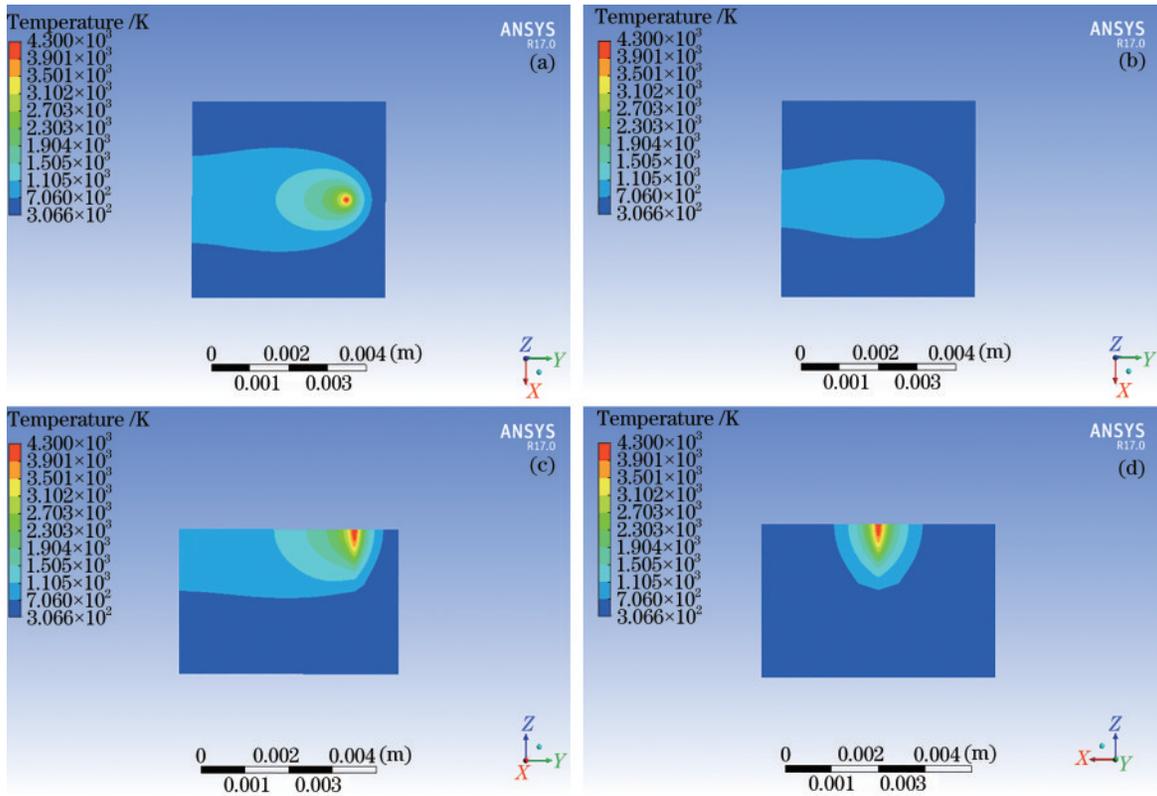


图 6 $t=0.4\text{ s}$ 时工件不同区域的温度分布云图。(a) 上表面; (b) 不锈钢与陶瓷的结合面; (c) 纵截面; (d) 横截面

Fig. 6 Temperature distribution cloud maps of different areas of the workpiece at $t=0.4\text{ s}$. (a) Upper surface; (b) bonding surface between stainless steel and ceramic; (c) longitudinal section; (d) cross-section

3.1 激光功率对温度场的影响

采用单因素实验方法进行仿真,在扫描速度 v 为 600 mm/min 的条件下,改变激光功率 P 来分析温度场的变化。提取了各功率下工件上表面及纵截面的温度云图,如图 7 所示。从图中可以看出,随着激光功率的增大,工件的最高温度由 2231 K 上升

到 5214 K , 熔化宽度和熔化深度的增大速率出现明显的增长趋势。因此,在保证切断工件的前提下选择较小的激光功率可以获得较小的切缝。此外,由图 7 还可以看出,增大激光功率对热量的扩散几乎没有影响。也就是说,在切割过程中,切割头附近的温度由功率主导,而远离切割源的位置,主要靠

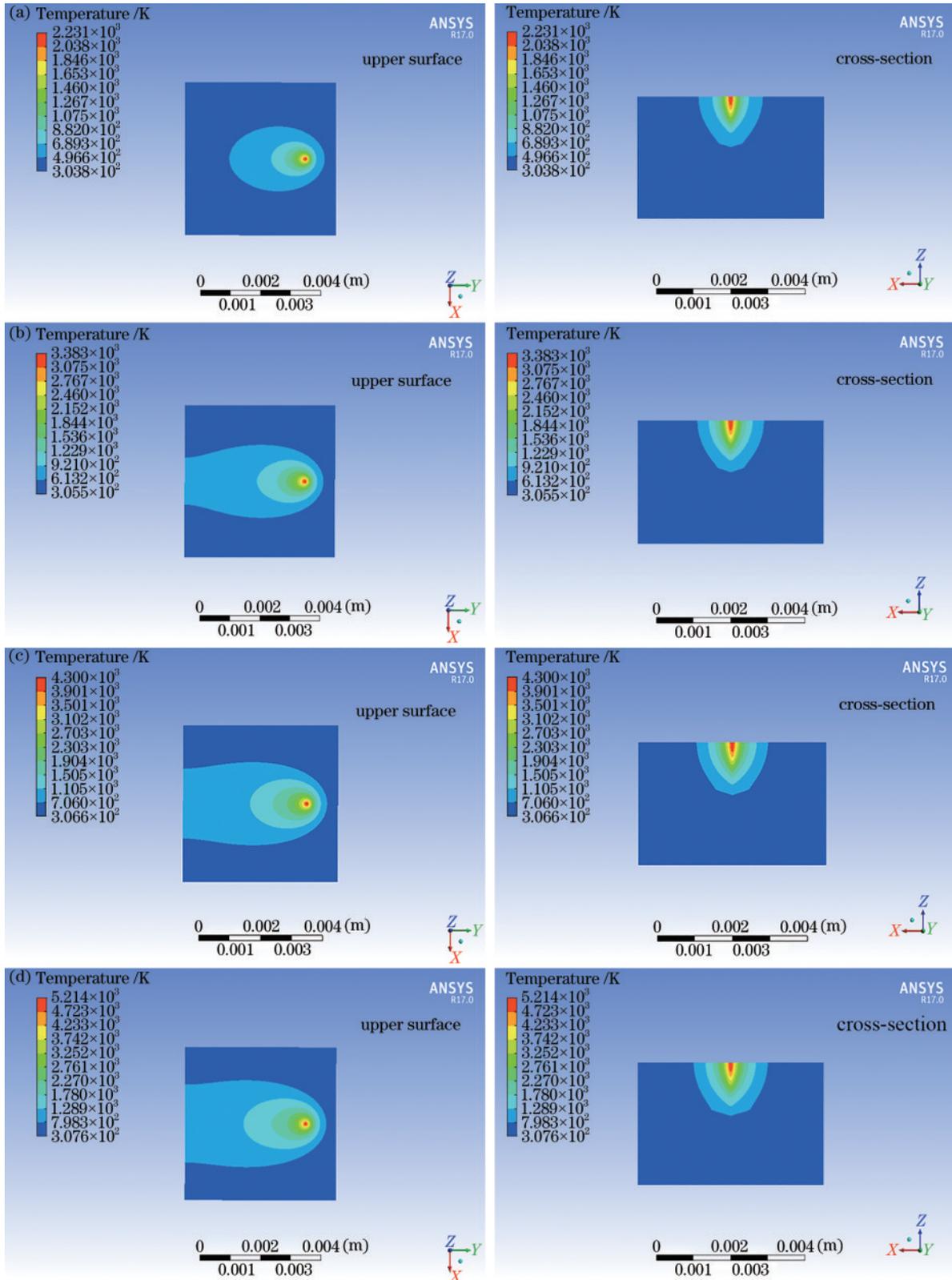


图 7 不同激光功率下的温度分布云图。(a) $P=1000\text{ W}$; (b) $P=2000\text{ W}$; (c) $P=3000\text{ W}$; (d) $P=4000\text{ W}$

Fig. 7 Temperature distribution cloud images at different laser powers. (a) $P=1000\text{ W}$; (b) $P=2000\text{ W}$; (c) $P=3000\text{ W}$; (d) $P=4000\text{ W}$

热传导, 这都符合实际激光切割时激光功率的影响规律。

3.2 切割速度对温度场的影响

在激光功率 P 为 3000 W 时, 通过改变切割速

度来分析温度场的变化,提取了各切割速度下工件上表面和横截面的温度云图,如图 8 所示。由图可以看出:随着切割速度的增加,热源中心由 2.68 mm 处移动到 3.32 mm 处,切割效率提高;同时,工件的最高温度、温度云图扩散范围、熔化

宽度和熔化深度都出现了减小的趋势。这是因为随着切割速度的提高,激光与工件的作用时间缩短,材料表面吸收的热量减少,切缝变得窄小。这都符合实际激光切割时切割速度的影响规律。

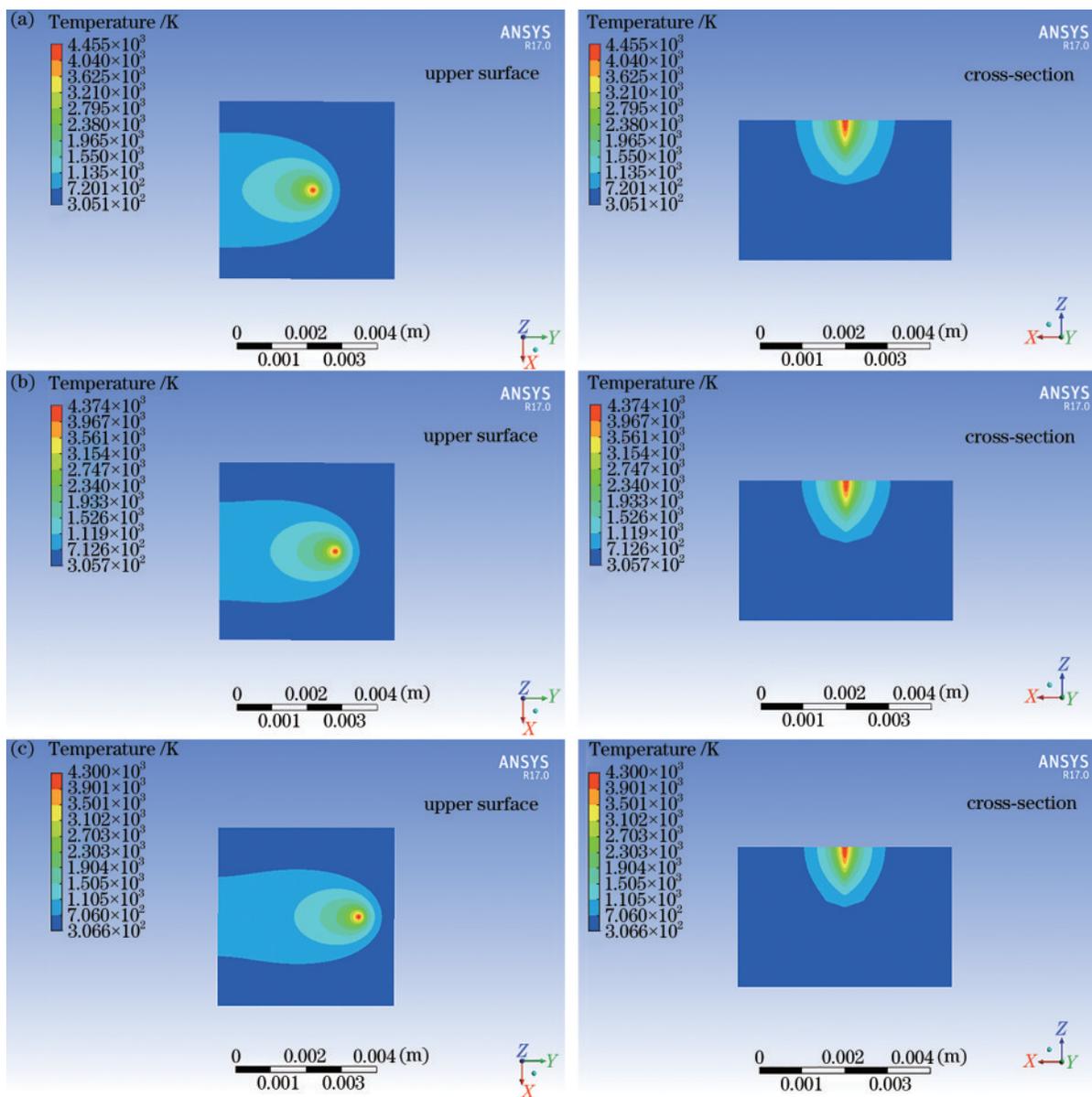


图 8 不同切割速度下的温度分布云图。(a) $v=400$ mm/min; (b) $v=500$ mm/min; (c) $v=600$ mm/min

Fig. 8 Temperature distribution cloud maps at different cutting speeds. (a) $v=400$ mm/min; (b) $v=500$ mm/min; (c) $v=600$ mm/min

4 结 论

采用 ANSYS 有限元软件的 Fluent 模块对激光切割 UO_2 陶瓷芯块-316Ti 不锈钢包壳管复合结构的温度场进行了数值模拟,得到了以下几点结论:

- 1) 通过 Fluent 模块中的 UDF 功能实现了双轴

圆激光热源的移动和加载。激光切割 UO_2 陶瓷芯块-316Ti 不锈钢复合结构时,沿激光扫描方向上的温度分布主要表现为彗尾状扩散形貌,且温度梯度主要集中在熔池前端(即切割热源前进方向)的小范围内,光斑边缘部分的热量以发散的方式向四周的材料传导,而靠近光斑中心位置的热量会集中向

更深处的工作方向传导。

2) 激光功率过大和切割速度过小都会使工件的熔化宽度增大, 导致切缝变宽, 而激光功率过小和切割速度过大会因热量输入不足和熔化深度减小而造成工件切不透; 因此, 在保证切断工件的前提下应选择较小的激光功率和较大的切割速度。

3) 基于 ANSYS 有限元软件的激光切割过程的数值模拟结果直观清晰, 可对实际切割情况进行预测, 对激光切割工艺参数进行优化。

参 考 文 献

- [1] Zhou J, Qiu S Y, Du P N, et al. Research progress in the FeCrAl alloys for accident tolerant fuel cladding[J]. *Materials Review*, 2017, 31(S2): 47-51.
周军, 邱绍宇, 杜沛南, 等. 耐事故燃料包壳用 FeCrAl 不锈钢的研究进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(S2): 47-51.
- [2] Li H B, He H, Ye G A, et al. An advanced head-end process for reprocessing of spent fuel by high temperature vol-oxidation treatment[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(5): 780-786.
李辉波, 何辉, 叶国安, 等. 高温氧化挥发法: 一种先进乏燃料后处理的首端工艺技术[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(5): 780-786.
- [3] Zhang Z F, He J Y, Zhu Z W, et al. Neptunium control in co-decontamination step of purex process [J]. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Environment*, 2002, 8(2): 165-170.
- [4] Li J Y, Shi L, Hu Y T. Some considerations on the construction of a spent nuclear fuel reprocessing plant in China[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2011, 33(4): 204-210.
李金英, 石磊, 胡彦涛. 我国乏燃料后处理大厂建设的几点思考[J]. *核化学与放射化学*, 2011, 33(4): 204-210.
- [5] Zhang X C, Qian J, Fu Q, et al. Cutting of PBO fiber-reinforced composites using picosecond lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 0402003.
张学聪, 钱静, 付强, 等. 皮秒激光切割 PBO 纤维增强复合材料[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 0402003.
- [6] Biswas R, Kuar A S, Mitra S. Influence of machining parameters on surface roughness in Nd:YAG laser micro-cutting of alumina-aluminium interpenetrating phase composite[J]. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2008, 2(3/4): 252-264.
- [7] Adalarasan R, Santhanakumar M, Rajmohan M. Optimization of laser cutting parameters for Al6061/SiCp/Al₂O₃ composite using grey based response surface methodology (GRSM)[J]. *Measurement*, 2015, 73: 596-606.
- [8] Shin J S, Oh S Y, Park H, et al. Underwater cutting of 50 and 60 mm thick stainless steel plates using a 6-kW fiber laser for dismantling nuclear facilities[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 1-8.
- [9] Oh S Y, Shin J S, Kim T S, et al. Effect of nozzle types on the laser cutting performance for 60-mm-thick stainless steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105607.
- [10] Shen Y P, Chen C, Gao M, et al. Technological characteristics in fiber laser cutting of medium-thickness aluminum alloy sheet[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102008.
沈义平, 陈聪, 高明, 等. 光纤激光切割中厚铝合金板工艺特性研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102008.
- [11] Tahir B A, Ahmed R, Ashiq M G B, et al. Cutting of nonmetallic materials using Nd:YAG laser beam [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(4): 290-293.
- [12] Zhou B H, Mahdavian S M. Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 146(2): 188-192.
- [13] Ji L F, Yan Y Z, Bao Y, et al. Crack-free cutting of thick and dense ceramics with CO₂ laser by single-pass process[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 785-790.
- [14] Beausoleil C, Yazdani S H, Katz Z, et al. Deep and high precision cutting of alumina ceramics by picosecond laser[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 15285-15296.
- [15] Luo Y H, Wang X Y. Morphology investigation of removal particles during laser cutting of Al₂O₃ ceramics based on vapor-to-melt ratio[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255: 340-346.
- [16] Ye S L, Ma J S, Huang X. Simulation of the temperature field in laser cutting of brittle materials [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(4): 599-601, 605.
叶圣麟, 马军山, 黄鑫. 激光切割脆性材料的温度场模拟[J]. *光学技术*, 2007, 33(4): 599-601, 605.
- [17] Yuan W. Technical research of YAG laser cutting sheet steels[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
袁伟. YAG 激光切割薄钢板的技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [18] Saternus Z, Piekarska W, Kubiak M, et al. Numerical

- modeling of cutting process of steel sheets using a laser beam[J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 254: 08004.
- [19] Ren N, Liu G D, Li X M, et al. Simulation analysis of temperature field of laser cut NdFeB magnetic material[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(1): 25-29.
任宁, 刘国东, 黎相孟, 等. 激光切割钕铁硼磁性材料温度场的仿真分析[J]. 制造技术与机床, 2020(1): 25-29.
- [20] Yu D Y, Wang X Y. Temperature field simulation of single-layer carbon fiber reinforced plastics in multi-directional laser cutting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111409.
于冬洋, 王续跃. 单层碳纤维复合材料激光多向切割的温度场模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111409.
- [21] Carbajo J J, Yoder G L, Popov S G, et al. A review of the thermophysical properties of MOX and UO₂ fuels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 299(3): 181-198.
- [22] Fink J K. Thermophysical properties of uranium dioxide[J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 279(1): 1-18.