

# 基于COMSOL的飞秒激光烧蚀TC4 仿真研究

宋宇阳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年1月19日; 录用日期: 2025年2月12日; 发布日期: 2025年2月21日

## 摘要

飞秒激光不同于传统连续激光, 它具有脉宽极窄、峰值功率高等特点, 能够实现对材料的无热熔处理。由于其刻蚀精度高、加工区域小且可控, 常常被用作超精细加工。为探究飞秒激光加工过程中激光能量密度、光斑半径、激光脉宽对烧蚀直径的影响, 本文基于双温模型, 利用COMSOL有限元仿真软件, 建立二维轴对称模型, 求解TC4烧蚀阈值, 验证了模型的准确性, 然后通过正交试验法, 分析了不同激光参数对TC4烧蚀深度的影响。

## 关键词

双温模型, TC4, 正交试验

# Simulation of TC4 Ablation by Femtosecond Laser Based on COMSOL

Yuyang Song

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 19<sup>th</sup>, 2025; accepted: Feb. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2025

## Abstract

Femtosecond laser is different from traditional continuous laser, it has the characteristics of extremely narrow pulse width, high peak power, and can realize the non-hot melt treatment of materials. Because of its high etching precision, small and controllable processing area, it is often used as a hyperfine machining. In order to explore the influence of laser energy density, spot radius and laser pulse width on ablation diameter during femtosecond laser processing, based on the two-temperature model, COMSOL finite element simulation software was used to establish a

two-dimensional axisymmetric model, solve the TC4 ablation threshold, and verify the accuracy of the model. Then, through orthogonal test method, the influence of different laser parameters on the ablation diameter of TC4 was analyzed.

## Keywords

Two-Temperature Model, TC4, Orthogonal Test

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

超快激光与金属作用过程中, 具有脉冲宽度小、作用时间短等特点, 同时由于加工过程中电子、晶格之间的能量传递时间小于超快激光加工时间, 所以产生的热影响区域小, 因此超快激光加工也被称为“冷加工” [1]。飞秒激光具有较高的峰值功率、极短的作用时间以及非线性加工等特点, 在极短时间内实现材料电子、晶格温度的升高进而从根本上改变激光与材料作用的机理, 所以传统的傅里叶热传导方程已经不能够解释超快激光加工过程中的电子和晶格的双温现象及其变化趋势。

Anisimov 等 [2] 首先提出了超短脉冲激光与金属作用的双温模型。陈安民等 [3] 借助双温模型, 分析了电子热传导率对飞秒激光烧蚀金属过程中材料的电子、晶格温度分布的影响。杨丽等 [4] 利用三维双温模型采用有限差分法研究了飞秒激光能量对镍的激光烧蚀半径、烧蚀深度和烧蚀速率的影响。纪利平等 [5] 利用 COMSOL 建立了皮秒激光烧蚀通片的双温模型, 研究了光斑半径和激光能量对材料电子与晶格温度的影响。潘嘉裕等 [6] 在二维轴对称模型中引入了双温模型, 模拟了皮秒激光烧蚀 7075 铝合金, 认为激光烧蚀深度与激光密度线性相关。袁磊等 [7] 在双温模型的基础上建立了考虑离焦量和随电子温度变化的动态吸收率效应的三维双温模型, 开展了飞秒激光对面齿轮材料的烧蚀仿真, 分析了飞秒激光能量、脉宽对材料烧蚀形貌的影响。Omeñaca 等 [8] 建立了一种二维双温模型, 该模型考虑了激光烧蚀过程中的孵化效应和层裂与相爆炸烧蚀之间的状态变化, 可以精确可靠的获得烧蚀直径与烧蚀深度。

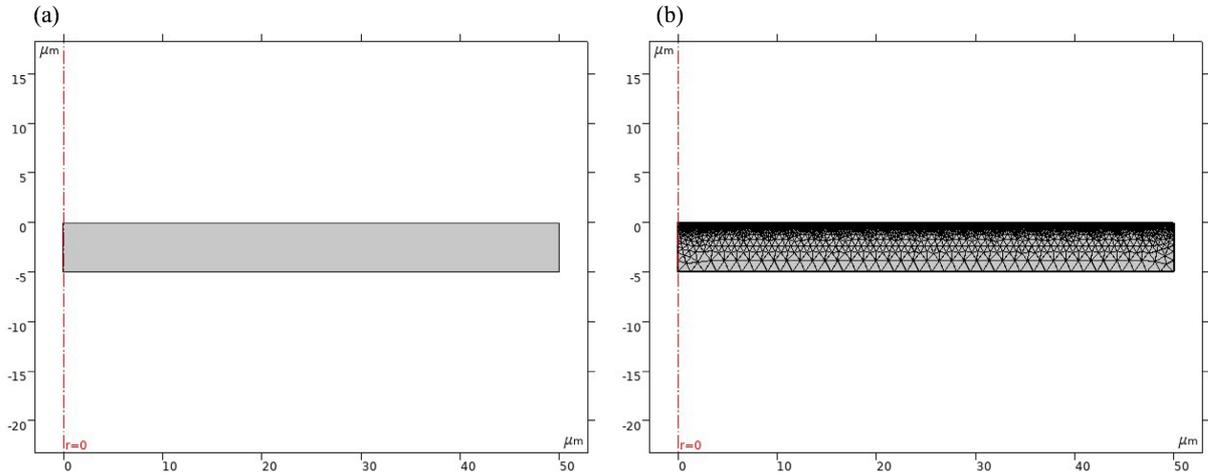
由于飞秒激光加工金属过程中, 产生的烧蚀坑形貌受到多种激光能量密度、光斑半径、脉宽等参数的影响, 为探究激光参数的变化对材料烧蚀直径的影响, 因此本文借助 COMSOL 有限元仿真软件, 通过双温模型, 建立飞秒激光烧蚀 TC4 二维轴对称有限元模型。求解 TC4 烧蚀阈值, 验证有限元模型的准确性。通过正交试验, 分析不同激光参数对材料表面烧蚀深度、直径的影响。

## 2. 模型建立

### 2.1. 几何模型及网格划分

考虑飞秒激光对 TC4 钛合金的烧蚀效果是轴对称的, 所以为简化计算过程, 提高计算效率, 本文通过 COMSOL 在圆柱坐标系中的径向  $r$  和轴向  $z$  平面上建立一个尺寸为  $r = 50 \mu\text{m}$  和  $z = 5 \mu\text{m}$  的二维轴对称几何模型, 如图 1(a) 所示。几何模型的上表面为激光体热源加载面, 入射激光的光斑中心坐标  $0 (r = z = 0)$ ; 左边界为对称轴; 右边界和下表面的边界条件均为恒温  $300\text{K}$ , 且热流通量为零, 即无热量通过这两个面向外消散。在对几何模型进行网格划分过程中, 由于飞秒激光的脉冲能量为高斯分

布，在光斑中心处具有最高的能量和热穿透深度，所以需要材料上表面进行增大网格密度处理，以提高计算计算结果的准确性，求解步长为 0.1 ps，求解总时间为 50 ps，划分网格后的几何模型如图 1(b) 所示。



**Figure 1.** Geometric model and mesh generation. (a) TC4 geometry; (b) Mesh generation  
**图 1.** 几何模型及网格划分。(a) TC4 几何尺寸；(b) 网格划分

## 2.2. 控制方程

飞秒激光烧蚀 TC4 表面时，其大部分光子能量首先被自由电子吸收，材料内部电子温度瞬间升高，之后电子向晶格系统传热直至电子、晶格温度趋于平衡，材料发生去除。在这一过程中，飞秒脉冲作用时间远远小于电子冷却时间，因此本次仿真忽略传递到晶格系统的热通量。在数值模型中，轴对称双温模型的控制方程为：

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_e r \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) \right] - g(T_e - T_l) + S(r, z, t) \quad (1)$$

$$C_l = g(T_e - T_l) \quad (2)$$

其中式(1)为电子系统温度  $T_e$  为电子温度， $k_e$  为电子热导率， $C_e$  为电子热容， $g$  为耦合系数， $S(r, z, t)$  为激光源项。式(2)为晶格系统温度， $T_l$  为电子温度。

电子热导率的表达式为[9]：

$$k_e(T_e, T_l) = k \times \left( \frac{T_e}{T_l} \right) \quad (3)$$

式中  $k_e$  单位为  $J/(m^3 \cdot K)$ ， $K$  为电子热导率系数。电子热容的表达式为[10]：

$$C_e(T_e) = B_e \times T_e \quad (4)$$

式中  $C_e$  单位为  $J/(m^3 \cdot K)$ ， $B_e$  为电子热容常数。激光源项  $S(r, z, t)$  在时空上服从高斯分布，表达式为：

$$S(r, z, t) = (1 - R_e) * \frac{F}{t_p} * a * \exp \left[ -4 \ln(2) * \frac{(t - t_p)^2}{t_p^2} \right] * \exp \left[ -\frac{r^2}{r_0^2} \right] * \exp(a * z) \quad (5)$$

式中  $F$  为激光能量密度,  $t_p$  为激光脉宽,  $R_e$  为激光反射率,  $a$  为激光吸收系数,  $r_0$  为激光光斑半径。

本次仿真模型中所用到的 TC4 其它参数如表 1 所示:

**Table 1.** TC4 material parameters

**表 1.** TC4 材料参数

热物性参数(单位)	名称	值
电子导热系数(W/(m*K))	$K$	6.7
电子热容系数(J/(m <sup>3</sup> *k <sup>2</sup> ))	$B_e$	314
电子晶格耦合系数(W/(m <sup>3</sup> *k))	$g$	$4 \times 10^{17}$
晶格热容(J/(m <sup>3</sup> *K))	$C_l$	$2.33 \times 10^6$
反射率	$R_e$	0.52
吸收率(1/m)	$a$	$3.74 \times 10^7$
密度(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	$4.43 \times 10^3$
临界温度(K)	$T_{cr}$	7500 [11]

### 2.3. 单脉冲烧蚀仿真

本文首先模拟计算了飞秒激光烧蚀 TC4 的单脉冲烧蚀阈值, 并与相关文献结果作对比, 验证有限元模型的准确性。仿真过程中, 飞秒激光单脉冲烧蚀 TC4 的参数设定如表 2 所示:

**Table 2.** Laser parameters

**表 2.** 激光参数

能量密度 J/cm <sup>2</sup>	光斑半径 $\mu\text{m}$	激光脉宽 fs
1.38~9.36	10	100

### 2.4. 正交试验

有限元模型的正确性得到验证后, 通过正交试验, 分析飞秒激光的能量密度、光斑半径、激光脉宽对材料烧蚀深度、直径的影响, 具体的实验因素与水平如表 3 所示:

**Table 3.** Level value for each factor

**表 3.** 各因素的水平值

水平	能量密度(A) J/cm <sup>2</sup>	光斑半径(B) $\mu\text{m}$	激光脉宽(C) fs
1	1	5	100
2	2	10	500
3	4	15	1000

**Table 4.** L9(3<sup>4</sup>) Orthogonal experiment arrangement

**表 4.** L9(3<sup>4</sup>)正交试验安排

实验序号	因素 A	因素 B	因素 C	误差 D
1	1	5	100	1
2	1	10	500	2

续表

3	1	15	1000	3
4	2	5	500	3
5	2	10	1000	1
6	2	15	100	2
7	4	5	1000	2
8	4	10	100	3
9	4	15	500	1

采用 4 因素 3 水平正交表 L9(3<sup>4</sup>)来进行正交试验, 不考虑因素间的交互作用, 具体的试验方案如表 4 所示。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. TC4 烧蚀阈值

由表 2 调整有限元模型激光参数后, 分别计算不同能量密度下, 激光烧蚀直径的变化, 仿真结果如表 5 所示:

**Table 5.** Simulation results of single pulse ablation

**表 5.** 单脉冲烧蚀仿真结果

能量密度 J/cm <sup>2</sup>	烧蚀直径 $\mu\text{m}$
1.38	20.24
1.85	21.5
2.75	23.22
3.66	24.66
4.6	25.68
5.51	26.36
6.44	26.82
7.34	27.28
8.29	27.8
9.36	28.12

烧蚀阈值作为材料表面吸收激光能量密度的最低值, 当激光能量密度超过该阈值时材料表面会发生显著的烧蚀效应, 因此可以通过利用在不同能量密度下的烧蚀直径与激光能量密度的关系来计算钛合金的烧蚀阈值, 材料烧蚀直径的平方  $D^2$  与激光能量  $E_0$  的关系如下所示[12]:

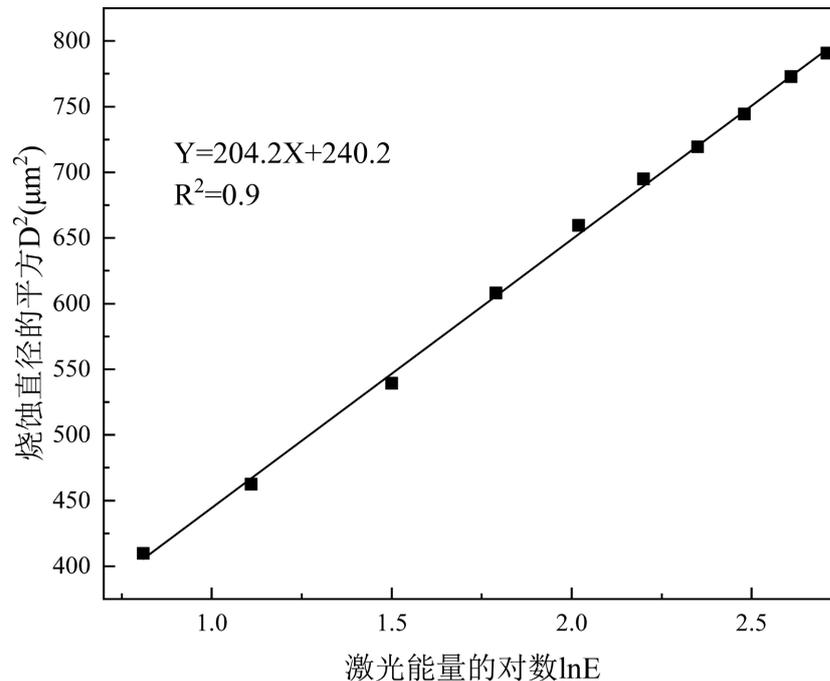
$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln \frac{E_0}{E_{th}} \quad (6)$$

式中  $E_{th}$  为激光作用下的烧蚀阈值,  $\omega_0$  为激光光斑束腰半径。

激光能量密度  $F$  与激光能量  $E$  满足如下关系:

$$F = \frac{2E}{\pi\omega_0^2} \quad (7)$$

由式(6)可知材料烧蚀直径的平方与激光能量的对数呈线性关系,如图2描述了不同能量下烧蚀直径的散点图以及拟合后的曲线。



**Figure 2.** Relationship between the logarithm of laser energy and the square of ablation diameter  
**图 2.** 单脉冲激光能量对数与烧蚀直径平方关系

图2中的散点图经过拟合后直线的斜率为204.2,可以计算得到激光的束腰半径为 $\omega_0 = 10.1 \mu\text{m}$ 。令 $D^2 = 0$ 时,直线与X轴相交得到 $E_0 = 0.31 \mu\text{J}$ ,带入式(7)即可得到单脉冲激光烧蚀钛合金的去除阈值为 $0.19 \text{ J/cm}^2$ 。该值接近于Kong等[13]所得到的钛合金烧蚀阈值 $0.21 \text{ J/cm}^2$ ,验证了有限元模型的合理性和正确性。

### 3.2. 正交试验结果分析

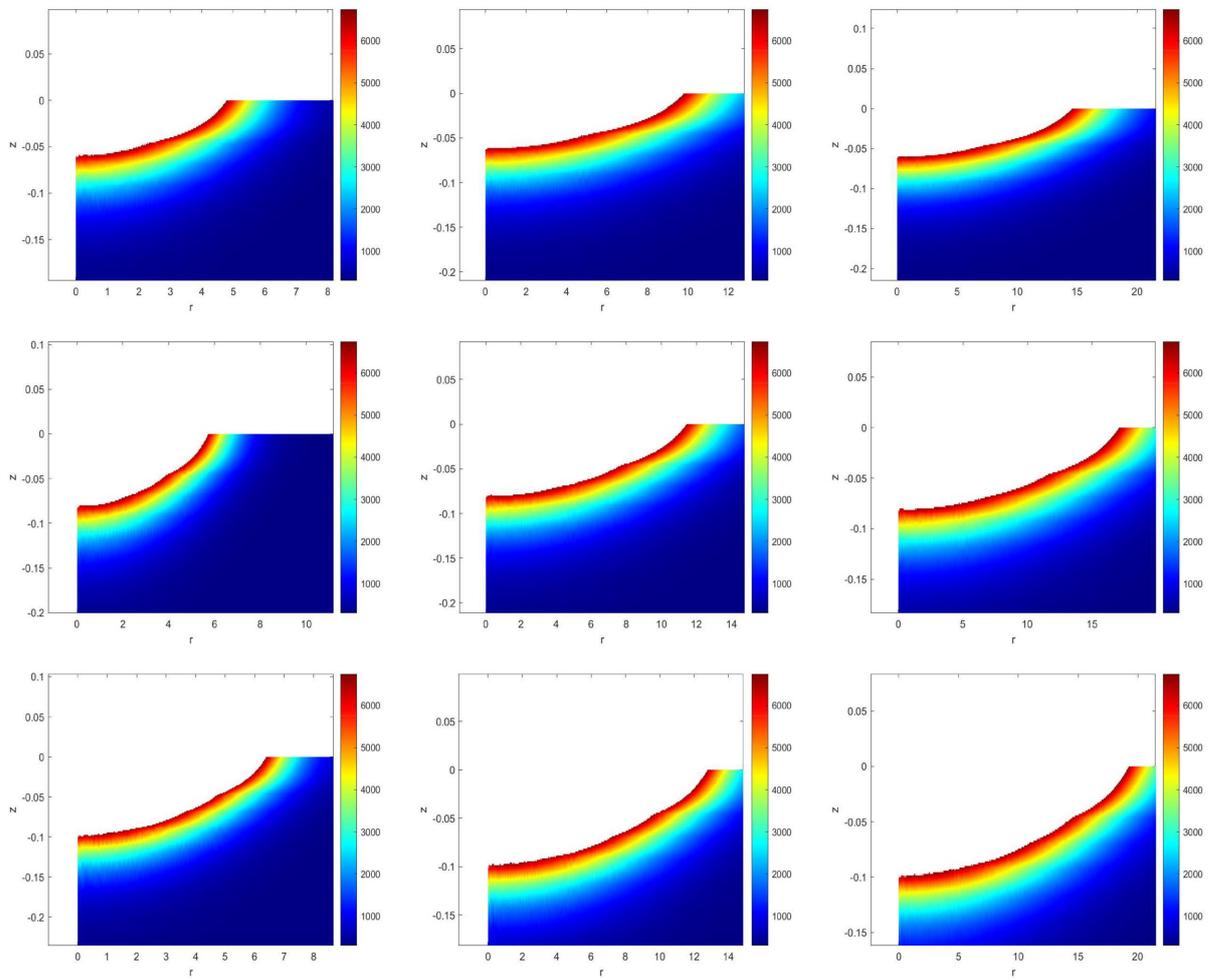
按照表4对有限元模型激光参数进行调整,开展正交试验仿真分析,计算在不同能量密度、光斑半径、激光脉宽下对TC4烧蚀深度的变化,不同参数下烧蚀形貌如图3所示,仿真烧蚀深度、直径结果如表6所示。

仿真烧蚀深度、直径数值结果如表6所示:

**Table 6.** Simulation results under different parameters

**表 6.** 不同参数下仿真结果

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
烧蚀深度(μm)	60.02	62.88	60.02	80.02	78.59	80.02	95.74	98.6	98.6
烧蚀直径(μm)	9.54	19.64	28.96	11.32	22.74	34.1	12.68	25.4	38.42



**Figure 3.** Ablation morphology  
**图 3.** 烧蚀形貌

为了详细探究仿真过程中激光能量密度、光斑半径、激光脉宽对 TC4 烧蚀直径、深度的影响，对实验结果进行极差分析，分析结果如表 7 所示：

**Table 7.** Results of range analysis  
**表 7.** 极差分析结果

烧蚀形貌	名称	A	B	C	D
烧蚀深度	k <sub>1</sub>	60.97	78.59	78.12	79.07
	k <sub>2</sub>	79.54	80.02	80.5	79.55
	k <sub>3</sub>	97.64	79.55	78.12	79.55
	极差 R	36.67	1.43	2.38	0.47
烧蚀直径	k <sub>1</sub>	19.38	11.18	23.01	23.57
	k <sub>2</sub>	22.72	22.59	23.15	22.14
	k <sub>3</sub>	25.50	33.83	21.46	21.89
	极差 R	6.12	22.65	1.69	1.67

为了更加直观的判断激光能量密度、光斑半径、激光脉宽对 TC4 烧蚀直径、深度的主次影响顺序，绘制了因素与烧蚀深度，烧蚀直径的趋势图，分别如图 4、图 5 所示。

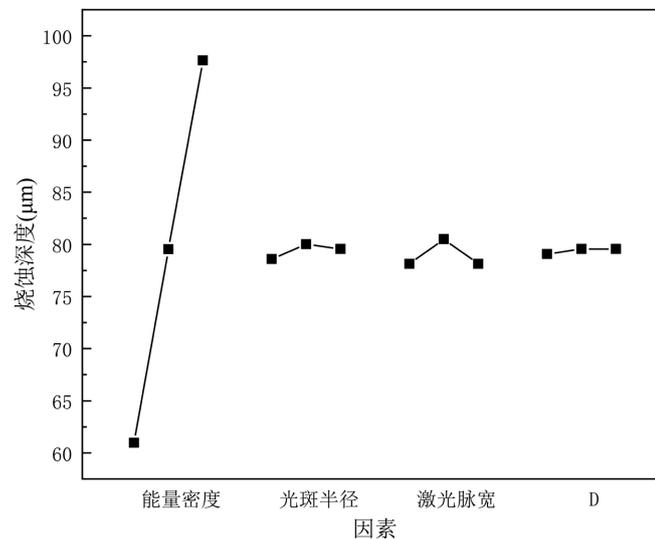


Figure 4. Trends of each factor and ablation depth

图 4. 各因素与烧蚀深度变化趋势图

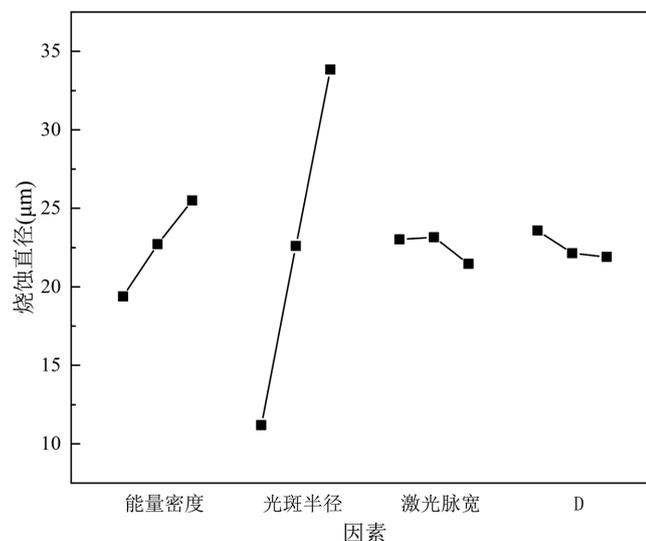


Figure 5. Trends of each factor and ablative diameter

图 5. 各因素与烧蚀直径变化趋势图

由图 4、图 5 各因素与烧蚀深度、直径变化趋势图可以清晰的观测到，在激光烧蚀过程中，对于 TC4 的烧蚀深度而言，激光能量密度影响最大，其次是激光脉宽，最后则是激光光斑半径。产生这种现象的主要因为在飞秒激光单脉冲烧蚀 TC4 时，更高的能量密度意味着传递给材料表面单位面积更多的能量，使材料在短时间内被大量去除，深度增加，所以对烧蚀深度的影响最为显著。激光脉宽时激光脉冲持续的时间，较宽的激光脉宽会使材料吸收激光能量的时间变长，导致材料内部热扩散更加充分，但是飞秒激光脉宽本身就较短，因此与激光能量密度相比对烧蚀深度的影响较小。对于烧蚀深度而言，在相同能量密度和脉宽下，改变激光光斑半径只改变了能量分布范围，并不改变能量在深度方向上的作用强度，

所以对烧蚀深度的影响最小。对烧蚀直径而言，激光光斑半径影响最大，然后是激光能量，其中激光脉宽对烧蚀直径的影响最小，极差数值与误差项接近。产生这种现象的主要原因为：激光光斑半径本身就定义了激光作用在材料表面的横向范围，半径越大烧蚀直径自然就越大，所以光斑半径对烧蚀直径的影响最显著。激光烧蚀过程中能量密度增大时，虽然主要影响烧蚀深度，但也会在一定程度上使烧蚀区域向外扩展，从而影响烧蚀直径。对于烧蚀直径来说，脉宽对材料在横向方向上的扩展作用非常小，主要是能量密度和光斑半径在起作用，所以从仿真结果来看，激光脉宽对烧蚀直径的影响最小。

#### 4. 总结

本文通过 COMSOL 有限元仿真软件，借助双温模型，建立了飞秒激光烧蚀 TC4 钛合金的二维轴对称模型，并对建立的模型进行准确性验证及正交实验分析，得到如下结论：

(1) 通过飞秒激光单脉冲烧蚀 TC4 仿真计算，得到了飞秒激光烧蚀 TC4 的烧蚀阈值为  $0.19 J/cm^2$ ，与相关文献中的结果相吻合。

(2) 飞秒激光加工过程中，各因素对烧蚀深度的影响主次顺序为：能量密度 > 激光脉宽 > 光斑半径。

(3) 飞秒激光加工过程中，各因素对烧蚀直径的影响主次顺序为：光斑半径 > 能量密度 > 激光脉宽，其中激光脉宽对烧蚀直径的影响几乎可以忽略。

#### 参考文献

- [1] 王涛, 王杰, 姚涛, 沈永辉, 邢奔. 激光抛光中金属表面的建模及仿真[J]. 激光与红外, 2019, 49(9): 1068-1074.
- [2] Anisimov, S., Kapeliovich, B. and Perelman, T. (1974) Electron Emission from Metal Surfaces Exposed to Ultrashort Laser Pulses. *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, **66**, 375-377.
- [3] 陈安民, 姜远飞, 刘航, 金明星, 丁大军. 双温方程用于飞秒激光烧蚀金属的模拟分析[J]. 激光与红外, 2012, 42(8): 847-851.
- [4] 杨丽, 孙萍萍, 安然. 飞秒激光烧蚀镍的数值模拟[J]. 激光杂志, 2013, 34(6): 55-57.
- [5] 纪利平, 宋梓钰, 孙亚萍, 王兴盛, 李成玉. 基于 COMSOL 的皮秒激光单脉冲烧蚀铜片[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 198-204.
- [6] 潘嘉裕, 庄鹏, 于新海. 皮秒激光烧蚀 7075 铝合金数值模拟与实验研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 994-999.
- [7] 袁磊, 明兴祖, 李湾, 刘海渔, 周静, 颜敏. 基于三维双温模型的飞秒激光烧蚀面齿轮材料形貌研究[J]. 包装学报, 2023, 15(6): 73-82.
- [8] Omeñaca, L., Olaizola, S.M., Rodríguez, A., Gomez-Aranzadi, M., Ayerdi, I. and Castaño, E. (2025) Experimental Findings and 2 Dimensional Two-Temperature Model in the Multi-Pulse Ultrafast Laser Ablation on Stainless Steel Considering the Incubation Factor. *Optics & Laser Technology*, **180**, Article ID: 111507. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111507>
- [9] Kiran Kumar, K., Samuel, G.L. and Shunmugam, M.S. (2019) Theoretical and Experimental Investigations of Ultra-Short Pulse Laser Interaction on Ti6Al4V Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, **263**, 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.028>
- [10] Chen, J.K., Latham, W.P. and Beraun, J.E. (2002) Axisymmetric Modeling of Femtosecond-Pulse Laser Heating on Metal Films. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, **42**, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10407790190053806>
- [11] Chen, J.K., Tzou, D.Y. and Beraun, J.E. (2006) A Semiclassical Two-Temperature Model for Ultrafast Laser Heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **49**, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.022>
- [12] 岳端木, 孙会来, 刘泽林, 杨雪, 孙建林. 飞秒激光加工镍钛合金的烧蚀阈值实验研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 441-446.
- [13] Kong, M.C. and Wang, J. (2014) Surface Quality Analysis of Titanium and Nickel-Based Alloys Using Picosecond Laser. *Procedia CIRP*, **13**, 417-422. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.071>