

飞秒激光加工TC4钛合金的温度场数值模拟

乔军¹, 谢扬¹, 侯忠霖¹, 孙建华¹
1.材料与冶金学院, 辽宁科技大学, 辽宁, 鞍山

简介: TC4钛合金具有比强度高, 耐高温, 密度低, 耐蚀性和机械性能好等优点, 被广泛应用于航空航天等领域。目前, 关于飞秒激光加工钛合金的热积累研究较少。本文将单脉冲飞秒激光的残余能量视为一个面热源, 其热量通过热传导传递给周围晶格, 采用三维热传导方程研究多脉冲加工的温度场问题^[1]。利用COMSOL Multiphysic有限元软件建立热积累模型, 计算热量和温度随时间的变化规律, 阐明加工参数(脉冲能量、重复频率、扫描速度等)与热积累温度的关系, 并与经实验验证的Matlab数值模型^[2]进行比较。

结果: 不同激光重复频率下的材料温度场。

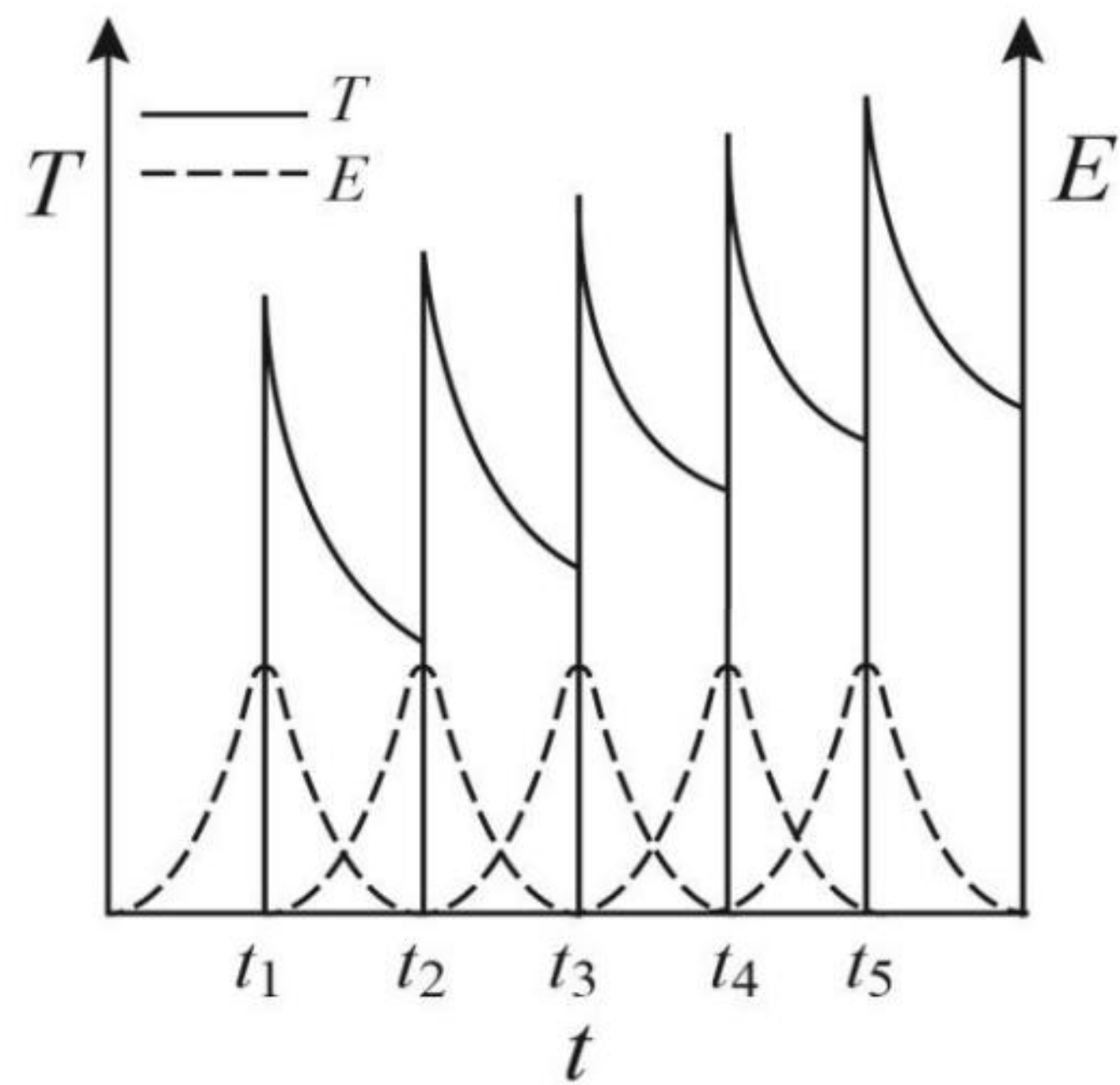


图 1. 超快脉冲激光加工的热积累示意图

计算方法: 在COMSOL中选用固体传热接口, 内置的三维基于经典傅里叶热传导定律来描述瞬态的热传导:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T = Q$$

模拟选取一个三维钛合金板材, 几何形状和网格划分如下。

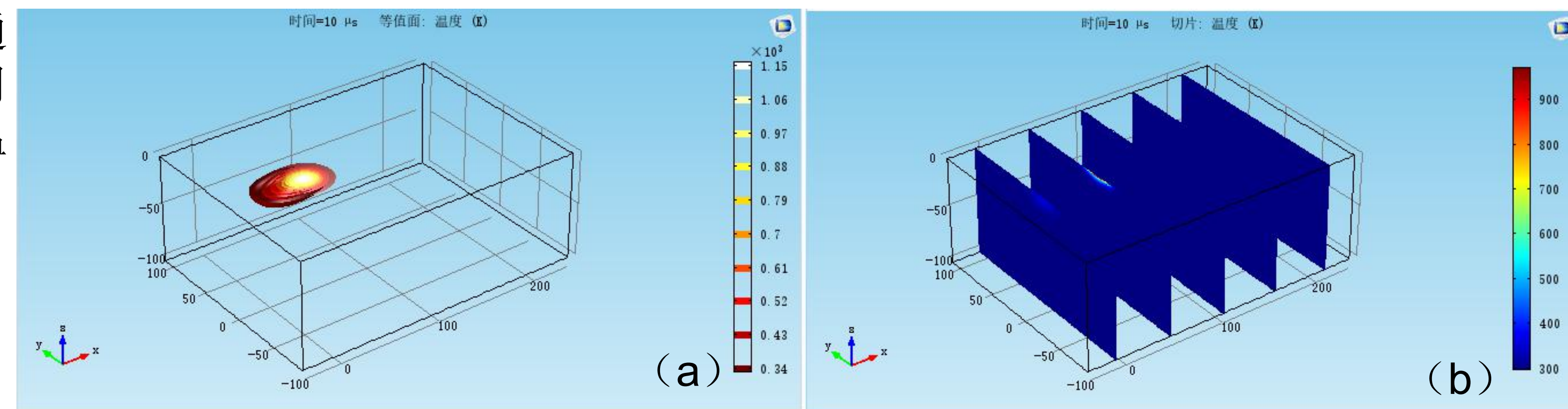


图 3.(a) 10 μs时刻等温面图像;(b)10 μs时刻温度切片图

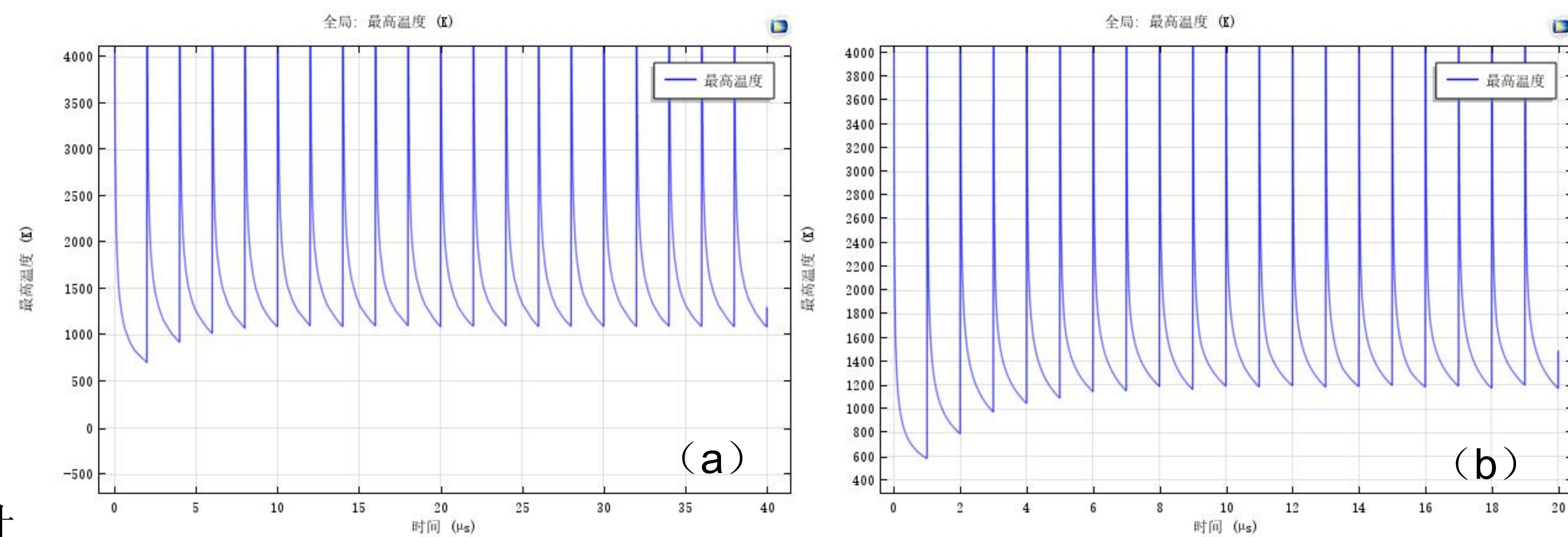


图 4. 不同重复频率下的TC4表面最高温度(脉宽320 fs, 光斑能量20 μJ, 扫描速度4 m/s)

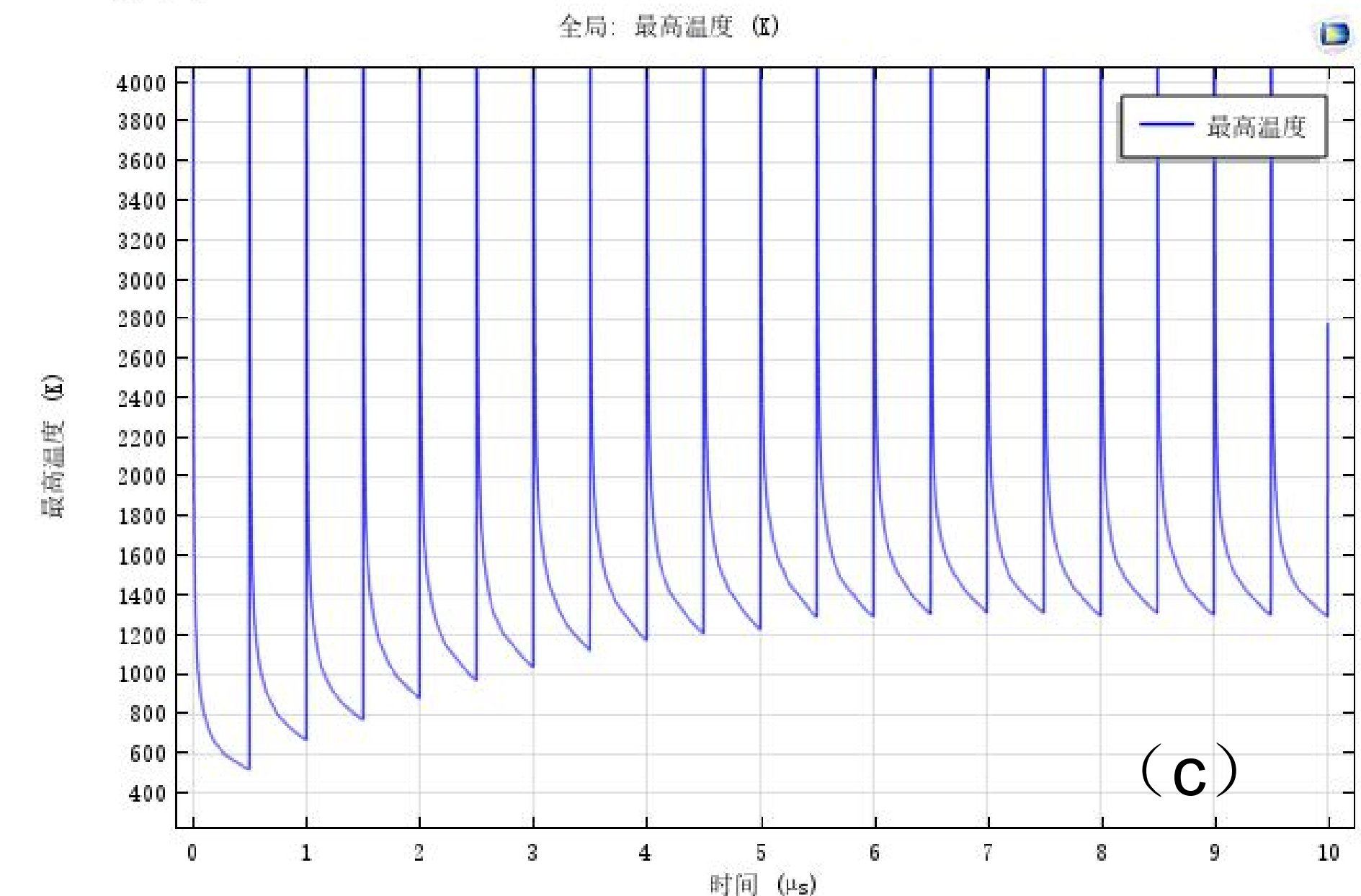


图 5. Franziska Bauer模型模拟结果 (a) 和本实验模型模拟结果 (b)

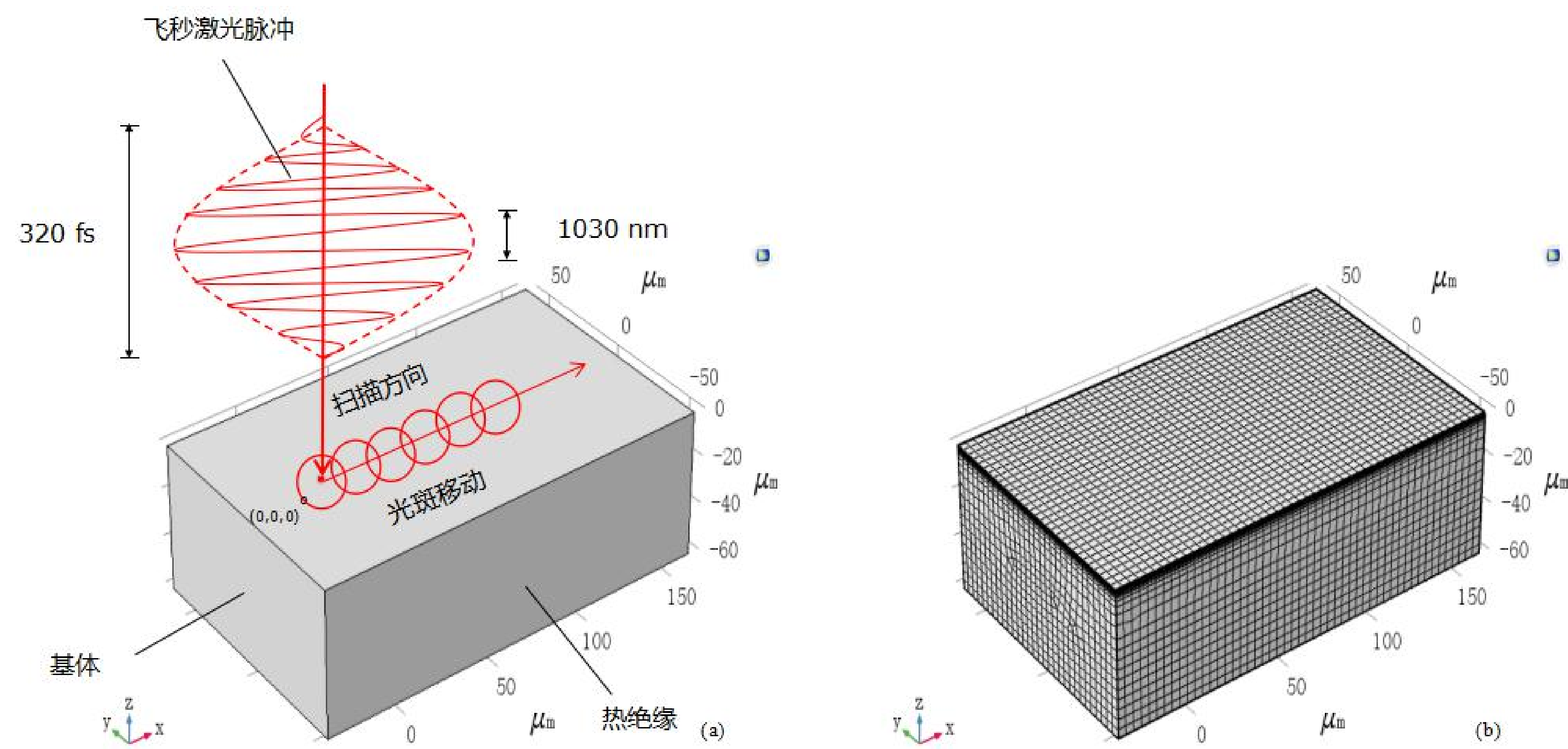


图 2. 几何模型及网格划分: (a) TC4钛合金几何模型; (b) 网格单元划分

将单脉冲激光的残余能量视为一个呈高斯分布的面热源, 公式如下:

$$hf(x, y, t) = \frac{E}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-vt)^2}{2\sigma^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}}$$

其中输入热源Q为公式:

$$Q = A \times hf(x, y, t) \times \text{pulse}(t)$$

式中A为烧蚀后能量吸收系数, hf(x,y,t)为激光能量密度函数, pulse(t)为符合脉冲重复频率的周期函数。

飞秒激光加工TC4钛合金材料的参数如下表所示:

加工参数	数值
脉冲宽度τ	320 fs
激光波长λ	1030 nm
光斑半径r_spot	35 μm
脉冲能量E	20 μJ
扫描速度v	4 m/s
重复频率M	500 kHz、1 MHz、2 MHz

结论: 随着激光重复频率增大, 材料达到热平衡状态的平衡温度也增大, 热积累效应逐渐增强。通过与Matlab软件模拟结果和实验结果对比, 验证了本模型的正确性, COMSOL软件对热积累模型适用, 并具有较高的模拟精度, 具有很好的应用价值。下一步打算从微观角度用双温方程来描述飞秒脉冲加工金属时的温度场变化, 为飞秒激光加工金属材料(打孔、抛光等)建立理论基础。

参考文献:

- Taylor L L, Qiao J, Qiao J. Optimization of femtosecond laser processing of silicon via numerical modeling[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(9): 2745-2758.
- Bauer F, Michalowski A, Nolte S, et al. Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 1035-1043.