

飞秒激光烧蚀TC4钛合金的数值模拟

王靖, 谢扬, 侯忠霖, 乔军

材料与冶金学院, 辽宁科技大学, 鞍山, 辽宁, 中国

基金项目: 辽宁省-沈阳材料科学国家研究中心联合研发基金2019JH3/30100004

1. 简介

飞秒激光的脉宽为飞秒量级, 远小于皮秒量级的电子-声子耦合时间, 可实现真正意义上的“冷”加工。由于飞秒激光在很短的时间内作用于材料的微小区域, 难以利用仪器直接检测材料温度, 因此需要开发能够精确模拟材料温度的数值模型。本文针对飞秒激光烧蚀钛合金建立基于电子-晶格双温方程的二维轴对称模型, 引入在时间和空间上皆为高斯分布的体热源, 并模拟单脉冲飞秒激光对Ti6Al4V材料的表面烧蚀。

2. 计算方法

在COMSOL Multiphysics中选用固体传热接口, 基于Anisimov^[1]提出的双温模型描述超短脉冲激光与金属作用的两个阶段, 采用两个相互耦合的热传导方程描述电子-晶格变化, 控制方程为:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla(k_e T_e) - g(T_e - T_l) + Q(r, z, t)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla(k_l T_l) + g(T_e - T_l)$$

式中, 下标 e 和 l 分别代表电子和晶格, C_e 、 T_e 、 k_e 分别为电子的比热容、温度和热导率; T_l 、 C_l 、 k_l 分别为晶格的温度、比热容和热导率; g 为电子-晶格耦合系数; Q_{rzt} 为激光热源。

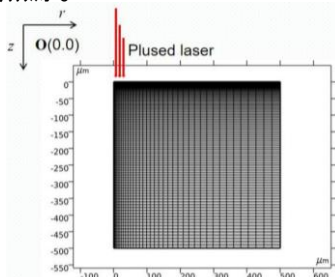


图 2. 圆柱坐标系下 r 、 z 平面的几何网格划分

建立一个尺寸为 $r = 500 \text{ mm}$ 和 $z = 500 \text{ mm}$ 的二维轴对称几何模型, 激光热源光斑中心坐标为 $O(r = 0, z = 0)$ 。激光脉冲能量呈高斯分布, 在光斑中心处能量最高, 因此网格自 $O(r = 0, z = 0)$ 沿 z 和 r 向遵循等差数列排布, 以增加光斑中心附近的网格密度。

在软件中设置相指示器, 其中 1 代表固体, 0 代表完全去除, 中间是过渡区域。

3. 结果

3.1 能量密度为 4.0 J/cm^2 时表面形貌

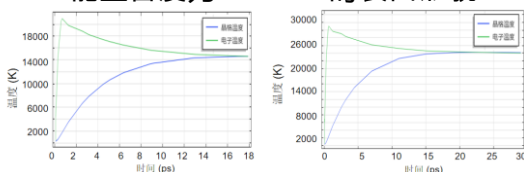


图 4. 不同脉冲能量下电子和晶格温度变化: (a) 0.19 J/cm^2 ; (b) 0.41 J/cm^2

3.2 能量密度为 4.0 J/cm^2 时表面形貌

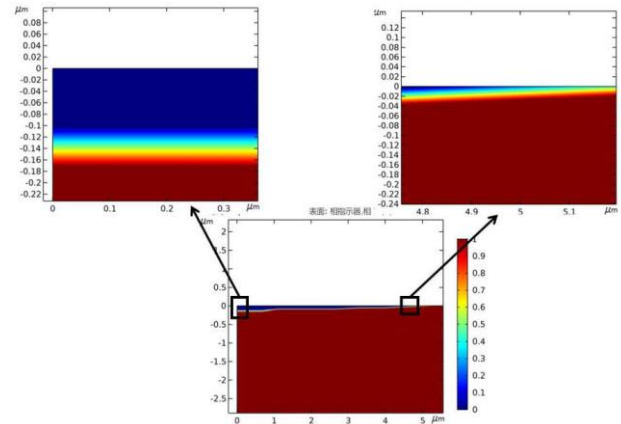


图 3. 能量密度为 4.0 J/cm^2 时表面形貌

3.3 不同能量密度下的表面形貌

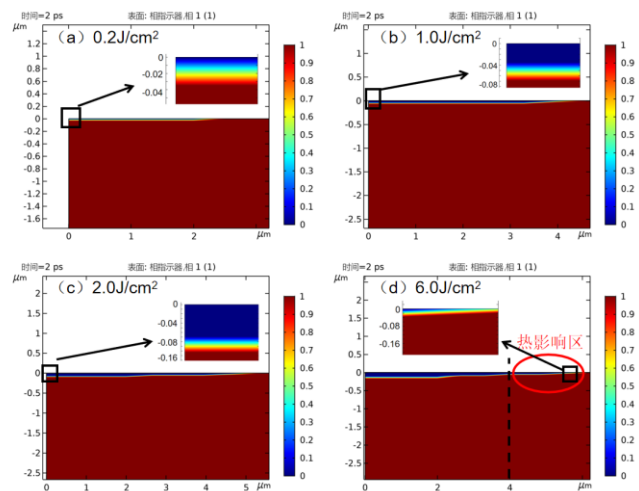


图 4. 烧蚀形貌随能量密度的变化

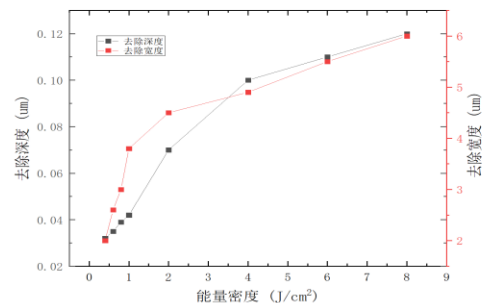


图 5. 烧蚀深度和宽度随能量密度变化

4. 结论

建立了烧蚀温度模型, 模拟了钛合金在不同能量密度下的表面烧蚀情况。结果表明, 随着激光能量密度增加, 电子和晶格耦合时间增加; 材料被烧蚀的宽度和深度增大。飞秒激光对加工区域周围的热影响在纳米级别。

参考文献:

1. Anisimov S I, Kapeliovich B L, Pamlan T L. Electron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses[J]. Soviet Physics - JETP, 1974, 39: 375.