

纳秒激光烧蚀铝材料的二维数值模拟*

张朋波¹⁾²⁾ 秦 颖¹⁾ 赵纪军^{1)†} 温 斌²⁾

1)(大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室和高科技研究院, 大连 116024)

2)(大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024)

(2009 年 10 月 30 日收到; 2010 年 1 月 8 日收到修改稿)

为了探索纳秒脉冲强激光与材料的相互作用机理, 建立了二维数值模型, 利用有限差分法对纳秒激光脉冲烧蚀金属铝的温度场进行了数值模拟. 通过对比不同脉宽、光斑和能量下激光引起的温度场随时间的演化, 发现脉冲的前期温度升高比后期快. 等温图显示中心温度升高最快, 烧蚀轮廓与激光束形状相似, 烧蚀深度达 1—5 μm . 脉宽越长, 烧蚀越窄和越深, 光斑越大, 烧蚀越宽和越浅. 数值研究表明, 1) 激光的脉冲形状、脉宽和功率密度直接影响烧蚀的形状和深度; 2) 激光功率密度在 10^9 W/cm^2 量级烧蚀面近似为光斑大小. 这些结果对于实验上设计激光控制参数有一定指导作用.

关键词: 能量吸收机理, 温度场模型, 烧蚀形状, 烧蚀深度

PACC: 4410, 1240P, 4255B, 4260H

1. 引 言

激光与物质的相互作用机理一直是多学科的研究热点^[1-12], 目前已广泛应用于激光加工和刻蚀、材料改性、激光驱动技术、激光生物和医学等领域. 当入射激光辐照在材料上, 能量在很薄的透射深度内被吸收, 引起表面的温度升高, 进而热量向材料内部传递. 当激光强度足够大时, 被辐照材料的表面会发生熔化、汽化、甚至电离形成等离子体等复杂的物理过程. 对于这些过程, 实验上很难进行实时观察和测量, 且费用很昂贵, 对于高功率激光脉冲与物质的作用尤为如此. 因此, 有必要对激光脉冲作用引起的热效应进行深入研究. 本工作特别关注纳秒尺度下单激光脉冲与金属材料的相互作用. 这方面的工作, 对于激光精确加工、激光驱动技术和激光冲击硬化过程中激光参数的设计有一定的理论指导作用.

激光-材料相互作用引起的热效应及相关效应, 前人在实验和理论上已做了大量的研究, 主要包括数值模型和实验^[1,2,13-20]. 早在 1965 年, Ready 等^[1]采用两种模型考察了材料吸收激光能量所引起的温度效应. 他们在低激光功率密度下利用通常的热

传导模型, 在高功率激光密度下采用改进模型. 并在假定激光功率密度和一些热物性参数为常数的基础上, 他们分析了相变的影响和温度随深度的变化, 发现激光束实际的形状和金属热物性参数对结果十分重要. 1987 年, Chan 和 Mazumder^[2]提出考虑了相变机理的一维稳态模型, 可以描述激光引起的一维温度场和对材料的热破坏. 1990 年, Kar 和 Mazumder^[13]发展了二维模型, 研究了激光辐照过程中熔化和汽化对材料的破坏作用. 2000 年, Cavendish 实验室的 Watson 和 Field^[14]测量了脉宽为 10 ns 和光斑直径为 1 mm 的激光脉冲对 Al 膜的烧蚀深度, 他们采用的激光能量为 51—155 mJ, 烧蚀深度为 0.35—1 μm . 2004 年, 倪晓昌和王清月^[15]采用有限差分法, 假定材料吸收率为常数 0.61, 对飞秒和皮秒脉冲激光在金属表面烧蚀过程的温度场进行了一维数值模拟, 并分析了双温方程描述较短脉冲激光作用的合理性. 张端明等^[6,16-18]在一维温度模型的基础上对烧蚀特性做了详细研究, 考虑了激光烧蚀材料下动态边界和动态吸收率随时间的变化, 更真实地描述了激光烧蚀过程中的物理机理. 模拟结果与实验值更加符合, 为脉冲激光沉积法的机理研究提供了理论依据. 2008 年, Zhan 等^[19]在吸收模型基础上研究了高反射涂料的温度场, 用

* 国家自然科学基金(批准号: 10875021)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhaojj@dlut.edu.cn

电磁场理论描述了能量吸收率随材料表面温度的变化. 事实上, 随烧蚀材料温度的升高, 对激光的反射率会明显下降, 特别是高功率脉冲作用^[21,22]. 尽管前人做了大量工作, 也取得诸多成果, 但是大多数现有的模型都没有包含以下两个重要因素: 1) 能量吸收率和热物性参数随温度的变化; 2) 二维效应, 实验上发现激光光斑大小和功率密度对烧蚀形状和边界影响很明显. 因此, 建立合适的物理模型, 考察激光脉冲的烧蚀形状尤为重要.

本文通过考虑能量吸收和热传导机理、相变潜热、材料的热物性参数, 建立了二维温度场模型, 模拟得到二维温度场的动态分布以及激光烧蚀的形状和深度. 这些数值模拟结果, 不仅有助于深入地理解激光-物质作用的物理机理, 而且对实验上设计激光控制参数起到理论指导作用.

2. 数值模型

2.1. 能量的吸收机制

实验上发现, 在激光与材料相互作用过程中, 能量吸收率随辐照表面温度升高而增加^[21,23]. 事实上, 能量的吸收率与激光的波长、材料成分及温度有密切关系. 在电磁场理论的基础上, 利用 Drude 理论和电导率的温度效应^[21,22,24], 可以得到材料表面对激光能量吸收率 $A(T)$ 随温度变化的关系式为

$$A(T) = 1 - R(T) = 1 - \left| \frac{n(\omega, T) - 1}{n(\omega, T) + 1} \right|^2, \quad (1)$$

$$n^2(\omega, T) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \left(1 - \frac{\nu_0^2}{\omega^2} \right)^{-1}, \quad (2)$$

$$\text{其中 } \nu_0 = \frac{\omega_{pe}^2}{4\pi\mu\sigma_0(T)}, \sigma_0(T) = \frac{\sigma_0(T_0)}{1 + \beta(T - T_0)},$$

$R(T)$ 表示反射率, $n(\omega, T)$ 为金属材料的折射率; ω 为激光角频率, $\omega_p = (n_e e^2 / (\epsilon_0 m_e))^{-1/2}$ 为金属材料的等离子体频率(取决于电子的密度 n_e), 其中 ϵ_0 是真空绝对介电常数; ν_0 为电子和离子碰撞频率; $\sigma_0(T)$ 为电导率; β 为材料系数, 取 $\beta = 0.0063$.

根据(1)和(2)式计算得到金属表面对 1064 nm 激光光束吸收率随温度的变化关系如图 1 所示, 能量吸收率 $A(T)$ 随温度非线性增加, 这与实验测量和 Hagen-Rubens 公式预测的趋势相一致^[21]. 随着温度升高, 金属电导率降低, 导致金属反射率明显下降, 也即吸收率增加.

激光能量沉积通常发生在一个很薄的穿透深

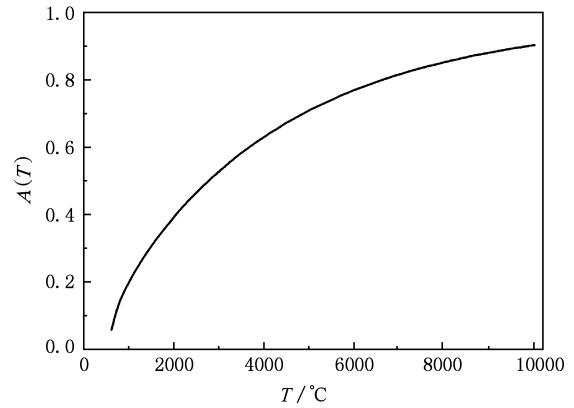


图 1 金属铝对 1064 nm 激光的吸收率随温度的变化

度内, 对于金属材料穿透深度为纳米量级. 根据 Lambert-beer-Bouguer 定律, 光强 I 随入射深度 z 呈指数衰减^[21,24]:

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z), \quad (3)$$

其中, I_0 是光斑中心的最大光强, α 是激光在材料中的吸收系数. 对于近红外波长 (0.75—1.5 μm) 的光, 吸收系数 $\alpha = 2\omega_p/c$, $\delta = 1/\alpha$ 为吸收深度(穿透深度), 表示光强衰减为 $1/e$ 的传播距离.

激光的空间分布与能量的作用面积密切相关, 为了描述激光辐照材料引起的二维效应, 我们假定激光束为轴对称 Gauss 光束, 激光束的空间形状可描述为

$$f(r) = \frac{2}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right), \quad (4)$$

式中, r_0 为光斑半径(表示光强下降为 $1/e$ 时到光束中心的距离), 系数 2 对应于在 r_0 范围内的能量占总激光能量的 85%. 我们模拟采用的激光束形状(见图 2)与实验测量基本一致^[23].

同时, 为描述激光脉冲随时间的演化, 通过参考过去的实验和理论研究得到的脉冲时间演化关系^[23,25,26], 我们拟合出与实验相符合的脉冲时间分布函数(见图 3), 具体表达式如下:

$$g(t) = \frac{4}{\tau} \left(1 - \exp\left(-\frac{1.9t}{\tau}\right) \right) \exp\left(-\frac{1.9t}{\tau}\right), \quad (5)$$

式中 t 代表脉冲时间, τ 代表脉宽, 系数 1.9 代表脉宽调节参数.

于是激光功率密度分布与激光能量、空间和时间分布之间的关系可写为

$$I(r, t) = E \cdot f(r) \cdot g(t), \quad (6)$$

式中, $I(r, t)$ 为激光脉冲强度分布, E 为入射激光能量.

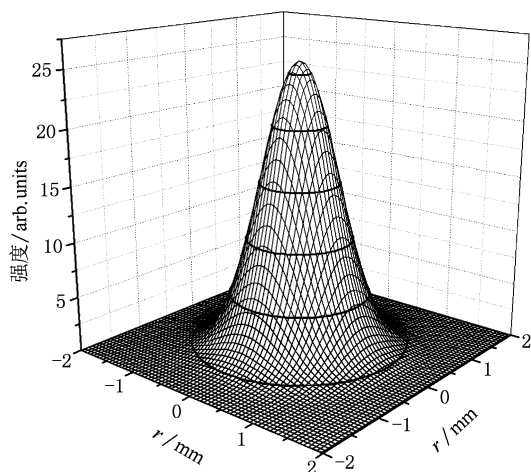


图2 当前模型的高斯激光束空间分布

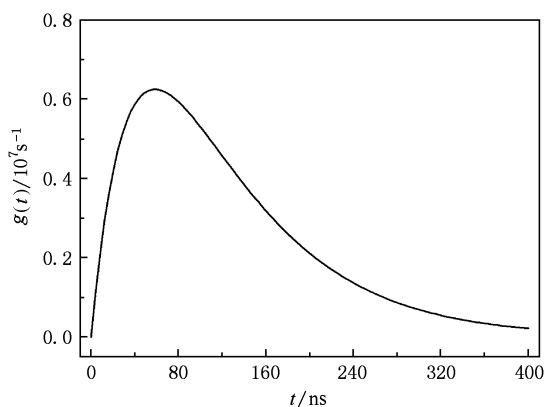


图3 激光脉冲的形状(脉宽持续 160 ns)

通过以上的理论分析,入射激光能量以内热源形式注入,具体表述如下:

$$Q(r, z, t) = \begin{cases} \frac{A(T) \cdot d[I(r, t) \alpha \exp(-\alpha z)]}{dt \cdot dr \cdot dz} & t \leq \tau \\ 0 & t > \tau \end{cases}, (7)$$

(7)式中, $Q(r, z, t)$ 为在激光穿透深度范围内单位体积吸收的能量.

2.2. 温度场模型

入射的激光能量首先沉积在材料表面,然后通过热传导将热量传递到材料内部.由于电子之间自由碰撞的弛豫时间为 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ s,在纳秒时间尺度范围内,电子吸收的能量有足够的时间传递给周围晶格.所以入射激光能量瞬间在材料表面很薄的深度被吸收,并达到电子和晶格的局域动态热平

衡.本工作做如下4个假设:1)激光束垂直照射材料;2)能量随温度梯度呈线性变化;3)材料为各向同性且熔化和汽化不影响能量吸收;4)由于纳秒脉冲作用是瞬态的,可以采用绝热边界条件.在以上假设的基础上,实际的三维温度场问题在轴对称柱坐标系下就转化为二维(见图4).根据热传导理论,我们建立二维温度场数值模型

$$\rho c(T) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + L_m + L_v + Q(r, z, t), (8)$$

$$\text{边界条件: } -k \left(\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right)_{z=0, \infty} = 0, (9)$$

$$-k \left(\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right)_{r=0, \infty} = 0, (10)$$

$$\text{初始条件: } t = 0, T(z, r, 0) = T_0, (11)$$

其中 $T(r, z, t)$ 代表材料温度; r, z 为径向和轴向坐标变量; t 为时间变量; $\rho, c(T), \kappa(T)$ 分别为材料的密度、比热容和热传导系数; $L_m (L_v)$ 为熔化潜热(汽化潜热); $Q(r, z, t)$ 代表前面定义的激光能量注入源; T_0 为初始温度.

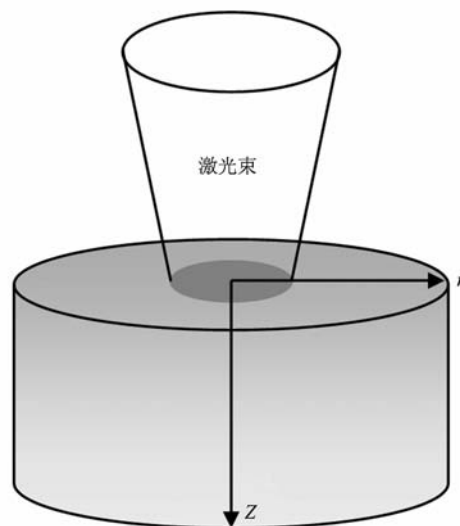


图4 温度场模型

采用有限差分方法对以上方程组进行数值求解,为了保证差分方程求解的稳定性,在差分过程中采用了二维交替隐式差分格式^[27],最终得到激光辐照材料引起的温度场分布.

3. 计算结果和讨论

本工作考虑单激光脉冲,所采用的激光参数和物理常数在表 1 中给出.烧蚀材料选取金属纯铝,其材料参数总结在表 2 中.对能量的吸收率 $A(T)$ 由 (1) 式得到(见图 1).在计算中,径向取 500 步,轴向取 500 步,时间步长取 0.001 ns,总计算时间取为单脉冲持续时间.

为了检验模型的合理性,我们首先根据实验的激光参数^[1,14](激光功率密度为 1×10^9 W/cm²,光斑为 $\Phi = 1$ mm 和脉宽为 44 ns 及激光功率密度为 2.1×10^9 W/cm²,光斑为 $\Phi = 1$ mm 和脉宽为 10 ns)模拟了对铝烧蚀的形状和深度.图 5 给出了模拟的二维烧蚀轮廓,并与实验作了对比.从图 5(a) 可以看出计算的烧蚀深度约为 3.1 μm ,与实验测量值 3.6 μm ^[1]相吻合.图 5(b) 显示烧蚀深度约为 1.4 μm ,与实验测量值 1.0 ± 0.1 μm ^[14]接近.偏差的原

因可能来源于模型中没有考虑汽化物质(等离子体)对吸收率的影响和高温电离需要的能量.相比前人的模型,我们的模拟结果更接近实验值,从而证明我们的模型是合理的.

表 1 激光参数和常数^[21,22,24]

名称	符号	数值和单位
圆频率	ω	1.77×10^{15} s ⁻¹
等离子体频率	ω_p	2.4×10^{24} s ⁻¹
光速	c	3.0×10^8 m·s ⁻¹
真空绝对介电常数	ϵ_0	8.854×10^{-12} F·m ⁻¹
吸收系数	α	16×10^8 m ⁻¹
吸收深度	δ	10 nm
波长	λ_0	1064 nm
光斑半径	r_0	0.5/1/2/3 mm
脉宽	τ	10 /160 ns
初始温度	T_0	20 °C
电导率	$\sigma_0(T_0)$	3.2×10^{17} s ⁻¹

表 2 铝材料的热物性参数和常数^[28]

名称	符号	数值和单位
固态密度	ρ_s	2710 kg·m ⁻³
液态密度	ρ_l	2373 kg·m ⁻³
熔化温度	T_m	660 °C
汽化温度	T_v	2500 °C
固态比热容	c	$(874.4 + 0.52 T)$ J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
液态比热容	c_l	1178 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
气态比热容	c_g	1178 J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹
固态热传导	K_s	$(240.5 - 0.0065437 T - 0.000059 T^2)$ W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
液态热传导	K_l	$(61.1467 + 0.065437 T - 1.33187 T^2)$ W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
气态热传导	K_g	115 W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹
融化潜热	L_m	3.87×10^5 J·kg ⁻¹
汽化潜热	L_v	8.3×10^6 J·kg ⁻¹
气体常数	R	8.314475 J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹
铝膜半径	r	1/1.5/2.5/3.5 mm

3.1. 不同脉宽下激光脉冲烧蚀金属铝的温度场

考虑能量为 0.4 J、光斑直径为 2 mm 的单脉冲激光,分别考虑两种情况:1)激光脉宽为 160 ns,峰值强度为 7.96×10^7 W/cm²;2)激光脉宽为 10 ns,峰值强度为 1.27×10^9 W/cm².图 6 显示了不同时刻材料表面在径向的温度分布.在脉冲前期,由于铝表面对激光的反射率很高,温度升高较慢;当材料发生相变时,吸收的绝大部分能量提供了融化潜热和汽化潜热,随后对能量的吸收显著提高.由图 6

可以清楚地看到,在辐照的中心区域温度迅速升高,在辐照中心温度最高,向周边非线性逐渐减小,并在相变时有明显变化,如图 6(a) 中从 80 ns 的 3562 °C 升到 128 ns 的 10784 °C,而图 6(b) 中从 2 ns 的 21044 °C 升到 6 ns 的 71778 °C.随后激光脉冲开始衰减,温度升高的趋势变慢,整体上径向的温度分布与激光强度分布十分相似.另一方面,对比脉宽 160 和 10 ns 的烧蚀和温升率可以发现:1)前者在 80 ns 时表面材料开始汽化,发生相变的表面约为 1/2 光斑大小,后者在 2 ns 时表面材料开始汽

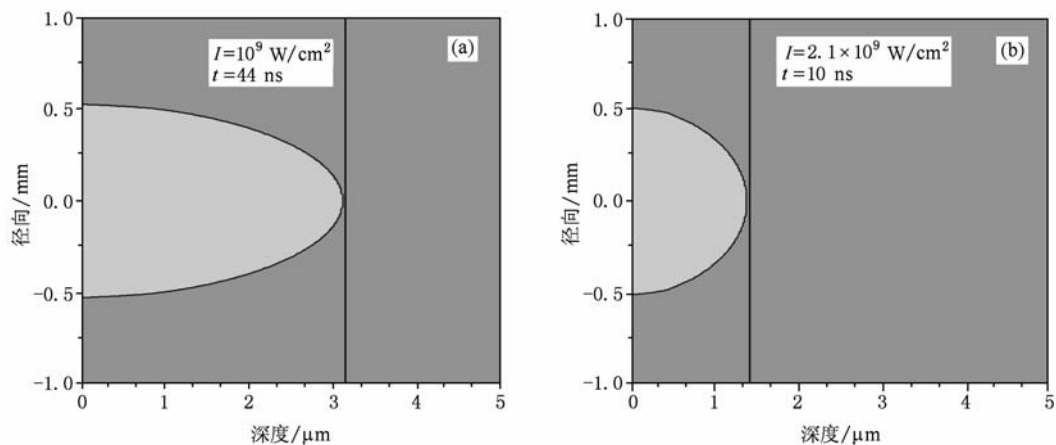


图5 计算的烧蚀深度与实验^[1,14]的对比 (a) 光斑为 $\Phi = 1$ mm, 功率密度为 1×10^9 W/cm², 脉宽为 44 ns; (b) 光斑为 $\Phi = 1$ mm, 功率密度为 2.1×10^9 W/cm², 脉宽为 10 ns

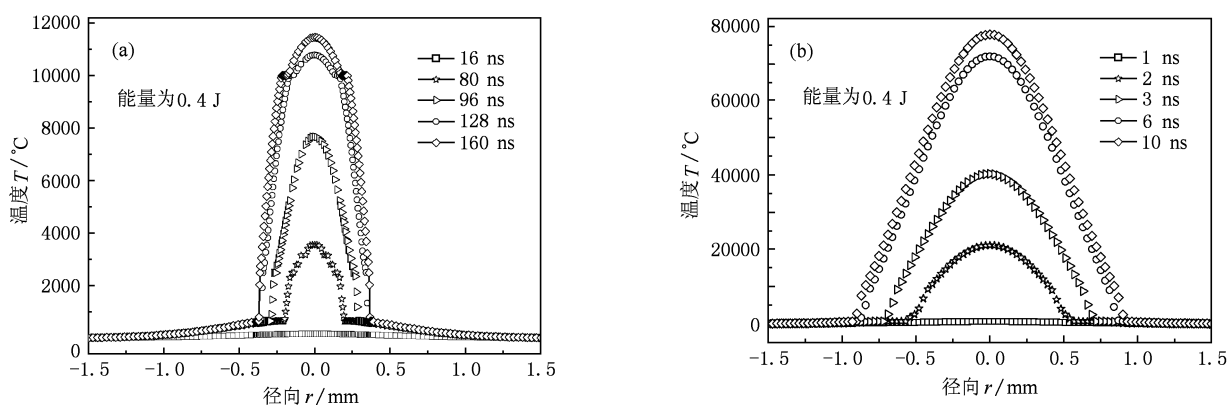


图6 径向温度随时间的变化($z=0$) (a) 脉宽为 $\tau = 160$ ns, (b) 脉宽为 $\tau = 10$ ns

化, 10 ns 时烧蚀表面近似等同光斑大小; 2) 前者最大温升率达 8.4×10^{10} °C/s; 而后者最大温升率达 1.2×10^{13} °C/s, 相差约两个量级, 这表明激光功率密度对升温率的影响十分显著. 通过定量比较, 我们发现激光脉宽对烧蚀材料有重要的影响, 即相同的激光能量下, 脉宽越短, 功率密度越大, 导致烧蚀材料表面的温度越高、汽化面越大, 进而产生烧蚀的轮廓越平坦.

图7 给出温度随轴向深度的变化(取轴心 $r = 0$), 整体上温度随深度的增加而降低, 脉宽越长温度下降越慢. 对比发现, 相同的激光能量为 0.4 J 时, 脉宽越短功率密度越高, 从 160 ns 的 7.96×10^7 W/cm² 变为 10 ns 的 1.27×10^9 W/cm². 随脉宽变短, 表面的烧蚀温度成倍升高, 最大温度从 160 ns 的 11454 °C 升到 10 ns 的 77673 °C, 而烧蚀深度变浅, 从 160 ns 的 4 μm 变浅为 10 ns 的 1.6 μm. 这些结果表明, 相同能量和光斑大小的条件下, 功率密度与脉宽的关系可以近似为 $I = 4E/\pi D^2 \tau$, (D 为光

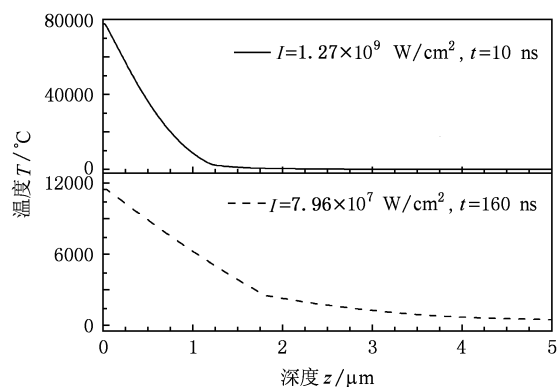


图7 温度随轴向深度的变化(轴心 $r=0$)

斑直径) 并且将对材料烧蚀深度产生影响.

图8 给出 160 和 10 ns 脉宽的激光脉冲烧蚀铝材料的三维温度场分布. 图8(a) 脉冲较长, 功率密度较小, 烧蚀主要集中在辐照中心, 最大的烧蚀深度为 4 μm; 图8(b) 脉冲较短, 功率密度较大, 烧蚀表面近似为光斑大小, 最大的烧蚀深度为 1.6 μm.

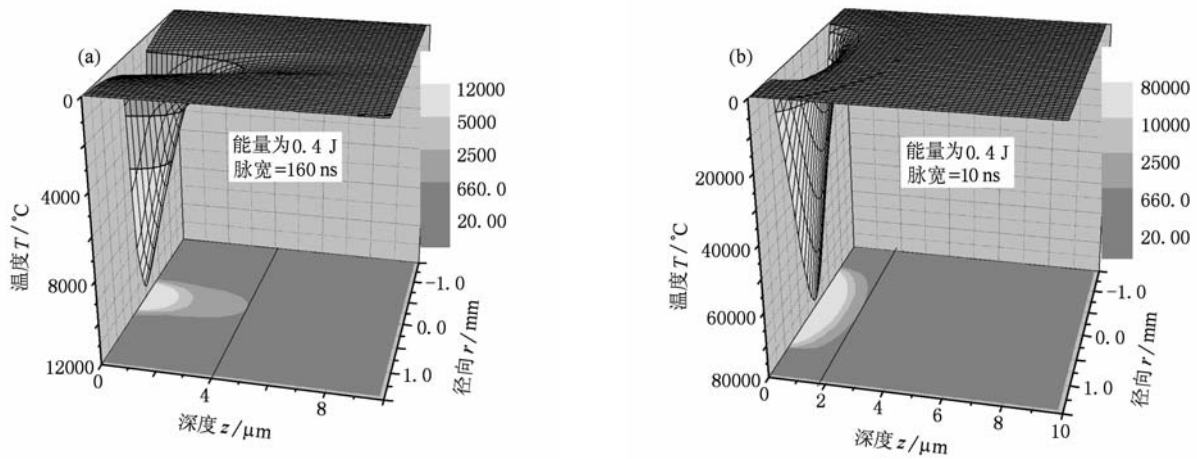


图8 三维温度场分布 ($\Phi = 2 \text{ mm}$) (a) 脉宽为 160 ns, (b) 脉宽为 10 ns

这说明对精确的激光打孔和刻蚀应该采用较长的脉冲,对于材料的表面改性或激光冲击硬化等则应采用较短脉冲.

3.2. 不同光斑大小下激光脉冲烧蚀铝的温度场

模拟采用的激光参数为:能量为 2 J,脉宽为 10

ns,光斑直径分别取为 4 和 6 mm. 当光斑为 $\Phi = 4 \text{ mm}$ 时,对应的激光功率密度为 $1.59 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$; 当光斑为 $\Phi = 6 \text{ mm}$ 时,激光功率密度 $7.07 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$. 图 9 和 10 分别给出光斑为 $\Phi = 4 \text{ mm}$ 和 $\Phi = 6 \text{ mm}$ 条件下二维温度场随时间的演化. 对于前者,在 2 ns 时,辐照区域局部发生熔化和汽化,5 ns

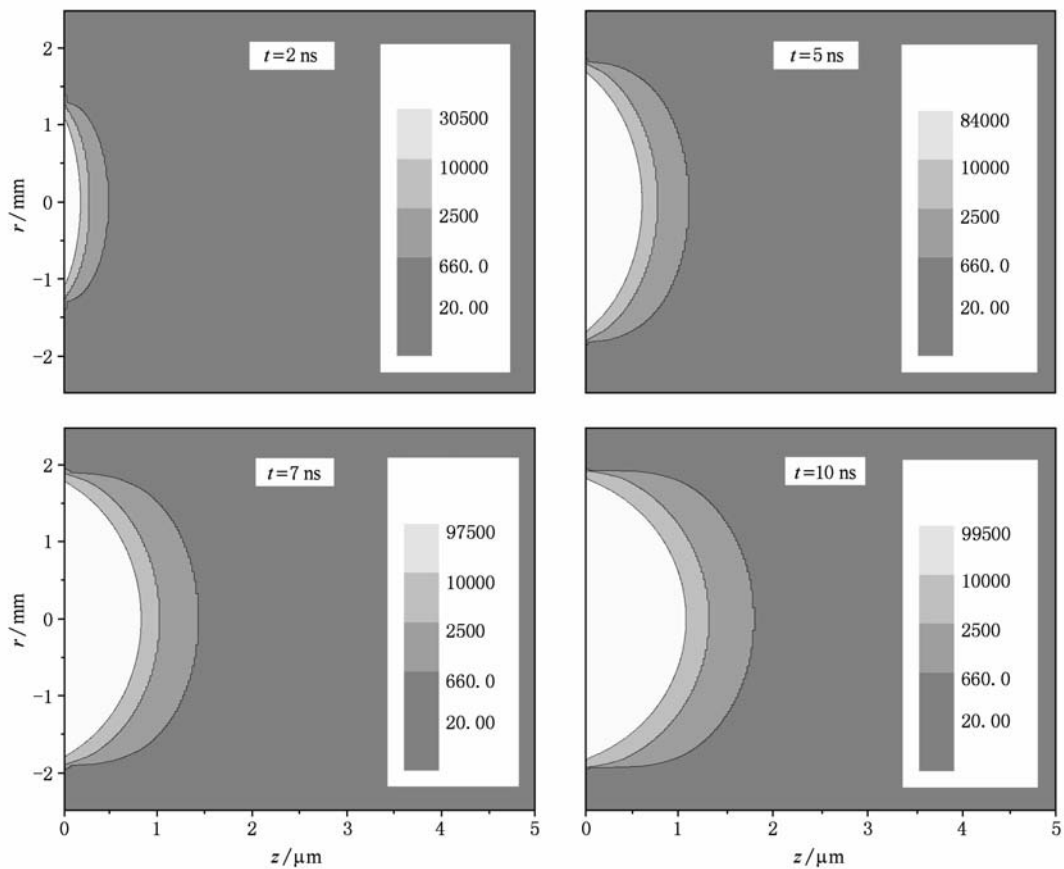


图9 烧蚀形状随时间的变化 (能量为 2 J,脉宽为 10 ns,光斑为 $\Phi = 4 \text{ mm}$)

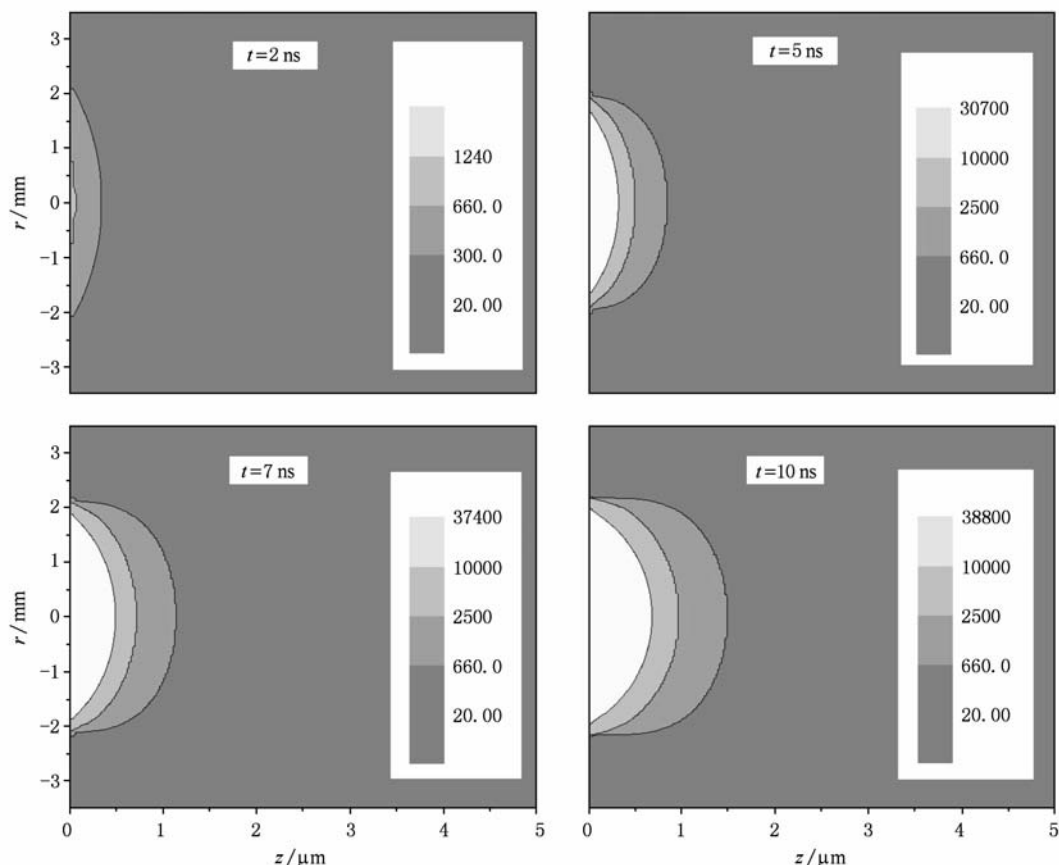


图 10 烧蚀形状随时间的变化 (能量为 2 J, 脉宽为 10 ns, 光斑为 $\Phi = 6$ mm)

时烧蚀形状初步形成, 10 ns 时烧蚀深度达到最大值 $1.7 \mu\text{m}$, 烧蚀面近似等于光斑大小, 且形状比较平坦. 对于后者, 在 2 ns 时, 辐照区域局部刚刚发生熔化, 随后烧蚀区域逐渐扩大, 最大烧蚀深度为 $1.5 \mu\text{m}$, 最终烧蚀面小于光斑大小且形状比较平坦. 对比不同光斑的烧蚀效应, 我们发现, 在相同激光能量下, 光斑越大, 功率密度越小, 从而导致材料表面熔化和汽化延后、烧蚀速度变慢、烧蚀面积扩大和表面峰值温度明显降低. 这表明, 激光功率密度在 10^9 W/cm^2 量级时烧蚀表面近似为光斑大小, 激光功率密度小于 10^9 W/cm^2 量级时烧蚀表面明显小于光斑大小. 以上模拟结果, 对于实验上合理选择激光参数 (激光光斑、功率密度和脉宽) 具有一定的理论指导作用.

4. 结 论

通过考虑能量吸收和热传导机理、相变潜热及材料的热物性参数, 我们建立了二维模型, 利用有限差分法对纳秒激光脉冲烧蚀金属铝材料的温度场进行了数值模拟. 结果表明: 1) 烧蚀的形状和深度对于激光功率密度、光斑半径和脉宽非常敏感; 2) 材料对能量的吸收率随温度的升高呈单调上升关系; 3) 烧蚀材料的加热率由激光能量的吸收率和激光功率密度所决定; 4) 激光功率密度在 10^9 W/cm^2 量级时, 烧蚀表面近似为光斑大小且烧蚀形状较平坦; 5) 材料的烧蚀深度和烧蚀形状与材料的热物性参数及激光参数呈现复杂的依赖关系.

- [1] Ready J F 1965 *J. Appl. Phys.* **36** 462
 [2] Chan C L, Mazumder J 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 4579
 [3] Milchberg H M, Freeman R R, Davey S C, More R M 1988

Phys. Rev. Lett. **61** 2364

- [4] Aden M, Beyer E, Herziger G, Kunze H 1992 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **25** 57

- [5] Yilbas B S, Yilbas Z, Akcakoyun N 1996 *Opt. Laser Technol.* **28** 503
- [6] Zhang D M, Li Z H, Huang M T, Zhang M J, Guan L, Zou M Q, Zhong Z C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 914 (in Chinese) [张端明、李智华、黄明涛、张美军、关丽、邹明清、钟志成 2001 物理学报 **50** 914]
- [7] Zheng R L, Chen H, Liu J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 0554 (in Chinese) [郑瑞伦、陈洪、刘俊 2002 物理学报 **51** 0554]
- [8] Xu H Y, Zhang Y C, Song Y Q, Chen D Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1758
- [9] Zhang K Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1815 (in Chinese) [张可言 2004 物理学报 **53** 1815]
- [10] Cheng J X, Zheng Z J, Chen H S, Miao W Y, Chen B, Wang Y M, Hu X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3419 (in Chinese) [成金秀、郑志坚、陈红素、缪文勇、陈波、王耀梅、胡昕 2004 物理学报 **53** 3419]
- [11] Niu Y X, Huang F, Duan X F, Wang Y F, Zhang P, He C J, Yu Y, Yao J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4816 (in Chinese) [牛燕雄、黄峰、段晓峰、汪岳峰、张鹏、何琛娟、禹晔、姚建铨 2005 物理学报 **54** 4816]
- [12] Zhang H Y, Wu S G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5314 (in Chinese) [张红鹰、吴师岗 2007 物理学报 **56** 5314]
- [13] Kar A, Mazumder J 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 3884
- [14] Watson S, Field J E 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33** 170
- [15] Ni X C, Wang Q Y 2004 *Chin. J. Laser.* **31** 277 (in Chinese) [倪晓昌、王清月 2004 中国激光 **31** 277]
- [16] Zhang D M, Hou S P, Guan L, Zhong Z C, Li Z H, Yang F X, Zheng K Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2237 (in Chinese) [张端明、侯思普、关丽、钟志成、李智华、杨凤霞、郑克玉 2004 物理学报 **53** 2237]
- [17] Zhang D M, Li L, Li Z H, Guan L, Hou S P, Tan X Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1283 (in Chinese) [张端明、李莉、李智华、关丽、侯思普、谭新玉 2005 物理学报 **54** 1283]
- [18] Tan X Y, Zhang D M, Li Z H, Guan L, Li L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3915 (in Chinese) [谭新玉、张端明、李智华、关丽、李莉 2005 物理学报 **54** 3915]
- [19] Zhan M Q, Shao J D 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 045306
- [20] Liu M Q, Li B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3402 (in Chinese) [刘明强、李斌成 2008 物理学报 **57** 3402]
- [21] Sun C W 2002 *Laser Irradiation Effects* (Beijing: Defense Industry Press) pp7—18, pp21—22 (in Chinese) [孙承伟 2002 激光辐照效应(北京:国防工业出版社)第7—18、第21—22页]
- [22] Colvin J D, Ault E R, King W E, Zimmerman I H 2003 *Phys. Plasma.* **10** 2940
- [23] Nowakowski K A 2005 *Ph. D. Dissertation* (Worcester: Worcester Polytechnic Institute) p104, p322
- [24] Johnston A H 1993 *Trans. Nucl. Sci.* **40** 1694
- [25] Yilbas B S, Mansour S B 2007 *Int. J. Therm. Sci.* **46** 385
- [26] Solana P, Kapadia P, Dowden J M, Marsden P J 1999 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32** 942
- [27] Peaceman D W, Rachford H H 1955 *J. Soc. Ind. Appl. Math.* **3** 28
- [28] Qin Y, Wu A M, Zou J X, Liu Y, Wand X G, Dong C 2003 *Trans. Mater. Heat Treat.* **24** 85 (in Chinese) [秦颖、吴爱民、邹建新、刘悦、王晓刚、董闯 2003 材料热处理学报 **24** 85]

Two-dimensional numerical simulation of laser-ablation of aluminum material by nanosecond laser pulse *

Zhang Peng-Bo¹⁾ Qin Ying¹⁾ Zhao Ji-Jun^{1)†} Wen Bin²⁾

1) (*Laboratory of Materials Modification by Laser, Electron, and Ion Beams and College of Advanced Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

2) (*School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

(Received 30 October 2009; revised manuscript received 8 January 2010)

Abstract

To investigate the interaction between high-power pulsed laser and metal materials, we established a two-dimensional numerical model. The laser-induced two-dimensional temperature distribution was simulated using a finite difference method. From comparison of temperature evolution under different pulse time, spot sizes and energies, it can be seen that the rise of temperature in the initial period is faster than that in the later periods. Isothermal diagram shows that the temperature rising rate is fastest in the center of laser irradiating zone and that the ablation depth is in the range of 1—5 μm . As the laser pulse duration becomes longer, the ablation zone becomes narrower and deeper. As the laser spot diameter increases, the ablation zone becomes wider and shallower. The present numerical results indicate that: (1) the ablation shape and depth sensitively depend on the laser shape, pulse duration and power density; (2) with laser power density in the order of 10^9 W/cm^2 , the ablation area is roughly of the orgc of the laser spot. These results are helpful for designing relevant laser parameters in experiments.

Keywords: energy-absorption mechanism, temperature field, ablation shape, ablation depth

PACC: 4410, 1240P, 4255B, 4260H

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10875021).

† Corresponding author. E-mail: zhaojj@dlut.edu.cn