

·激光技术·

长脉冲激光与金属相互作用影响分析

任天宇, 王 洋, 薛 阳

(长春理工大学, 吉林 长春 130012)

摘 要:通过使用1 064 nm, Nd:YAG长脉冲激光作用在金属材料从理论和数值模拟的角度研究各种因素对激光加热效应的影响。针对国内外目前长脉冲激光与物质相互作用研究的现状,分析和模拟了长脉冲激光与材料相互作用过程中的各种现象和问题,特别是对长脉冲激光与金属相互作用时的温度场及应力场进行了较全面的理论分析。就靶材物质对激光的反射、吸收和转化的基本机制,激光对金属材料加热的温度场、应力场及其熔融的温度场和固-液态界面的移动速度及液态质量迁移、激光引起材料的气化、烧蚀的质量迁移,进行了系统的讨论。

关键词:激光与金属相互作用;数值模拟;数值研究

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)06-0028-05

Analysis of Long Pulse Laser-metal Interaction

REN Tian-Yu, WANG Yang, XUE Yang

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: The effect of a variety of factors on the laser heating from the theory and numerical simulation, by using 1 064 nm Nd:YAG long pulse laser interaction with metal. The phenomenon and problem in the process of the laser-matter interaction are analyzed and simulated, as for laser-metal interaction research at home and abroad, especially the temperature field and stress field of the long pulse laser-metal interaction are analyzed theoretically. The effect of the basic mechanism of the laser reflection, the absorption and the transformation on the target material, the temperature field, the stress field and the melting temperature of the metal material heated by the laser, the moving velocity of the solid-liquid interface, the liquid mass transfer, the material gasification and the ablation mass transfer are analyzed.

Key words: laser-metal interaction; numerical simulation; numerical research

1 高功率激光对靶面的作用

高功率激光光束作用于靶材时,靶表面吸收大量激光能量,引起温度升高、熔融、气化、喷溅等现象。具体过程依赖于激光参数(能量、波长及脉宽等)、材料特征和环境条件。一般说来,在不同数量级的激光功率密度作用下靶表面发生的物理现象是^[1]:

103-104 W/cm² 104-106 W/cm² 106-108 W/cm² 108-1 010 W/cm²
加热 熔融 气化 等离子体

激光与物质相互作用时产生两个典型效应:二次非线性光学效应和高压冲击波(光力学)效应。当高功率激光辐照在靶材上时,一部分被靶材表面反射,一部分通过靶材透射,一部分散射,而大部分则被靶材吸收^[2]。

1.1 强激光对物质作用的研究现状

国内外科学工作者在高功率激光与物质相互作用方面做了大量的研究工作。其中以美国和前苏联

收稿日期:2011-12-10

基金项目:国家自然科学基金(61077024/F050205)

作者简介:任天宇(1983-),男,浙江绍兴人,博士研究生,研究方向为物理电子学;王洋(1982-),女,吉林长春人,博士研究生,研究方向为物理电子学。

的研究工作尤为突出。目前国外通常使用的激光与物质作用模型是Feisch U等建立了一个LGA (lattice gas automata)数值流体力学模型,经过近些年的不断发展和改进形成了今天的格子 Boltzmann 模型 LBE (lattice boltzmann quation models)。LBE 模型在模拟各种复杂系统物理现象等方面得到了广泛的应用。例如,不可压缩流体、混相流体、电磁流体等,但它也存在一些不足,在模拟超音速流动现象时不是很理想,只是对模拟简单的管内冲击波现象时比较满意,对于冲击波在障碍物表面上的折射现象的数值模拟还没有取得成功。H.Steiner 和 W.Gretle 等人利用非自相似流体力学讨论了在真实气体环境中激光驱动球面冲击波的数值模拟。

目前由于激光器件的限制,在高功率激光与物质相互作用方面研究发展较快,当前的气体大功率激光器、固体激光器和化学激光器方面取得了很大的成就。

1.2 激光对物质作用研究存在的问题

由于激光与靶材相互作用的物理过程十分复杂(既取决于靶材的多样化,又与作用激光参数的多样化和作用条件的多样化有关),并且其物理过程涉及诸多学科领域,包括激光物理、势力学、等离子体物理、非线性光学、传热学、气体动力学、流体力学、材料力学、固体物理、固体材料的光学性质等方面。因此,有关高功率激光与靶材相互作用问题还没有得到圆满的解决。其原因主要有以下几点:首先,是研究对象本身的复杂性和多样化;其次,是一些基本问题和理论、模型以及适用范围等还没有得到清楚的

解释和验证;第三,是激光器件本身的日益发展带来了新的研究内容、激光新的应用带来新的理论问题;第四,现阶段对激光与物质相互作用的研究大部分只是对其中的部分阶段进行了讨论,对于整个过程并没有进行详细的研究。国外如俄罗斯虽然对激光材料的加热、熔融和气化过程的研究有了系统的软件,但他们的软件存在明显的不足,如在熔融过程应该存在一个过渡平台,但他们的软件没有反映。

1.3 实验方案的制定及具体措施

使用 1 064 nm, Nd:YAG 长脉冲激光作用在金属材料从理论、实验和数值模拟的角度深入地研究上述各种因素对激光加热效应的影响。使用 1 064 nm Nd:YAG 激光器照射铝合金(30crmnsiA 钢板)表面。改变激光光斑半径和辐照时间观察靶材上表面温度分布,靶材上、下表面中心点温度随时间的变化及分析靶材温升速率随时间的变化情况,激光光斑半径改变的情况下,上、下表面中心点温度随时间的变化。

实验装置如图 1 所示。

材料:2A12 铝合金,尺寸:半径 6 cm,厚度:0.2 cm。

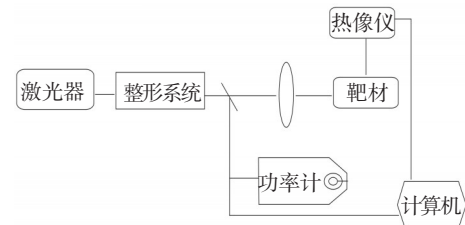


图1 实验装置图

表1 力学参数及物理参数

泊松比	密度 /(kg·m ³)	Specific heat /(J/(kg·°C))	热传导系数 /(W/(m·°C))	热扩散系数 10 ⁻⁵ /°C	强化模量 GPa
0.33	2 800-0.22 T	921+0.48 T	121-0.08 T	2.3	75-0.11 T

2 物质对激光的反射和吸收研究

2.1 物质对激光的反射和吸收微观描述

激光与物质相互作用首先是从入射激光被物质反射和吸收开始的。激光束入射于均匀、各向同性靶材物质时,部分能量被周围气体(或微粒)和靶表

面所散射或反射,进入靶物质的激光能量部分被吸收,其余部分则穿透靶物质继续传播。

从微观机理来看^[3],激光与物质的相互作用是高频电磁场对物质中自由电子或束缚电子作用的结果,物质对激光的吸收与其物质结构和电子能带结构有关。

2.2 数学模型的建立

金属对激光反射与吸收的经典电磁理论可以理解为激光作为电磁波在介质中的传播可用麦克斯韦(Maxwell)方程组进行描述。若记激光在介质中的电场强度为 E ,频率为 ω ,介质的介电常数为 ϵ ,磁导率为 μ ,电导率为 σ ,真空中光速为 c ,介质中光速则为 cn ,其中 n 为折射系数。引入复折射系数 $\hat{n}=n-ik$, \hat{n} 反映经过时间推迟后的相位补偿关系,其中消光系数 k 反映了电磁波幅度的衰减特性。 N,k 一般与入射光的波长有关。因为激光为单色电磁横波,因而其电场强度可以描述为

$$E=E_0 \exp[i\omega(t-\hat{n}\frac{r}{c})] \quad (1)$$

式中, t 为时间; r 为空间位置向量; l 为激光传播方向的单位向量。将该 E 的表达式代入麦克斯韦方程组即可得到反映电磁波传播特性的复折射系数与介质物理常数的关系

$$n^2 = \frac{\mu}{2} \left[\sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} + \epsilon \right] \quad (2)$$

$$k^2 = \frac{\mu}{2} \left[\sqrt{\epsilon^2 + \left(\frac{4\pi\sigma}{\omega}\right)^2} - \epsilon \right] \quad (3)$$

对于电介质 $\sigma=0, n^2=\mu\epsilon > 1, k=0$ 。也就是说,激光在纯粹电介质中的传播速度慢于真空光速 c ,且其强度不发生衰减。激光强度 I 即垂直于传播方向的单位面积上通过的电磁波功率 $I = \frac{cnE^2}{4\pi}$,根据 Lambert-Beer-Bouguer 定律,光强 I 随传播距离 z 呈指数衰减,即有 $I(z)=I(0)\exp(-az)$,式中, a 称为介质对激光的线性吸收系数,从 E 幅度的表达式即可得到

$$a = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{n\lambda} = \frac{4\pi k_0}{\lambda_0} \quad (4)$$

式中, λ 和 λ_0 分别是介质和真空中激光的波长,

$\omega\lambda_0=2\pi c$ 。常数 $\delta=1/a$ 具有长度量纲,表示光强度衰减 e 倍的传播距离,称为电磁波在介质中传播的趋肤深度或吸收深度。

下面考虑激光自真空中正入射于介质表面的情况,入射、反射和折射光束的电场向量分别以上标 i, r, t 表示。光在界面处反射、折射时,传播距离为零,无相位推迟,只需要考虑各波振幅的向量关系。由麦克斯韦方程导出正入射时有

$$E_0^r = \frac{\hat{n}-\mu}{\hat{n}+\mu} E_0^i \quad E_0^t = \frac{2\mu}{\hat{n}+\mu} E_0^i \quad (5)$$

反射光束与入射光束强度之比称为反射率

$$R = \left| \frac{E_0^r}{E_0^i} \right|^2 = \frac{(n-\mu)^2 + k^2}{(n+\mu)^2 + k^2} \quad (6)$$

可以表述为通常在电介质中有 $\mu \approx 1$,因而有

$$R \approx \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (7)$$

电磁场理论表明,若物体对某种频率光的吸收系数很大时,它对该频率光的反射率也很大,例如石英对于波长 $8.5 \mu\text{m}$ 红外光有强反射。这种选择反射现象可利用来确定物体远红外吸收带的位置,或用来分离某些频率范围内的红外线束。

激光通过介质1入射于介质2时,这两种介质界面处的反射率是

$$R = \frac{(n_1-n_2)^2 + (k_1-k_2)^2}{(n_1+n_2)^2 + (k_1+k_2)^2} \quad (8)$$

如果介质很厚或者吸收系数很大,进入的激光几乎被全部吸收,定义该介质对入射激光的吸收率为 $A=1-R = \frac{4n}{(n+1)^2+k^2}$ 。如果介质厚度 d 与吸收系数 a 的乘积不很大,有部分激光从介质背面透射出去,经前后界面多次反射,该介质对入射光束的总吸收率 A 和透射 T ,分别为

$$A = \frac{(1-R)(1-e^{-ad})}{1-Re^{-ad}} \quad T_r = \frac{(1-R)^2 e^{-ad}}{1-R^2 e^{-2ad}} \quad (9)$$

从式(3)和式(5)可以看出,对于电解质 $\frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon}$, a 和 R 都很小,且与激光波长 λ_0 关系不大;金属在红外区段有 $\frac{4\pi\sigma}{\omega\epsilon}$, a 和 R 都很大,且与 λ_0 明显有关,这时

$$n_2 \approx k_2 \approx \frac{2\pi\sigma}{\omega} = \frac{\sigma\lambda_0}{c} \quad \text{从而有}$$

$$a \approx 4\pi \sqrt{\frac{\mu\sigma}{\sigma\lambda_0}} \quad (10)$$

$$R \approx 1 - \frac{2}{n} \approx 1 - 2 \sqrt{\frac{c}{\sigma\lambda_0}} \quad (11)$$

上面式(11)称为 Hagen-Rubens 公式,表明 λ_0 变小时 R 降低,短波长激光更易于被靶物质吸收。 λ_0 短到一定的截至波长, R 变为零,反射消失。表面良好的金属的反射率计算值与实验值比较接近。

3 温度和表面状况对金属光学特性的影响

可以认为温度不低于四分之一德拜温度, $\rho \propto T$;

若温度大大低于德拜温度 $\rho \propto T^b$, $b=5$ 。对于过渡元素,温度 T 趋于绝对零度时, $b \rightarrow 2-3$ 。常用金属的德拜温度约为200~400 K,因此在激光辐照条件下,一般均可认为 ρ 是温度 T 的线性增函数,或者表示为

$$\sigma_0(T_2) = \frac{\sigma_0(T_1)}{1 + \beta(T_2 - T_1)} \quad (12)$$

按照 Drude 理论和电阻率的温度效应计算的光滑金属表面对1 064 nm 光束吸收率随温度变化曲线由图2给出。

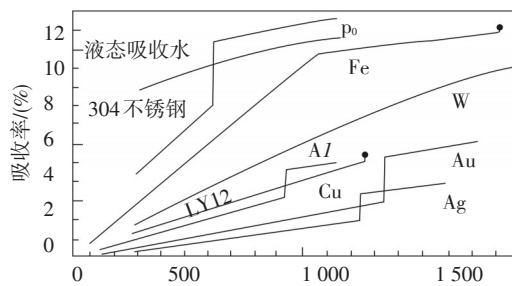


图2 光滑金属表面对1 064 nm 光束吸收率随温度变化曲线

3.1 表面粗糙度的影响

激光加热下金属的表面容易氧化,氧化层的折射系数 n' 、消光系数 k' ,层次结构及厚度 Δ 等决定了金属对激光的吸收。如果氧化层厚度增加到一定的程度,并对入射激光比较透明,氧化层上、下表面间将发生干涉效应,使吸收率大大增加。

3.2 表面熔化和气化的影响

激光照射过程中,金属表面升温,引起激光反射率 R 下降。在表面达到熔化温度但尚未发生相变的一段时间内, R 保持不变,熔化之后 R 继续下降。激光加工中往往采用〔预脉冲+主脉冲〕的波形结构,使工件表面在窄而高的预脉冲作用下提前升温或熔化,降低反射率,以便更好地吸收激光主脉冲的能量。

4 结束语

激光与物体的作用可以认为是物体对激光的吸收就是其内部电荷或振子与激光单色电磁场相互作用的问题,但是实际物质远为复杂,了解其内部结构及光的吸收或发射特征,主要依靠吸收光谱的测量。

液体和固体中分子间相互作用很强,一般把它

们的光谱作为原子和分子光谱模型的引伸加以研究,并不完全反映它们真实的微观结构。固体中存在大量密集的吸收中心,其光谱由若干频率范围较大的连续区组成。如一般金属在可见光和红外波段有很强的连续吸收带,自由电子起主要作用;对于紫外波段以及更高频率的辐射,束缚电子的作用比较显著,金属实际上表现出与电介质相似的光学性质。

固体材料中在趋肤深度内被吸收的激光能量直接转化为自由电子或束缚电子平均动能的增加,其中大部分再通过电子与晶格或离子的相互作用转化为材料表面层的热能^[14],但也存在一些其他的转化机制,如各种粒子的发射效应。

参考文献

- [1] 孙承伟.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 邱元武.激光技术和应用[M].上海:上海同济大学出版社,1997.
- [3] Fan C H, Sun J, Longtin J P. Plasma absorption of femtosecond laser pulses in dielectrics. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(4):275-283.
- [4] Karlsson L. Thermal Stresses in Welding, in R. Hetnarski (ed.). *Thermal Stresses I*, North-Holland, Amsterdam, Chapter 5, 2006:299-389.
- [5] 刘智,李儒新,余玮,等.飞秒超短脉冲激光加热金属平面靶[J]. *光学学报*, 2000, 20(10):1297-1304.
- [6] Douglas A, Iaziti J A, Hayes G B, et al. Time dependence of laser-induced surface breakdown in fused silica at 355 nm in the nanosecond regime[C]// *Proc of SPIE*, 1991, 1441:146-153.
- [7] Wu Z L, Fan Z X. In-Situ investigation of laser induced damage in optical coatings with photothermal deflection technique[J]. *Chinese Physics*, 1991, 11(2):408-412.
- [8] 陈陶.激光与物质热作用过程的数值模拟研究[D].南京:南京理工大学,2004
- [9] W Kautek, J Kruger. Femtosecond pulse laser ablation of material, semiconducting, ceramic and biological materials[J]. *SPIE*, 1994, 2207:600-611.
- [10] Vogel A, Busch S, Parlitz U. picosecond and nanosecond shock wave emission and cavitation bubble generation by optical breakdown in water. *J. Acoust. Soc. Am.* 1996.
- [11] Zysset B, Fujimoto J G, Deytsch T F. Time-resolved measurements of picosecond optical breakdown. *Appl. Phys.* 1989; B48:139-147.
- [12] Frisch U, d'Humieres D, Hasslacher B, Lallemand P, Pomeau

Y,Rivet J PLattice GasHydrodynamics in Two and Three Dimensions[J]. Complex Systems,1987(1):694-707.

[13] Tsutahara M,Feng S.Simulation of the Stratified Flows Us-

ing the Two-ComponentLattice Boltzman Method [J]. Comput Phys Commun,2000(129):131-137.

(上接第13页)

[7] LCoS-Microdisplay Technology and Applications.SID 2000.

[8] Stephen P, Atwood , Kenneth A.Optical System Design Chal-

lenge for High Vollume Reflective LCoS[J] , MicroDisply Inspection, 2001.

(上接第21页)

表2中, S 为标准差,CIEL $^*u^*v^*$ 计算得到的色域面积标准差几乎是CIEDE2000和CIEL $^*a^*b^*$ 的3倍,表明CIEL $^*u^*v^*$ 色空间受明度的影响较大。

综上,对显示器进行三维色彩分析时,无论是色域面积的计算,还是色彩彩度和色差的计算,CIEL $^*u^*v^*$ 计算结果受明度的影响大,若测量环境光源不稳定或者亮度计的精度不高,都会对测量结果产生比较大的影响。而CIEDE2000与CIEL $^*a^*b^*$ 并没有太大差别,但是CIEDE2000公式在色差阈值和明度阈值计算方面要优于CIEL $^*a^*b^*$ 。所以,对于精度要求较高的测量,应该选用CIEL $^*a^*b^*$ 色空间,并使用CIEDE2000公式计算。

3 结论

文中对不同背光源亮度下LCD显示器的RGB三色色坐标进行了测量,分析了亮度对显示器色域覆盖率和色饱和度的影响,并就三维色域分析色空间模型的选取进行了分析和比较,结果表明:

(1)当显示器明度为中高明度时,LCD显示器色域覆盖率最大,红色与绿色的色饱和度随背光源明度的增强而增大,蓝色色饱和度呈先增大后减小的趋势。色域覆盖率大小与RGB三色饱和度成线性关系,且三者的影响权重相差不大。要使得显示器在高明度条件下色域面积不减小,就要提高蓝色色饱和度。

(2)在对显示器色彩进行三维分析时,CIELUV色空间受明度的影响大,结果误差较大。CIELAB色空间受明度的影响较小,CIEDE2000和CIEL $^*a^*b^*$ 二者

计算的结果并没有太大差别,但是CIEDE2000在最小色差和明度阈值计算方面要优于CIEL $^*a^*b^*$,对于精度要求较高的测量和分析,应该选用CIEDE2000公式。

参考文献

- [1] Chih-Hao Chang, Hsing-Chieh Cheng, Yin-Jui Lu, et al. Enhancing color gamut of white OLED displays by using micro-cavity green pixels[J]. Organic Electronics, 2010, 11: 247-254.
- [2] Wei Huang, Jie-Min Li, Li-Mei Yang, et al. Local dimming algorithm and color gamut calibration for RGB LED backlight LCD display[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43: 214-217.
- [3] 许祖彦.大色域显示——新一代显示技术[J]. 物理, 2010, 39(4): 227-231.
- [4] 刘全恩.色域及色域覆盖率[J]. 电视技术, 2004(11): 49-54.
- [5] 李彦,徐岩,李桂苓.高清晰电视系统三维色域研究[J]. 南开大学学报, 2011, 44(1): 30-35.
- [6] 刘明亮,王永宁,朱海红.彩色CRT显示器呈色域的确定[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(2): 151-155.
- [7] 许宝卉.CRT与LCD显示器色域特性研究[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 417-419.
- [8] 黄敏,廖宁放,刘浩学,等.颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 599-603.
- [9] 汪哲弘,徐海松.用阴极射线管显示器研究辨色阈值 II:典型色差公式评价[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1344-1348.
- [10] 汪哲弘,徐海松.颜色视觉匹配中明度阈值的评价[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1273-1277.
- [11] János Schanda. Colorimetry: understanding the CIE system [M]. Canada: John Wiley & Sons, 2007: 79-97.