

金属材料在中强度激光辐照下的相变速度研究^{*}

张可言

(涪陵师范学院物理系, 重庆 涪陵 408005)

(2003 年 8 月 22 日收到 2003 年 10 月 14 日收到修改稿)

在找出了使金属材料只发生液化相变的激光功率密度的前提下, 借用金属液态与金属固态某些相似的性质, 通过类比, 给出了金属液化材料对激光的吸收率. 经过分析, 指出了直接解析金属相变速度的不可能性. 通过建立金属液态内的能量方程, 在质量守恒的前提下, 求得了激光辐照金属的相变速度. 通过讨论发现, 影响金属相变速度的因素不仅有激光的强度, 而且还有激光的圆频率.

关键词: 金属材料, 中强度激光, 辐照, 相变, 速度

PACC: 4260H, 6570

1. 引 言

众所周知, 在高功率激光器出现以前, 物质材料的相变条件不外乎自发内因驱使、外加热源促成、外场诱发产生等几种情况. 随着激光器的出现特别是高功率激光器的出现, 利用激光对材料进行辐照的研究又成为一大热门. 近年来, 在利用强激光烧蚀金属材料, 特别是金属 Al 材料的研究上, 不仅研究了 Al 材料的烧蚀机理^[1]、烧蚀产生的等离子体中辐射粒子的速度及冲击波^[2]、超强激光场等离子体中电子的纵向运动^[3], 也研究了激光加热金双盘靶辐射与再辐射^[4]、超热电子诱生的磁场分布^[5, 6]以及激光场对离子分子与固体相互作用的影响^[7]等, 更为甚者是利用超强激光(强度达 $10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)进行核聚变研究. 由于所需的激光功率较高, 其烧蚀过程中的烧蚀压相当大, 一般可达 10^{12} Pa 的数量级, 其烧蚀速度对所有物质都近似为匀速快烧蚀, 根本无从研究因物质系统之不同而出现的不同烧蚀速度. 在中等强度的激光辐照研究方面, 由于涉及辐照相变问题, 而物质的相变往往又相当复杂, 至今成果不丰. 本文拟利用中强度激光来辐照金属材料, 通过分析其液化相变机理来映射研究金属材料的相变速度, 以此弄清楚中强度激光辐照金属材料的相变机理.

2. 中强度激光的强度分析

根据目前已知的研究结果, 可以认为, 被照金属材料的激光能量吸收率与被照金属材料是否发生相变、相变类型以及是否被等离子体化直接相关.

当辐照激光较弱, 被照的金属未发生相变时, 激光使金属中原子振动加剧, 产生大量声子, 在考虑光子与声子相互作用的情况下, 采用物质与光相互作用的量子理论, 可得金属材料的激光能量吸收系数^[8]

$$A(\omega) = \frac{\mu_0 c q^2}{48\pi^2 m \Omega} \left[1 + \coth\left(\frac{\hbar\omega}{2k_B T}\right) \right], \quad (1)$$

其中 m 为金属材料的离子质量; q 为金属材料的离子电量; Ω 为金属材料的原胞体积; c_0 为光速; k_B 为波尔兹曼常数; T 为金属材料的温度; μ_0 为真空磁导率; \hbar 为普朗克常数; ω 为辐照激光的圆频率.

根据(1)式, 考虑金属材料相变熔化热, 可以计算出被辐照金属材料不发生相变的最高辐照激光功率密度在 $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 数量级.

当辐照激光过强, 被照金属材料发生等离子体化时, 材料对激光的吸收主要为材料附近等离子体对激光的吸收. 此吸收机理非常复杂, 从吸收生热的角度来讲, 主要为逆韧致吸收. 根据量子统计理论, 利用 Feynman 图技术, 同时考虑离子屏蔽、集体

^{*} 重庆市教委及重庆市高校中青年骨干教师基金(批准号 200217)资助的课题.

效应和量子效应对吸收的影响,可以计算出材料的逆韧致吸收系数^[9]为

$$A(\omega) = \frac{Z^2 e^6 n_e k_B T_e}{6 \epsilon_0^3 \hbar \omega^3} R(\omega, T_e), \quad (2)$$

其中 Z 为金属材料的电离度(由实验测定), e 为电子的电量、 n_e 热电子数密度、 ϵ_0 为真空电介常数、 \hbar 为普朗克常数; ω 为辐照激光的圆频率、 T_e 为等离子体温度、 $R(\omega, T_e)$ 为另一函数。

根据(2)式,结合金属材料的电离能,可以计算出使被照金属材料发生等离子体化的最低激光功率密度在 $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 数量级。

由此看来,要使被照金属材料既能发生相变,又不被激光辐照等离子体化,相应的激光功率密度 $I(\omega)$ 的范围为 $10^6 - 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

3. 材料的激光能量吸收率

设所选定的激光功率密度为 $I_{\text{中}}(\omega)$, 它满足 $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} < I_{\text{中}}(\omega) < 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。又设激光是以矩形脉冲的形式存在的。当材料吸收中强度激光的多个矩形脉冲能量后,材料积累的能量变成热能,使材料的辐照端温度升高,温度的升高又使能量通过热的传递进行转移,在材料中形成温度的分布。当某处的温度达到金属材料的熔化相变温度时,从该处到吸热面之间的材料即发生液化相变。由于液化后的材料在黏滞力的作用下,并不立即脱离金属材料的相变面,以后的激光就只能照在液化层上,金属材料对激光的吸收就变成了金属液态层对激光的吸收。考虑到金属材料的液态与固态之间在物理性质上虽有差异,但其基本属性却差异不大,这样,就可将固态金属对激光的吸收机理映射到金属液态对激光吸收机理的研究上。根据(1)式,可得金属液态材料在单位时间内通过单位体积所吸收的激光能量 U 为

$$U = \frac{\mu_0 c q^2}{48 \pi^2 m \Omega} I(\omega) \left[1 + \coth\left(\frac{\hbar \omega}{2 k_B T_{\text{液}}}\right) \right]. \quad (3)$$

由(3)式可以看出,金属材料的激光吸收率不仅与材料本身性质(m, Ω 和 q)有关,还与激光强度 I 和激光圆频率 ω 有关,更重要的是也与材料的液态温度 $T_{\text{液}}$ 有关。

4. 辐照相变速度

由于被照金属材料发生的是边界不断收缩(液

化物质在剪切力的作用下外流)的液化相变,从金属材料本身的角度讲,要研究其液化相变后边界的收缩速度,必须首先在金属材料上建立温度分布方程,然后根据某点的温度是否达到该材料的液化相变温度来判断该点的对应面(相变面)到激光辐照面之间的部分是否要发生相变,最终确定相变速度。

由于此处研究的是中强度激光对金属材料的辐照,虽有相变发生,但激光功率密度还未达到使金属材料等离子化的程度,故在被照金属的内部,不可能产生超热电子而对材料的内部进行预热^[5,6],热的传递仅靠电子的热运动实现热传导,其机理类似于材料的气动加热相变^[10]。为此设被照金属材料的厚度 l (相对于相变层来讲要很大),金属材料的密度为 ρ_L 、比热容为 c_L 、导热系数为 k_L (可认为是常数)。考虑到激光光斑边缘的热阻效应^[9],在激光光斑的辐照范围内,可将受垂直激光辐照的金属材料,当成一维空间的问题来研究,如图(1)。

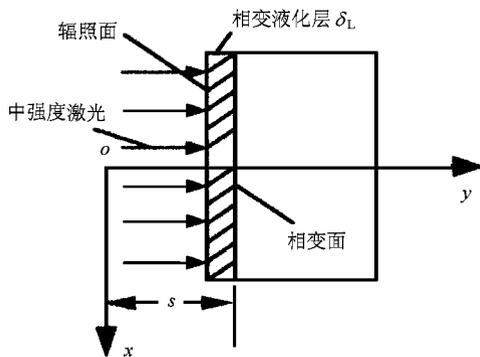


图 1 激光辐照原理

类似文献[10]研究变域气动加热的理论,可以立即得到金属材料中的温度分布方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{s}(t) \frac{l-y}{l-s(t)} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (4)$$

其中 $\alpha = \frac{k_L}{\rho_L c_L}$; $\dot{s}(t)$ 为金属材料的辐照面移动速度; $s(t)$ 为某时刻辐照面的位置。方程(4)式的边界条件为

$$\rho_L L \dot{s}(t) - k_L \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=s(t)} = U \Delta y, \quad (5)$$

$$- k_L \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l} = 0. \quad (6)$$

这里 Δy 为激光在金属板材里的透射深度,它可由 $\Delta y = [2\lambda(\mu\sigma\omega)^2]$ 来计算。

初始条件为 $t = 0$ 时, $s(t) = 0, T = T_0(y), \dot{s}(t)$

= 0. 这里 L 为金属材料的潜热; U 为 (3) 式确定的激光吸收率.

由 (4) 式、(5) 式和 (6) 式可以看出, 根据目前的手段, 要解析计算金属的相变面的移动速度 $s(t)$, 是非常复杂的 (除非方程离散后的数值计算), 为此, 必须考虑另外途径.

4.1. 液态金属的能量方程

现将金属材料按图 1 的方式放置, 令激光从左到右水平辐照. 当金属液化以后, 金属液态在激光辐照压和剪切力的作用下, 将沿 x 轴流动.

现在液态材料的内部任取一流体体积元, 如图 2, 设其体积为 ΔV 、温度为 T 、液化金属材料的热传导系数为 k . 由于激光是沿着 y 轴垂直辐照的, 在材料的内部只有在 y 轴的方向上才存在温度的分布, 这样, 根据 Fourier 定律可以计算出单位时间内在 y 轴方向传入单位体积元的净热能为

$$E_1 = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (7)$$

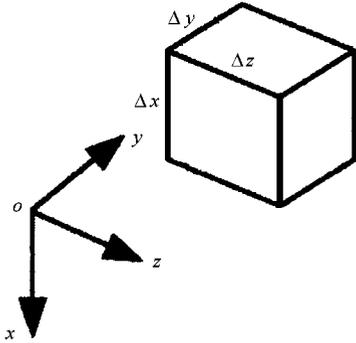


图 2 液态体元原理图

又由于金属液态物质沿 x 轴流动, 必在液体内部产生一个沿 x 轴方向的附加面压强 Δp , 如液体在此附加压强的作用下沿 x 轴在 Δt 时间内发生了 Δx 的位移, 则此压强对体元所作的净余功为 $\Delta p(\Delta y \Delta z) \Delta x$, 由此可得此附加压强在单位时间对单位体积元所作的净功为

$$E_2 = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta p(\Delta y \Delta z) \Delta x}{\Delta x \Delta y \Delta z \Delta t} = u_x \frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dt}. \quad (8)$$

又因为黏滞力的作用, 金属液体在 y 轴方向上出现沿 x 轴流动的速度差异, 从而存在一个沿 x 正方向的黏滞力 $\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta x \Delta z$ 和一个沿 x 轴负方向的黏滞力 $-\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta x \Delta z$, 此两力如沿 x 轴在 Δt 时间

内发生了 Δx 和 $\Delta x'$ 的位移, 则此两力对单位体积元所作的净功为

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta x \Delta z \right) \Delta x - \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \Delta x \Delta z \right) \Delta x'}{\Delta t \Delta x \Delta y \Delta z} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x - \Delta x'}{\Delta t \Delta y},$$

由于位移 Δx 和 $\Delta x'$ 均随 y 而变化, 则 $\Delta x - \Delta x' = \frac{\partial x}{\partial y} \Delta y$, 代入上式有

$$E_3 = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x - \Delta x'}{\Delta t \Delta y} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2. \quad (9)$$

根据单元体积的能量守恒关系, 即单位时间内, 外界传入单位体元的热能与外界对单位体元所作的功之和应等于单位体元在单位时间内内能的增加. 设液态物质的密度为 ρ 、比热容为 c , 则单位体积元在单位时间内增加的内能为

$$E_{\text{内}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\rho c \Delta T}{\Delta t}. \quad (10)$$

由于温度 T 是一个关于 x 和 y 的函数, 必有

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t},$$

代入 (10) 式有

$$E_{\text{内}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\rho c \Delta T}{\Delta t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial x} \cdot u_x + \rho c \frac{\partial T}{\partial y} \cdot u_y. \quad (11)$$

让 (7) 式加 (8) 式再加 (9) 式等于 (11) 式即可得单元体的能量方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial x} u_x + \rho c \frac{\partial T}{\partial y} u_y = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + u_x \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2. \quad (12)$$

4.2. 金属液态和固态的剥离速度

考虑到黏滞阻力的作用, 现作如下近似处理: 在相变面处 (液态与固态之交汇处), 将能量方程 (12)

式中的 $u_y \frac{dp}{dx}$ 和耗散项 $\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2$ 略去, (12) 式变为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial x} \cdot u_x + \rho c \frac{\partial T}{\partial y} \cdot u_y = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (13)$$

考虑到激光辐照时光斑边缘的热阻效应, 可以认为金属的液化相变主要在光斑所处的范围进行, 这样就可以近似的取温度 T 不随 x 变化, (13) 式变为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial y} \cdot u_y = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (14)$$

根据文献 [9] 提供的资料, 当入射激光功率密度为 $5 \times 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 金属 Al 材料的传热深度仅及

$0.08 \pm 0.01 \text{ mm}$. 而此处研究的是激光功率密度小于 $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 其传热深度应小于 $0.08 \pm 0.01 \text{ mm}$, 故发生液化相变的厚度应比此值还小. 这样, 可设 u_s 为常数 u_s (金属液态的剥离速度), 参考图 1, 对 (14) 式积分, 有

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{s-\delta_L}^s = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s - \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{s-\delta_L} = \frac{\rho c}{k} u_s (T_e - T_w), \quad (15)$$

其中 T_e 为相变面的温度; T_w 为辐照面的温度. 由于 $s - \delta_L$ 所在的面就是激光对液体的辐照面, 根据 (3) 式, 在单位时间内, 液体通过该面单位面积上吸收的能量为 $U \Delta y$, 这时有

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{s-\delta_L} = \frac{U \Delta y}{k}. \quad (16)$$

将 (16) 式代入 (15) 式可解得

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s = \frac{U \Delta y}{k} - \frac{\rho c}{k} u_s (T_e - T_w). \quad (17)$$

此 (17) 式描述的是在相变面处单位时间内通过单位面积从液态层向固态金属传递的能量, 该能量传给金属后以潜热的形式存在于金属材料之中, 它刚好等于单位时间内, 通过相变面单位面积获得的潜热. 设金属材料的相变潜热为 L , 则

$$\rho_L L \dot{s} = k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_s = U \Delta y - \rho c u_s (T_e - T_w). \quad (18)$$

考虑到质量守恒, 在相变面处, 金属材料相变所涉及的质量应等于金属液态物质脱离金属的质量, 此时有

$$\dot{s} \rho_L = u_s \rho. \quad (19)$$

由 (19) 式解出 u_s 并代入 (18) 式, 可得金属材料的相变推进速度 \dot{s} :

$$\dot{s} = \frac{U \Delta y}{\rho_L (L + c T_e - c T_w)}. \quad (20)$$

5. 讨 论

由 (20) 式可以看出:

1. 金属材料的相变速度 \dot{s} 与金属液态的激光吸收率成正比. 根据 (3) 式, 当保持激光圆频率 ω 不变时, 随着激光强度 I 的增加, 金属液态对激光的吸收率也正比的增加, 金属材料的相变速度将加快. 反之亦然. 当保持激光强度不变时, 随着圆频率的

增加, 金属液态对激光的吸收率也增加, 但不是线性关系. 根据 (3) 式和文献 [11] 给出的金属材料的相关参数作进一步的分析表明, 当激光频率小于 10^{14} Hz 时, 其吸收率随激光频率的增加而缓慢地增加. 当激光频率大于 10^{14} Hz 时, 其吸收率随激光频率的增加而迅速地增加. 由此说明, 金属材料在中强度激光的辐照下, 影响其相变速度的因素不仅有激光的强度, 而且还有激光的圆频率.

2. 金属材料的相变速度 \dot{s} 与金属材料的密度 ρ_L 有关, 而与金属液态的密度 ρ 无关. 当选择密度大的金属材料时, 金属材料的相变速度减小, 其理由是当金属材料的密度较大时, 单位体积的质量也大, 要通过吸收中强度激光来破坏材料的结合键实现相变所需要的能量就越多, 在激光强度不变的情况下, 实现同等质量相变的时间就越长, 相应的相变速度就越小. 反之亦然.

3. 金属材料的相变速度 \dot{s} 与金属材料的相变潜热有关. 当材料的相变潜热 L 增加时, 相变速度减小. 反之亦然.

4. 金属材料的相变速度 \dot{s} 与金属液态时的热容比 c 有关. 理由不在复述.

5. 金属材料的相变速度 \dot{s} 与金属材料的液化相变温度 T_e 有关. 从 (20) 式可以看出, 液化相变温度较高的材料, 在同等强度激光的辐照下, 其相变速度较小. 反之亦然.

6. 结 论

从本文的分析和计算中作如下总结:

1. 本文采用排除法找出了使金属材料只发生液化相变的中强度激光功率密度为: $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} < I_{\text{th}}(\omega) < 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.

2. 借用了金属液态与金属固态某些性质的相似性, 类比给出了金属液态对激光的吸收率 (3) 式.

3. 指出了直接解析金属相变速度的不可能性, 并通过建立金属液态内的能量方程, 在质量守恒的前提下, 求得了激光辐照金属的相变速度.

4. 通过讨论发现, 对激光来讲, 影响金属相变速度的因素不仅有激光的强度, 而且还有激光的圆频率.

- [1] Yaakobi B *et al* 1977 *Phys. Rev. Lett.* **38** 350
- [2] Zhang S D and Zhang W J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1512 (in Chinese] 张树东、张为俊 2001 物理学报 **50** 1512]
- [3] He B *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1939 (in Chinese] 何斌等 2001 物理学报 **50** 1939]
- [4] Jiang S E *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 730 (in Chinese] 江少恩等 2001 物理学报 **50** 730]
- [5] Chen Z L and Zhang J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 735 (in Chinese) [陈正林、张杰 2001 物理学报 **50** 735]
- [6] Chen Z L and Zhang J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2180 (in Chinese) [陈正林、张杰 2000 物理学报 **49** 2180]
- [7] Wang G Q and Wang Y Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 939 (in Chinese] 王桂秋、王友年 2003 物理学报 **52** 939]
- [8] Zheng R L ,Chen H and Liou J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 554 (in Chinese] 郑瑞伦、陈洪、刘俊 2002 物理学报 **51** 554]
- [9] Chang T Q *et al* 1999 *Laser and plasma interaction* (Changsha : Hunan science and technology Publishing House) p32 (in Chinese) [常铁强等 1999 激光与等粒子体相互作用(长沙:湖南科学技术出版社 第 32 页]
- [10] Yang X S 2002 *Change region heat transfer to induce perspiration control theory*(Beijing : Beijing University Press) p6 (in Chinese] 杨学实 2002 变域传热发汗控制理论(北京:北京大学出版社 第 6 页]
- [11] Li Z H 1985 *Data Book About Elements Nature* (Shijiazhuang :Hebi Peoples Publishing House) p13 (in Chinese] 李振寰 1985 元素性质手册(石家庄:河北人民出版社 第 13 页]

Phase transition speed research of metal material at laser irradiation medium strength^{*}

Zhang Ke-Yan

(Department of Physics ,Fuling Teacher 's College ,Chongqing , Fuling 408003 ,China)

(Received 22 August 2003 ; revised manuscript received 14 October 2003)

Abstract

Under the condition that there is only solid-liquid transition in a metallic material , we found the laser power density for melting the material . Through analysis of the similarity of some behaviors of solid and liquid states , we obtain the absorptivity of laser by the metal , and indicate the impossibility to directly calculate the transition rate of the metal . However , we can obtain the transition rate under the irradiation of laser , and find the relationship of the transition rate with the intensity and the frequency of the laser .

Keywords : metal material , medium strength laser , irradiation , phase transition , speed

PACC : 4260H , 6570

^{*} Project supported by the Chongqing City Educational Committee Program of Financial Aid and the Youth in Chongqing City College the Key Teacher Program of Financial Aid (Grant No.200217).