

文章编号: 1001-3806(2003)03-0202-03

光场力对烧蚀物时空分布的影响*

徐荣青^{1,2} 陆建² 倪晓武² 杨克成³ 程祖海³

(¹华东船舶工业学院电子与信息系, 镇江, 212003)

(²南京理工大学应用物理系, 南京, 210094)

(³华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 对烧蚀物的时空分布进行了研究。烧蚀物离开靶材表面时的速率分布由蒸发机制决定, 在激光作用时间内烧蚀物的传输行为由扩散机制和光场力机制共同决定, 激光作用结束后烧蚀物的传输行为由扩散机制单独决定, 并解释了烧蚀物的时空分布及烧蚀物趋光运动的现象。

关键词: 光场力; 烧蚀物; 相互作用

中图分类号: TG156.99

文献标识码: A

Effect of light field force on transportation behavior of ablated materials

Xu Rongqing^{1,2}, Lu Jian², Ni Xiaowu², Yang Kecheng³, Cheng Zuhai³

(¹ Department of Electronics and Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang, 212003)

(² Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

(³ National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The transportation behavior of ablated materials is studied. The speed distribution of ablated materials when they leave target material surface is determined by the mechanism of ablation. The transportation behavior of ablated materials during the action of working laser is controlled by diffusion mechanism and light field force mechanism. The transportation behavior is determined by diffusion mechanism only after the action of laser. The time-space distribution and the tending-to-light phenomena of ablated materials are interpreted.

Key words: light field force; ablated materials; interaction

引言

在最近的 10 年中, 脉冲激光烧蚀材料被广泛地用于材料加工和沉积薄膜。当激光能量高于靶材的烧蚀阈值时, 靶材蒸发和电离, 在靶材表面形成烧蚀物。烧蚀物包含原子、离子、分子、团簇以及微米尺度的液态和固态颗粒形态的物质。烧蚀物的产生及发展过程涉及激光与固态靶、液态层及烧蚀物之间的相互作用, 而且这些作用总是耦合在一起, 相互影响。这一过程极其复杂, 尽管有关这方面实验结果的报道很多^[1~4], 但有关激光与烧蚀物的动力学过程还未得到令人满意的解释。在激光加工中, 后续激光与烧蚀物的相互作用改变了激光在靶材上的时

空分布, 影响了激光加工的效率和质量; 在薄膜沉积中, 烧蚀物的组份及传输过程直接影响镀膜的质量。了解激光和烧蚀物相互作用的动力学过程对激光加工和激光镀膜是非常重要的。以前在这方面的所有工作仅考虑了烧蚀物对后续激光的能量吸收, 进而烧蚀物的传输形成激光支持的冲击波; 从宏观的角度看, 烧蚀物显示了高温超声速流的特征, 所有的激波模型都是建立在流体动力学基础上的; 从微观角度看, 烧蚀物之间, 烧蚀物与环境气体之间要发生可观的碰撞, 因而烧蚀物的宏观运动是一种非稳态膨胀; 另外, 激光对烧蚀物作用不仅表现在能量吸收上, 还应表现在烧蚀物受光场力的作用^[5~8]。由于烧蚀物宏观上的整体运动与烧蚀物的微观过程是紧密相关的, 甚至是由其决定的, 故以前所有的激波模型是不完善的或者只适用于某些特殊情况。笔者首次提出了光场力对烧蚀物传输行为的影响; 烧蚀物离开靶材表面的速率分布由蒸发机制决定; 在激光

* 激光技术国家重点实验室开放基金项目。

作者简介: 徐荣青, 男, 1966 年 4 月出生。博士研究生。主要从事激光与物质相互作用的机理和测试的研究。
收稿日期: 2002-07-09; 收到修改稿日期: 2002-10-18

作用时间内烧蚀物的传输行为由扩散机制和光场力机制共同决定,开始一段时间,由于聚焦焦点在靶材上,光强沿激光方向增强,光场力的方向与激光方向一致,激光作用后一段时间,由于烧蚀物吸收激光,烧蚀物外侧的激光强于内侧的光强,故光场力方向为逆激光方向;激光作用结束后,烧蚀物的传输行为由扩散机制单独决定,并由此解释了烧蚀物的时空分布及烧蚀物趋光运动的现象。

1 光场力基本理论

光场是高频电磁场,光场分布的区域即电磁场分布的区域,光场中的粒子与光存在相互作用,粒子通过折射率、光吸收系数对光产生作用,光通过粒子的吸收及极化率对粒子产生影响,光场中媒质的极化强度为:

$$P(r, t) = \epsilon(r, t) E(r, t) \quad (1)$$

式中, r 为空间坐标,即坐标原点到场点的矢量, t 为时间, ϵ 为极化率, E 为电场强度。光场与极化介质的作用能(单位体积)为:

$$U = - E \cdot P \quad (2)$$

单位体积极化介质所受的光场力为:

$$f = - \nabla U = \nabla(E \cdot P) = - \nabla(E^2) \quad (3)$$

因光强可表示为 $I = \frac{1}{a} E^2$, a 为常数,则(3)式可表示为: $f = a \nabla(I) = a [I \nabla + \nabla I]$ (4)

一般可认为极化率 ϵ 为常量,则(4)式为:

$$f = a \nabla I \quad (5)$$

2 实验装置

采用光学阴影同步照相法测量了激光烧蚀铝靶时烧蚀物的空间形状及其发展情况。图 1 是实验装置示意图。在一台调 Q Nd YAG 激光器上完成了对烧蚀物发展情况的测试,把振荡输出光经过 1 个倍频晶体后用 $0.53\mu\text{m}$ 波长激光全反且 $1.06\mu\text{m}$ 波长激光全透的分光镜把波长为 $0.53\mu\text{m}$ 的激光分离出来,经过准直系统后,再经过光路延迟时间装置作为阴影探测的光源,而接收系统则由成像透镜、滤色镜和等待式相机组成,从放大级输出的波长为 $1.06\mu\text{m}$,激光经聚焦透镜会聚后作用在靶上。烧蚀物区域与相机相对于成像透镜成像物像关系,这是为了克服衍射效应带来的误差。探测光延迟时间可通过光路延迟装置调节,实验过程中主要参数如下:作用激光能量 $0\text{mJ} \sim 120\text{mJ}$ 可调节,作用激光脉宽 15ns ,作用激光波长 $1.06\mu\text{m}$,作用激光直径 $D =$

6mm ,聚焦透镜焦距 $f = 38\text{mm}$,探测光延迟时间 $0\text{ns} \sim 300\text{ns}$ 可调。

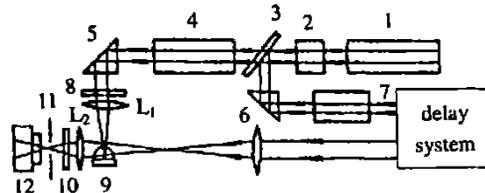


Fig. 1 Optical path scheme of ablated material shadow photography
1—oscillator 2—frequency doubled crystal 3—dichroic mirror 4—amplifier 5,6—right angle prism 7—collimating system 8—polariser 9—target Al 10—filter 11—diaphragm 12—camera L_1 —focusing lens L_2 —imaging lens

3 结果与分析

激光与靶相互作用,其烧蚀物的空间形状及其发展过程取决于烧蚀物喷射的初始速度分布、后继激光对烧蚀物的作用及环境因素。烧蚀物喷射的初始速度分布由蒸发机制决定;后继激光对烧蚀物的作用有两个,一是烧蚀物吸收激光的能量,二是光场力对烧蚀物有力的作用,这一作用可看成改变了初速度的分布(因为激光与烧蚀物的作用时间很短,空间尺寸小);这样,激光作用结束后,烧蚀物的空间形状及其发展过程由一定速度分布的粒子在环境中由扩散机制决定。由蒸发机制决定的烧蚀物的初始速度分布是以垂直于靶面为轴对称呈 \cos 形式,由于激光加热是快速加热的过程,激光辐照靶使靶材蒸发出的粒子密度可达 $10^{16}/\text{cm}^3 \sim 10^{21}/\text{cm}^3$ [9],如此高密度粒子能够发生可观的相互碰撞,结果烧蚀物粒子的速度重新进行了分布和调整,这导致烧蚀物从 \cos 形式的空间分布变为有 \cos^n (n 典型值为 $1 \sim 20$) 形式的沿靶法线方向的高度择优分布。所以,直接用肉眼观察烧蚀物在空间的传输,看到的是一个象羽毛状的发光团,一般称其为羽焰,因此,烧蚀物的传输通常称为羽焰的传输。人们广泛地利用了光谱技术、探针技术、闪频照相技术等数十种方法[10~12]对羽焰进行了相当细致的研究,研究羽焰的整体运动的宏观特征主要是激波模型。考虑后续激光与烧蚀物相互作用的原始文献是文献[13],烧蚀物逆光运动,冲击波是由激光支持的。这一结论在长脉冲激光作用下是成立的,因为此时激光能量密度低,激光作用时间长;而纳秒激光的脉冲短,其激光能量密度高,光场力的作用不可忽略。在激光作用时间内,其烧蚀物的空间尺寸较小,若激波是由激光支持的,则烧蚀物吸收的光能对其烧蚀物粒子

速度的改变是各向均匀的,30ns以后(激光作用结束后),烧蚀物的行为应由一定速度分布的粒子在环境中的扩散所决定,烧蚀物的时间演化过程应是 \cos^n 形式上叠加一各向同性的分布,烧蚀物的空间形状应是羽状,对称轴是靶的法线。图2是短脉冲激光作用下采用光学阴影同步照相法拍摄的照片,3个图分别是激光开始作用后52ns,108ns和137ns时烧蚀物的空间分布照片, n 为靶的法线方向, z 为逆激光方向。分析图2可知,烧蚀物的对称轴不在靶的法线方向,也不在入射激光方向,而在这二者之间,在实验中, n 与 z 的夹角为 15° ,烧蚀物的对称轴与 z 的夹角为 4° 。下面将分析产生这一结果的原因。



Fig. 2 Spatial distribution of ablated materials at Al target surface produced with a laser energy of 78 mJ with on amplification of 10 a—52ns b—108ns c—137ns

在激光照射靶材的初始时刻,由于聚焦点在靶面上,故沿着 z 轴光强逐渐减弱,靶材受激光照射后会有烧蚀物喷发,在靶材表面有烧蚀物分布,开始一段时间,因烧蚀物密度较稀对激光吸收较少,故光强沿着 z 轴是减弱的。由(5)式可知光场力沿 z 轴的负方向,喷发沿 z 轴正方向,相当于挤压烧蚀物,经过这段时间烧蚀物已被压缩成一高密度的薄层,在此区域激光的吸收系数较大,故激光在此区域内光中急速减弱,光强分布沿 z 轴增强,且梯度很大,故此区域所受的光场力大且方向与 z 轴方向一致,即逆作用激光方向。从烧蚀物高密度薄层形成到激光作用结束这段时间内,烧蚀物薄层受较大光场力的作用,且光场力的方向逆激光方向,即这段时间内,烧蚀物被加速,相当于激光作用后,烧蚀物的速度分布比开始时的蒸发速度分布增加了光场力作用所产生的速度增量,另外烧蚀物吸收激光能量,这对烧蚀物粒子速度分布的影响是各向均匀的,对烧蚀物粒子的平均动量的贡献为0,故激光作用结束后各方向粒子的动量分布为蒸发的动量分布加上光场力作用产生的增量动量。图3是蒸发的动量分布和激光作用结束后的动量分布示意图,图中 n 为靶的法线, z 为逆激光作用方向, p 为烧蚀物由蒸发引

起的平均动量分布, P 为由光场力产生的附加动量,激光作用结束后,粒子的空间分布由具有动量为 $p+P$ 分布的这些粒子扩散所决定。故粒子空间分布的对称轴既不是 n 也不是 z ,而应介于 n 与 z 之间,至于与 z 轴的夹角是多大,取决于光场力产生的 P 和蒸发产生的 p 的大小。

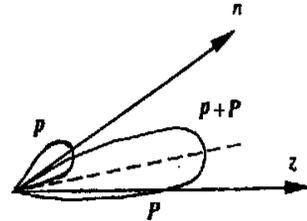


Fig. 3 Distribution of velocity of particles

4 结论

高功率激光与物质相互作用时,后继激光对烧蚀物有两个作用,一是把能量传给烧蚀物,二是对烧蚀物有光场力的作用,由于时间短,这一作用的效果相当于改变了烧蚀物的速度分布,烧蚀物的传输过程由蒸发机制决定烧蚀物喷发的初速,叠加由光场力及吸收光能引起的附加速度分布所产生的新的速度分布在环境中的扩散所决定,光场力引起的附加速度的方向为逆光方向,蒸发产生的初速以靶的法线为对称轴呈 \cos 分布,羽焰形状的对称轴介于靶的法线与激光之间,夹角视具体参数而定。光场力的作用改变了粒子的时空分布,从而影响了激光加工的效率和质量,有关这方面的研究,将另文讨论。有关研究结果建议在研究高功率激光与物质相互作用时,受光场力影响的物理效应(力学、热学、冲击波等)应予考虑。

参考文献

- [1] 何 斌. 物理学报, 2001, 50: 1939.
- [2] 张树东, 张为俊. 物理学报, 2001, 50: 1512.
- [3] 王 薇, 张 杰. 物理学报, 2001, 50: 1517.
- [4] Docchio F, Regondi P, Mellerio J. Appl Opt, 1988, 27: 3661.
- [5] Stato S, Harada Y, Waseda Y. Opt Lett, 1994, 19: 1807.
- [6] Ashkin A. Biophysical Journal, 1992, 61: 569.
- [7] Ashkin A, Dziedzic J M. Nature, 1987, 235: 1517.
- [8] Ashkin A, Schutze k, Dziedzic J M. Nature, 1990, 348: 346.
- [9] 陈晓源. 脉冲激光沉积法制薄膜的机制. 南京大学博士学位论文, 1998.
- [10] Lu Y F, Hong M H, Low T S. J A P, 1999, 85: 2899.
- [11] Siano S, Pacini G, Pini R et al. Opt Commun, 1998, 154: 319.
- [12] Mahdih M H, Hall T A. J Phys D, 1996, 30: 588.
- [13] Ramsded S A, Savic P. Nature, 1964, 203: 1217.