

强 CO₂ 激光照射靶面的现象

夏生杰 王春奎 傅裕寿
吴宝根 方慧英 周光地

(中国科学院力学研究所)

1981年6月6日收到

提 要

在强激光对靶材的作用中,以连续及脉冲 CO₂ 激光为主光源,首先研究了发生于靶前区的现象.用高速干涉摄影术来诊断. 判别出连续激光引起烧坑形成的时间及蒸汽羽喷向的扭转过程.并观察了脉冲激光引起等离子体的发展、空气击穿及产生冲击波运动和蒸汽羽等非自发光现象.使用了脉冲 He-Ne 激光高速干涉摄影装置.

前 言

激光与物质相互作用的研究,在国内外都广泛地在进行.每两年一次的激光相互作用及等离子现象的会议及每年一次的激光破坏光学材料的讨论会,均有论文集出版^[1,2]. 这些工作分别围绕强激光与靶球的作用以研究人工聚变;强激光对光学材料,特别是大功率激光器窗口的破坏、激光处理及加工等等.所用激光的功率密度范围极广,研究对象多种多样,甚为活跃. 本文仅涉及属于较低靶面功率密度范围的强激光与固体靶材的相互作用. 对这类问题的实验研究,目前普遍采用高速摄影术作为诊断技术. 其中大部分是对自发光现象的研究^[3-5]. 至于对非自发光现象的研究,除借助高速摄影术外,还需要再引进光学显示技术. 目前已在这些研究中使用了高速干涉摄影术及高速阴影、纹影摄影术. 用以诊断激光靶材作用时靶前区发生的现象. 例如研究激光维持爆震波(LSD 波)的形成和发展^[6]等. 我们已用研制的脉冲 He-Ne 激光分幅高速干涉摄影术及阴影术^[7]来诊断激光靶材相互作用时靶前区的现象. 在连续及脉冲强 CO₂ 激光辐照金属和非金属靶材的研究中,记录到许多非自发光现象. 每次试验可得到相互作用过程的数十幅干涉照片.

连续输出 CO₂ 激光与靶材的作用

在连续输出功率 70 瓦的 CO₂ 激光与靶材相互作用研究中^[8]. 用一个焦距 135 毫米的聚焦镜,将光束聚于靶面上约 0.5 毫米直径的光斑,得到 3×10^4 瓦/厘米² 的功率密度. 在这一功率密度水平上,靶材兼有熔融及大量汽化. 激光引起的蒸汽羽喷射速度较低并与靶材性质有关. 我们选用两种典型材料:陶瓷及有机玻璃. 用高速干涉摄影术诊断出

激光束作用于靶面上的瞬间及达到动态平衡的过程。

从高速干涉图 1—4 中可以看出，靶材上初期产生的蒸汽羽是呈柱状结构，两种材

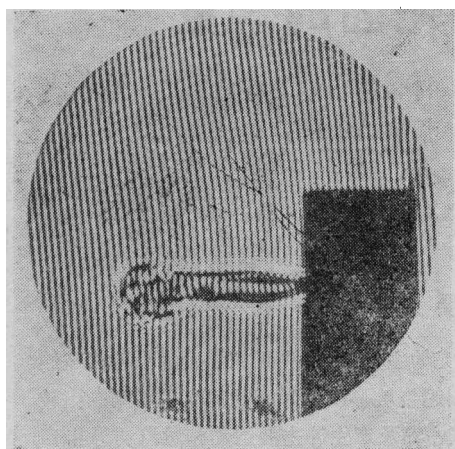


图 1 有机玻璃蒸汽羽的柱状结构

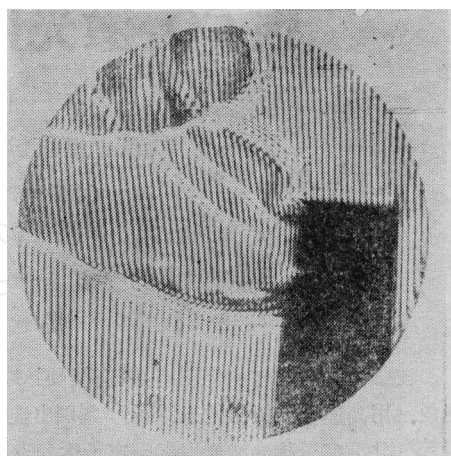


图 2 有机玻璃蒸汽羽的稳定喷射

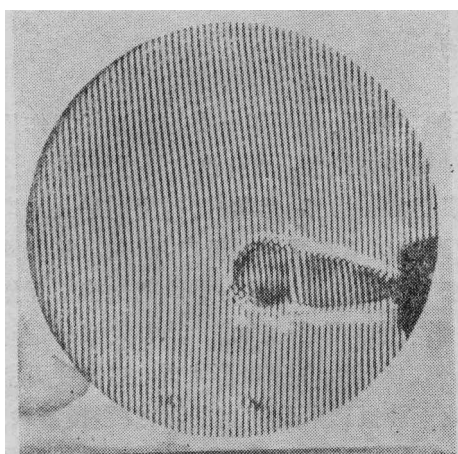


图 3 陶瓷蒸汽羽的柱状结构

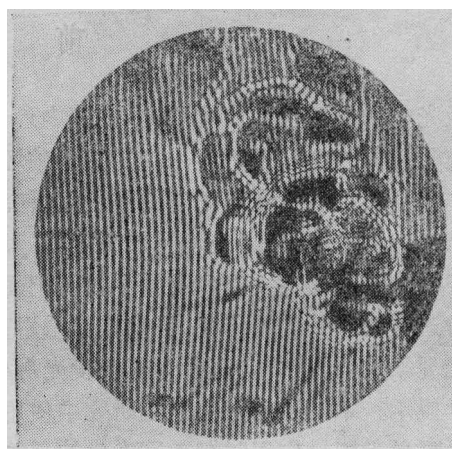


图 4 陶瓷蒸汽羽的烟雾及炸开的汽团

料的蒸汽羽喷射轮廓见图 5。有机玻璃蒸汽羽的初始喷射速度为 3.6×10^2 厘米/秒。虽然激光束的能量从开始入射到终结一直是稳定的，但是，蒸汽羽前沿增长的速度是在变化的。如图 6 曲线所示。

蒸汽羽对波长为 10.6 及 0.6328 微米的辐射基本上是透明的，喷射过程中不再会吸收能量。从图 1—4 中可看出羽内的干涉条纹。原来在蒸汽羽内大于环境气体的温度及密度，在喷射过程中逐渐降低，并受空气阻力作用，蒸汽羽将不断扩散开来。使喷射过程达到动平衡状态。沿靶面法线方向的速度最终降至零。形成一个连续而稳定的喷射过程。如图 2 所示。

对于陶瓷材料，在激光作用的初期约 5 毫秒内，其现象与有机玻璃相似，蒸汽羽仍呈柱状结构而透明。如图 3 所示。但是，蒸汽羽的初始喷速低于有机玻璃。约为 1.9×10^2 厘

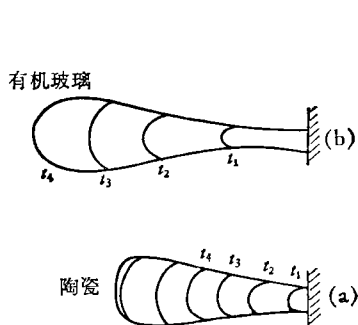


图 5 蒸汽羽的形象及随时间的变化

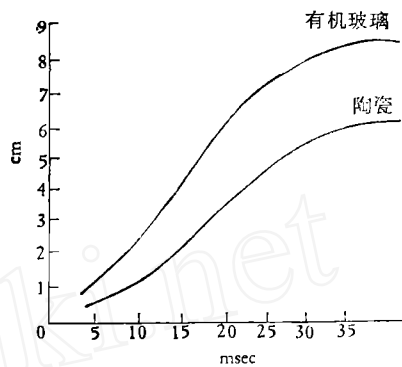


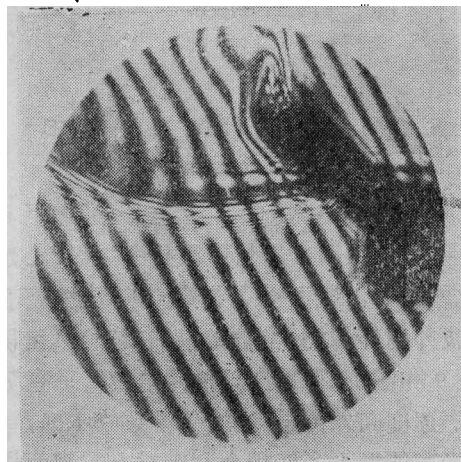
图 6 蒸汽羽前沿位移与时间的关系曲线
纵坐标为 cm, 横坐标为 msec

米/秒。在稍后期, 由于冲刷效应, 使这类绝热粉末未烧结体, 在逐粒粉末受热汽化时形成单独汽团。也有凝聚态粒子随蒸汽羽喷出。但这些粒子不透明, 在喷出过程中将继续吸收一部分光辐射。由于喷出汽团处于压力及温度较低的环境中, 所以在蒸汽羽中炸开来。图



(a) 垂直靶面喷射

(b) 开始扭转



(c) 扭转完毕

图 7 蒸汽羽的扭转过程

4 可明显看出炸开粒子的轨迹, 它们的炸心并不一定在靶面上, 而是在靶前区。

从一系列高速干涉摄影底片上看出, 陶瓷材料蒸汽羽的喷射不像有机玻璃那样稳定, 而是有非周期性的脉动。稳定的激光能量不能连续地辐射到靶材上。喷出的粒子及烟雾对入射光起了干扰作用。消耗了许多能量。

激光辐照靶材产生的蒸汽羽, 开始总是垂直靶面向外喷射。为了判明这些现象, 将靶面与入射激光束成 45° 角安置。激光束作用于靶材的瞬间, 汽化物是垂直于靶面与激光入射方向成 45° 角。如图 7(a) 所示。但随着时间的增长, 靶面形成烧坑及通道后, 蒸汽羽很快就扭转为逆入射光方向喷射。从图 7 中可以看出这种喷射方向的扭转过程。有机玻璃约 20 毫秒开始扭转, 到 33 毫秒扭转结束。这也就是激光烧坑形成的时间。

用连续输出 3 万瓦的激光, 经 1000 毫米焦距反射镜聚焦于不锈钢靶上时, 可以观察到大量高温金属熔滴飞溅出来, 形成耀眼的火星。这在非金属的烧蚀中是不存在的。如图 8 所示。在光束角内的熔滴仍要继续吸收光辐射。因此常需用高压气体吹散熔滴, 以便光能更多地入射到靶面上。

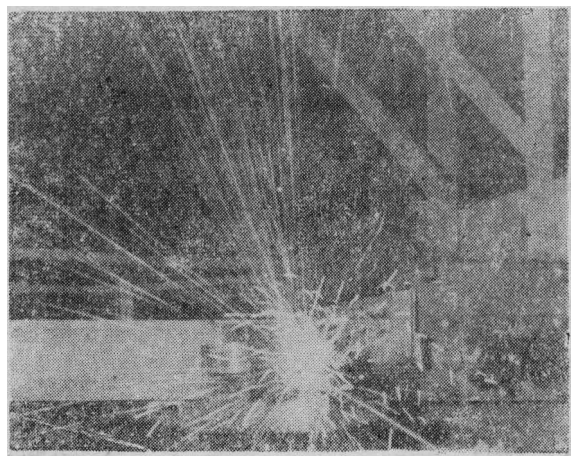


图 8 强激光照射金属靶的情况

脉冲 CO_2 激光与靶材的作用

用 10 焦耳能量, 脉宽 1 微秒的 TEACO_2 脉冲激光束, 经焦距 100 毫米透镜聚焦于靶面上。功率密度约到 10^7 瓦/厘米²量级时, 靶材以汽化占主导^[40]。激光作用于靶材的瞬间产生高温并汽化靶材, 汽化物瞬时沿靶面垂直向外膨胀, 压缩靶前空气, 形成以光束着靶点为中心的球形空气冲击波并向外传播, 当激光束结束后, 汽化物头部迅速扩散成蘑菇状, 其前沿速度迅速下降。图 9 和图 10 可看出球形冲击波及垂直靶面喷射并最终成蘑菇状汽羽的形象。冲击波以超声速度向外传播, 初始马赫数约 1.84, 直至冲击波消失。这一过程没有强烈发光和声响。光束能量大多能耦合到靶材上。靶面烧坑较深而烧蚀面积和光斑尺寸相当。具有明显的穿孔效果。

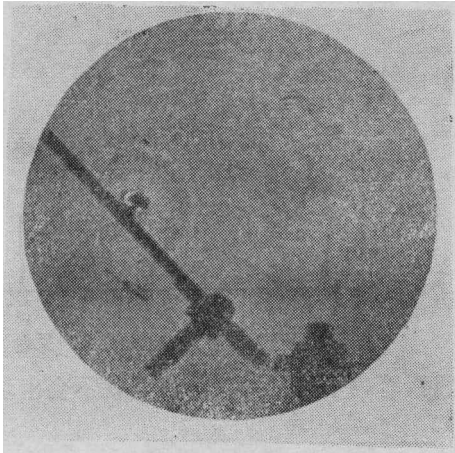


图9 球形冲击波

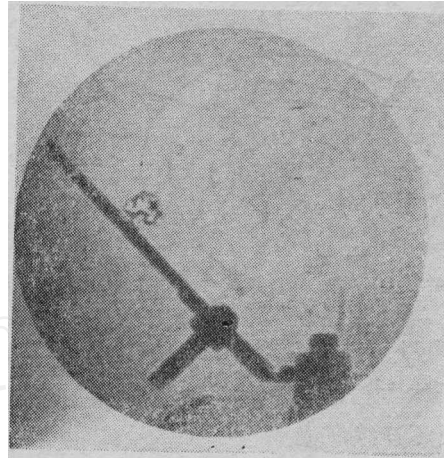


图10 蘑菇状蒸汽羽

脉冲 CO₂ 激光超过击穿阈值

提高脉冲 CO₂ 激光的功率密度到 10^9 瓦/厘米²量级时, 功率密度远远超过空气击穿阈值、当激光聚焦于大气环境中的靶面上时, 引起靶前空气击穿并产生高温等离子体, 并且伴随有强烈发光及声响, 等离子体云沿光束方向为长轴成椭球形以超音速膨胀^[11], 8 微秒内的平均马赫数为 5 左右, 它压缩周围空气, 形成以等离子体云为中心的椭球形空气冲击波向外传播。等离子体云中心在靶前, 椭球冲击波碰到靶面形成反射波。从图 11 和 12 靶与入射激光成 45° 角的试验中可以看出。图 13 则画出了各时间阶段的原始椭球形冲击波及斜靶上的反射波。反射波在被原始波所经过并加热过的介质中传播时, 其绝对速度大于原始波, 从而赶上原始波并形成马赫反射^[12]。如图 12 下部分。这与点源爆炸冲击波在壁面上的反射具有相似的结果^[9]。如图 14 所示。

当激光击穿空气 32 微秒后, 反射波通过有高温高密度边界的残余区时, 波形出现了滞后及不连续现象, 如图 12 所示。这是等离子体与空气冲击波的相互作用结果。如果等

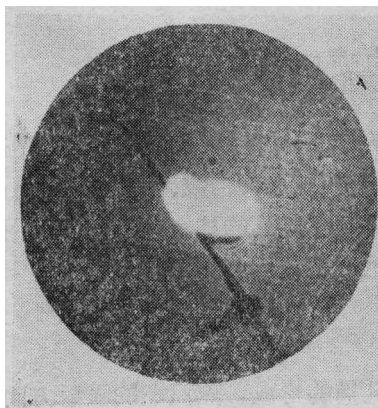


图11 椭球形等离子体云

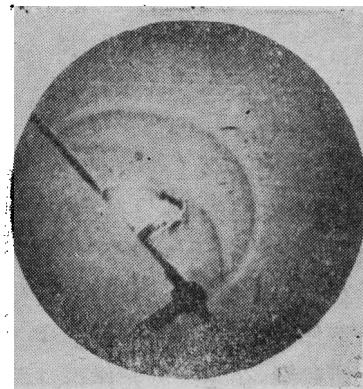


图12 椭球形冲击波、反射波及马赫反射

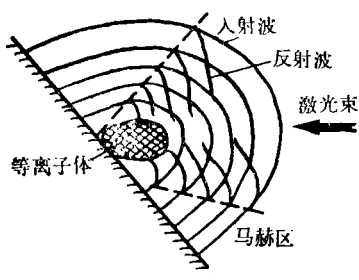


图 13 产生爆震波时椭球形冲击波的人射反射

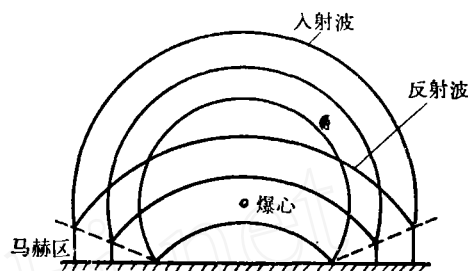


图 14 原子爆炸球形冲击波的人射反射

离子体中心离靶面距离增大,则反射波到达该区时,等离子体已消失,波前就不会出现滞后及不连续现象。

从直接对发光等离子体的高速摄影中确定,在上述功率密度的脉冲激光结束后约 16 微秒,等离子体云发光边沿膨胀到最大值约 6 毫米。等离子体高温辐射作用于靶材上,使靶材表面产生了比激光束光斑尺寸大得多的烧蚀面积。沿激光束方向发展的等离子体消失后,看到了与光束成 45° 角且垂直于靶面的柱状汽化羽。其底部宽大。如图 11 所示。这与图 8 和 9 形成明显的对比。

击穿阈值对材料破坏的影响

试验图 9, 10 与 11、12 对比来看,激光功率密度在空气击穿阈值以下时,产生球形冲击波,汽化物垂直靶面喷射,底部细小。不同靶材有不同的烧蚀深度。当功率密度超过击穿阈值时,空气被击穿,形成了椭球形冲击波。此时,靶材性质退居次要地位。激光与不同靶材的相互作用效果近似。从最后靶上烧坑来判断。当产生等离子体后,靶材烧蚀面积比未击穿时扩大一个数量级,形状也不规则,烧坑较浅。激光能量没有全部直接作用到靶上,而是高温等离子体云的再辐射于靶上的结果。因此,激光能量在大于和小于空气击穿阈值时,对靶材产生了不同的破坏效果。这对研究在大气环境下激光与靶材相互作用是有价值的。特别是对于激光穿孔。

连续及脉冲激光蒸汽羽的喷向及扭转

从对连续及脉冲激光辐照到 45° 倾角的靶材上的诊断照片中看出,超过空气击穿阈值的强激光,使靶前形成沿光束方向发展的等离子体及椭球形冲击波。脉冲停止后约几十微秒,等离子体消失后,只存在与光束成 45° 角并垂直于靶面的柱状蒸汽羽。因而在这一实验条件下的等离子体与蒸汽羽互成 45° 角。椭球冲击波继续传播,精度减小。

对于在击穿阈值以下的激光,没有产生明显的等离子体及声响,只出现垂直于靶面的蒸汽羽及球形冲击波。

与上述对照,在连续激光作用过程中,由于烧蚀孔道的形成,蒸汽羽的喷射方向有个扭转过程。光束愈强,扭转愈快。对非金属材料约几十毫秒。

结 论

上述实验显出了几个特点: 连续激光引起蒸汽羽的喷射现象, 对各种靶材在初始阶段都是一致垂直于靶表并呈柱状。只是由于烧坑的形成才改变方向。激光继续辐照, 坑道加深, 与靶放置角度无关; 对于脉冲激光与靶材作用则要控制阈值上下, 以便有不同的效果。需要穿孔时, 功率密度不应超过击穿阈值, 这样可得到尺寸准确而深的孔。

此外, 研制的脉冲 He-Ne 激光分幅高速干涉摄影装置, 能把发光, 特别是不发光现象的发生发展过程全部记录下来。它对透明介质中发生的现象, 如激光靶材作用时靶前区现象的诊断中, 给出了大量的二维信息, 是一种良好的诊断手段。

参 考 文 献

- [1] G. V. Sklizkov, *Laser interaction and related plasma phenomena* (1971).
- [2] Glass and Guenther, *Laser induced damage in optical materials*.
- [3] W. E. Maher, R. B. Hall, R. R. Johnson *J. Appl. Phys.*, 45(1974), 3675.
- [4] R. L. Stegman *et al.*, *J. Appl. Phys.* 44(1973), 2138.
- [5] S. A. Metz, *J. Appl. Phys.*, 46(1975), 1634.
- [6] R. B. Hall, W. E. Maher & P. S. P. Wei, AD-766766, (1973).
- [7] Xia Sheng-jie *et al.*, *International conference on laser 1980 digest*, p. 172.
- [8] 周光地、夏生杰等, *激光*, 5(1978).
- [9] 林三等译, *原子武器论文集*, 国防工业出版社.
- [10] G. Varsi 著, 长沙工学院译, *激光技术* 5.
- [11] John. F. Ready, *Effects of high-power laser radiation*. (1971).
- [12] L. L. Glass, *Shock waves & man*, (1974).

THE PHENOMENA ON TARGET IRRADIATED BY INTENSE CO₂ LASER

XIA SHENG-JIE WANG CHUN-KUI FU YU-SHOU
WU BAO-GEN FANG HUI-YING ZHOU GUANG-DI
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In the investigation of the interaction of the intense CW and pulsed CO₂ laser with targets, we have studied first the phenomena on targets and observed the forming-time of the crater and the processes of torsion of the direction of the laser plume produced by CW laser. We have also observed the development of the plasma, the air breakdown and the unluminescent phenomena such as the plume and shock-wave produced by pulsed laser etc.

The device of the framing high-speed interferography with pulsed He-Ne laser was used.