

激光与物质相互作用的时空分辨研究

庄斗南 庄大奎

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文报道在激光与靶互作用过程中所测量的发光光谱、发光温度和生成物对激光的反作用(吸收和散射等)参数,同时,还报道激光与某些物质互作用过程的时空分辨和钻孔效应的测量结果。

Investigation of temporal and spatial resolution for laser-material interaction

Zhuang Dounan, Zhuang Dakui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: In the experiment of interaction between laser light and target materials, the luminescence, temperature, the counter action of resultant products on laser light, and the temporal and spatial resolution have been measured.

一、引言

我们采用光谱测温、阴影法和双光束透射法等定量地测出了兆瓦级激光作用于几种典型靶上的发光、吸收光谱;温度、喷射物对激光反作用的时间和空间分辨谱。

实验采用脉宽毫秒、千焦耳级的1.06 μm 激光,作用的材料有Al-Mg合金、玻璃钢、钢和猪肉皮等,产生差异悬殊的效果,但所有测量结果可以反映出相同的作用过程:作用区的物质吸收激光,迅速升温。若光功率密度足够高,该区物质温度达到熔点以上,突然熔融、气化和热爆炸;靶面出现小孔,刚熔化的物质也随之喷射出去,所以,孔内可以

被清除得十分干净。喷射角与孔形有关(小孔形状由激光束入射锥角确定),局部区域的喷射物在激光的继续驱动下进一步升温,形成等离子体。

喷出物的状态十分复杂,它包含刚刚熔化的靶物质、气化和等离子体等,它们对激光的反作用很不一样,而且散落在空间上的分布、温度和光谱状态也很不一样,本实验测试了这些状态参数。

二、实验装置

为了获得完整的参数,实验安排了多种测试装置(如图1所示)。激光器是掺钕硅酸

收稿日期:1985年4月29日。

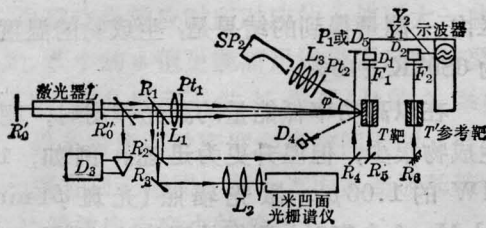


图1 激光与靶物质互作用的
时空分辨测量实验装置

盐玻璃棒($\phi 30 \times 1500$ mm), 激光脉宽毫秒级, 单脉冲能量 $100 \sim 3000$ J, 均可调节。光束方向角 $\theta \approx 4$ mrad。使用三种非球面镜($f = 300, 450$ 和 1000 mm), R_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为分光片。靶块 T 上预先钻有供测量用的柱形小孔(小孔方向与 R_5 反射光束的轴线相重合), D_1 和 D_2 是性能一致的光电探测器(491 光电管), 用于测量激光的时间波形; P_1 是已曝光和显影过的黑色印相纸, 用于测量喷出物吸收和散射的激光空间分布; 光谱仪 SP_1 (1m 凹面光栅谱仪) 和 SP_2 (棱镜中型光谱仪, 拍谱范围 $300 \sim 700$ nm) 分别用于测量激光光谱和生成物发光光谱。为尽量避免喷出物的影响, SP_2 光轴与激光光轴成 $27^\circ \sim 40^\circ$ 角放置; Pt_1 和 Pt_2 为保护玻璃片, 可以挡住喷射物; D_3 是监测主激光能量的卡计; D_4 是探测靶发光的探测器; 若用灵敏卡计 D_5 取代 P_1 , 则可以定量测量生成物对激光的吸收系数(激光穿过生成物和不穿过生成物时的脉冲能量比值); F_1 和 F_2 是 $1.06 \mu\text{m}$ 干涉滤光片。

三、实验结果

1. 生成物

实验中可以从 Pt_1 和 Pt_2 保护板上收集到固态(成块或滴状)和均匀分布的粉末状生成物, 前者由熔融态生成物质喷射而成; 后者呈白色, 由烟雾状气态生成物凝结成。靶为金属材料时, 固态凝结物较多; 靶为玻璃钢时, 收集物呈粉末状。

激光作用后在靶上留下锥形孔。当光功率足够高时, 锥孔内熔融态物质被清除得很干净, 孔的锥角比激光束锥角稍大。靶孔深度和消失质量(相当于喷出物总质量)与激光能量接近正比例关系, 比例系数与靶材有关。主要结果见表1(表内数值均为多次实验的平均数)。表中激光脉宽 6 ms, 能量 1000 J; 靶面上功率密度 8.5 MW/cm^2 , 能量密度 $5.1 \times 10^3 \text{ J/cm}^2$, 焦斑面积 0.196 cm^2 。

表1 $1.06 \mu\text{m}$ 激光作用于几种
典型材料的平均效果

靶材	铝-镁合金	玻璃钢	25# 钢	猪肉皮
消失质量(mg)	60	35	55	≤ 10
孔深(mm)	7	2.5	2.5	≤ 1

表2 列出短脉冲高功率 $1.06 \mu\text{m}$ 激光作用于 Al-Mg 合金靶面的实验结果。比较表1和表2的参数可知, 激光对靶作用要求一定的功率密度、阈值 W_0 和能量密度阈值 E_0 (统称破坏阈值)。靶材和波长不同, 破坏阈值也不相同。例如, Al-Mg 合金和钢等金属靶, 对于 $10.6 \mu\text{m}$ 激光, $W_0 \geq 0.1 \text{ MW/cm}^2$; 而对于非金属靶——玻璃钢, $W_0 < 0.1 \text{ MW/cm}^2$ 。光脉宽缩短, W_0 提高; 对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光, 在超过 W_0 的同一光功率和能量密度条件下, 对金属靶破坏程度比对玻璃钢严

表2 $10\text{ns}, 1.06 \mu\text{m}$ 激光辐照 Al-Mg
合金靶面的实验结果

激光功率密度 (MW/cm^2)	13.3	52	500	5×10^3	2×10^4
光能密度 (J/cm^2)	0.13	0.52	5	50	200
靶面破坏情况	无留下破坏痕迹(低于阈值)	可分辨出破坏痕迹(破坏阈值)	辐照表面留下棕色斑痕(边界清晰)	辐照表面留下黄色斑点	出现明显凹坑

重, 硬质材料比富有弹性的肉皮严重, 在 W_0 之上。光功率密度的大小直接影响生成物的状态。

2. 生成物的发光光谱和温度

激光作用于靶面时, 生成物的温度采用光谱法进行测量(由图 1 装置中的 SP_2 谱仪拍摄), 由于光谱是时间积分的结果, 故从谱线对强度计算的温度只反映脉冲时间内的平均值。光谱测温结果与摄谱条件和线对选择等密切相关。

Al-Mg 合金靶发光兼具有电弧和火花的一些谱线, 和电弧谱类似之处——包含一些强的中性原子线和 AlO 分子带谱, 还具有一些火花谱线, 也包含有离子线, 例如, AlII 466.3 nm、623.1 nm 和 559.3 nm, AlIII 526 nm、470.2 nm、452.9 nm 和 428.7 nm, MgII 344.8 nm 和 385 nm 等。一些强的中性原子线, 例如 AlI 396.2 nm 和 394.4 nm, MgI 383.5 nm、383.2 nm 和 382.9 nm 等线中心上出现吸收凹陷, 而相对应的 Al-Mg 合金火花和电弧谱线没有类似的吸收现象发生。估计是由于扩散开来的原子蒸气所引起的。

我们选用一对具有共同下能级的谱线相对强度比来计算温度。为处理数据方便, 选择的线对必须符合几个条件: 背景影响(包括干板均匀性影响)弱得可忽略; 自吸收可忽略; 二根谱线强度必须落在乳剂特性曲线的线性区内。

一次打靶中, 同时满足上述条件的谱线对并不容易找到, 经反复试验, 选用了一对杂质 MnI 线对(MnI 476.64 nm 和 MnI 478.34 nm), 这对线在同一材料的火花光谱中未出现过, 在电弧谱中更强。该线对很锐, 背景弱而且均匀。该线对参数

$$\Delta E = 0.63 \text{ eV}, \quad k = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K},$$

$$g_1 A_1 = 12, \quad g_2 A_2 = 4.0$$

在小能量打靶时, 谱线强度过弱, 我们采用均匀预曝光(即雾化)处理方法使它们落入线性

区内。测量得到的结果是: 生成物的温度 T 为 $6803\text{K} \pm 10\%$ 。

在以高功率低能量的激光作用时, 靶的生成物很少, 但温升更为迅速。例如, 100 MW 的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光辐照(光斑 $\phi 1 \text{ mm}$) Al-Mg 合金靶时, 测得的温度为 10^6 K 。

3. 生成物对激光反作用的时间分辨测量结果

用 1450 J、7 ms 激光作用于 Al-Mg 合金靶时, 图 1 装置所拍的示波图见图 2, 其中粗线是通过生成物区域的激光波形, 细线是参考激光波形, 从中可见, 生成物对激光反作用强烈, 作用的起始时刻相对于激光起点有一延时, 延迟时间常数决定于激光穿透小孔的时刻。在本实验条件下, 激光穿过 2 mm 厚(即靶离通光孔距离) Al-Mg 合金靶不到 1 ms。在剩余的大部分激光脉冲时间内, 生成物对激光的反作用持续存在, 总的吸收(即积分吸收)是严重的。

4. 生成物对激光反作用的空间分布和吸收(包括散射)系数

实验采用阴影法和双光路对比探测法, 前者是定性的, 后者是定量的。

阴影法是用分光片 R_1 (见图 1)从打靶的激光束中分出一小部分(称为参考光束, 光能量足够在黑纸上留下烙印), 参考光束经反射镜 R_2 和 R_4 反射后, 沿与打靶光束垂直的方向紧贴靶面横向穿过, 照射在黑纸 P_1 上, P_1 上所留下的烙印即为阴影照片。其中, 照射光强足够大时, P_1 纸变浅色, 否则为黑色。

这种安排可以保证参考光束与打靶光束是同时射出的; 同时还可以保证参考光束横向通过激光作用于靶时的生成物喷射区。

图 3 是实验照片的复制图, 它能清晰地显现出生成物的喷射分布——靠近靶面处(即靶心附近)呈圆球形黑阴影, 从靶心沿打靶激光束方向呈锥形黑阴影, 此外, 还有以靶心为球心的放射线状阴影。这些阴影反映参

考激光受到生成物的作用(包括吸收和散射),使参考光强减弱到不足以在 P_1 上留下变色的疤,只呈现原有的黑色。所以,这种阴影照片可以用来显示生成物的空间分布。为进行定量分析,我们把二只对标过的卡计分别置于图 1 的 D_1 和 D_2 位置进行测量,结果经归一化处理可得生成物对激光的吸收系数(见表3)。这些参数表明,同样的激光作用下,Al-Mg 合金靶生成物的吸收系数高于玻璃钢,总吸收系数随光脉冲能量的增大而增加,但单位激光能量所引起的生成物吸收系数却随激光能量的增加而下降。这似乎表明生成物状态与激光能量的关系是,光能量大,生成物气化更迅速、液态减少。

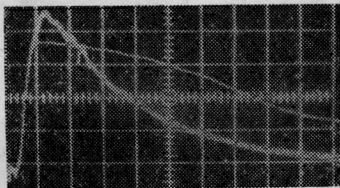


图2 激光作用 Al-Mg 靶时的双光束激光波形
(实验采用真双线示波器,扫描速度 ms/cm)

5. 生成物的状态和提高钻孔效果的方法

本实验所得生成物发光光谱和阴影图等结果可以把激光作用靶时生成物的状态用图 4 表示。靶面外生成物分可为四个区域: A 区(即靠近靶孔附近区域)内最早充满熔融物、气化和等离子体,该区内生成物密度高、温度

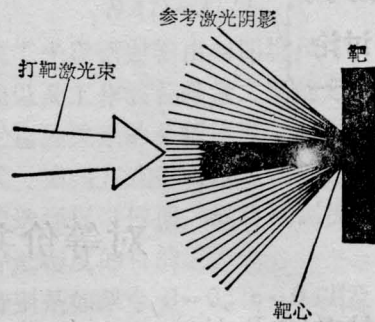


图3 参考光束通过生成物的阴影分布

也最高,对激光的反作用最为强烈; B 区是在比入射光束聚焦圆锥大一些的锥形空间内,此区喷出物集中,且在入射锥角内继续受激光的驱动而升温,温度甚高,但比 A 区的低; C 区紧靠 B 区,区内喷射物密度较低,并且得不到激光的驱动,它兼容来自 A 区的喷射物和从 B 区扩散出来的生成物; 余者为 D 区,该区仅有少量喷出物,主要成分是从上述区域扩散出来的气化物(保护片 Pt_1 和 Pt_2 所收集的白色粉末主要来自此区)。发光谱中的离子和中性原子线主要来自 A 区,其次

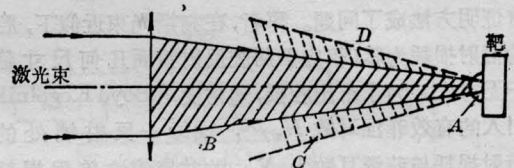


图4 激光作用于靶的生成物分布状态图

表3 靶生成物吸收(包括散射) $1.06 \mu\text{m}$ 激光的系数

靶材	参 数						
	L_1 焦距 $f(\text{mm})$	激光脉宽 (ms)	光束角 (mrad)	靶面焦 斑直径 (mm)	激光脉 冲能量 (J)	生成物对激 光吸收系数 (%)	单位打靶激光能量 引起的吸收系数 (%J ⁻¹)
玻 璃 钢	1000	9	4	4.1	1162	50	0.043
					1320	51.5	0.039
					1735	57.6	0.033
铝-镁合金	450	9	4.5	2.3	726	66.4	0.091
					1051	75.7	0.072
					1692	81	0.048

(下转第 657 页)

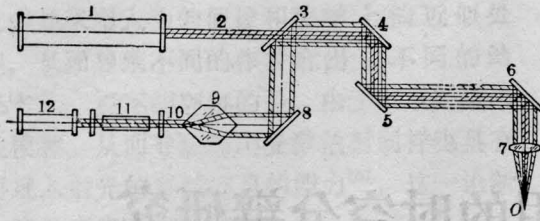


图5 CO₂、YAG 复合激光手术刀光路示意图

束10, 经过双凸光锥9变换成内直径7mm、外直径13mm的环状光束。经45°反射镜8和45°小孔反射镜3的反射, 与光束2组成复合激光束。再通过导光系统内部45°反射镜4、5、6多次反射, 最后经过硒化锌透镜7聚焦输出, 在焦点O处形成具有三种激光的复合光斑。采用双凸光锥变换器的主要优点是大大减少了YAG激光束的传输损耗, 提高了激光器的效率, 达到一机多用之目的。

3. 加热、焊接与切割

一般激光器的光斑能量大多为高斯分布

(上接第661页)

为B区。C和D区存在氧化过程, 并充满冷却的原子蒸气, 故为吸收谱和分子带谱的产生区域。

由于A和B区的生成物会消耗掉很多激光能量(尤其是激光脉冲尾部的能量), 所以为了提高激光钻孔、切割效率可以采用如

(上接第663页)

模式理论是一种简单但不严密的方法, 并且容易造成物理概念上的混淆。事实上, 可以从多种途径较严格而又实用地建立这一理论。鉴于这一问题在腔模理论中的重要性, 作者认为, 对此问题的进一步讨论有可能深化对腔模理论的认识。

作者曾就本文有关论点与魏光辉副教授、陈侗嵘教授以及西德H. Weber教授作过十分有益的讨论, 谨此致谢。

的圆形光束, 由于激光束的高能量、高密度的特点, 它已被广泛用于工业中的加热、焊接与切割等加工工艺。但在某些特殊要求的场合, 例如对某些工件需要进行环状加热、焊接与切割时, 圆形光束将给使用者带来不便。通过双凸光锥可以方便地得到任意尺寸的环状光斑, 而不需要对原激光器作任何变动, 就可以对需要进行环状加热、焊接、切割的工件进行加工。

作者在双凸光锥的光学加工中, 曾得到上海教育仪器厂王善荣、姚海林, 上海技术物理研究所陆艺伟等同志的大力协助和指导, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 唐贵琛等; 环状输出激光器, 83年上海激光学会年会论文。
- [2] 何海林; 上海医疗器械研究所十周年论文集, 1982年。

下措施: 减少靶面对激光的反射和散射(靶面可进行预先处理); 选择合适波形的重复率脉冲(以Al-Mg合金靶为例, 选用1ms矩形脉冲)。我们建议钻孔或切割用的激光采用振荡-放大结构, 由振荡器提供合适波形和重复率的弱激光然后放大输出经聚光镜作用于靶。

参 考 文 献

- [1] G. D. Boyd, H. Kogelnik; *Bell Syst. Techn. J.*, 1962, **41**, 1347.
- [2] J. P. Gordon, H. Kogelnik; *Bell Syst. Techn. J.*, 1964, **43**, 2873.
- [3] A. Yariv; *Quantum Electronics*, 2. Edition John Wiley & Sons Inc., 1975.
- [4] 陈侗嵘; 《成都电讯工程学院学报》, 1983, **4**, 10.

(四川大学物理系 吕百达
1985年11月18日收稿)