

研究简报

强脉冲 CO_2 激光与靶材
在空气中的相互作用*

傅裕寿 夏生杰 王春奎 吴宝根

(中国科学院力学研究所)

提 要

用高速干涉摄影诊断手段对激光作用在固体靶材上的表面效应,冲击波的传播、反射及绕射机制进行了实验观察,拍摄了各种现象的干涉及阴影照片,并进行了简要的分析。

强激光与材料相互作用的一个直接结果是对材料的破坏。研究激光对材料的破坏,不论是在工业加工应用中或其他目标的破坏研究中都有着实际的意义。

激光经过聚焦作用于靶材,其物理过程是复杂的。由于连续波激光与靶材相互作用受到一些本质条件的限制,长距离破坏材料的发展前途,在大气环境条件下很不乐观。于是,一些研究工作者则寄希望于脉冲式激光器。这是因为脉冲输出有较好的传输性能,并且有冲击破坏的特点。当前其优选的脉冲激光器件当然属于 CO_2 激光^[1]。

理论分析表明,脉冲激光能使材料产生热爆炸破坏和层裂破坏。脉冲激光作用在材料上产生的冲击波在材料中传播,在界面上发生反射,当反射所产生的张力超过材料的结合强度时,会在某一个截面上发生层裂,破坏材料。显然,这种破坏较之烧蚀和汽化去除材料的破坏要优越得多。这是因为断裂只拉断两个断裂面之间的晶格结合键,而汽化或烧蚀则需要破坏所有移去材料的结合键。Steverding 等人^[2]指出,对于同样的破坏作用,断裂破坏的体积与汽化去除的材料体积相同时,对所需要的能量而论,后者比前者要大 10^6 倍,而烧蚀则要比断裂所需能量大 10^5 倍多。

但是,要使材料发生层裂,必须具备这样的条件,功率密度相当高的巨脉冲激光作用和材料中产生强冲击波。遗憾的是,这一课题不论在理论方面或实验方面,工作都做得还很不充分。对破坏的物理机制的认识还有待于进一步深入研究。

将激光与靶材的相互作用分为两部分讨论是适宜的。一部分是靶前区,激光作用在靶材上,在靶材表面产生的物理现象和力学效应的讨论;另一部分是讨论在靶材内部产生的力学效应。首先将靶材表面所发生的现象研究清楚,给材料内部的力学效应分析一个清晰的边界图象是十分必要的。这也正是许多研究者致力于解决的研究课题。

本文介绍的内容是利用力学研究所自制的双放电 CO_2 脉冲器件研究激光与靶材相互作用的表面现象的规律。 CO_2 器件输出 10 焦耳/脉冲,脉宽 1 微秒。其诊断手段是自行

* 1979年3月20日收到。

研制的一套高速干涉摄影系统(见图 1)。

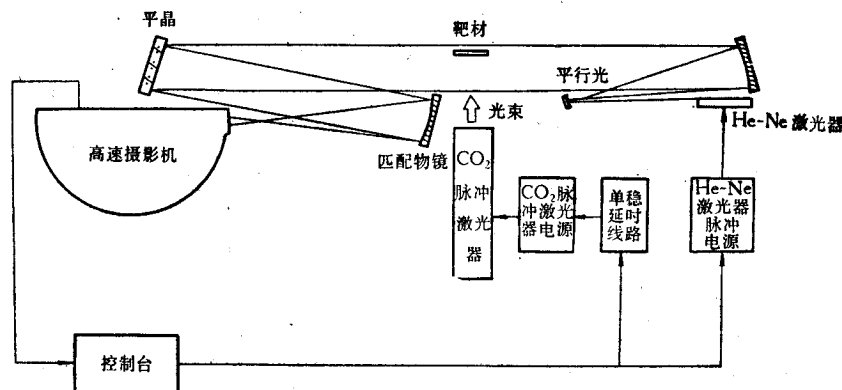


图 1 高速干涉摄影诊断系统

实验观察分析的项目包括激光维持爆震波的观察和判断;激光与靶材作用时,在靶前击穿空气产生高温等离子体火球的观察;击穿所产生的冲击波在空气中传播的规律;冲击波的传播速度讨论以及冲击波在靶材边界上的绕射等。

对于这些实验结果的分析将有助于建立较正确的理论模型以便对材料破坏的复杂过程进行定量的理论分析。

一、激光维持爆震波的判断

当激光强度足够强,在激光作用的时间范围内,激光和材料互作用区周围的空气可以充分地吸收激光辐射而高度离化,在焦点范围内产生高温等离子体并以超声速离开靶面向激光方向传播。这样传播的波称为激光维持爆震波。

激光维持爆震波具有窄的压缩和加热的波前,离化程度很高或全部离化,它有冲击波的特征,出现明显的冲击波前。

在判断时可抓住它的超声速和脱离靶材沿激光束方向传播的特点。

当激光强度不够高,而低于某一强度值时,它们的运动以亚声速或稍大于声速沿靶面的法线方向传播。这通常称为激光维持燃烧波。

为了判断上述现象,用有机玻璃和钢材做靶,放置靶平面与入射光束成 45° 角的位置。用锗透镜聚焦在靶材上,如图 2 所示。焦距 $f = 100$ 毫米,光束发散角约为 $\theta = 5 \times 10^{-3}$ 弧度,输出能量 10 焦耳,脉宽 10^{-6} 秒,则计算得焦点上的功率密度为

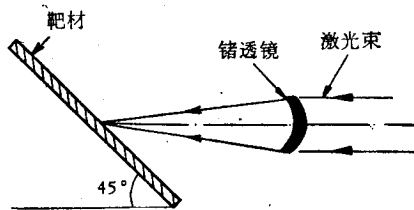


图 2 靶材与光束聚焦位置图

$$I = 1.25 \times 10^9 \text{ 瓦/厘米}^2.$$

实验中明显地产生爆震波,从图 3 中清楚地看到离开靶面向激光方向传播的特征。

对于钢进行离焦照射,即将靶材放在焦点前面,使照射到靶材的斑点扩大,且降低激光器输入电压使激光输出降低到 1 焦耳左右的能量,这样被辐照的功率密度约为 10^6 瓦/

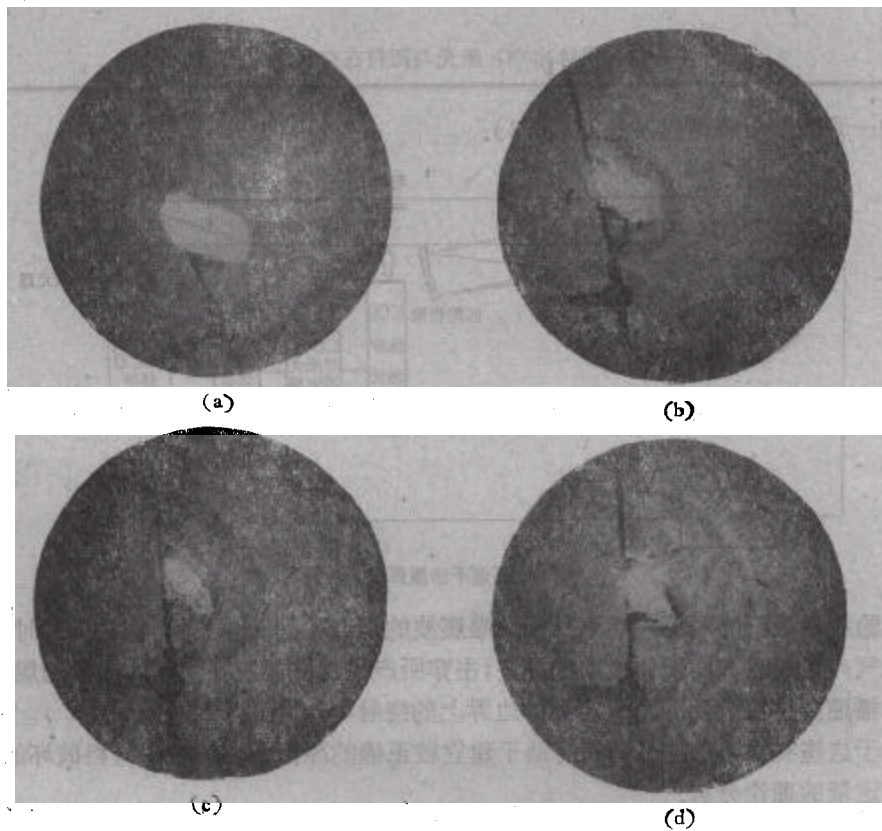


图3 斜靶上辐照功率密度在爆震波阈值以上时，等离子体沿光束方向运动发展图

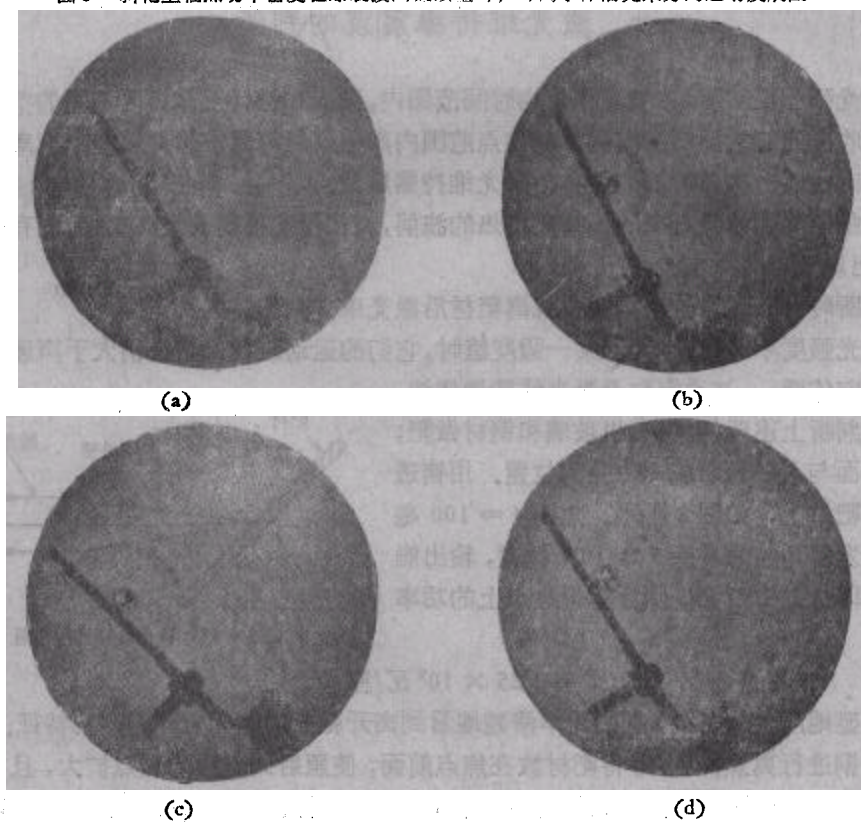


图4 斜靶上辐照功率密度低于爆震波点火阈值时，等离子体垂直靶面运动发展图

厘米²量级, 则观察到沿靶材法线传播的燃烧波特征, 即使具有燃烧波的特征, 也仍然观察到在空气中传播的球面弱冲击波现象. 见图 4.

二、激光与靶材作用表面现象的实验观察

1. 实验现象的描述

当功率密度为 $I = 1.25 \times 10^9$ 瓦/厘米² 的强脉冲激光作用于靶材时发现, 对于有机玻璃, 靶材有明显的与焦斑面积相同大小的坑痕, 对于钢材则发现有同样尺寸的汽化斑痕. 同时观察到靶材表面击穿空气产生的高温等离子体的火球, 并发出剧烈的爆炸响声. 这表明激光能量的一部分用于汽化靶材, 另一部分用于击穿周围气体.

又从冲击波的传播发现, 击穿空气所产生的球形冲击波与气体喷射产生的斜击波速度相近, 球形冲击波在前, 斜击波在后, 其速度图见图 5. 斜击波见图 3(b)~(d).

直观观察看到喷射物的直径在 5 毫米左右, 对材料表面观察到汽化斑点直径也约近 5 毫米. 由于聚焦点只有 1 毫米的直径, 因此说明这种汽化斑并不是激光直接聚焦作用的结果.

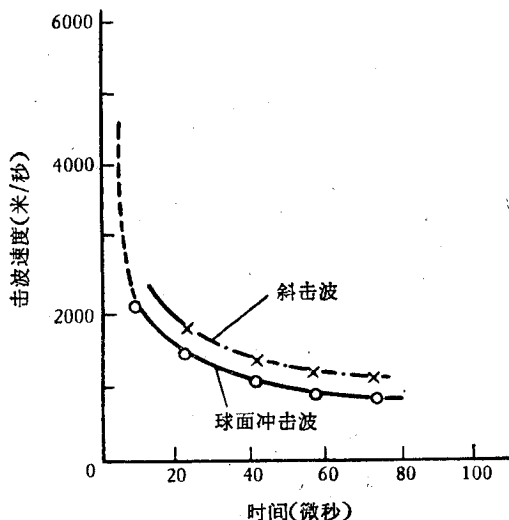


图 5 击波速度随时间变化图

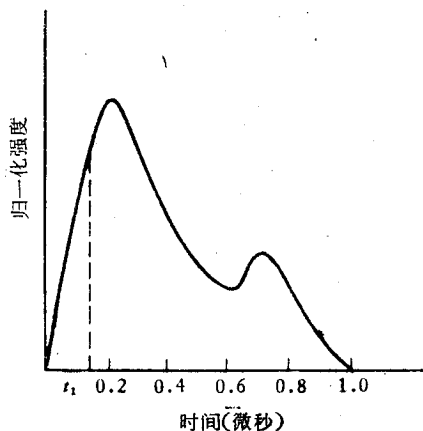


图 6 激光波型放大示意图

根据上述实验现象便形成一个激光作用在材料表面的物理图象, 可描述如下.

2. 材料表面物理图象的描述

(1) 激光脉冲波型放大示意图见图 6. 用我们自制的光子牵引探测仪测定的激光波型见图 7. 在图 6 中, 脉冲的初始阶段, 即 t_1 以前的光被材料吸收使部分物质汽化, 该能量相对来说很小. 对有机玻璃材料能汽化一个小坑, 而对钢材等只留下一个汽化斑痕. 这种汽化物质降低了靶前发生击穿的阈值.

(2) 汽化物质吸收了 t_1 以后的脉冲能量, 在汽体击穿阈值以上的功率密度下发生汽体击穿, 产生高温等离子体. 由于在实验中使用的激光功率密度很高, 所以其击穿中心在稍离表面, 即焦前的一定位置. 击穿产生的冲击波以球面波向四周传播. 击穿时等离子

体的温度可达二万度,并且对材料可产生高的压力.对于塑料制品压力峰值达 2.03 千巴,

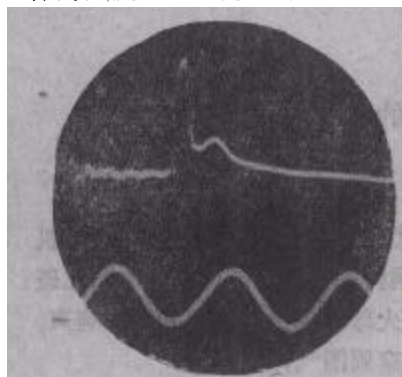


图 7 在环境压力为一个大气压激活介质为 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ 的条件下,测定的激光波型照片(每一周波为 2 微秒)

对于铝约为 148 巴^[3]. 高温下的等离子体辐射加热固体表面的材料,并破坏了靶材表面分子结合键.

(3) 当冲击波向靶材方向传播时,对靶材有大的压力,并且在靶材表面产生反射波,这种反射对其正在高速膨胀离开靶材的汽化材料附加一种力. 这时汽化物质高速离开靶面向外喷射. 实验证明,这时的喷射尺寸比焦点的直径大得多. 这一喷射速度很高,沿途可能产生斜击波,斜击波在向前传播中形成带有一定曲率的击波. 上述的汽化、击穿、喷射三者都几乎在激光脉冲的持续时间内完成. 从击波传播的情况可以看到,击穿所产生的球面波在前,接着是被材料表面反射回来的球面波,然后是喷射产生的斜击波. 所以可以

断定,击穿之后有汽化物从表面喷射. 从图 8 中可清楚地看到这一过程.

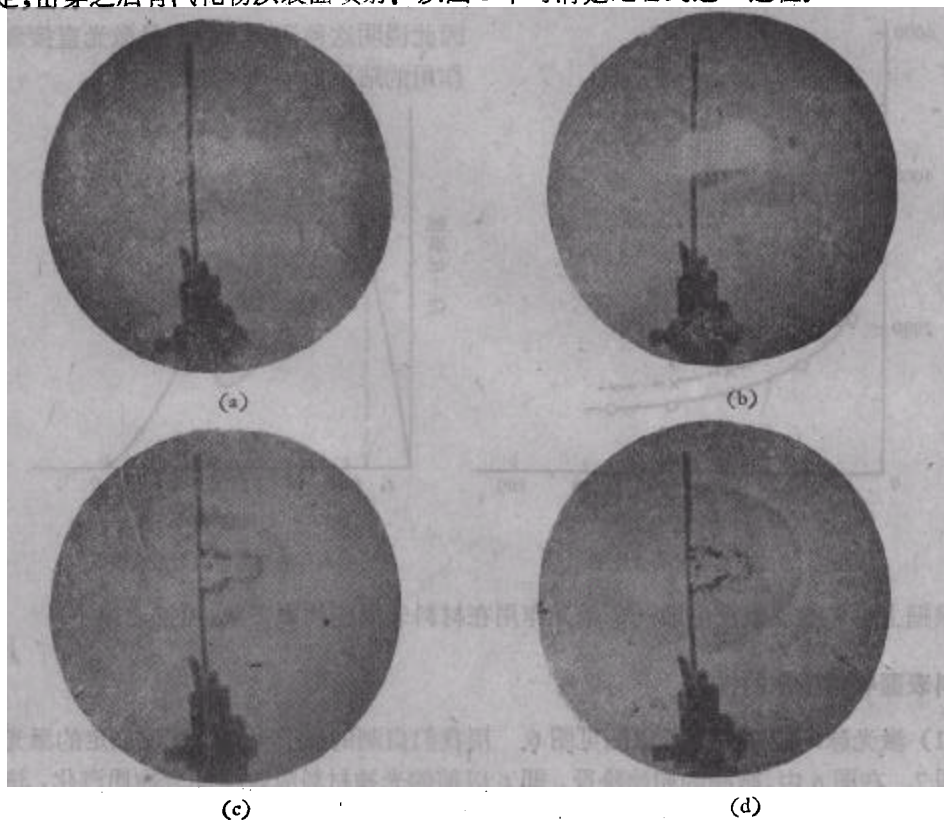


图 8 等离子体点火后,靶材表面喷射气体的情况

三、爆震波的传播速度

从图 9 干涉摄影照片中看到冲击波与等离子火球脱体时才能将冲击波区分开来. 在

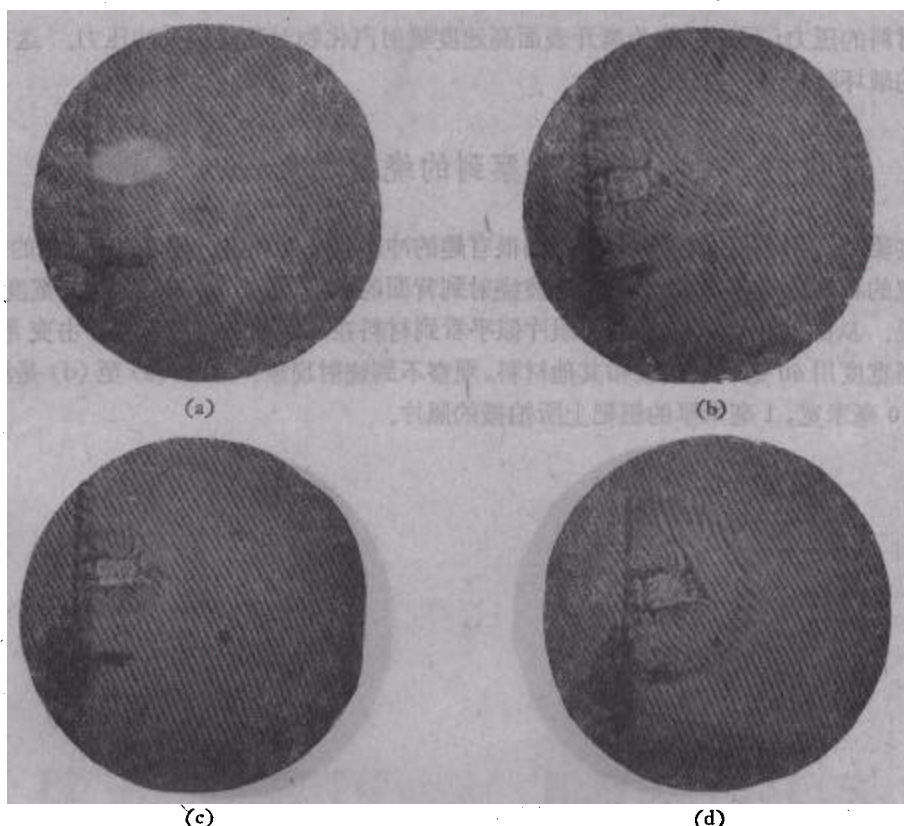


图9 等离子体点火后, 气体喷射和冲击波传播的高速干涉摄影照片

这以前冲击波与爆震波的传播以及等离子体火球都是重合的, 很难将它们区分。

利用气动力学模型^[4]得到爆震波的传播速度由下式给出:

$$D = \left[2(\gamma^2 - 1) \frac{I_0}{\rho_0} \right]^{1/3}, \quad (1)$$

式中 I_0 是入射的激光强度, ρ_0 是空气密度, γ 是有效绝热指数, 本实验取

$\gamma = 1.27$, $\rho_0 = 1.2 \times 10^{-3}$ 克/厘米³, $I_0 = 1.25 \times 10^9 \times 10^7$ 尔格/厘米²·秒时, 得到的初始速度为 2.5×10^6 厘米/秒。

爆震波点火后在靶表面上的压力公式为

$$P = P_{Dw}[(\gamma + 1)/2\gamma]^{2\gamma/(\gamma-1)}, \quad (2)$$

式中 $P_{Dw} = \rho_0 D^2/(\gamma + 1)$, 根据上面求得的 D 得到 $P_{Dw} = 2.3 \times 10^3$ 公斤/厘米²。代入 (2) 式求得靶材表面上的压力高达 1.2×10^3 公斤/厘米²。本文介绍的实验结果, 第一幅照片是 4 微秒的结果, 所以只得到 4 微秒内等离子体火球膨胀的平均速度约为 2000 米/秒, 如果认为冲击波前与火球表面重合, 也可认为是冲击波的平均速度。当然在激光作用时间内 (1 微秒) 的激光维持爆震波的速度要比 2000 米/秒大得多, 再进一步提高摄影速度, 将可测得更精确的爆震波初始速度。不过计算得到的初始速度 2.5×10^6 厘米/秒在数量级上是可信的。有关爆震波在材料前后表面产生的压力的实验测量有待进一步工作。

从实验现象可判断, 作用到材料上的压力也将分为两部分, 一部分为击穿产生的冲击

波对材料的压力;另一部分为离开表面高速度喷射汽化物对靶材的反冲压力。这在考虑材料的破坏时都应计算在内。

四、观察到的绕射现象

实验中,当靶材比较窄时,观察到很有趣的冲击波绕射现象。用 10 毫米宽的铝, 20 毫米宽的有机玻璃条,都观察到冲击波绕射到背面的图象,见图 10(b)至(d),宽度越小,越明显。从图 10 中的(b)和(c)照片似乎看到材料在冲击波的作用下冲击变形的迹象。当宽度用 60 毫米的铝板和其他材料,观察不到绕射现象。图 10(a)至(d)是激光聚焦在 10 毫米宽, 1 毫米厚的铝靶上所拍摄的照片。

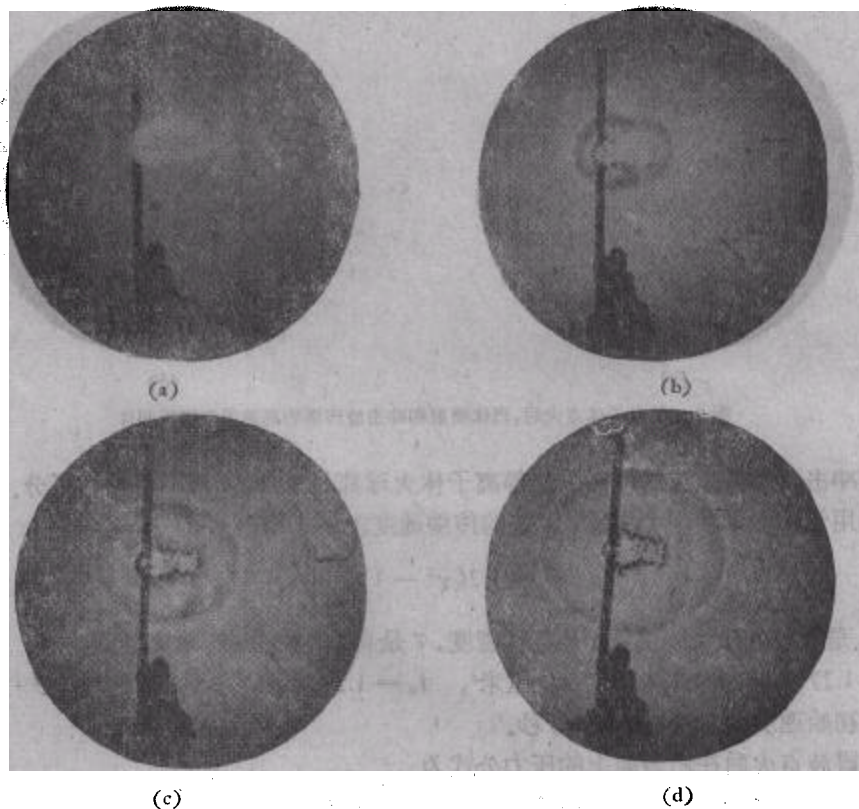


图10 在宽 10 毫米、厚 1 毫米的铝靶上冲击波绕射发展照片

参 考 文 献

- [1] P. J. Klass, *AW&ST*, **109** (1978), No. 6, 56—59.
- [2] B. Steverding and H. P. Dudel, *J. Appl. Phys.*, **43** (1976), 1940.
- [3] R. E. Beverly and C. T. Walters, *J. Appl. Phys.*, **47** (1976), 3485.
- [4] Ю. П. Раизер, *Письма в жэтф*, **7**(1968), 73.

INTERACTION OF HIGH INTENSITY CO₂ PULSED LASER WITH TARGET IN AIR

FU YOU-SHOU XIA SHENG-JIE

WANG CHUN-KUI WU BAO-GEN

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Experimental observations of the high energy pulsed CO₂ Laser-target interaction were made by high-speed interference photography and high-speed shadowgraphy to reveal various effects in front of the surface as well as the reflection and diffraction of a shock wave. Brief analyses are presented.