

脉冲 HF 激光在固体表面产生的等离子体波研究

周大正 沙国河 杨德政 王政岐 白吉玲 张存浩

(中国科学院大连化学物理研究所)

当功率密度在 $10^7 \sim 10^8 \text{W/cm}^2$ 以上的激光脉冲辐照固体表面时,产生一个离开表面逆激光方向传播的高超音速等离子体波,即所谓激光支持的爆震波(LSD波),这个波几乎完全吸收了入射的激光而直接控制着激光与靶面间的热和动量耦合。

实验是用波长约 $2.8 \mu\text{m}$ 、能量 30J 、脉宽约 $1 \mu\text{s}$ 的电子束引发的 HF 脉冲激光对不同的靶材和环境气体测量了等离子体的产生、传播速度及对靶面的冲量。测定靶面上等离子体的方法是通过靶上小孔在靶后检测透过的激光信号,当等离子体生成时,入射激光被吸收而波形出现截止。产生等离子体必需的阈值功率密度随靶材而异,对铝和铜约 $2 \times 10^7 \text{W/cm}^2$,而对有机玻璃则达 $7 \times 10^7 \text{W/cm}^2$ 。但是,随激光功率密度增加,屏蔽时间提前,而两者的乘积(即能量密度的阈值),对铝和铜此值约为 $15.8 \pm 2 \text{J/cm}^2$ 。

为了测定 LSD 波速,在垂直于波前运动方向以透镜将波前成象在相距数毫米的两光纤上,其输出信号用光电倍增管-示波器接收,故根据波前的时延和波形可求得波速和等离子体发光区的宽度。当靶面激光功率密度为 $2.3 \times 10^8 \text{W/cm}^2$ 时,靶前 3.5mm 处等离子体速度为 $1.25 \times 10^6 \text{cm/sec}$ (马赫数 $M \sim 37$),距靶 9.5mm 处减到 $0.71 \times 10^6 \text{cm/sec}$,至 13mm 以后消失(此时,激光已熄灭)。

根据 S. A. Ramsden 等人首先提出的 LSD 波理论,导出波速 D 的表示式:

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

由此式计算前述实验条件下的 D 为 $1.18 \times 10^6 \text{cm/sec}$,与实测量相符。测量了不同环境气体和气压下波速的变化:对空气, D 正比于压力的 -0.34 次方,这与式(1)要求的 $-\frac{1}{3}$ 次方甚接近;但对氩气,则是 -0.21 次方,这点似可用氩电离度随压力变化而导致 γ 的变化来解释。

从波速 D 可近似计算对靶面的冲量。单位激光能量产生的冲量即比冲为

$$I = \frac{\frac{1}{\gamma} + 2}{\gamma + 1} \rho_0 D^2 \frac{s}{w} \quad (2)$$

实验用冲量摆测量了各种条件下的比冲,测得在空气中的值约为 0.39 ,与(2)式要求冲量的压力指数为 0.33 很接近。

综上所述,用气体爆震波理论可相当成功地解释激光产生的表面等离子体波过程。用式(1)、(2)可近似计算波速和冲量。