

激光脉冲和放电脉冲产生冲击波的研究

姚 兵 王 甦 曹 雁 刘 迅

曾传相

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

(四川大学光电科学技术系, 成都, 610064)

摘要: 提出使用调 Q 激光脉冲和直流放电脉冲的复合效应在金属靶中产生冲击波。试验表明, 这种新方法显著改善了先前的仅用激光脉冲产生冲击波的技术。

关键词: 激光脉冲和放电脉冲 复合效应 冲击波

Combined effect of shock waves induced by laser pulse and discharge pulse

Yao Bing, Wang Su, Cao Yan, Liu Xun

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Zeng Chuanxiang

(Department of Optoelectric Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Combined effect of shock waves induced by laser pulse and discharge pulse is analyzed. Experiments show that this new technique is more advantageous than that to induce shock waves just with laser pulse.

Key words: laser pulse and discharge pulse combined effect shock wave

引 言

当高功率激光在空气中同靶相互作用时, 靶表面会强烈快速膨胀、蒸发, 甚至靶前面的气体会被击穿, 在此过程中会有多种物理因素对靶产生强烈冲击, 在靶内产生强的冲击波。在适当条件下以足够高功率密度的脉冲激光照射金属靶材料, 有可能产生 10^9 Pa 以上的极高强度的冲击波。这样强的冲击波, 除核爆炸外, 用其它传统手段是不可能得到的。目前, 以高功率激光脉冲辐照靶已成为在材料中产生强冲击波的重要手段, 并在材料的检测、改性、破坏、冲击波化学研究, 及与材料的高压状态方程有关的许多研究领域中得到重要应用^[1~4]。

同样, 当空气中一对电极间产生强的脉冲放电击穿时, 放电过程中许多因素亦会对靶电极产生强烈冲击, 在其内产生强的冲击波^[5]。

由于上述两种在靶中产生冲击波的方法在物理机制上有许多共同点, 我们提出将高功率激光脉冲与强电流放电脉冲结合在一起, 共同对金属靶电极产生强冲击作用, 从而在靶中产生比激光脉冲或放电脉冲单独作用更强的冲击波。

1 方案的提出及分析

1.1 高功率激光脉冲对金属靶的作用

将高功率激光脉冲聚焦于金属靶表面时, 激光所照射处可达到很大的功率密度, 并将对靶

产生如下几方面的作用^[6]:

(1) 激光光压的作用。若激光作用点的光功率密度(光强)为 I , 则其在光照处产生的光压 $P = I(1+r)/c$, 其中 c 为光速, r 为靶表面光照处对光的反射率。若将高能巨脉冲聚焦作用于靶, 由于焦斑处光强 I 可达到极高的数值, 脉冲光压值会非常大。对一般的高功率激光脉冲而言, 其光压对靶的冲击作用常可忽略。例如, 若焦斑处光强 $I = 10^{10} \text{W/cm}^2$, 光压只有 1 个大气压。

(2) 热弹性压力的作用。激光脉冲照射处的薄靶表层首先吸收光脉冲的前部, 变成热能而在小区域中快速集结, 这种能量不能通过热传导而快速疏散, 从而造成该小薄层的体积迅速膨胀, 对其周围区域造成挤压冲击, 在靶中出现热弹性波^[7]。

(3) 蒸气反冲力的作用。激光脉冲使所照射处加热熔化后, 部分材料从表面上高速蒸发, 由于反冲作用, 这种蒸气将对靶产生强的冲击力, 从而在靶中产生冲击波^[4]。

(4) 激光脉冲引发与维持的爆炸作用。由于激光脉冲非常强, 当其功率密度达到某一阈值后, 激光所照射靶表面附近的蒸气和空气将被后续激光热离化、强电场离化而成为等离子体, 并不断被后续激光脉冲加热。这种高温高压等离子体对激光是近乎不透明的, 从而对靶表面产生光屏蔽作用。由于激光脉冲能量主要被这种等离子体所吸收, 导致靶表面附近气体瞬时击穿, 伴随着强烈的闪光与爆炸声。这种激光维持的爆炸(LSD)波的迅猛膨胀, 必将对靶产生强的冲击作用。LSD波常常是激光脉冲在靶中产生强冲击波的主导因素^[8]。

1.2 直流感电脉冲对金属靶的作用

当金属靶与另一电极间产生直流脉冲放电时, 有多种因素会对靶产生冲击力^[5]。(1) 极间介质被电离击穿时的冲击压力。当极间介质被电离击穿后, 在极间先形成一条细小的放电通道。由于高速粒子的相互碰撞, 使其温度积聚上升到 10^4K 以上, 并产生巨大压力, 迫使放电通道迅速扩张, 从而产生强烈的冲击波。此冲击力的大小正比于放电通道中等离子体的电荷密度。(2) 带电粒子对靶的冲击力。放电时, 不仅放电通道有一个很高的压力, 而且正负带电粒子在电场作用下将以很高的速率分别冲击阴极和阳极表面, 形成一个巨大的冲击压力。(3) 电极材料在抛出时产生的压力。在电极表面局部受热而迅速熔化和汽化时, 由于整个过程十分短促, 电极材料的抛出具有爆炸性特点, 从而会对电极产生巨大的反向冲击力, 在靶内产生冲击波。

如图 1 所示, 在金属靶前面一定间隔上放置另一带中心孔的金属电极, 两电极间连接一个高压小电容供给脉冲放电所需能量。当调 Q 巨脉冲穿过电极中心孔入射到金属靶表面上时, 它一方面由于前述机构对靶产生作用, 另一方面它在靶前面产生的气体电离引发直流脉冲放电。因此, 激光脉冲和放电脉冲同时对靶产生综合作用, 在靶内形成比单独由激光脉冲或放电脉冲作用更强的冲击波。

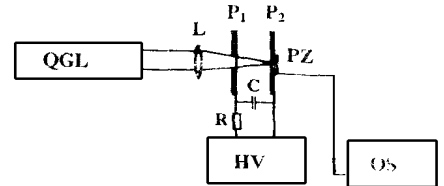


Fig. 1 Experiment arrangement

2 试验装置与结果

试验装置如图 1 所示, QGL 为 Q 开关钕玻璃激光器; L 为焦距 5cm 的会聚透镜; P₁ 为带中心孔的金属电极; P₂ 是金属靶电极; PZ 为压电压力换能器; C 为高压电容; R 为充电电阻; HV 为高压直流电源; OS 为 YB4312 示波器。巨脉冲激光由调 Q 钕玻璃激光器 QGL 产生, 其

脉宽为 20ns, 峰值功率可达 500MW。激光脉冲由焦距为 5cm 的透镜 L 聚焦, 通过带中心孔的铝板电极 P₁ 照射到金属靶 P₂ 表面。靶为 2mm 厚的铝片, 在其背面正对激光照射处安装 PZT 压电压力换能器 PZ, 它与靶间用石蜡作过渡层。用此换能器检测靶内产生冲击波的强度, 其信号在示波器 YB4312 上显示, 并照相记录。一个高压小电容 C(2μf, 3kV) 连接在电极 P₁ 和靶 P₂ 之间, 由可调高压直流电源 HV 通过充电电阻 R 向它充电。通过改变电容上的充电电压来改变电容储能, 从而改变放电脉冲能量。试验中 P₁, P₂ 之间间距选择为充电电压不能将其间的空气击穿的长度上, 由激光脉冲在靶前面产生的电离电荷来引发放电脉冲。显然, 放电脉冲的产生及其在靶表面的作用部位, 由激光脉冲所控制。

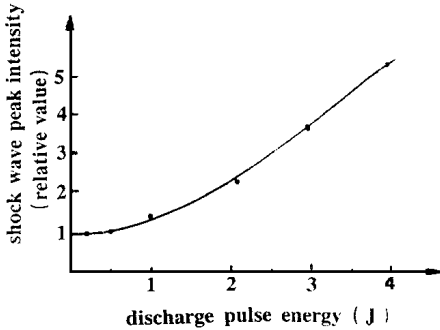


Fig. 2 Relationship between shock wave peak intensity and discharge pulse energy, laser pulse power is 50MW, Al target thickness is 2mm, distance between two electrodes is 3cm

为检测直流放电脉冲对靶中产生冲击波所起的作用, 试验中将激光脉冲保持某一固定值, 通过改变放电脉冲的能量, 观察靶中所产生冲击波峰值强度的相对变化。图 2 是激光脉冲功率为 50MW 时, 靶中所产生冲击波峰值强度与放电脉冲能量的关系。试验中靶接电源正极, 电极间距为 3cm。当改变电极的极性时, 结果变化不大。

从图 2 可看出, 试验曲线不是一条直线, 放电脉冲能量 E 较小时靶中冲击波强度随脉冲能量增长较慢。这是由于放电脉冲能量较小时, 不仅供给放电通道的能量较少, 而且两电极间所加电压 V 也较低 ($V \propto \sqrt{E}$)。低电压对放电区等离子体的密度及膨胀、对带电粒子撞击电极、对放电脉冲宽度等因素

的影响, 远不如放电脉冲能量大时所加电压高的影响显著。

3 结束语

试验表明, 将调 Q 激光脉冲与直流放电脉冲有机地结合在一起, 是一种利用其综合作用在金属靶中产生强冲击波的有效方法, 它比单独用激光脉冲或放电脉冲在靶中产生冲击波更为优越。由于此方法所涉及的因素较多, 有待在理论与试验上作进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Askar Y G A, Moyoz E M. JETP Lett, 1963; 16: 1638
- 2 Anderholm N C. A P L, 1970; 16: 113
- 3 Steverding B, Duder H P. J A P, 1976; 47(5): 1940~ 1945
- 4 Fairand B P, Clauer A H. J A P, 1979; 50(3): 1497~ 1502
- 5 李明辉. 电火花加工理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1989: 149~ 154
- 6 Reedy J F. Effects of high power laser radiation. New York: Academic Press, 1971: 67~ 124
- 7 Scruby C B, Dewhurst R J, Hutchins D A. J A P, 1980; 51(12): 6210~ 6216
- 8 Maher W E, Hall R B, Johnson R R. J A P, 1974; 45(5): 2138~ 2145

作者简介: 姚 兵, 男, 1972 年 1 月出生。工程师。主要从事激光技术研究工作。