

CO₂ 激光烧蚀水所形成气蚀空穴机理研究*

崔村燕^{1,2}, 洪延姬², 文 明², 何国强¹

(1. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072 2 装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘 要: 分析了激光烧蚀液体时形成表面空穴的机理。利用高速相机获得 CO₂ 激光烧蚀蒸馏水的流场照片, 对空穴的发展过程进行了分析, 发现空穴的快速发展期在最初的 100 μs 内, 之后在几百 μs 内保持平衡。用简单模型计算了不同能流密度下, 空穴平衡时的形状, 并分析了模型的局限性。研究结果对于揭示激光烧蚀水产生推力的机理有重要意义, 有利于促进水工质激光推进的发展。

关键词: 激光推进; 水烧蚀; 空穴; 推力

中图分类号: O439 TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2010) 01-0115-05

Analysis for mechanism of cavitation produced by CO₂ laser-generated ablation of the surface of water

CU I Cun-yan^{1,2}, HONG Yan-ji², WEN Ming², HE Guo-qiang¹

(1. Coll. of Astronautics Northwestem Polytechnical Univ., Xi'an 710072 China

2 Inst. of Equipment Command and Technology Beijing 101416 China)

Abstract Mechanism of surface cavitation produced by laser-generated ablation was analyzed. Photos of flow field was obtained by high-speed camera. It was found that development speed of cavitation was very high during the first 100 μs, and it would be in a relative equilibrium state in the next several hundreds microseconds. A simple model was used to calculate the balance shape of cavitation in different energy-flux density and its limitation was presented. Results of this study is valuable for discovering formation mechanics of thrust in the process of laser induced ablation of water and development of laser propulsion with liquid propellants.

Key words Laser propulsion; Water ablation; Cavitation; Thrust

1 引 言

大量有关激光烧蚀液体的研究成果, 为液体作为工质的激光推进研究打下了坚实的基础。水作为最常见的液体, 在揭示激光与液体相互作用机理的研究中受到特别的关注^[1~4]。

气蚀空穴是激光烧蚀液体实验过程中的一种重要现象, 国外对于这一现象的研究比较多, Kawaguchi Y 等在 KrF 激光烧蚀甲苯实验过程中, 研究了从固体边界开始产生的气蚀空穴随时间演化的关系及生命周期和特征尺寸等^[5]; Oraevsky A A 等在有约束条件下激光烧蚀液体的机理实验中, 研究了液体内部气蚀

空穴产生及其相互作用过程^[6]; Andrews J G 等为研究激光焊接金属过程中的焊接深度建立了表面气蚀空穴形状的计算模型^[7]。国内对气蚀空穴方面的研究较少, 南京理工大学倪晓武小组对于激光烧蚀水中金属靶而产生气蚀空穴的破坏作用开展了一定研究^[8]。

本文用具有 ns 分辨率的 PCO HSFC 高速相机拍摄了 CO₂ 激光烧蚀蒸馏水的流场照片, 以气蚀空穴为主要分析对象, 揭示水烧蚀的机理。

2 激光烧蚀液体形成表面空穴的机理

如果液体表面辐照的激光能量超过某一个阈值,

* 收稿日期: 2009-06-04 修订日期: 2009-08-06

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金项目 (90916015)。

作者简介: 崔村燕 (1977-), 女, 博士生, 讲师, 研究领域为推进技术。Email: ccy6655@126.com

烧蚀是热(温度升高的作用)机理还是机械(由局部压降引起的)机理依赖于温度和压力场的演化。如果持续加热,烧蚀是在常压下由于温升造成的。然而,在短脉冲激光“快速”加热的条件下,烧蚀阈值是由局部压降决定的,此过程中仅有轻微的温升^[1]。

由快速加热引起的液体烧蚀为能量吸收导致液体温升,然后受热体积的热膨胀产生热弹性应力波。由于进一步的温升或者局部压降产生蒸气相。蒸气羽流和空穴的动力特性也会导致声学激励。

热弹性应力波产生的意义在于它的根源为水压低于蒸气平衡压力而产生的内部充满蒸气或者不溶性气体的气蚀空穴。空穴生长和破灭的动力学过程是烧蚀和声波脉冲形成的主要原因。相应地,脉冲激光辐照液体导致的声波脉冲和材料移除不仅仅取决于“慢”加热过程中的热量平衡,而是光激励应力场、蒸气空穴动力学过程和烧蚀羽流在空气中的演化等的共同作用结果。

图 1 给出了由于缓慢加热、快速膨胀和激光辐照等而引起的水的相变在 P - T 平面上的示意图^[5]。

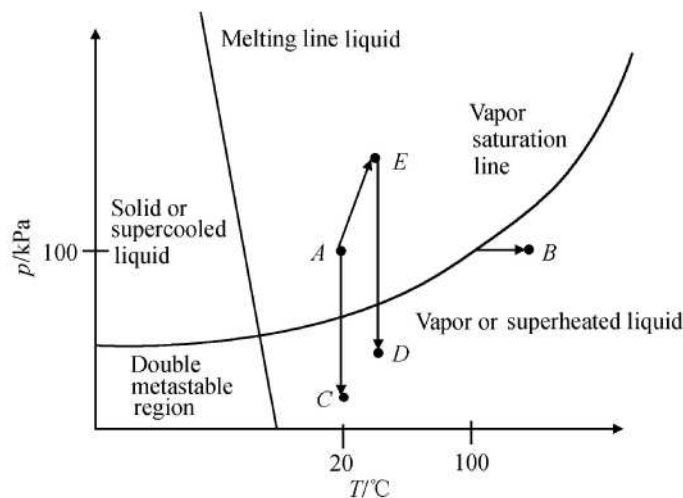


Fig 1 Phase diagram for water and possible transitions upon laser irradiation

在缓慢加热的情况下可以发生 $A \rightarrow B$ 的相变(恒压)。即便在常压下,水中的快速膨胀也会产生张应力,这个过程处于蒸汽和液体等量共存的亚稳定态($A \rightarrow C$)。在张应力约束的辐照条件下,激光加热可使其因热膨胀而进入亚稳定态($A \rightarrow E \rightarrow D$),并在温度低于 100°C 时,在水中产生空气/蒸汽。 $A \rightarrow C$ 和 $A \rightarrow E \rightarrow D$ 的相变过程会产生空穴。在稳定张力下形成的空穴通常是“空的”或者充满不溶于水的空气。在激光烧蚀的条件下,会发生更复杂的现象,如空穴。激光辐照产生的热不是纯机械张应力,在较高能流密

度时,温度会影响质量溅射过程。激光能流密度越高,辐照体积内的温度越接近沸腾点,蒸发对空穴的作用越显著。

3 实验结果分析

在激光烧蚀水的实验过程中出现两种差别较大的现象,一种是击穿时发出明亮的光,实验结束后,透镜上溅射的水滴细小而均匀,容器内的水量基本没有变化;另一种是实验过程中没有发光现象,透镜上溅射的水滴颗粒较大,且有水从透镜滴下,容器内水量明显减少。我们称前者为水诱导的空气击穿,后者为水烧蚀。推力测试及冲量耦合系数的计算结果显示,两种现象所获推力曲线特征差别较大,与水诱导空气击穿相比,水烧蚀所获冲量耦合系数要大得多。显然,在激光推进领域中,水烧蚀是比较理想的现象,因而本文仅对水烧蚀的实验现象进行分析。实验还发现,相同实验条件下,水诱导空气击穿时,激波在空气中和水中的最大传播速度分别可达 7 km/s 和 3.4 km/s 而激光烧蚀水产生的激波在空气中和水中的最大传播速度仅为 2 km/s 和 1.5 km/s (水中声速约为 1460 m/s)。

综上所述,我们可以推断,在水烧蚀过程中,推力的主要贡献不是激波的强度,而是气蚀空穴的动力学特性。

图 2 给出了激光单脉冲能量为 32 J 时,高速相机拍摄的水烧蚀流场照片。在 $5 \mu\text{s}$ 时,水面下有明显的气蚀空穴,水面上有冠状阴影(或称其为溅射水冢^[9])产生,冠状阴影上方出现明显脱离的激波,冠状阴影和气蚀空穴都随时间增长;激波存在的时候,冠状阴影的边界相对比较光滑,在 $40 \mu\text{s}$ 时,激波已经衰弱不见或者已经演化出视场,冠状阴影的光滑边界变得模糊。

计算体积时,依据发展的形状不同,设定的空间形状如图 3 所示。设空间形状为绕纵轴的旋转体, H 1 为液面到空穴最宽处的距离,图 3(a)由两个水平方向半轴相同、竖直方向半轴不同的半椭球体构成,图 3(b)由一个半椭球体和一个圆柱体构成,图 3(c)由一个半椭球体和一个与之具有相同水平方向半轴的半椭球台构成。

图 4 给出了气蚀空穴体积随时间的变化关系。由于每组实验仅能获得四组照片,而激光能量波动较大,所以图 4 中的气泡体积在同一时刻出现不同的值,甚至出现较大的差别。从图 4 可以看出,体积随

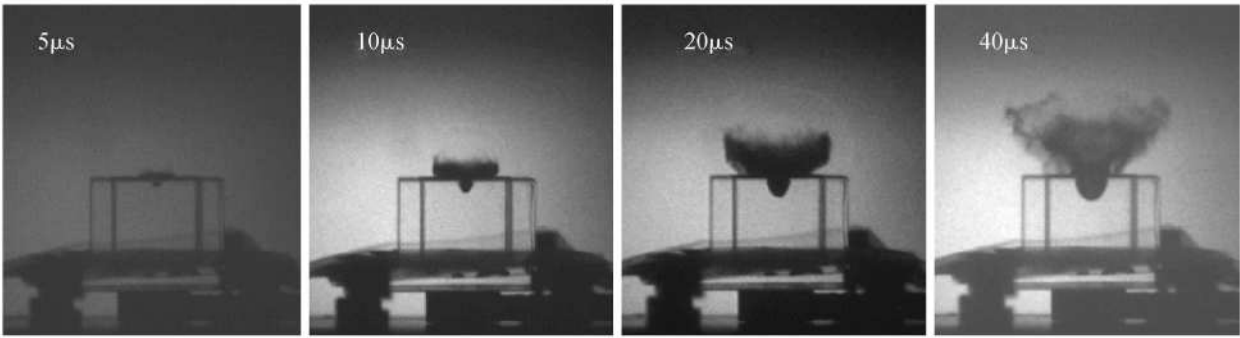


Fig 2 Photos of flux-field evolution of water ablation

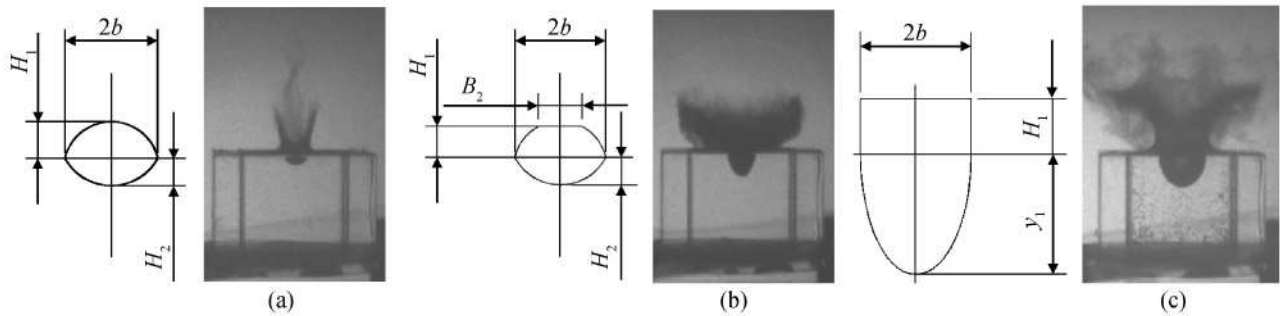


Fig 3 Shape models of cavitations

时间变化的速度较快, 增长速度不均匀, 在 50 μs 之前, 体积增长基本呈线性。第 12 组实验时间设置为 60 70 80 90 μs, 第 26 组实验时间设置为 90 100 110 120 μs, 第 27 组实验时间设置为 50 60 70 80 μs, 从图 4 可以清楚看出, 这三组实验的第一幅照片获得的体积比后面三幅获得的要小, 而且后面三幅获得的体积比较接近, 即体积增速变缓。

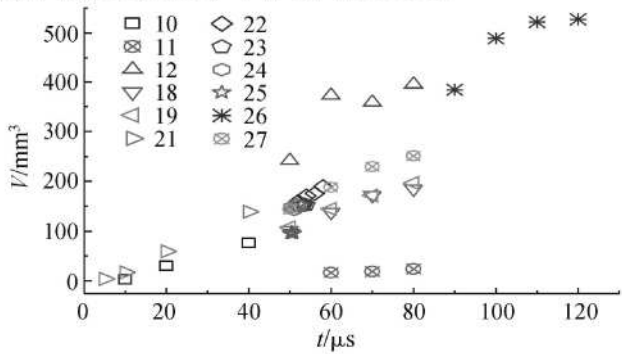


Fig 4 Volume variation of cavity with time gained in experiment

受实验条件所限, 无法获得 120 μs 之后的照片, 但第 12 组和第 26 组数据已明显表现出空穴体积增长速度变慢的趋势。图 5 为 Pakhomov 小组获得的水、酒精和异丙醇体积随时间的演化关系^[9]。从图中可以看出, 在 100 μs 之前, 体积的增长速度较快, 在接近 100 μs 的时候, 体积增长已出现明显变缓的趋势, 200 μs 之后, 体积基本不再有明显变化。

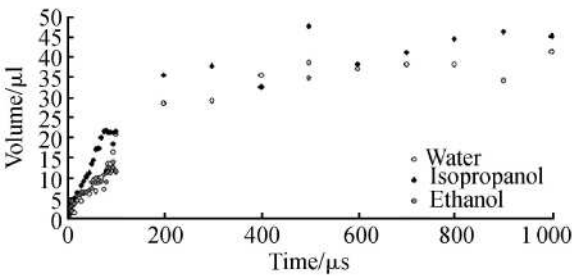


Fig 5 Cavity growth over time obtained by Pakhomov et al

4 平衡气蚀空穴计算模型

考虑到实验的实际情况, 选择模型时, 必须适用的条件为:

- (1) 与空穴相比, 液体与固体容器的交界面尺寸较大, 不会对空穴产生干扰;
- (2) 激光束是固定的, 即在烧蚀过程中, 激光束在液体自由表面上不发生位移。

采用柱面极坐标 (图 6), 能量密度为 $F(r)$, 液体的表面方程为 $z = s(r)$ 。假设液体内部无旋流, 引入无量纲长度 $R = \frac{r}{a}$, $S = \frac{s}{a}$, 和无量纲能量密度 $Q(R) = q(r) / (g \rho_0 h^2 a)^{\frac{1}{2}}$, $q(r) \cos \theta = \rho_n h$, 式中 a 为光束的特征宽度 (光束半径), h 为液体单位质量蒸发所需的能量, v 和 ρ 分别是液体中流线的速度和密度,

下标 g 表示气体、 n 表示法向。则空穴轮廓模型可表示为^[10]

$$\left| -s \left| Q_0^2 + s \right|^{\frac{1}{2}} - Q_0^2 s \ln \left| -\frac{s}{Q_0^2} \right|^{\frac{1}{2}} \right| = R - 1 \quad (1)$$

式中 Q_0 为设定的无量纲能量密度值。当 $\frac{1}{2} \pi Q_0^2 = 1$ 时, 孔底部的斜率为 Q 所以孔底部是尖端。图 7 为实验获得的底部为尖端的空穴照片。

当 $\frac{1}{2} \pi Q_0^2 < 1$ 时, 有

$$S = -Q_0^2, 0 < R < 1 - \frac{1}{2} \pi Q_0^2$$

当 $1 - \frac{1}{2} \pi Q_0^2 < R < 1$ 时, 空穴有较平的底部, 见图

3(c)。图 8 给出了不考虑表面张力时, 空穴的形状。

对于温度为 373.15 K 的水, $\rho_l = 958.3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_g = 0.597 \text{ kg/m}^3$, $h = 2256.7 \text{ kJ/kg}$, $a = 0.5 \text{ mm}$ 则 $Q_0 = 0.5, 3, 5, 10, 30, 80$ 时分别对应的激光能量密度为 $q_0 = 6.0 \times 10^7, 3.62 \times 10^8, 6.0 \times 10^8, 1.21 \times 10^9, 3.62$

$\times 10^9, 9.65 \times 10^9 \text{ W/m}^2$ 。

计算结果与实验数据相比, 总体趋势一致, 但并不完全吻合。实际上, 如果液面发生显著蒸发, 蒸汽会吸收一部分激光能量, 而且液体表面因为蒸发的原因也会呈现不规则的现象; 液面吸收的能量一部分用于蒸发, 还有一部分会以热传导的形式进入液体内部。为了简化模型, 公式 (1) 假设入射的激光能量都被液体表面吸收, 即蒸汽对光束没有衰减作用, 液面对光束没有反射作用。

激光烧蚀液面产生的蒸汽对液面的反冲压力是维持液面低压, 从而形成空穴的动力。为使空穴壁面保持平衡, 与反冲压力大小相等, 方向相反的是重力和表面张力的合力。对于水, 在 373.15 K 时, 表面张力对重力的比值 $(T/a)/\rho_l g d$ 约为 2.5 ($T = 0.05891 \text{ N/m}$, $a = 0.5 \text{ mm}$, 空穴深度 $d = 10 \text{ mm}$, $\rho_l = 958.3 \text{ kg/m}^3$), 所以模型中考虑表面张力更理想。为简化计算, 公式 (1) 忽略表面张力。

因而公式 (1) 提供的模型只能进行定性分析, 不能开展定量研究。

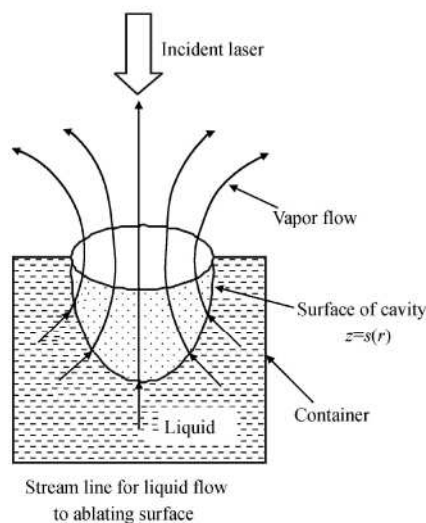


Fig 6 Fluid flow out of a laser-produced cavity

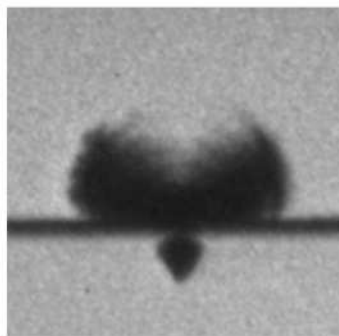


Fig 7 Surface cavity with a cusp at the bottom

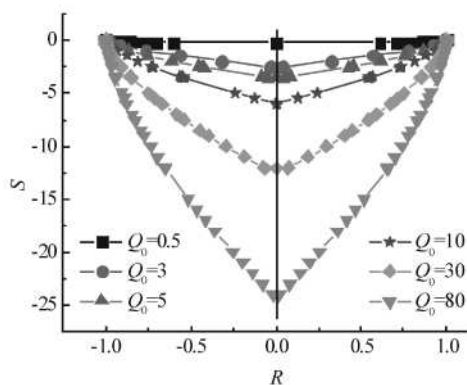


Fig 8 Hole profiles without surface tension for various or the normalized power density

5 结 论

通过理论分析, 实验研究和模型计算, 对激光烧蚀水所产生的空穴形成机理及特征进行了分析。研究结果表明:

(1) 烧蚀条件下, 自由表面产生的空穴是蒸汽压力回推液面造成的;

(2) CO_2 激光烧蚀水所产生的空穴体积在前 100

μs 增长较快, 100 μs 之后, 空穴在重力、表面张力和蒸汽压力的作用下, 将在一定时间内保持平衡。

(3) 公式 (1) 给出的计算模型可以定性分析平衡状态下, 空穴的形状。

纹影实验结果表明, 在激光烧蚀水时, 产生的激波在水中接近声速传播, 因而激波对介质的压力不是产生推力的主要原因。空穴平衡时在 100 μs 之后会

(下转第 128 页)

- al Blast wave energy conversion process in a line-focusing laser supported detonation waves [R]. *AAA* 2006-1356
- [3] Jian Lu, Xiao-Wu Ni, An-Zhi He. An interferometric investigation of ignition and propagation of laser-supported-detonation wave at initial stage [C]. *SPIE*, 2004 100~106
- [4] Raizer Yu P. Laser-induced discharge phenomena studies in soviet science [M]. *New York: Consultants Bureau*, 1977.
- [5] Thomas P D. Jet flow field behind a laser supported detonation wave [R]. *AAA* 77-28
- [6] Apollonov V V, Tishchenko V N. Stable generation and merging of shock waves for “lightcraft” applications Part 1 [C]. *New York Proceeding of 3rd International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2005 205~215
- [7] Donati V, Garifo L, Pandarese F, et al On the ignition of laser supported waves from solid targets by CW CO₂ laser radiation [R]. *AAA* 84-1573
- [8] Akhiro Fukui, Keigo Hatai, Shinatora chq, et al Supporting structure of the LSD wave in an energy absorption perspective [C]. *Hawaii Proceeding of 5th International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2008 403~410
- (编辑: 张荣莉)

(上接第 118 页)

持续几百 μs 才会溃灭, 发生溅射, 所以溅射也不是产生推力的原因。而空穴迅速发展的时间段与推力持续时间基本重合, 因而可以推断, 推力的形成与空穴的发展有密切关系。

参考文献:

- [1] Dongsik Kim. Pulsed laser-induced evaporation of liquids and its applications [D]. *California: University of California*, 1998
- [2] Sigrist Markus W, Kneubühl Fritz K. Laser-generated stress waves in liquids [J]. *J Acoust Soc Am.*, 1978 64 (6): 1652~1663
- [3] Sigrist Markus W, Laser generation of acoustic waves in liquids and gases [J]. *J. Appl Phys*, 1986 60(7).
- [4] Schoeffmann H, Schindt-Klober H, Reichel E. Time-resolved investigations of laser-induced shock waves in water by use of polyvinylidene fluoride hydrophones [J]. *J. Appl Phys*, 1987 63(1), 46~51
- [5] Kawaguchi Y, Ding X, Narazaki A. Transient pressure induced by laser ablation of toluene: a highly laser-absorbing liquid [J]. *Appl Phys A.*, 2003 1~7
- [6] Oraevsky Alexander A, Jacques Steven L. Mechanism of laser ablation for aqueous media irradiated under confined-stress conditions [J]. *J. Appl Phys* 1995 78(2): 1281~1290
- [7] Andrews J G, Athey D R. Hydrodynamic limit to penetration of a material by a high-power beam [J]. *J. Phys D: Appl Phys*, 1976 9
- [8] 倪晓武, 陈笑, 陆建. 激光与液态物质相互作用机理的研究进展 [J]. *激光技术*, 2002 26(4): 258~261
- [9] John Sinko, Lisa Kodgis, Simon Porter, et al Ablation of liquids for laser propulsion with TEA CO₂ laser [C]. *Proceedings of Fifth International Symposium on Beamed Energy Propulsion*, 2007.
- [10] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 国防工业出版社, 2005
- (编辑: 姚懿巧)