

文章编号: 1001- 2486(2008) 04- 0017- 05

非平衡机制下激光与等离子体相互作用机理*

鄢昌渝, 吴建军, 刘洪刚, 何 振

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 采用三温度热化学非平衡模型, 考虑了激光能量在空气等离子体中的共振吸收和逆韧致吸收机制, 用有限差分 NND 格式对控制方程组进行数值离散。对等离子体点火过程进行耦合计算, 并研究了不同入射激光强度条件下等离子体吸收波的形成和演化机制, 讨论了粘性扩散效应对等离子体吸收波的影响。结果表明, 在初始温度 300K, 大气压力条件下, 生成 ZND 模式的 LSD 波所需最小激光强度为 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

关键词: 激光等离子体; LSD 波; 热化学非平衡; 逆韧致吸收

中图分类号: V439; TN249 **文献标识码:** A

A Study on Laser and Plasma Interaction Effect Based on Non-equilibrium Mechanism

YAN Chang-yu, WU Jian-jun, LIU Hong-gang, HE Zhen

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The controlled equations based on thermo-chemical non-equilibrium model under the condition of three temperatures were solved numerically by finite difference NND scheme. The inverse bremsstrahlung absorption and plasma resonance absorption were considered when laser transmitted in air plasma. Plasma initiation process was simulated in coupling computation. The mechanism of formation and development of plasma absorbing wave were investigated under different incident laser intensity, while viscosity and diffuseness effects were considered. The results show that the minimum laser intensity needed to form LSD wave based on ZND model is $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ at the initialized temperature 300K and the pressure is 1 atm.

Key words: laser plasma; LSD wave; thermo-chemical nonequilibrium; inverse bremsstrahlung absorption

激光推进采用激光为飞行器提供能量, 强激光将工质击穿后, 形成高温高压的等离子体, 随后等离子体继续吸收激光能量并不断膨胀, 以此为动力推进飞行器^[1]。由于激光与等离子体相互作用是一个复杂的物理化学过程^[2], 其中包括激光在等离子体中的传播和各种吸收机制。到目前为止, 已有许多关于激光支持的爆轰波的理论、试验和数值仿真研究^[2-6]。激光与等离子体相互作用存在四种情况^[2]: (1) 击穿波; (2) 激光支持的爆轰波(LSD); (3) 激光支持的燃烧波(LSC); (4) 辐射机制。1977年, Raizer^[2]在极限条件下建立了适用于各种频率电磁波的一维 LSD 波模型。该模型在强激光作用下得到了很好的结果。文献[3-5]对一维 LSD 波进行了较为深入的数值计算研究, 包括一维平面波、一维柱面波和一维球面波。研究的工质包括氢气、氦气、氩气, 计算了定常和非定常流动, 考虑了热化学平衡和非平衡效应, 所得结果较好地揭示了计算条件下的 LSD 波生成机制。

1 数学模型和计算方法

1.1 控制方程组

参考 Gnoffo 建立的守恒方程组^[7], 考虑了三温度下的热化学非平衡过程。因此, 时变控制方程组包括组分连续方程、动量守恒方程和各种能量守恒方程。在减少了总质量守恒方程和采用准中性假设后, 对控制方程组进行无量纲化, 可得到一维无量纲守恒型方程组为:

* 收稿日期: 2007- 11- 20

基金项目: 国家部委资助项目(61328); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET- 06- 0927)

作者简介: 鄢昌渝(1980—), 男, 博士生。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} = i \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \mathbf{W}$$

式中,

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_{ns} \\ \rho u \\ \rho E \\ \rho e_v \\ \rho e_e \end{pmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho_1 u \\ \vdots \\ \rho_{ns} u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u H \\ \rho u e_v \\ u(\rho e_e + p e_e) \end{pmatrix} \quad \mathbf{E}_v = \begin{pmatrix} \frac{Le_1 k_{\text{总}}}{Pr Cp_{\text{总}}} X_{1x} \\ \vdots \\ \frac{Le_{ns} k_{\text{总}}}{Pr Cp_{\text{总}}} X_{nsx} \\ \tau_{xx} \\ u \tau_{xx} + q_x \\ q_{ix} \\ q_{ex} \end{pmatrix} \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_{ns} \\ 0 \\ S_T \\ S_v \\ S_e \end{pmatrix}$$

其中, $i = 0$ 为 Euler 方程组; $i = 1$ 为 Navier-Stokes 方程组。 $ns = 10$ 表示除电子组元外的 10 种组元。 ω_i 是组元质量生成速率。总能量源项 S_T 、振动能量源项 S_v 、电子能量源项 S_e 的计算分别如下:

$$S_T = Q_l$$

$$S_v = Q_{e-v} + Q_{T-v} + \sum_{i=1}^{10} \omega_i \hat{D}_i$$

$$S_e = Q_l - Q_{e-v} + Q_{e-T} - \sum_{i=6}^{10} n_{e,i} \hat{I}_i$$

其中, Q_l 为激光能量沉积源项, Q_{T-v} 为平动-振动能量松弛项^[8], Q_{e-v} 为振动-电子能量松弛项^[9], Q_{e-T} 为平动-电子能量松弛项^[10], $\sum_{i=1}^{10} \omega_i \hat{D}_i$ 为离解或复合反应的组元生成项所导致的振动能量的变化^[7], $\sum_{i=6}^{10} n_{e,i} \hat{I}_i$ 为组元生成项所导致的电子能量的变化^[7]。各种能量松弛机制的计算可见相应的参考文献。

1.2 化学反应模型

采用只考虑 N、O 两种元素的 11 组元纯空气模型。选定 Park 建立的空气有限速率化学反应式^[6]。假设在 ns 个化学组元的混合气体中有 m 个反应, 第 r 个反应式可表示成一般形式的当量表达式:

$$\sum_{i=0}^{N_j} \alpha_i X_i = \sum_{i=0}^{N_j} \beta_i X_i, \quad (r = 1, 2, \dots, m)$$

其中, X_i 代表组元或催化剂, α_i 、 β_i 分别是反应物与生成物的当量系数, k_{fr} 、 k_{br} 分别是正向反应速率系数与逆向反应速率系数, 下标“ f ”、“ b ”分别代表正向反应与逆向反应。

正反应和逆反应速率系数分别为:

$$k_{fr} = A_{f,r} T_k^{B_{f,r}} \exp\left(-C_{f,r}/T_k\right)$$

$$k_{br} = k_{fr}/K_{eq,r}$$

其中, 化学反应式及 T_k 的确定见文献[6]; $K_{eq,r}$ 为平衡常数, 主要采用 Gupta 模型^[11]进行计算, Gupta 模型中没有包含的反应式, 将采用 Park 模型^[12]进行计算。

1.3 等离子体点火

等离子体点火(即等离子体初始化)采用 1.0×10^7 W/cm² 为初始条件, 点火区长度为 0.5mm。点火能量确定为入射激光能量的 15%, 点火计算直到点火区电子数密度达到临界电子数密度的 1% 时结束。

1.4 逆韧致吸收模型

在一维计算条件下, 忽略折射率变化对光线传播方向的影响, 假设光线沿直线传播。在吸收条件下, 每条光线的当地激光强度依据 Beer 法则进行计算^[2]:

$$\frac{dI_i}{ds_i} = -K_i I_i$$

在 10.6μm 的 CO₂ 激光辐射作用时, 忽略光电效应, 认为自由电子是唯一吸收激光能量的等离子体物质。CO₂ 激光辐射的逆韧致吸收系数, 在一价离子范围的发射进行修正后, 由下式进行估计^[2]:

$$K_{iCO_2} = \frac{5.72 p_e^2 \ln \left[27 \left(\frac{T_e}{10^4} \right)^{4/3} p_e^{-1/3} \right]}{\left(\frac{T_e}{10^4} \right)^{7/2}}$$

1.5 等离子体共振吸收

电子静电振动的等离子体频率 ω_p 定义为^[6]:

$$\omega_p^2 = n_e q_e^2 / m_e \epsilon_0$$

当静电振动频率与入射电磁波(激光)频率相等时, 将会发生等离子体共振, 此时等离子体变得“不透明”, 激光束将被全反射。在共振期间, 激光将通过共振吸收等非线性吸收机制进行吸收, 这时可以通过假定等离子体前沿的一个总吸收和能量的再分配得到吸收的激光能量。本文采用 80% 作为等离子体共振期间的能量吸收效率。

1.6 计算方法

控制方程的对流项采用张涵信院士建立的 NND 有限差分格式^[13] 进行数值离散, 对化学反应源项进行了点隐式处理^[8], 对流项采用 LL-SGS 方法^[8] 进行隐式求解。

2 计算结果与分析

计算区是左端封闭的一维圆管, 长度 1cm。划分为 1000 个网格。所有计算情况下点火时的入射激光功率密度均为 $1.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 。全流场初始条件为: 温度 300K, 大气压力的环境空气。

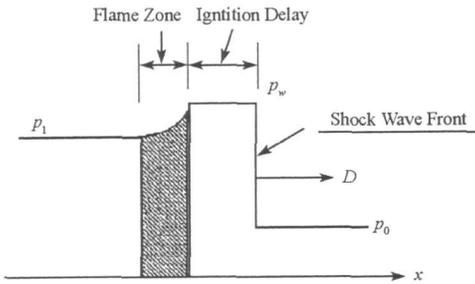


图 1 一维 ZND 模型的定常压力图
Fig. 1 1- D steady pressure profile by ZND model

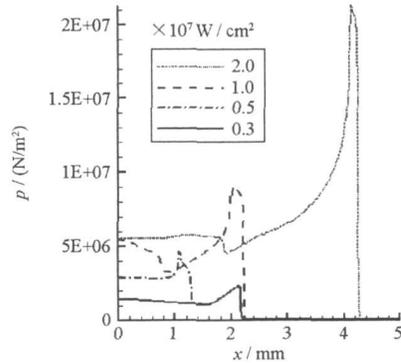


图 2 不同入射激光强度下计算所得压力图
Fig. 2 Computed pressure profile for different incident laser intensity

图 1 为文献[4]中给出的基于一维 ZND 模型的稳态爆轰波压力分布图。可以看到, 爆轰波由冲击波波前、点火延迟区和燃烧区三部分组成。图 2 为不同入射激光强度条件下, 计算得到的压力分布图。可以清楚地看到, 当入射激光强度大于等于 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 所得压力分布均与图 1 具有相同的结构, 即冲击波前沿、点火延迟区、激光能量吸收区。当入射激光强度等于 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 可以看到两个压力峰值, 其中第一个压力峰值在 2.11mm 处, 与入射激光强度等于 $3.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时所得压力峰值重合。这说明第一个压力峰值是由于等离子体点火引起的。而第二个压力峰值在 1.08mm 处。

图 3 为不同入射激光强度条件下, 最大电子数密度随时间的变化。在点火结束后, 激光强度为 $1.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 和 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 最大电子数密度迅速上升, 然后趋于稳定, 这说明激光能量已经进入稳定吸收阶段, 且激光强度为 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时, 所得最大电子数密度超过了临界电子数密度, 说明这时的主要吸收机制为共振吸收。当激光强度为 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时, 最大电子数密度先下降后上升, 然后趋于稳定, 结合图 2 可以知道, 激光能量的吸收发生在密度更小的区域。这表明随着密度的减小, 可以在更低的激光强度下维持 LSD 波, 但是必须能够提供足够的离解电子, 这时的吸收机制主要是自由电

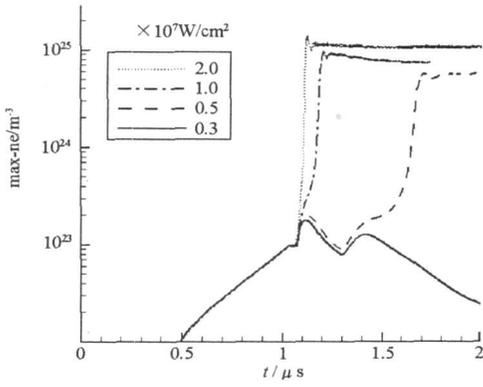


图3 不同入射激光强度下计算所得最大电子数密度
Fig. 3 Computed maximum electron number density history for different laser intensity

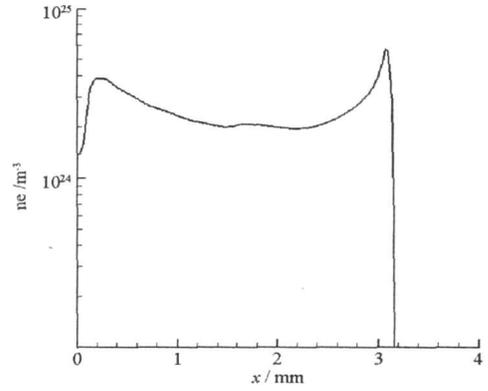


图4 5.0 × 10⁶ W/cm² 计算到 3μs 所得电子数密度分布图
Fig. 4 Computed electron number density profile at 3μs for 5.0 × 10⁶ W/cm²

子的逆韧致吸收。当激光强度为 $3.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,最大电子数密度也出现了两个峰值,第一个峰值发生在 $1.11\mu\text{s}$,第二个峰值发生在 $1.41\mu\text{s}$ 。第二个峰值也是在低密度区域发生,但是,电子数密度的增加不能弥补对流等造成的损失,因此,最大电子数密度迅速下降。

图4为入射激光强度 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,激光作用 $3\mu\text{s}$ 时的电子数密度分布图。可以看到,存在两个明显的电子数密度峰值,其中第一个峰值为等离子体吸收波,第二个峰值是由等离子体点火计算引起的。

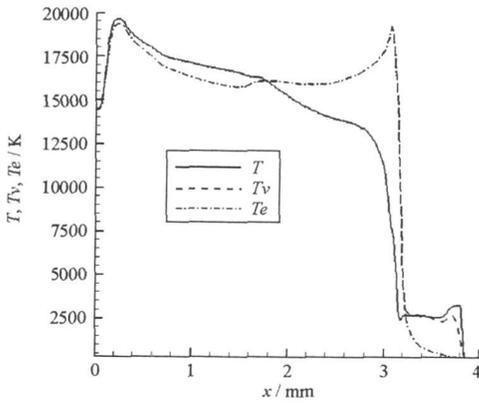


图5 5.0 × 10⁶ W/cm² 计算到 3μs 所得三温度分布图
Fig. 5 Computed temperature profiles at 3μs for 5.0 × 10⁶ W/cm²

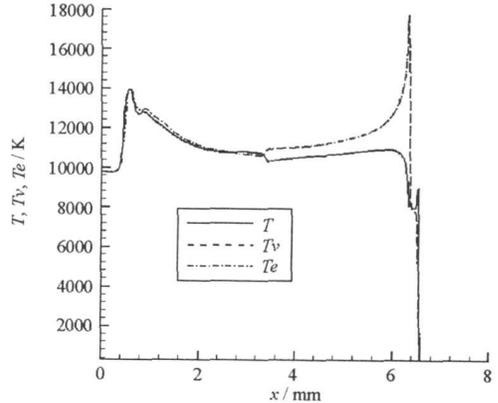


图6 2.0 × 10⁷ W/cm² 计算到 2.5μs 所得三温度分布图
Fig. 6 Computed temperature profiles at 2.5μs for 2.0 × 10⁷ W/cm²

图5为入射激光强度 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$,激光作用 $3\mu\text{s}$ 时的三温度分布图。可以看到振动温度和电子温度几乎完全重合,这是因为从电子能到振动能的能量弛豫时间相对于化学反应时间和流场流动时间来说非常短,因此可以认为两种能量瞬间达到平衡。而平动温度与电子温度相差较大。结合图5,可以计算出,超过90%的激光能量在等离子体吸收波中被吸收。

图6为入射激光强度 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,激光作用 $2.5\mu\text{s}$ 时的三温度分布图。与图5相比,可以看到一个有趣的现象,等离子体吸收波波后的三种温度更容易趋于平衡,这是因为影响能量弛豫时间的电子数密度更大,使得电子能可以更快地传递给平动能,并且平衡温度比图5中的平衡温度低,这是因为图6条件下波后的空气密度更高。

图7为入射激光强度 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,激光作用 $2.5\mu\text{s}$ 时的无量纲密度和马赫数分布图。可以看到一个明显的峰值区,这就是点火延迟区。结合图6可以看出,存在这个区域是因为等离子体吸收波是由电子数密度控制,该区的温度不到 $10\,000\text{K}$,还不能形成等离子体强烈吸收所需的大量自由电子。可以预计,随着激光强度的增高,该区温度将增加到足以形成大量的自由电子,从而冲击波前沿与等离子体

吸收波将合并。

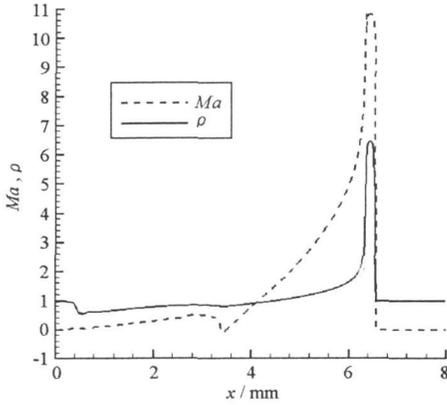


图7 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 计算到 $2.5 \mu\text{s}$ 所得无量纲密度和马赫数分布图

Fig. 7 Computed non-dimensional density and Ma profiles at $2.5 \mu\text{s}$ for $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$

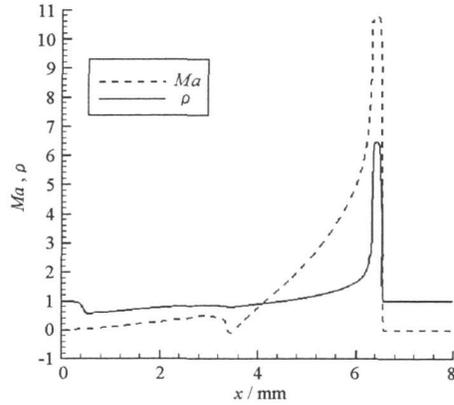


图8 考虑粘性效应时 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 计算到 $2.5 \mu\text{s}$ 所得无量纲密度和马赫数分布图

Fig. 8 Computed non-dimensional density and Ma profiles at $2.5 \mu\text{s}$ for $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ with transport effect

图8为考虑了输运影响,入射激光强度 $2.0 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$,激光作用 $2.5 \mu\text{s}$ 时的无量纲密度和马赫数分布图。与图7相比可以看到,两幅图非常吻合,这说明粘性效应对等离子体吸收波的影响可以忽略。

3 结论

(1)在初始温度 300K ,大气压力的空气中,生成一维ZND模式的LSD波所需要的最小激光强度为 $5.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。

(2)ZND模式的LSD波仍然具有很高激光能量吸收效率,达到90%以上。其中电子数密度是影响激光能量吸收效率的关键参数。

(3)在非正常流场的计算中,粘性效应对等离子体吸收波几乎没有影响。这可能是因为激光能量沉积过程非常迅速,使得能量源项和化学反应源项控制了整个过程。

参考文献:

[1] 翟冰洁,左都罗,卢宏.空气呼吸模式激光推进实验研究[J].光学与光电技术,2005,3(1):14-17.
 [2] Raizer Y P, Thibulewicz. Laser-induced Discharge Phenomena [M]. Consultants Bureau, New York, 1977.
 [3] Fujiwara T, Miyasaka T. Laser-supported Detonation Concept as a Space Thruster [C]//CP702, Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2004.
 [4] Shiraishi H. Fundamental Properties of Non-equilibrium Laser-supported Detonation Wave [C]//CP702, Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2004.
 [5] Shiraishi H. Numerical Analysis on Non-equilibrium Mechanism of Laser-supported Detonation Wave Using Multiply-charged Ionization [C]//CP830, Fourth International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2006.
 [6] Wang T. S., Chen Y. S., Liu J et al. Performance Modeling of An Experimental Laser Propelled Lightcraft [R]. AIAA Paper 2000-2347, 2000.
 [7] Gnoffo P A, Gupta R N, Shinn J L. Conservation Equations and Physical Models for Hypersonic Air Flows in Thermal and Chemical Nonequilibrium [R]. NASA TP 2867, 1989.
 [8] 柳军.热化学非平衡流及其辐射现象的实验和数值计算研究[D].长沙:国防科技大学,2004.
 [9] Park C, Lee S H. Validation Of Multi-temperature Nozzle Flow Code NOZNT [R]. AIAA Paper 93-2862, 1993.
 [10] Roberts T. Implementation Into TINA Modelling for the Electron/Electronic Energy Equation [R]. AIAA 96-1851, 1996.
 [11] Gupta R N, Yos J M, Thompson R A. A Review of Reacting Rates and Thermodynamic and Transport Properties for an 11 Species Air Model For Chemical and Thermal Non-equilibrium Calculation to 30000 K [R]. NASA RP-1232, 1990.
 [12] Park C. Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics [M]. Wiley, New York, 1990.
 [13] 张涵信,沈孟育.计算流体力学——差分方法的原理和应用 [M].北京:国防工业出版社,2003.