

激光与空气作用过程中辐射能量损失的研究^{*}

黄 辉, 金 星, 李 倩, 曹正蕊

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘 要: 激光与空气相互过程中, 与辐射相关的各种过程起着特别重要的作用。研究了高温气体辐射对气体流体力学过程的影响。辐射能量密度和压力对气体状态和运动的影响完全可以忽略不计, 而流场的辐射能量损失不能忽略。利用光线追踪法, 运用辐射输运方程, 根据光线在网格中的传播路径, 计算空气吸收的激光能量; 根据网格厚度, 确定辐射能量损失。数值求解含能量源项的流体控制方程, 对激光击穿空气的等离子流场演化过程进行了模拟, 得到了辐射能量损失随入射激光能量的变化规律。

关键词: 辐射流体力学; 辐射能量损失; 光线追踪法; 能量沉积

中图分类号: V439 TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2009) 05-0629-04

Study of radiation energy loss in laser-air interaction

HUANG Hui JIN Xing LI Qian CAO Zheng-ni

(Inst. of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract The process in laser-air interaction is related to radiation. The effect of high-temperature air radiation on air fluid mechanical process is investigated. It is found that the radiation energy density and pressure can be ignored, while the radiation energy loss cannot be neglected. Ray tracing method is used to compute the absorbed energy by the radiation transfer equation. According to the optical depth of the grid, radiation loss is determined. Control equations containing energy source term is solved numerically, and evolution of the laser-induced plasma field is simulated. The functional relationship between radiation loss and input laser energy has been obtained.

Key words Radiation hydrodynamics; Radiation loss; Ray tracking method; Energy deposition

1 引 言

在激光和空气的相互作用过程中, 激光的辐射输运过程和流体动力学过程相互关联并耦合在一起。一方面, 等离子体通过多种方式吸收激光能量, 使激光强度不断衰减; 另一方面, 激光在传输过程中损失的能量转化为空气等离子体的内能。带有辐射的流体力学方程组早在 20 世纪 50 年代末已经提出来了^[1], 当温度很高时, 与辐射的发射和吸收相关的各种过程以及辐射热交换将起着特别重要的作用, 因此引起广泛关注^[2~6]。

Yan 等人^[3]采用能量瞬时沉积模型, 使用一维球对称模型描述了沉积在球心处的激光能量产生的球面激波演化过程, 没有考虑流场演化过程中辐射场对

流场的影响。Kandala 等人^[4]在模拟了激光诱导等离子体的形成过程, 考虑了电离、离解效应对流场的影响, 将等离子计算模型引入连续输运方程, 电子的能量守恒方程有描述辐射能量损失的源项, 利用实验结果对模型进行了校正。程发银等人^[5]建立了等离子体的统计模型, 计算了包括高温区域和低温区域的混合等离子系统中杂质辐射能量损失。

辐射场对流场的影响可以表现在三个方面: 辐射能量、辐射压力和辐射能流, 本文将分别研究辐射场对气体运动和状态的影响。采用光线追踪法, 建立简化的物理模型来确定流场的辐射能量损失, 使用不同的单脉冲能量进行数值模拟, 得到辐射能量损失随能量的变化规律, 因此本文的研究结果将对激光能量比较大时的辐射流体力学计算有一定的参考价值。

* 收稿日期: 2009-05-04 修订日期: 2009-08-05。

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金项目 (10672184)。

作者简介: 黄 辉 (1983—), 男, 助教, 硕士, 研究领域为先进推进技术。E-mail: huanghui1983@gmail.com

2 物理模型和计算方法

2.1 辐射能量损失对气体状态和运动的影响

平衡辐射能量密度是高温气体辐射能量密度的上限,若用平衡辐射能量密度代替高温气体辐射能量密度,则气体温度为 T 时的辐射能量密度与气体能量密度比值为^[6]

$$\eta_1 = (8\sigma T^3 / 3cn_L k) \cdot (\rho_0 / \rho) \tag{1}$$

式中 σ, c, n_L, k, ρ 和 ρ_0 分别为斯提芬-玻耳兹曼常数、光速、洛喜密脱数、玻耳兹曼常数、气体密度和标准大气密度。光压与气体压力比值为

$$\eta_2 = \eta_1 / (3(\gamma - 1)) \tag{2}$$

在所有的光子都朝着一个方向运动的极端情况下,辐

射能流最大,为 S_p 。如果高温气体辐射是平衡的,则气体温度为 T 时的辐射能流为

$$S_p = 4\sigma T^4 \tag{3}$$

忽略空气分子的离解和原子的电离,则空气的能流为

$$S_f = \frac{3}{2} \frac{\rho}{\rho_0} n_L k T u \tag{4}$$

式中 u 为气体的典型速度。因此,辐射能流与气体能流比值为

$$\eta_3 = S_p / S_f = c \cdot \eta_1 / u \tag{5}$$

计算比值为 η_1, η_2 和 η_3 时,高温空气的能量密度和压力比值可以用 Saha 方程计算得到的状态参数计算。用简化公式 (2), (6) 和 (7) 以及 Saha 方程分别计算得到的结果见表 1。

Table 1 Energy density, pressure and flux density ratios of radiation to air for different conditions

Density ρ/ρ_0	Temperature T / K	η_1, η_2 and η_3 from Eqs (1), (2) and (5) ($\gamma = 1.15$)			η_1, η_2 and η_3 from the Saha equation		
		$\eta_1 \%$	$\eta_2 \%$	$\eta_3 \%$	$\eta_1 \%$	$\eta_2 \%$	$\eta_3 \%$
10	20 000	1.09×10^{-4}	2.42×10^{-4}	3.27	1.58×10^{-5}	2.48×10^{-5}	4.74×10^{-1}
1	20 000	1.09×10^{-3}	2.42×10^{-3}	3.27×10^1	1.18×10^{-4}	2.12×10^{-4}	3.54
0.01	20 000	1.09×10^{-1}	2.42×10^{-1}	3.27×10^3	6.37×10^{-3}	1.44×10^{-2}	1.91×10^2
10	50 000	1.70×10^{-3}	3.78×10^{-3}	5.10×10^1	1.99×10^{-4}	2.40×10^{-4}	5.97
1	50 000	1.70×10^{-2}	3.78×10^{-2}	5.10×10^2	1.29×10^{-3}	1.88×10^{-3}	3.87×10^1
0.01	50 000	1.70	3.78	5.10×10^4	7.53×10^{-2}	1.39×10^{-1}	2.26×10^3
1	900 000	9.91×10^1	2.20×10^2	2.97×10^6	2.96	3.33	8.88×10^4
1	2 700 000	2.68×10^3	5.95×10^3	8.03×10^9	1.05×10^2	—	—

从表 1 可见,在温度不是特别高和气体密度不是特别小的情况下,辐射的能量密度和压力实际上对于气体的能量平衡及其气体动力学的运动并无影响。而由辐射所引起的受热气体的能耗以及一般地说气体中的辐射热交换不能忽略。上述现象的原因就在于,在通常条件下气体的运动速度 u 与光速 c 有很大的差别: $u \ll c$ 。由于速度上的差别,甚至就是在辐射的能量密度比气体的能量密度小很多的时候,辐射的能流和气体的能流仍可相互比较。

2.2 辐射能量损失的计算

由于不考虑质量力和粘性,控制方程采用守恒形式 Euler 方程^[7]。由表 1 可知,辐射能量密度和压力对气体状态和运动的影响可忽略不计,守恒型流体动力学方程组中,只需要对最后的能量方程加上源项

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \text{div} (\rho E + p) = Q_L - Q_R \tag{6}$$

式中 Q_L 为单位时间单位体积内气体吸收的激光能量, Q_R 为单位时间单位体积内气体的辐射能量损失,单位均为 $J/(m^3 \cdot s)$ 。

在模拟激光束时使用光学追踪法,假设激光束由独立的光线组成,每条光线除了有确定的直线方程,还携带一定的功率。光线传播过程中,光的散射和光的吸收相比是可以忽略的,一般不考虑;当气体本身的温度不高或高温区域不大时,气体本身的发射也可以不考虑,辐射强度的变化规律遵循辐射输运方程

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial l} = -\mu_v \cdot I \tag{7}$$

式中 c 为光速, I 为辐射强度,对一条光线来说,就是它携带的功率, l 是沿激光传输方向的传输距离, μ_v 为气体对激光的吸收系数,由高温气体状态方程得到。对于 (i, j) 网格,沉积的激光能量为

$$Q_{Lij}^n = P_0^n \cdot \mu_{vij} \cdot l_{ij}^n \cdot \Delta t \tag{8}$$

式中 P_0^n 为激光光斑离散化后第 n 条光线携带的功率; μ_{vij} 为 (i, j) 网格的吸收系数, l_{ij}^n 为第 n 条光线扫过 (i, j) 网格的距离; Δt 是时间步长,如图 1 所示。

式 (8) 对所有的 n 求和,即得到 Q_L 在 (i, j) 网格的值。整个气体在 1 秒内总的能量损失 Q_R 为

$$Q_R = \int_R dV = \int \text{div} S dV = \int d\Sigma \tag{9}$$

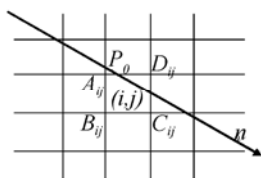


Fig 1 Schematic track of the ray n in the grid

式中 dV 和 $d\Sigma$ 分别为体积元和表面积元, S 为辐射能流矢量。根据 (i, j) 网格的光学厚度, 分为光学厚和光学薄两种极端情况研究高温气体的辐射能量损失。对于光学厚的辐射体, 其表面积的能量流为

$$S \approx (l_r / x) \sigma T^4 \quad (10)$$

式中 x 和 l_r 分别为辐射体的特征长度和 Rosseland 平均自由程, 式 (10) 成立的条件是 $l_r \ll x$ 。

对于 (i, j) 网格而言, 在 dt 时间内通过网格壁面辐射损失的能量 Q_{Rij} 为

$$Q_{Rij} \approx l_{rij} \sigma T_{ij}^4 \cdot dt \left| \frac{S_{BC} + S_{DA}}{\Delta x_{ij}} + \frac{S_{AB} + S_{CD}}{\Delta y_{ij}} \right| \quad (11)$$

式中 T_{ij} 为第 ij 网格的温度, Δx_{ij} 和 Δy_{ij} 分别为第 ij 网格在 x 和 y 方向的特征长度, l_{rij} 和 T_{ij} 分别为 (i, j) 网格的 Rosseland 平均自由程和温度, σ 为斯提芬-玻耳兹曼常数, S_{AB} , S_{BC} , S_{CD} 和 S_{DA} 分别为 (i, j) 网格 AB , BC , CD 和 DA 边的面积, 如图 1 所示。

对于光学薄的高温气体而言, 总的能量损失是由发射本领对物体体积积分决定的, 式 (6) 中的发射本领 q_R 为

$$q_R = 4\sigma T^4 / l_p \quad (12)$$

式中 J 为气体的体积发射本领, l_p 为 Planck 平均自由程, 式 (12) 成立的条件是 $l_p \gg x$ 。

对于 (i, j) 网格而言, 在 dt 时间内通过网格壁面辐射损失的能量 Q_{Rij} 为

$$Q_{Rij} \approx \frac{4\sigma T_{ij}^4}{l_{p_{ij}}} dt \cdot \Delta V_{ij} \quad (13)$$

式中 T_{ij} 为 (i, j) 网格的温度, (V_{ij}) 为体积, $l_{p_{ij}}$ 为其 Planck 平均自由程。对于 (i, j) 网格, 先把网格的特征长度与自由程进行比较, 判断是光学厚还是光学薄, 然后相应地调用式 (11) 或者式 (13) 求辐射能量损失。

2.3 计算方法

建模过程中, 假设激光诱导的等离子满足区域平衡条件, 各种微观量 (如截面等) 不直接参与方程组的计算, 由已知流场的温度和密度等物理量, 分别根据平衡态的统计力学和量子力学求出原子或离子在

各种量子状态的跃迁几率, 就可以得到式 (7) 中的吸收系数 μ_a 。式 (12) 中的 Planck 平均自由程 l_p 和式 (10) 中的 Rosseland 平均自由程 l_r 。利用光线追踪法, 根据光线在网格中的传播路径信息, 运用辐射输运方程, 得到流场的沉积能量 Q_L ; 按照式 (11) 或者式 (13) 确定流场的高温气体辐射能量损失。

流体计算使用有限体积法, 选用 Roe 格式, 并且通过使用具有最小模值通量限制器的 MUSCL 方法达到空间 2 阶精度, 用预估-校正法进行时间积分。

3 计算结果及分析

3.1 初边值条件

计算区域的半纵剖面为 $0.1 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的矩形, 除矩形的下边界为对称轴边界外, 其它 3 个边界为无粘滑移固壁边界条件; 气体被限制在矩形区域内, 可以更加方便地研究气体的辐射能量损失。激光束从左侧平行, 光斑半径为 0.01 m , 经焦距为 0.25 m 的透镜聚焦系统被聚焦于 $(0.05 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 处, 采用光线追踪法, 激光束被离散成 100 条独立的光线。激光脉冲波形对推力器性能有影响, 实验测得的波形拖尾段有很多振荡, 为方便理论分析和数值计算的进行, 将激光脉冲波形拟合为函数

$$P(t) = t / (at^2 + bt + c) \quad (14)$$

式中功率 $P(t)$ 的单位为 W , 时间 t 的单位是 s 。当常数因子 $a = 1.31424$, $b = -2.184320 \times 10^{-7}$, $c = 2.957046 \times 10^{-13}$ 时, 对应的单脉冲能量 $E_{in} = 30 \text{ J}$ 宽度 $t_p = 20 \mu\text{s}$ 峰值功率时刻 $t_h = 1.5 \mu\text{s}$ 。

流体计算使用有限体积法, 选用 Roe 格式, 并且通过使用具有最小模值通量限制器的 MUSCL 方法达到空间 2 阶精度, 用预估-校正法进行时间积分。

3.2 辐射能量损失随入射能量变化规律

将高能脉冲激光聚焦在空气中, 当辐射强度超过一定的阈值时, 发生空气击穿现象, 击穿区域的温度瞬时升高到一定的值, 入射激光能量通过逆韧致吸收机制沉积下来, 形成激光维持吸收波, 能量沉积效率 η_{le} , 辐射比例 η_R 和能量转换效率 η_k 可以表示为

$$\eta_{le} = \frac{E_{de}}{E_{in}}, \quad \eta_R = \frac{E_R}{E_{de}}, \quad \eta_k = \frac{E_k}{E_{de} - E_R} \quad (15)$$

式中 E_{in} 为入射激光能量, E_{de} 为流场沉积的激光能量, Q_R 是整个流场的辐射能量损失, E_k 为整个流场的动能。表 2 是脉冲能量 E_{in} 为 30 J , 100 J , 200 J , 300 J 和 600 J 时, 模型得到的计算结果; 不同能量的脉冲波形是图 3 中 30 J 的波形函数乘上一个常数得到的。

Table 2 Results for different pulse energy

E_{in}/J	$t_i/\mu s$	Q_R/J	η_r	η_k
30	0.76	0.54	1.8%	16.2%
100	0.27	4.0	3.9%	16.1%
200	0.14	16.1	8.1%	14.7%
300	0.11	34.2	11.4%	14.5%
600	0.06	110	18.3%	14.3%

表2中的击穿时刻是 t_i 是根据流场网格单元的功率密度得到的, 当流场用存在网格, 其功率密度大于击穿阈值, 就会出现击穿现象, 数值计算中空气介质的击穿阈值取为 $1.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。由表2可知, 单脉冲能量越大, 越早出现击穿。

表2中的不同能量下的沉积效率能量沉积率 η_k 均在70%以上, 比文献[3]中的65%和文献[8]的结果69%都稍大, 这是因为本文没有考虑气体等离子对入射激光的反射、散射和光线在入射激光在流场传播过程中的折转。文献[4]中, 单脉冲能量在300 mJ左右时, 能量沉积效率约为80%, 与本文的结果比较接近。表中的能量转换效率 η_k 约为15%, 随入射能量的变化幅度比较小。

表2中随入射能量 E_{in} 影响最大的是辐射损失 Q_R 和辐射能量比例 η_r , 利用多项式拟合, 得到 Q_R 和 E_{in} 之间的关系式

$$Q_R = 0.0002E_{in}^2 - 0.0473E_{in} - 1.9709 \quad (11)$$

所以, 辐射损失与入射激光能量是二次函数的关系, 图2是数值计算结果和拟合曲线。

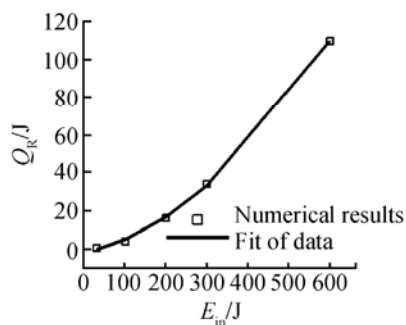


Fig 2 Curve of radiation loss vs pulse energy

需要注意的是, 公式(7)是在不考虑气体本身的发射与散射的条件下由能量守恒规律得到的, 当气体本身的温度不高或高温区域不大时, 自身的发射和散射和光的吸收相比, 可以忽略; 可是当入射激光单脉冲能量比较大时, 辐射能量损失也比较大, 在 E_{in} 为

600 J时, 辐射能量损失的比例达到了18.3%, 公式(7)的误差会比较大。

4 结 论

(1) 在温度不是特别高和气体密度不是特别小的情况下, 辐射的能量密度和压力实际上对于气体的能量平衡及其气体动力学的运动并无影响。

(2) 由于辐射场的速度 c 远大于气体的运动速度 u , 辐射的能流不可忽略; 可以采用简单的模型进行计算。

(3) 沉积的等离子内能转换成流场动能的效率约为15%, 随入射能量的变化幅度比较小。

(4) 辐射损失与入射激光能量是二次多项式关系。

参考文献:

- [1] Marshak Effect of radiation on shock wave behavior[J]. *Phys of Fluids*, 1958, 1(1): 176
- [2] 章冠人. 光子流体动力学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- [3] Yan H, Adalgren R, Boguszko M, et al Laser energy deposition in quiescent air[R]. *AAA* 2003-1051
- [4] Kandala R, Candler G. Simulation of laser-induced plasma experiments for supersonic flow control[R]. *AAA* 2005-205
- [5] Cheng F Y, Takizuka T, Hayashi N, et al Radiation loss in a compound plasma system with high and low temperature regions[J]. *Chinese Physics*, 2004, 13(11).
- [6] П. 泽尔道维奇, И. 莱依捷尔. 激波和高温流体动力学现象物理学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1985
- [7] 李倩, 文明, 曹正蕊, 等. 来流对吸气式激光推力器冲量耦合系数的影响[J]. *推进技术*, 2007, 28(5): 285~488 (LI Qian, WEN Ming, CAO Zheng-rui et al Effect of inflow on impulse coupling coefficient of air-breathing lightcraft[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(5).)
- [8] Ohnishi N, Ogino Y, Sawada K, et al Numerical analysis of laser-driven in-tube accelerator operation [R]. *AAA* 2005-749

(编辑: 梅 瑛)