

## 激光在高速流场中的传输及衰减特性

贾晓东<sup>1\*</sup>, 钱丰学<sup>1</sup>, 他吴睿<sup>2</sup>, 赵行<sup>2</sup>, 王小强<sup>2</sup>, 张娟娟<sup>2\*</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;  
2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基于 Maxwell 方程组构建了描述激光在大气中传播行为的理论模型, 并通过求解得到了具有高斯分布特征的激光分布解析解; 同时, 基于流场控制方程计算了不同马赫数的流场分布特征; 在此基础上, 通过建立非线性折射率模型, 考虑流场密度、温度、组分以及压力的影响, 研究了各因素对激光折射率的影响规律; 最后, 基于激光电场分布特征、流场分布特征以及比尔定律, 建立了描述激光在高速流场中的能量衰减模型, 揭示了高速流场对激光折射和衰减的影响规律。

**关键词:** 气流附面层; 电磁传输; 非线性折射率; 能量衰减

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230150

### 0 引言

激光具有高亮度、高单色性、高定向及高相干性等独特的性质, 近年来在各技术领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。激光的强相干性质使其不仅可以作为信息载体, 还可以作为能量载体, 其各种功能应用都依赖于特定波长、功率的激光辐射在发射系统和接收系统之间大气环境中的传输行为<sup>[5-6]</sup>。较高能量激光在通过靶材气流附面层时, 由于流场密度、压力、温度以及速度的非线性变化, 部分能量因散射而使得激光传输方向发生偏离 (即辐射能量在空间重新分配), 部分光辐射能量被吸收而转变为其他形式的能量 (如热能等)<sup>[7-10]</sup>, 这种传播方向的改变和能量密度的衰减会对激光的作用效果带来影响。

目前, 针对大气环境对激光传输的影响规律的研究主要集中于大气成分 (尤其是气凝胶颗粒及粒子群) 对光束的吸收和散射作用。由于大气光学性质的时空复杂性, 很多研究者致力于对不同地区和时间的大气条件的测量分析, 他们研究并开发了很多大气传输模型及光传输应用软件, 被广泛应用的有美国标准大气、HITRAN、LOWTRAN、MODTRAN、FASCODE

等。但该类软件的缺点是只适用于软件数据库模型中视距条件下的大气传输, 且软件中的气溶胶多为简化球状模型, 基于该模型的仿真对实际气溶胶的描述并不精确, 会导致使用范围有一定的局限性。此外, 研究者们针对各种气溶胶的形状、尺寸分布、统计特征等特性进行测量和理论研究。通过大量的试验观测得知, 水云粒子大多由 1~20  $\mu\text{m}$  的球形均匀水滴构成, 高云中的冰晶粒子往往具有椭球状、空心及实心六角柱状、平板状、子弹花状等复杂形状<sup>[11-13]</sup>。针对气溶胶光学特性的理论研究也经历了研究对象的形状从简单到复杂的发展过程, 研究方法也包含了适合规则形状的解析法和适合不规则形状的数值解法两类。上述研究很好地揭示了大气成分对激光传输方向和能量衰减特性。然而, 目前鲜有关于非线性流场对激光传输机制的研究, 在非线性流场中, 大气杂质对激光传输的影响十分微弱, 更多的影响来自于流场密度、压力以及速度的变化。高速流场所产生的压力、温度和速度等变化会使激光传播路径上的空气密度、折射率发生变化, 呈现非线性分布, 导致光波前相位畸变和激光能量密度降低<sup>[14-15]</sup>, 进而使得靶激光与初始发射激光产生差异。因此, 激光穿过高速流场

收稿日期: 2023-03-17; 修订日期: 2023-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12272157, 12372150); 中央高校定向探索项目 (lzujbky-2022-19)

作者简介: 贾晓东, 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

通讯作者: 张娟娟, 女, 副教授, 博士, 主要从事电磁固体力学、功能复合材料方面的研究。

到达靶向材料是一个涉及了电场、磁场、温度场、流场的极端环境下多物理场耦合的非线性动力学问题。要研究激光的传输和衰减特性,需对激光与流场的相互作用过程进行准确描述和表征。

文中基于经典电动力学理论构建了描述激光在大气中传播行为的理论模型,并通过求解非线性控制方程得到了具有高斯分布特征的激光分布解析解;同时,基于流场控制方程计算了不同马赫数的流场分布特征;在此基础上,通过建立非线性折射率模型,考虑流场密度、温度、速度以及压力的影响,研究了各因素对激光折射率的影响规律;最后,基于激光传输和衰减特性揭示了靶材气流附面层对激光到靶参数的影响规律。

## 1 激光在高速流场中传输及衰减率理论模型

### 1.1 基于电动力学的激光表征

首先对激光在大气介质中的传输行为进行表征。激光束是一种特定频段的电磁场,其运动规律可以用 Maxwell 方程组和电磁本构方程描述,基于已有理论可推导出激光的电场强度  $\vec{E}$  满足如下的波动方程<sup>[16]</sup>:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

针对无耗介质,即  $\sigma = 0$  (大气未被电离而产生等离子体可认为是无耗介质),公式 (1) 可进一步可简化为:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} - \frac{1}{\varepsilon_0 C^2} \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

式中:  $C^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}$ 。由此可以求解出稳态激光场所满足的矢量亥姆霍兹方程:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 n^* \vec{E} = 0 \quad (3)$$

式中:  $k$  为真空中光波的波数,  $k = \frac{2\pi}{n^* \lambda}$ ;  $n^*$  表示复折射率,  $n^* = \sqrt{1 + \chi}$ 。

### 1.2 激光电场控制方程求解

针对激光电场控制公式 (3) 进行求解。假设有沿着  $x$  轴方向传输的光场,其光场的解可以表示为:

$$\vec{E}(x, y, z) = \Psi(x, y, z) \exp(ikx) \quad (4)$$

将公式 (4) 代入公式 (3), 得到:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

由于激光具有很强的会聚性且是典型的高斯光束,满足傍轴近似条件,对公式 (5) 进一步求解,可得到激光电场的解:

$$E(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(x)} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{w^2(x)}\right) \exp\left(-ik \frac{y^2 + z^2}{2R(x)}\right) \exp(-i(kx - \eta(x))) \quad (6)$$

其中,在  $x$  点处的光斑半径:

$$w(x) = w_0 \sqrt{1 + x^2/x_0^2} \quad (7)$$

式中:  $x_0 = \pi n w_0^2 / \lambda$  为瑞利长度,  $n$  为介质的折射率。

### 1.3 高速流场对激光传输行为的影响机制

高速流场存在激波、边界层、湍流等复杂结构,对激光的影响作用体现在流场温度、压力以及密度变化对其折射率产生影响,进而影响电场分布特征,导致激光传播方向的改变和能量的衰减。

#### 1.3.1 激光在高速流场中非线性折射率的表征

在非均匀介质中,光的传播轨迹比较复杂,与非均匀介质的状态有密切关系。光波在非均匀大气中传输时,大气温度和气压引起其折射率随空间和时间的随机起伏。在非均匀介质情况下,折射率  $n$  不是常数,而是空间位置的函数。在强光作用下,介质中的非线性电极化效应不能被忽略,导致折射率依赖于光强。非线性折射率的表达式为:

$$n = n_0 + \gamma I \quad (8)$$

式中:  $n_0$  为参考状态气体折射率;  $\gamma$  为非线性折射率系数;  $I$  为光强度。激光束的光强与激光电场强度有如下关系:

$$I = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_0 |E|^2 \quad (9)$$

故可得出折射率为:

$$n = n_0 + \gamma \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_0 \left| E_0 \frac{w_0}{w(x)} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{w^2(x)}\right) \exp\left(-ik \frac{y^2 + z^2}{2R(x)}\right) \exp(-i(kx - \eta(x))) \right|^2 \quad (10)$$

可以看出,在高速流场中,气体密度、温度和压力进一步对折射率产生影响。

#### 1.3.2 气体密度、温度和压力对折射率的影响

激光在气流层中的传输特性是由光束在通过气

流层空间范围时所引起的光学性质的变化决定的。当光束穿过高速流场中时受到某种方式的扰动,与无扰动时相比,光线偏离原来的传播方向。首先,折射率与流场密度之间的关系可通过 Lorenz-Lorentz 公式给出:

$$\left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)\frac{1}{\rho} = \frac{2}{3}K_{GD} \quad (11)$$

式中:  $K_{GD}$  为 Gladstone-Dale 系数 (比折射度),  $m^3/kg$ , 其表达式为:

$$K_{GD} = \sum K_i \frac{\rho_i}{\bar{\rho}} = \frac{K_h}{\bar{\rho}} \quad (12)$$

折射率随温度的变化可以表示为:

$$n = 1 + (n_c - 1) \frac{\bar{T}}{T} \quad (13)$$

气体在可压缩过程中,由于压力变化引起密度变化,使局部气体折射率变化,对于绝热变换有:

$$n = 1 + \delta_0 (p/\bar{p})^{\frac{1}{\gamma}} \quad (14)$$

式中:  $\gamma=c_p/c_v$  为比热比,  $c_p$  为定压克分子热容量,  $c_v$  为定容克分子热容量。基于公式 (10)、(11)、(13) 和 (14) 可得到折射率与流场密度、温度、压力之间满足:

$$\frac{(n-1)^\gamma (n^2+2)}{n+1} = \frac{3R\bar{p}\bar{T}\delta_0^\gamma}{2K_h\bar{p}} (n_0-1) \quad (15)$$

由公式 (15) 可知,折射率与流场的密度、温度、压力呈非线性关系。

### 1.3.3 激光在高速流场中的能量衰减

电磁波传播时即有能量传播,单位时间内穿过与传播方向垂直的单位表面的能量称为功率流。功率流是一个矢量,其方向是该点能量流动的方向。从微观角度来说,当激光束在大气中传输时,可以认为电磁场的电场分量作用于物质的微观结构,令结构中的带电粒子受到外力做受迫振动,该作用使得电磁场的一部分能量转化为热能,宏观就体现为入射光的能量发生了损耗,称为光被吸收。一束入射光通过某一介质层,其光通量由于受到介质的散射和吸收,使得通过介质层以后的原光路上的出射光受到衰减,即大气消光。研究大气的消光特性时是从入射光与出射光为同轴光的角度出发的。光强因散射和吸收而引起的衰减遵从比尔规律,即:

$$I = I_0 e^{-\mu(\lambda)l} \quad (16)$$

式中:  $I_0$  为经过大气衰减前的光强;  $I$  为经过大气衰减后的光强;  $l$  为传输距离;  $\mu(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  的激光的大气衰减系数。公式 (16) 表示大气对光的消光特性是随着介质层的厚度呈现指数规律减弱的。功率和光强之间的关系满足  $P = SI$ 。由公式 (6) 和公式 (16) 可得:

$$P = \frac{1}{2} S \epsilon_0 c n_0 \left| E_0 \frac{w_0}{w(x)} \exp\left(-\frac{y^2+z^2}{w^2(x)}\right) \exp\left(-ik\frac{y^2+z^2}{2R(x)}\right) \exp(-i(kx-\eta(x))) \right|^2 e^{-\mu(\lambda)l} \quad (17)$$

公式 (17) 描述了激光在流场中的能量衰减行为。

## 2 模型验证

为验证所提出强激光在高速流场中的传输及衰减率理论模型,将计算结果与风洞试验结果进行对比。风洞试验是由激光发射器发射功率为 713 W 的激光,穿过风洞一侧 K9 玻璃进入风洞,然后透过风洞中部的有机玻璃,再穿过风洞另一侧的 K9 玻璃,并对其光斑半径和功率进行测量,激光在流场中传输的模型示意图如图 1 所示。

风洞中的通入气流的马赫数分别为 0、0.85、3,风洞两侧 K9 玻璃之间的距离为 0.6 m,靶材玻璃处在 0.3 m 位置处。具体试验结果如表 1 所示。

通过所提出的模型计算了激光在流场中的光斑半径变化和电场分布特征,如图 2~图 4 所示,并与试验结果对比了到靶光斑半径  $d_2$  和功率  $P_2$ 。模型所采取的参数见表 2。

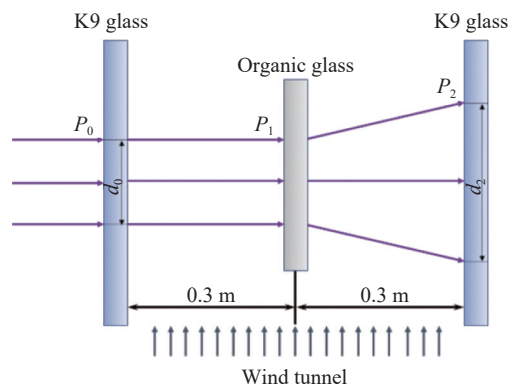


图 1 激光在流场中传输的模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of a model for laser propagation in a flow field

表 1 风洞试验参数及结果

Tab.1 Wind tunnel test parameters and results

Mach number, $Ma$	$P_0/W$	$P_2/W$	$d_0/cm$	$d_2/cm$	$L/m$
0	713	240	4.4	8.63	0.6
0.85	713	258	4.4	8.69	0.6
3	713	308	4.4	-	0.6

从图 2~图 4 可以看出,所提出模型计算得到靶光斑半径和能量衰减与风洞试验结果一致,验证了所提出模型的准确性和可靠性。试验中,由于风洞两侧有 K9 玻璃,风洞中靶材为有机玻璃,其对光斑半径和能量衰减影响较大,在计算中考虑了玻璃的影响,其作用体现在对扩散系数  $\beta'$  和衰减系数  $\mu(\lambda)$  的变化。从图

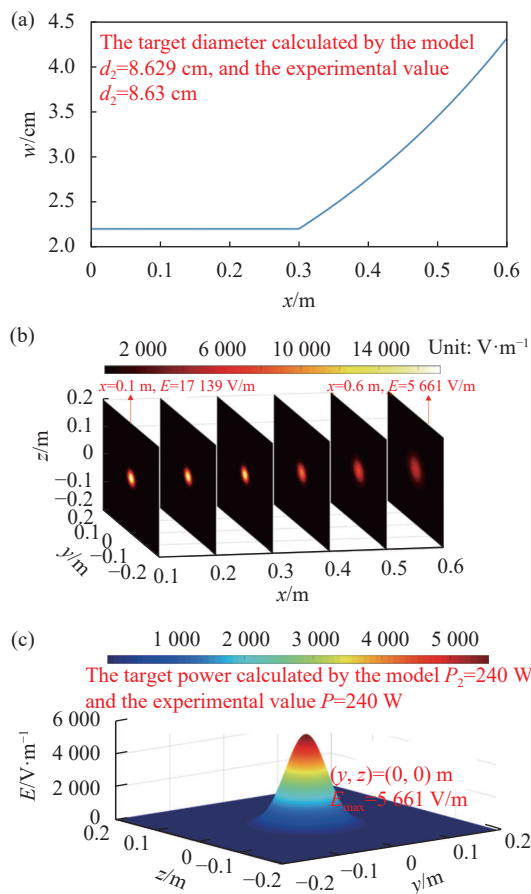


图 2  $Ma=0, P_0=713 W$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.2 Laser in the flow field (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=0, P_0=713 W$

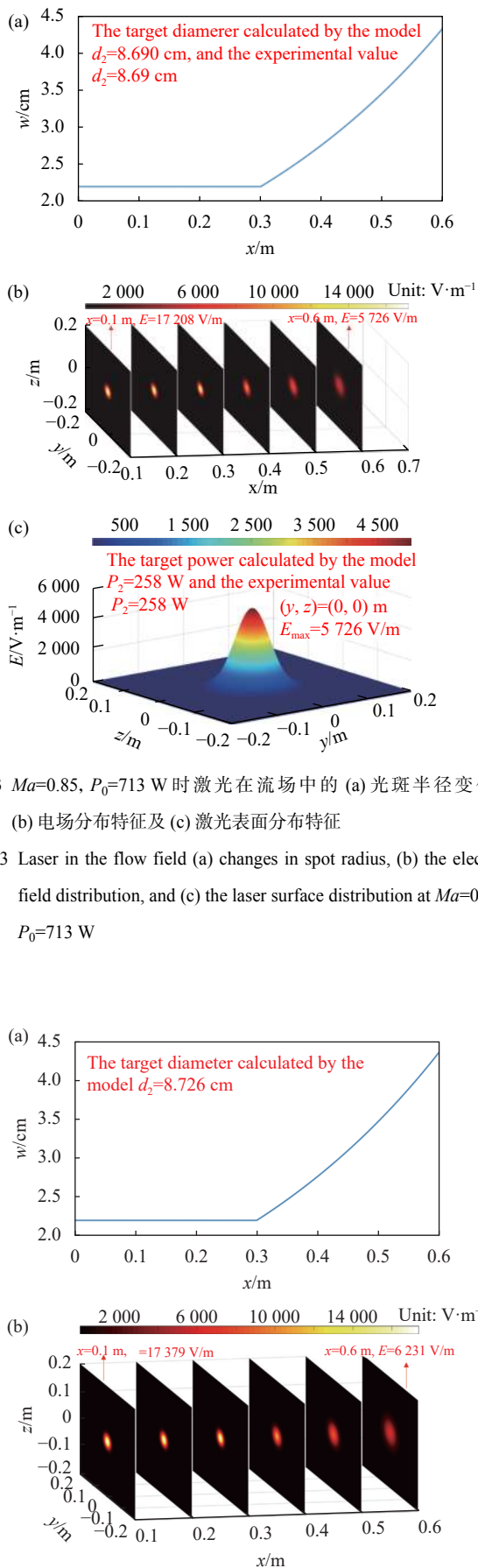


图 3  $Ma=0.85, P_0=713 W$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.3 Laser in the flow field (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=0.85, P_0=713 W$

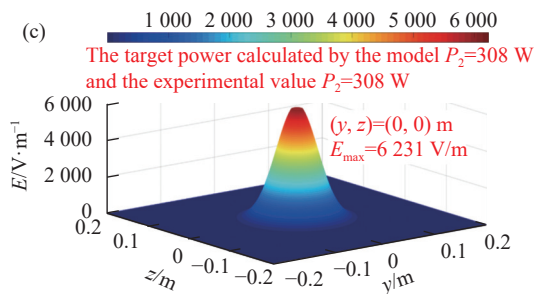


图 4  $Ma=3, P_0=713$  W 时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.4 Laser in the flow field (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=713$  W

表 2 计算所选取参数

Tab.2 Selected parameters for calculation

Mach number, $Ma$	$P_0$ /W	$d_0$ /cm	$L$ /m
0	713	4.4	0.6
0.85	713	4.4	0.6
3	713	4.4	0.6

中可以看出, 光斑半径随着传输距离的增加而逐渐增大, 说明流场和玻璃对光束具有发散作用; 电场强度随着传输距离的增加而逐渐减弱, 说明流场和玻璃对光束能量具有削弱作用; 激光是典型的非线性光, 在光束中心位置强度最大, 自内至外逐渐减小。

### 3 结果与讨论

基于高速流场中的能量衰减模型, 研究了不同马赫数  $Ma$ 、发射功率  $P_0$ 、光斑半径以及入射角对激光光斑半径随着传输路径的变化和电场分布特征。

#### 3.1 功率变化

首先, 去除玻璃的影响, 这是由于扩散系数和衰减系数均只体现流场作用, 玻璃靶材的影响不再考虑。研究了激光在流场中的光斑及能量变化特征, 此时激光的光斑半径变化和能量的衰减均来自高速流场的作用。

图 5~图 7 为不同发射功率下电场沿传输距离的分布特征和激光表面分布特征。激光传输行为受流场密度梯度的变化, 计算时马赫数与光束半径恒定, 分别为  $Ma=3, r=2.2$  cm, 说明所对应气体的

密度和对激光的折射能力相同。因此, 在相同传输距离下, 传输功率越大, 激光截面电场值越大。从图中可以看出, 发射功率对光斑半径无影响, 且光斑半径随传输距离的增加而逐渐增大, 增加量

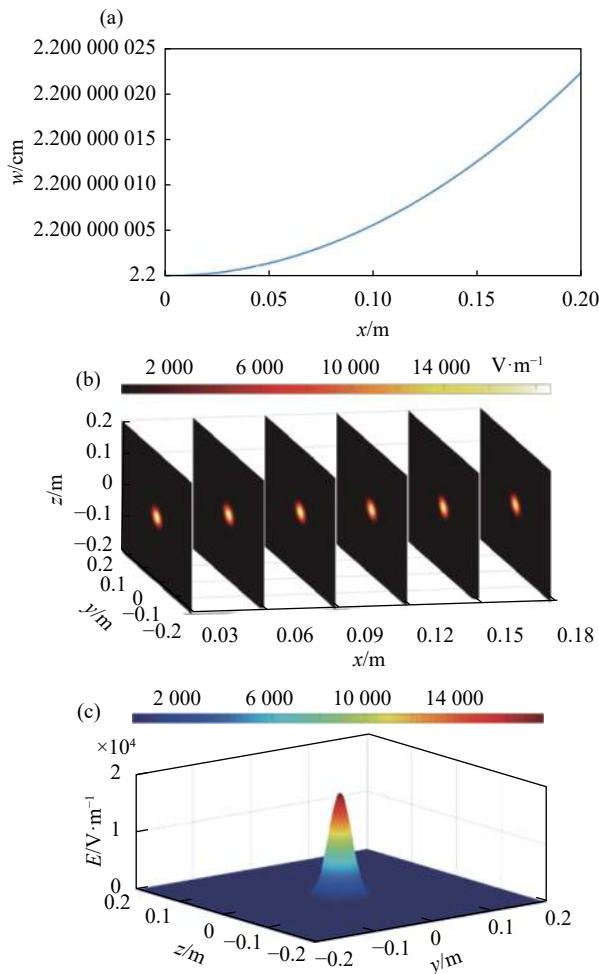
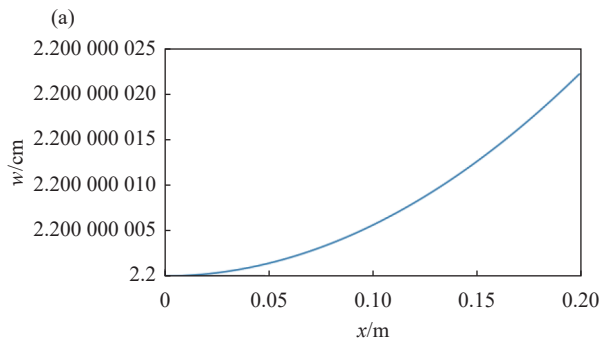


图 5  $Ma=3, P_0=713$  W,  $r=2.2$  cm 时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.5 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=713$  W,  $r=2.2$  cm



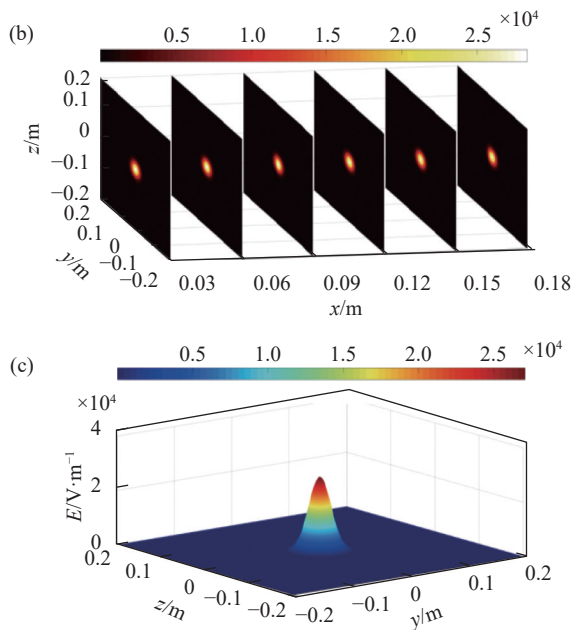


图 6  $Ma=3, P_0=1650\text{ W}, r=2.2\text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.6 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=1650\text{ W}, r=2.2\text{ cm}$

为  $1 \times 10^{-8}$ , 几乎可以忽略; 激光截面电场值随着发射功率的增加而增加, 其截面电场值在光束中心位置强度最大, 自内至外逐渐减小, 说明激光是典型的非线性光。

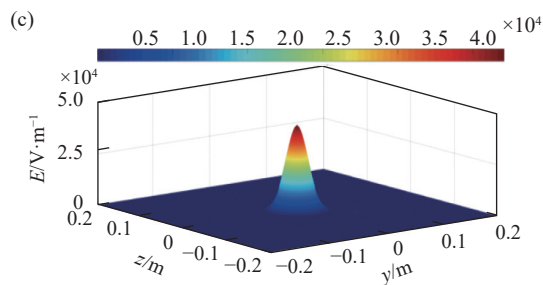
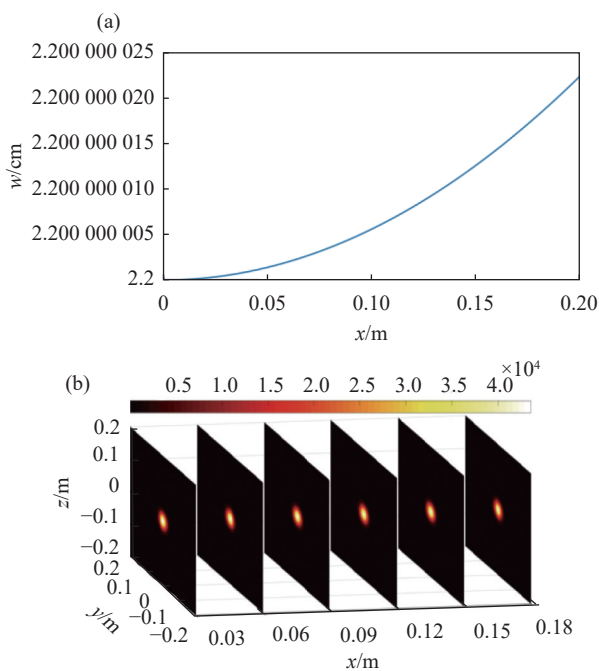


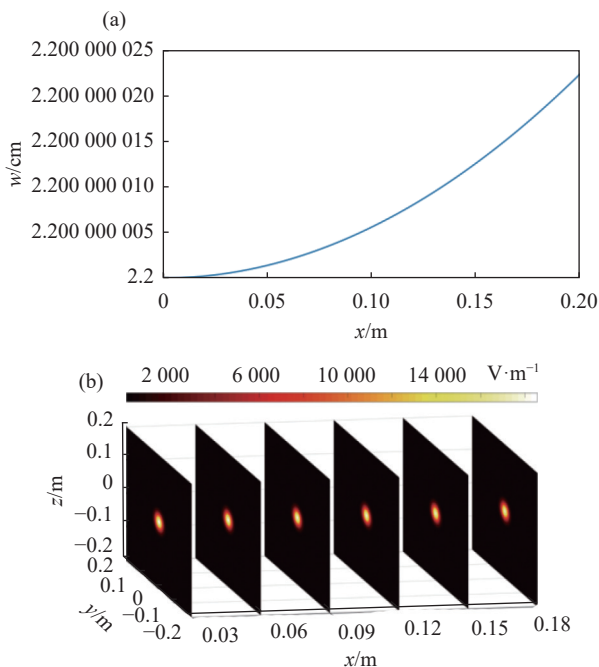
图 7  $Ma=3, P_0=3900\text{ W}, r=2.2\text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.7 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=3900\text{ W}, r=2.2\text{ cm}$

### 3.2 马赫数变化

其次, 激光传输行为受流场影响主要是来自流场密度梯度变化, 当激光从大气进入靶材气流附面层时, 气流密度梯度发生变化, 因此影响激光的传输行为。图 8~图 10 为激光在不同马赫数靶材气流附面层的分布特征。

从图 8~图 10 可以看出, 流场对激光的发散作用较弱, 激光的半径增加量为  $9.1 \times 10^{-8}$ , 几乎可以忽略; 然而不同马赫数下激光能量衰减明显, 在 0.18 m 处衰减后, 激光输出功率分别为 413.8、435.7、495.9 W, 按照衰减率计算公式:  $(P_0 - P_2)/P_0$ , 可以得到三种马赫数下的衰减率分别为 42%、38.9%、30.4%。衰减率随着



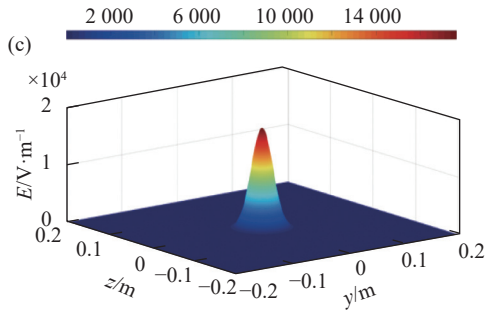


图 8  $Ma=0.85, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.8 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=0.85, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$

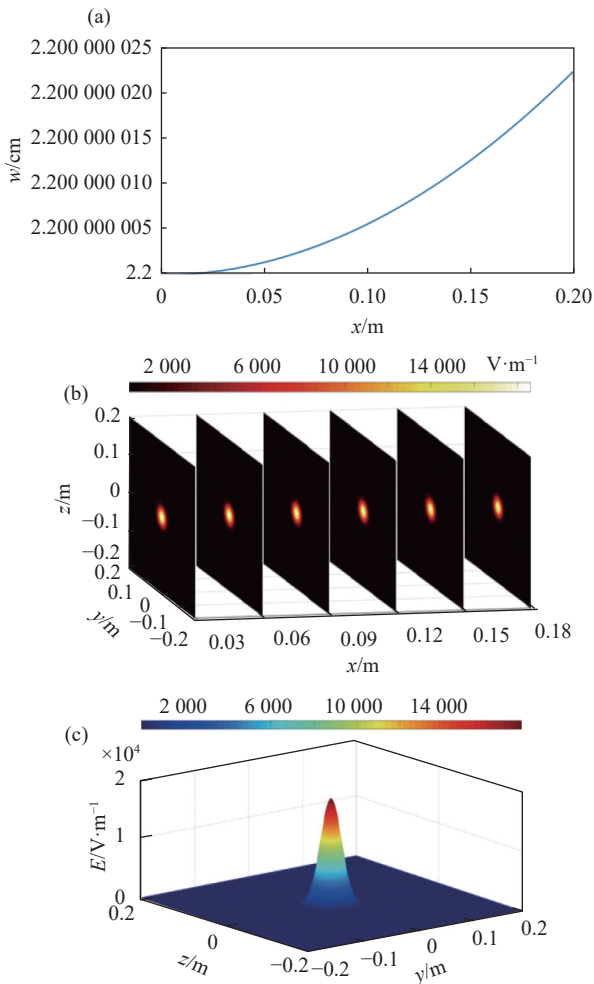


图 9  $Ma=2, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.9 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=2, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$

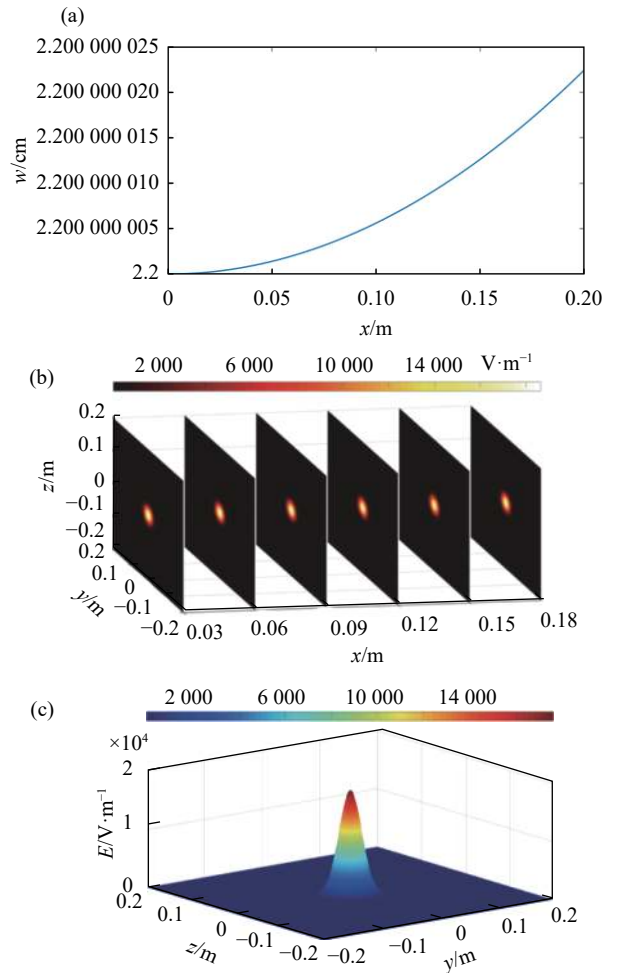


图 10  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.10 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$

马赫数的增加而减小,这是由于气体密度依赖于流场速度,马赫数不同对应的气体密度不同,从空气到高速流场,气体密度将会有个突变过程,马赫数越大,气体含量越稀薄,密度梯度变化越大,从而影响气体的折射率。气体中粒子含量越少,对激光的折射能力越弱。因此,在相同传输距离和传输功率下,高马赫数下的能量衰减量小于低马赫数下的能量衰减量。此外,激光截面电场值随着马赫数的增加而增加,其截面电场值在光束中心位置强度最大,自内至外逐渐减小。

### 3.3 半径变化

再次,讨论  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}$  的流场下发射激光

半径对激光传输特性的影响规律, 分别讨论半径为 1.5、2.2、3 cm 时的激光传输半径和电场分布特征, 如图 11~图 13 所示。

从图 11~图 13 可以看出, 流场对激光的发散作用较弱。发射激光半径分别取 1.5、2.2、3 cm 时, 在靶材气流附面层, 激光半径增加量分别为  $4.067 \times 10^{-7}$ 、 $9.09 \times 10^{-8}$ 、 $2.67 \times 10^{-8}$ , 几乎可以忽略。此外, 随着发射激光半径的增大, 流场对激光半径的发散作用减小, 激光的能量衰减较为明显, 衰减量为 30.4%, 这是因为激光在流场中的传输特性受激光的直径影响, 激光光束直径的大小影响激光折射效应, 激光直径越大, 能量损失越大。此外, 激光截面

电场值随着发射激光半径的增加而减小, 其截面分布特征始终遵循中间电场值最大、向周围逐渐递减趋势。

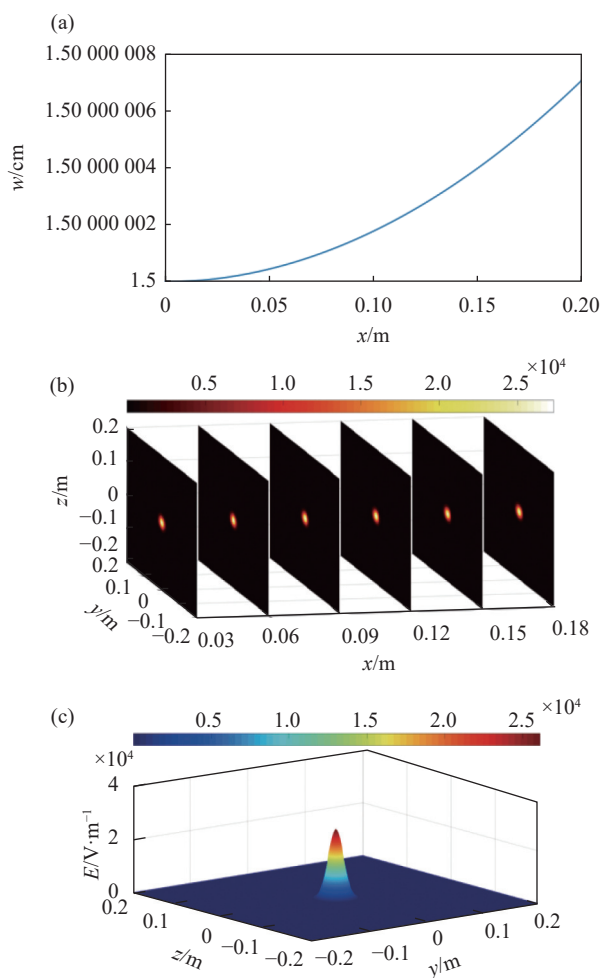


图 11  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}, r=1.5 \text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.11 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}, r=1.5 \text{ cm}$

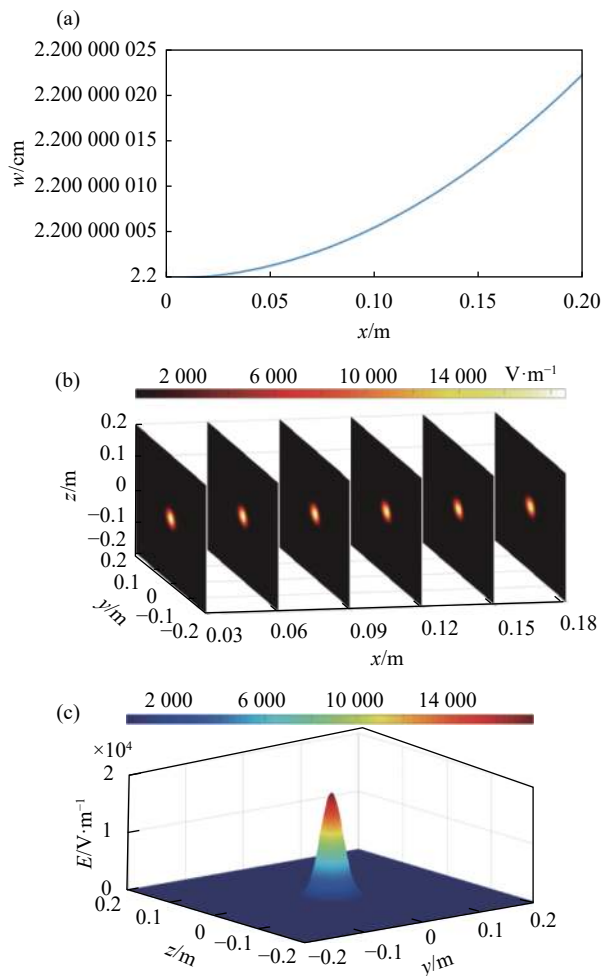
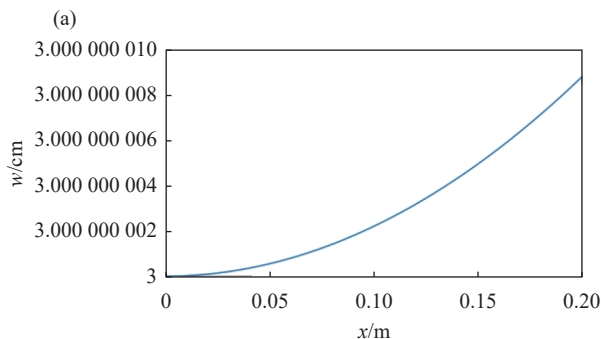


图 12  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.12 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=713 \text{ W}, r=2.2 \text{ cm}$





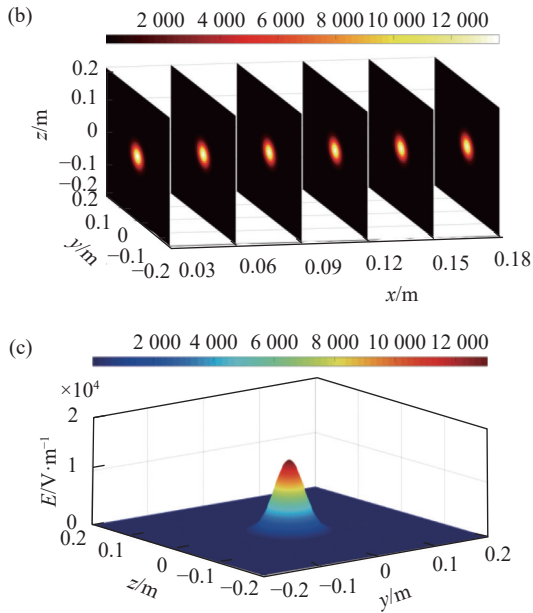


图 13  $Ma=3, P_0=713\text{ W}, r=3\text{ cm}$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.13 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $Ma=3, P_0=713\text{ W}, r=3.0\text{ cm}$

### 3.4 角度变化

最后, 讨论入射角度对激光传输特性的影响规律, 在  $Ma=3, r=2.2\text{ cm}$  的流场下, 考虑入射角分别为斜  $60^\circ, 90^\circ$  和  $120^\circ$  (与  $30^\circ$  一致) 时激光传输半径和电场分布特征, 入射角度示意图如图 14 所示。

图 15~图 17 为  $Ma=3, P_0=713\text{ W}$  的流场在不同入射角度下, 激光通过流场时的光斑半径随着传输路径和电场沿传输距离的分布特征, 以及激光表面分布特征。可以看出, 不同入射角度下, 流场对激光的发散作用较弱, 在靶材气流附面层, 激光半径的增加量分别为  $2.27 \times 10^{-8}, 1.02 \times 10^{-8}, 1.36 \times 10^{-8}$ , 几乎可以忽略, 入射角度为斜  $60^\circ$  时, 流场对激光半径的发散作用最大; 流场对与激光的能量衰减明显, 衰减量为 23.9%。此外, 其截面电场值在光束中心位置强度最大, 自内至外逐渐减小。

三种入射角度下不同位置处的传输功率如图 18 所示, 这里讨论小距离传输情况。由图可知, 当马赫数一定时, 对应的传输功率沿传输距离的增加近似线性减小; 在相同传输位置处, 入射角度为斜  $60^\circ$  时的传输功率小于  $90^\circ$  和  $120^\circ$  时的传输功率, 这是因为随着

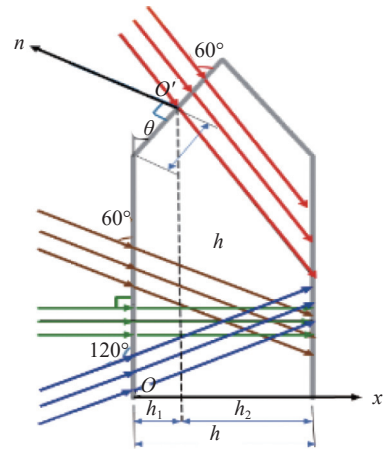


图 14 入射角度示意图

Fig.14 Schematic diagram of the angle of incidence

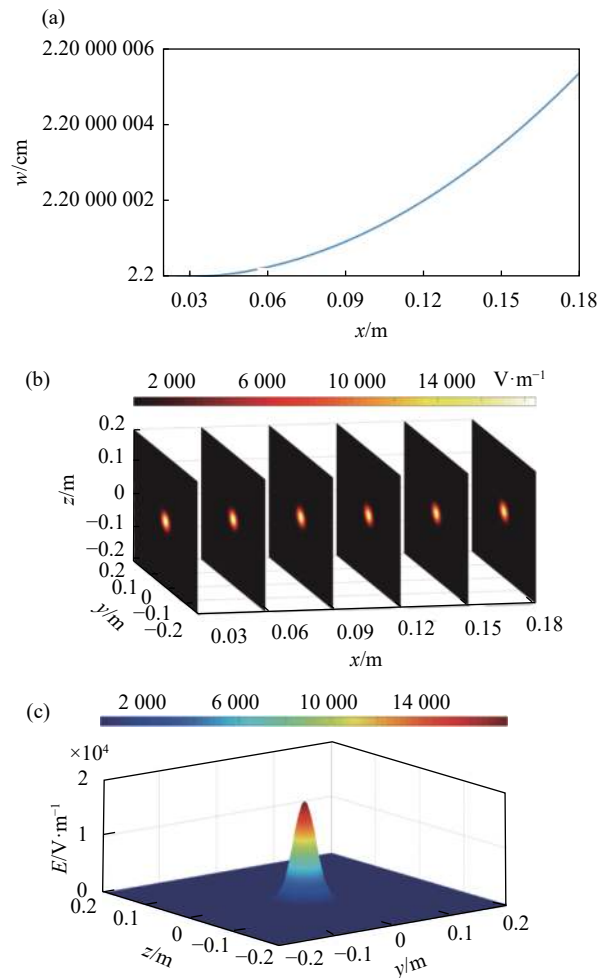


图 15 斜  $60^\circ, r=2.2\text{ cm}, P_0=713\text{ W}, Ma=3$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.15 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at  $60^\circ, Ma=3, P_0=713\text{ W}, r=2.2\text{ cm}$

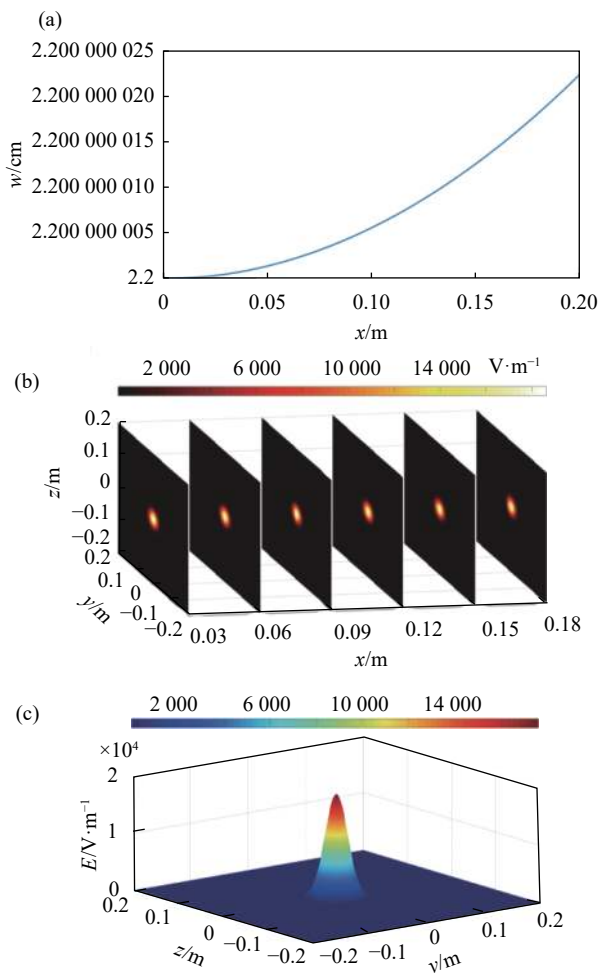


图 16 90°,  $r=2.2$  cm,  $P_0=713$  W,  $Ma=3$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.16 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at 90°,  $Ma=3$ ,  $P_0=713$  W,  $r=2.2$  cm

激光入射角度的增加,从空气到高速流场界面处的折射现象导致透镜的等效焦距变大,进一步导致激光在高速流场中形成的瑞利长度变大,从而增加了传输功率的损失量,导致入射角度越大,传输功率损失量越大。入射角度为 90° 时,传输功率损失最小,说明为减小传输功率损失,激光入射角度尽可能垂直射入。

传输距离 0.18 m 处激光传输功率与密度、压强、温度之间的关系如图 19 所示。分析结果表明,激光传输功率损失量与密度、压强成正比,与温度成反比。由于激光具有能量密度高的特性,在传输过程中会对流场产生一定的影响,导致其自身能量特性的改变。在相同的马赫数下,流场对激光的影响主要来自流场的折射率,而流场折射率则与流场密度紧密相

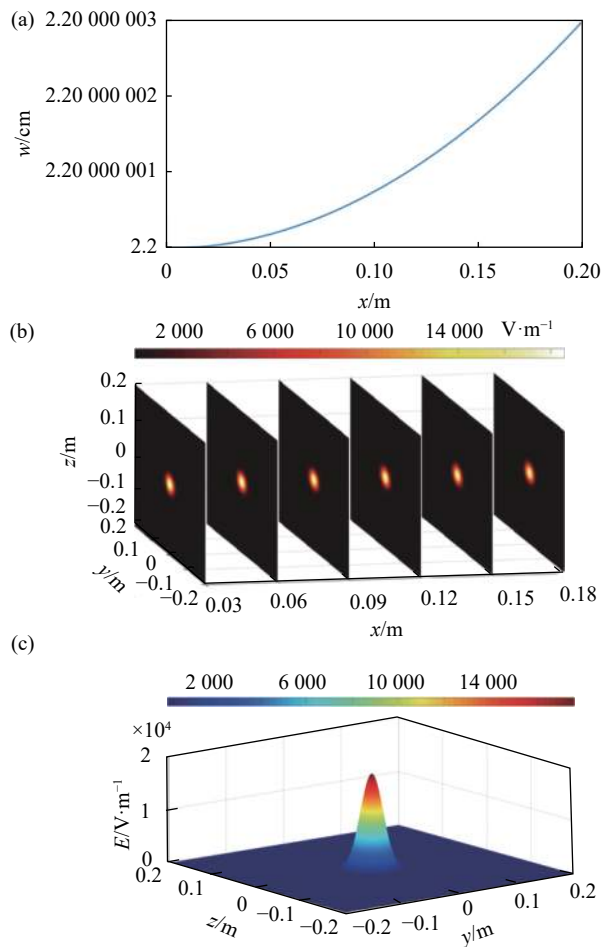


图 17 120°,  $r=2.2$  cm,  $P_0=713$  W,  $Ma=3$  时激光在流场中的 (a) 光斑半径变化、(b) 电场分布特征及 (c) 激光表面分布特征

Fig.17 Laser in the flow field exhibits (a) changes in spot radius, (b) the electric field distribution, and (c) the laser surface distribution at 120°,  $Ma=3$ ,  $P_0=713$  W,  $r=2.2$  cm

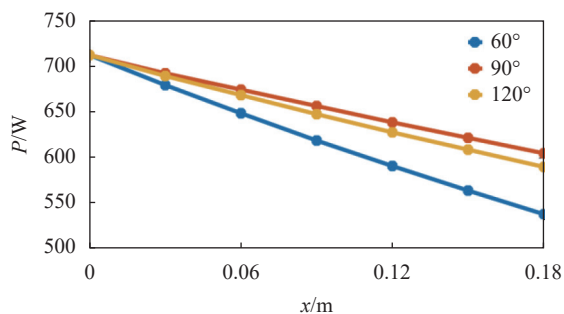


图 18 三种入射角度下不同位置处的传输功率

Fig.18 Transmission power at different positions at three angles of incidence

关,流场密度越小,激光穿过流场的衰减率越大;而流场压强越小,说明空气越稀薄,从而影响气体的折射率。气体中粒子含量越少,对激光的折射能力越弱,

传输功率衰减率越小;激光穿过流场时,流场会吸收一部分激光能量,当温度越高,流场吸收能量减少。因此,传输功率损失量与温度成反比。

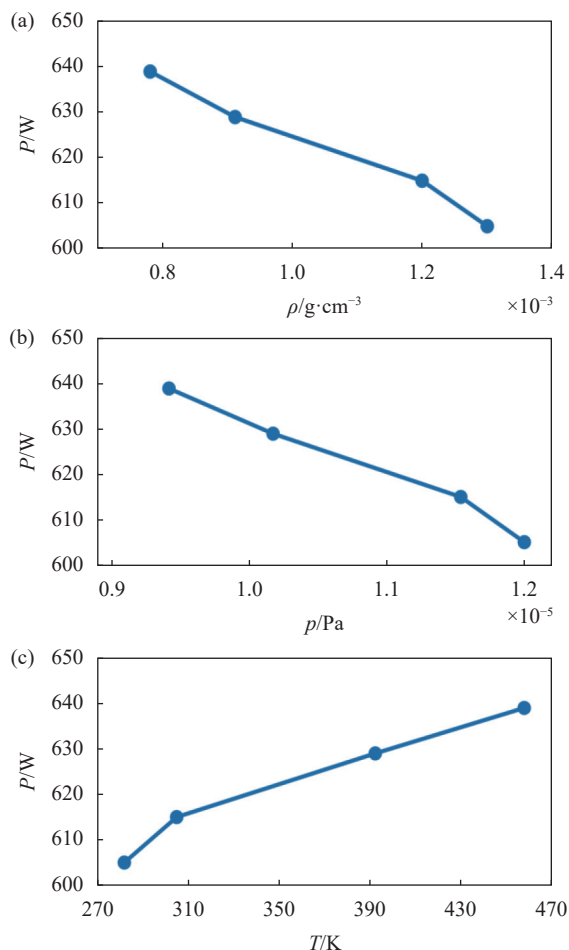


图 19 0.18 m 处的传输功率与 (a) 密度、(b) 压强及 (c) 温度之间的关系  
Fig.19 Relationship between the transmission power and (a) density, (b) pressure, and (c) temperature at 0.18 m

## 4 结 论

文中基于 Maxwell 方程组构建了描述激光在大气中传播行为的理论模型,并通过求解得到了具有高斯分布特征的激光分布解析解,基于流场控制方程计算了不同马赫数下流场分布特征,建立了高速流场环境强激光传输及衰减特性理论模型,基于此对高速流场中的能量衰减模型进行验证,研究了不同马赫数、发射功率、光斑半径及入射角对激光光斑半径随着传输路径的变化。研究表明,到靶功率随着马赫数的增加近似线性增加,且在相同马赫数下,只有当流

场作用时的到靶功率始终小于玻璃+流场作用到靶功率,在玻璃+流场作用下,到靶功率的模型值与试验数据基本吻合。激光在截面的分布特征始终遵循中间电场值最大、然后向周围逐渐递减的趋势,说明激光是典型的非线性光。马赫数不同时对应的气体密度不同,从空气到高速流场,气体密度将会有个突变过程,在相同的传输距离下,高马赫数下的功率大于低马赫数时的情况。当马赫数一定时,对应的功率随着传输距离的增加近似线性减小。研究结果揭示了不同流场作用下激光能量的衰减特性和规律,为激光的实际应用提供了理论指导。

## 参考文献:

- [1] He Guangsheng. Nonlinear Optics and Photonics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2019. (in Chinese)
- [2] 张明生. 激光光散射谱学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] Wang Yunzhe, Zhang Luwei, Shao Junfeng, et al. Damage effect of pulsed laser on Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> filter film on quartz substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220482. (in Chinese)
- [4] Guo Wei, Chang Hao, Du Bangdeng, et al. Estimation method of laser micro-scal eablation quality based on image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(S2): 20210297. (in Chinese)
- [5] Wang Beizhan. Research on transmission propagation of laer beams through a optical system[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- [6] Rybak J P, Churchill R J. Progress in reentry communications [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(5): 879-894.
- [7] Chen Xiaozhan. Wavefront difference and correction of gaussianbeams with different wavelengths in atmospheric turbulence[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] Li Lifang. The study of atmospheric aerosol particles scattering impact on laser propagation in the atmosphere[D]. Taiyuan: North University of China, 2013. (in Chinese)
- [9] Li Junshen, Zhao Guomin, Jiao Luguang, et al. Preliminary study on effects of laser irradiation on thin aluminum alloy sheet in tangential flow [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2962-2966. (in Chinese)
- [10] Zhang Xiaoteng, Li Zewen, Zhou Yiqing, et al. Perforation effect of CW laser irradiation on aluminum alloy under subsonic flow [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2):

20210883. (in Chinese)
- [11] Yang P, Liou K. Single-scattering properties of complex ice crystals in terrestrial atmosphere [J]. *Beitrage zur Physik der Atmosphere-Contributions to Atmospheric Physics*, 1998, 71(2): 223-248.
- [12] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. Waltham: Academic Press, 2002.
- [13] Macke A. Scattering of light by polyhedral ice crystals [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(15): 2780-2788.
- [14] Gan Caijun, Li Liang, Mao Tao, et al. Experimental research on aberration of small light beam at different convective Mach number [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(6): 730-734. (in Chinese)
- [15] Yin Xingliang. An engineering method to calculate transmitting effect of aero-optics for hypersonic interceptor [J]. *Engineering Science*, 2006(11): 74-79. (in Chinese)
- [16] Liu Yang. Study on nonparaxial propagation characteristic of laser beam[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)

## Laser transmission and attenuation characteristics in high-speed flow field

Jia Xiaodong<sup>1\*</sup>, Qian Fengxue<sup>1</sup>, Ta Wurui<sup>2</sup>, Zhao Hang<sup>2</sup>, Wang Xiaoqiang<sup>2</sup>, Zhang Juanjuan<sup>2\*</sup>

(1. High Speed Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

### Abstract:

**Objective** When a high-energy laser passes through the target airflow boundary layer, its optical path transmission path will change, and its energy density will also decay. It is the key to study the influence mechanism of the target gas boundary layer on the laser transmission performance for the application of laser as energy carrier in military field. The laser passing through the high-speed flow field to reach the target material is a nonlinear dynamic problem involving the coupling of electric fields, magnetic fields, temperature fields, and flow fields. In order to study the transmission and attenuation characteristics of laser, it is necessary to accurately describe and characterize the interaction between laser and flow field.

**Methods** Based on the classical electrodynamics theory, a theoretical model describing the laser propagation behavior in the atmosphere is constructed. At the same time, the flow field distribution characteristics of different Mach numbers are calculated based on the flow field governing equation. On this basis, considering the influence of flow field density, temperature, velocity and pressure, the nonlinear refractive index model is established, the influence of each factor on laser refractive index is studied. Finally, based on the laser transmission and attenuation characteristics, the influence of the gas boundary layer on the laser-to-target parameters is revealed.

**Results and Discussions** The radius of the laser spot gradually increases with the increase of transmission distance, which indicates that the flow field and glass have a divergent effect on the beam (Fig.2-4). Under the action of glass and flow field, the power to target is in good agreement with the experimental data. The electric field intensity decreases gradually with the increase of transmission distance, which indicates that the flow field and the glass have a weakening effect on the beam energy. The loss of laser transmission power is directly proportional to density and pressure, and inversely proportional to temperature (Fig.19). At the same Mach number, the influence of the flow field on the laser mainly comes from the refractive index of the flow field, which is closely related to the flow field density. The smaller the flow field density is, the greater the attenuation rate of the laser passing through the flow field is. The smaller the pressure in the flow field is, the thinner the air is, which affects the refractive index of the gas.

**Conclusions** The distribution characteristics of laser cross section always follow the middle electric field value to the maximum, and then gradually decrease to the surrounding, which shows that laser is a typical nonlinear light. Different Mach numbers correspond to different gas densities. From air to high-speed flow field, there will be a sudden change in gas density. Under the same transmission distance, the power at high Mach number is greater than that at low Mach number. When the Mach number is fixed, the corresponding power decreases approximately linearly with the increase of transmission distance.

**Key words:** target airflow boundary layer; electromagnetic transmission; nonlinear refraction; energy decay

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (12272157, 12372150); Fundamental Research Funds for the Central Universities (lzujbky-2022-19)