

# 热晕小尺度不稳定性的研究

吴毅 王英俭 龚知本 汪超 侯再红

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘 要** 报道了在实验条件下热晕小尺度不稳定性的研究结果. 从实验及数值模拟两方面给出了光束质量 Strehl 比, 扰动积分能量的增长, 各扰动谱项的能量竞争以及近场光斑半径随时间的变化. 研究结果基本反映了热晕小尺度不稳定性的物理规律. 实验测量与数值计算的结果具有较好的一致性.

**关键词** 热晕, 小尺度不稳定性.

## 1 引 言

目前对激光大气传输热晕问题的研究大致被分为两类. 一类即整束热晕效应, 对它的物理规律人们已有了透彻的认识. 另一类是被称之为热晕小尺度不稳定性<sup>[1]</sup>. 在研究强激光大气传输时, 必须考虑湍流效应与热晕的相互作用问题.

本文报道了在实验室内利用对发射光束的小尺度注入扰动进行的热晕小尺度不稳定性的实验研究以及与实验相对应的数值模拟研究. 与 Karr 等人的实验<sup>[2]</sup>不同, 本文直接采用了长程吸收气体作为激光传输介质, 给出了光束质量 Strehl 比\*、近场光斑半径, 扰动积分能量的增长以及各扰动谱项之间能量竞争随热晕作用时间的变化规律, 同时对热浮力和热扩展的影响作了专门讨论.

## 2 实验布局与参数

图 1 为室内热晕小尺度不稳定性实验研究示意图. 连续氩离子激光束经反射板 R 反射后通过斩光器 D(通光时间 1.6 sec)进入模拟吸收管道, 出射光由光强探测系统记录. 其中反射板 R 为双面镀膜板, 一面镀全反射膜、一面镀增透膜(增透率约 95%). 当增透膜面向前时, 由于反射板与入射光束间存在一小角度, 经其两个面反射的两束光形成干涉条纹, 从而获得对入射激光束的小尺度注入扰动. 当该反射板全反射膜面向前时即获得整束无扰动入射光. 吸收气体是 NO<sub>2</sub>、充 400~530 Pa 进入吸收管道后加空气至  $1.013 \times 10^5$  Pa(即一个大气压). 吸收系数由管道出口处功率计探测. 光束的近场光斑半径和光强谱由 CCD 视频图像信号采

\* Strehl 比定义为传输光束远场轴上光强与光束在真空中传输远场轴上光强的比

收稿日期: 1993 年 6 月 7 日; 收到修改稿日期: 1993 年 8 月 6 日

样的数据处理结果获得. Strehl 比则是用透镜焦平面上加小孔光阑的光电倍增信号采样获得. 小孔的作用即是获取光束的低空间频率能量, 而 Strehl 比亦正是定义在光束的远场轴上光强, 它实际上是反映光束能量远场集中度的物理量. 下面给出实验参数: 波长  $\lambda = 0.514 \mu\text{m}$ , 功率  $P = 0.45 \text{ W}$ , 入射光  $1/e$  功率点光斑半径  $a_0 = 2.5 \text{ mm}$ , 光束发散角  $\theta_0 = 0.3 \sim 0.4 \text{ mrad}$ , 扰动强度相对幅度  $I'/I_0 = 10\% \sim 20\%$ , 扰动条纹的空间周期  $p_t \approx 0.8 \text{ fringes/mm} = K/2\pi$ , 扰动菲涅耳数  $N_s = \pi^2 k/2K^2 z = 0.6$  ( $k$  为波数,  $z$  为吸收长度  $4 \text{ m}$ ), 光束菲涅耳数  $N_F = ka^2/z = 19.1$ , 吸收系数  $\alpha = 0.75 \sim 1.15/\text{m}$ , 热晕速度  $N_\lambda = |dn/dT|(I_0/\rho C_p)(k/2\pi)(1 - e^{-\alpha z}) = 33.6 \sim 35 \text{ waves/sec}$ , 热扩散速率  $DK^2 = 504.8/\text{sec}$  空间匀加速热浮力对流速度  $v = (\bar{T}'/T_0)gt = (I_0/\rho C_p)t^2 e^{-\alpha z}$ , 它是与时间有关的参数.

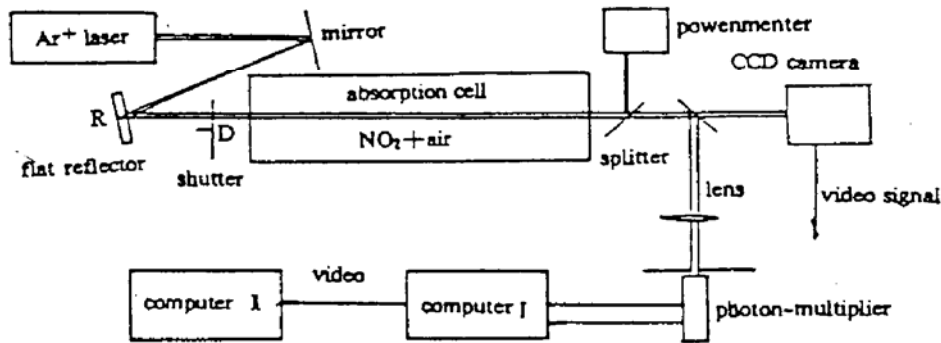


Fig. 1 Experiment setup

### 3 数值模拟计算方法

在旁轴与等压近似条件下, 光波传播以及光与介质相互作用可以用下述方程描述:<sup>[1]</sup>

$$2ki \frac{\partial \psi}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 \psi + 2k^2 \delta n \psi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + v \nabla_{\perp} T' - D \nabla_{\perp}^2 T' = \frac{\alpha I}{\rho C_p} \quad (2)$$

$$\delta \phi = k \int \delta n dz = k \frac{dn}{dT} T' dz \quad (3)$$

它们实际上是麦克斯韦方程组与能量方程的演变形式. 本文采用多段步进相屏法和快速傅里叶变换算法对(1)~(3)式进行联立数值求解, 获得光场  $\psi$  的时变空间分布, 计算中所有参数与(上节所列的)实验参数一致, 只是在初始高斯光束的位相上引入发散因子  $(-i k r^2/2f)$ , 它与入射光束发散角  $\theta_0$  相当,  $f$  取负聚焦长度, 在有注入条纹扰动时, 给初始光束的振幅上加入  $[1 + p \cos(4\pi y)]$  的调制, 其中  $p$  值取  $5\% \sim 10\%$  相当于实验光强调制度 ( $I'/I_0$ ),  $y$  为以高斯光束  $1/e$  功率点半径归一化的计算坐标, 即在计算中  $1/e$  功率点直径上有 4 个条纹的调制.

### 4 实验及数值计算的数据处理

在实验与数值模拟计算中对热晕光束质量就三个方面进行评价: 1) 近场光斑半径; 2) 光束远场 Strehl 比; 3) 光强扰动能量积分谱和各扰动单谱项随时间的谱化. 实验值为平均结果. 近场光斑半径  $r = \left[ \iint |\mathbf{r} - \mathbf{r}_c|^2 I(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r} \iint I(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r} \right]^{1/2}$  获得, 其中  $\mathbf{r}_c = \frac{\iint \mathbf{r} I(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}}{\iint I(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r}}$  为光斑中心,  $I(\mathbf{r})$  为光强图像数据. 图 2(a) 是原始光斑的两维傅里叶变换在平行于条纹方向

上若干线的求和对数谱图. 可以看出, 注入条纹扰动的光斑谱在高频区域存在一个明显大于整束光斑谱的区域, 称之为扰动能量特征区, 也是本文考察扰动能量随时间变化的谱积分区. 而在低频区域这两种光斑的谱特征比较一致, 反映出原始光斑强度所具有的高斯廓型, 该低频段即是考虑 Strehl 比的谱积分区. (实验中采用透镜加小孔栏, 即傅里叶变换低频滤波, 获取 Strehl 比). 图 2(b) 是正常座标下对应于图 2(a) 中所示的扰动能量特征区注入扰动光斑的谱图. 图中离散点“+”是用前节介绍的数值模拟注入扰动时光斑谱在上述特征区域的价值. 它的单峰性是单一频率余弦调制与高斯廓线傅里叶变换卷积的结果. 而实验谱出现的多峰是由于对光斑的实际调制并非严格的单频余弦函数, 因此主峰附近出现一些较小峰值. 但可以看出, 实际注入扰动的主峰值与模拟扰动主峰值很接近, 其频率值为  $P_1 \approx 0.8 / \text{mm}$ , 因而可以认为模拟扰动光强基本反映了实际光强空间分布.

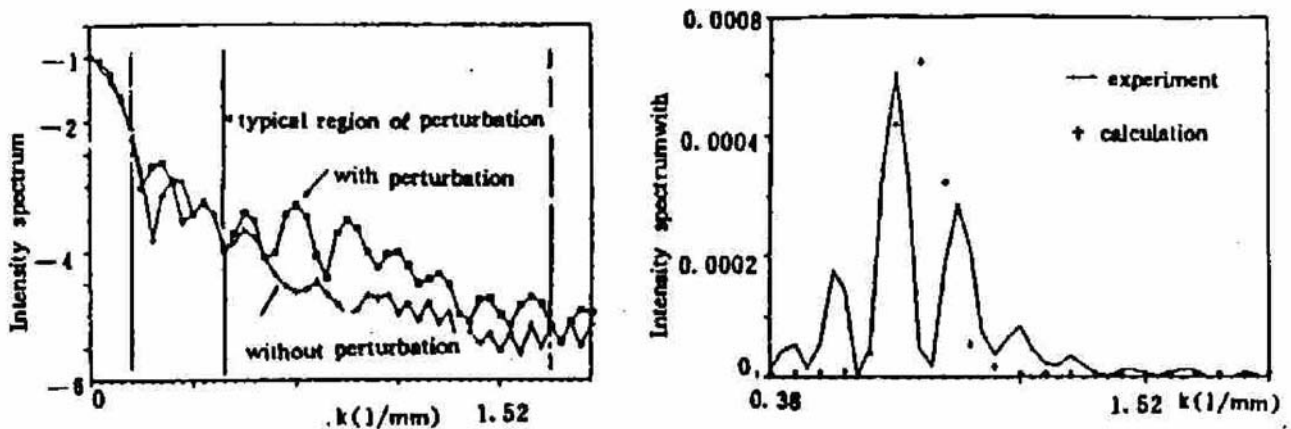


Fig. 2 Initial logarithm-spectrum of the modules square of the laser intensity in Fourier domain  
(a; strehl integration region)

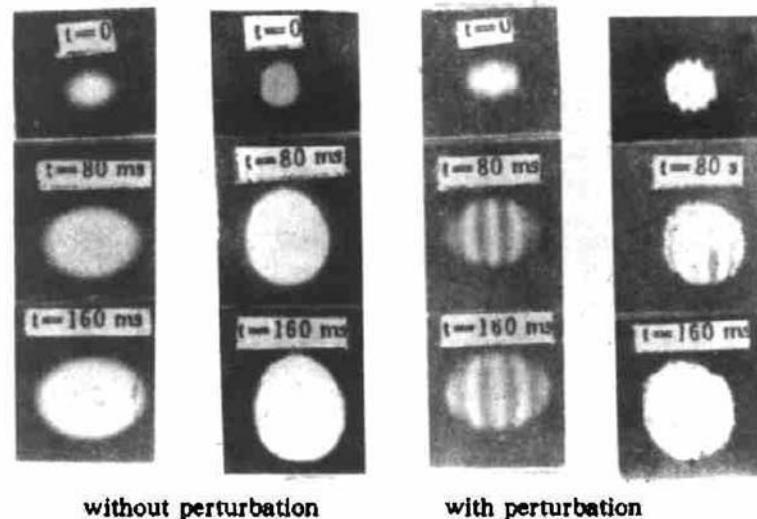


Fig. 3 Photograph of thermal blooming variation with time

## 5 研究结果与讨论

图 3 是热晕光斑的实验与数值模拟在不同时刻的照片. 从中可以定性地看到热晕的形成使光斑变大了, 且当光束中存在小尺度条纹扰动时, 扰动条纹的对比度随时间变得更加明显, 这就是说扰动能量被放大了.

图 4 给出了热晕光束的近场相对光斑半径(即以原始光斑半径归一)的实验值与数值计算

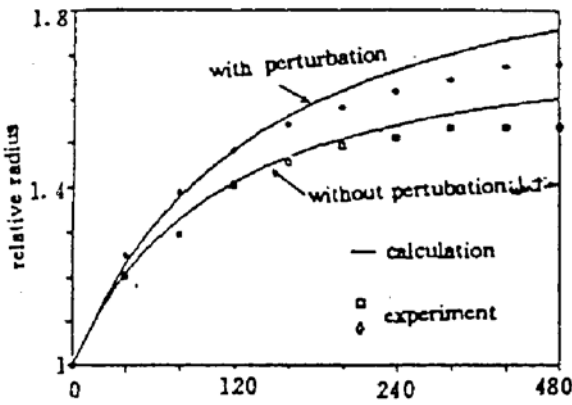


Fig. 4 Variation of relative beam radius with time

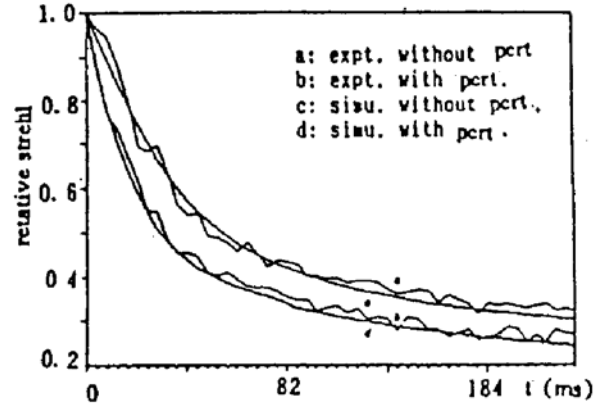


Fig. 5 Variation of Strehl ratio with time

结果随时间的变化. 计算结果与实验值具有较好的一致性. 从图中可以看到, 由于小尺度扰动的影响使得热晕光束的近场场光斑半径比其原始值大 1.7 倍(稳态值), 而整束无扰动光束的热晕近场光斑则是原始光斑半径的 1.5 倍. 这是热晕小尺度不稳定性对光束质量破坏的一种反映. Strehl 比的下降亦是以扰动热晕光束的值为低, 到稳态时其值为 0.48(实验), 而整束情况下在同样时间的 Strehl 比为 0.55(实验). 在热晕的早期( $t < 60$  ms), 光束 Strehl 比的下降趋势亦是以在小尺度扰动存在时更为迅速, 如图 5 所示\*

图 6 是扰动特征能量傅里叶频域谱项的积分值随时间的变化. 小尺度条纹扰动的存在使得扰动特征谱域的能量在热晕的早期被迅速放大. 该放大倍数为 3 倍. 在热晕后期可以明显地看到由于热扩散的作用使得扰动能量不再被放大而趋于稳定. 数值计算亦给出了类似的结果. 本研究中将这种阻尼因素归源于热扩散是由于  $DK^2$  ( $\approx 504.8/\text{sec}$ ) 比  $\nu k$  ( $\approx 35.5/\text{sec}$ ) 大一个多量级, 它们分别是方程(2)中  $D\nabla_{\perp}^2 T'$  和  $\nu\nabla_{\perp}^2 T'$  的傅里叶变换系数. 因此不稳定性扰动能量增长所受到的

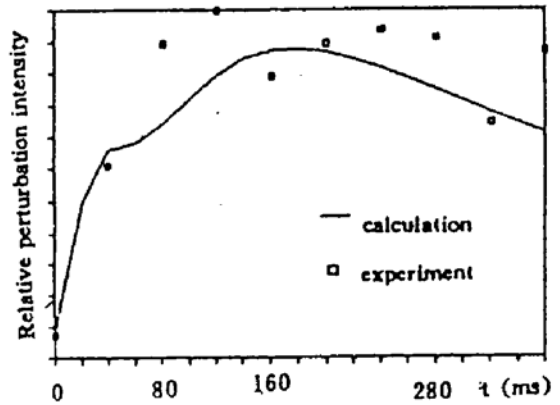


Fig. 6 Variation of the integration of perturbative energy with time

制约主要来源于热扩散. 但必须指出在实际激光大气传输中, 热扩散因素并非如此明显地起着阻尼小尺度不稳定性的作用, 因为实际大气湍流的特征扰动空间频率 ( $2\pi/L_0 < K < 5.92/l_0$ ,  $L_0$  和  $l_0$  分别为湍流的外尺度和内尺度) 总是比本文模拟实验中的扰动频率小一到两个量级. 只是那些接近湍流内尺度湍涡的受激热散射时有可能受到热扩散的阻尼.

图 7 给出了光强扰动谱图中单一频谱项随时间的变化. 其中图 7(a)、图 7(b)为谱项  $P_1 = 0.672/\text{mm}$  和  $P_2 = 0.867/\text{mm}$  的表现形式. 它们随时间的变化有呈迅速上升后下降型; 有呈振荡型. 数值计算曲线亦有如此规律. 这反映出一个物理现象: 在扰动能量具有一定的谱域范围时, 各高频扰动谱项不但从低频谱项中获取能量而得以增长, 而且它们之间在传输及时间过程中也存在着能量竞争. 某一高频谱既可从其它高频谱项中获取能量, 也可将能量转移给其它高频谱项. 作者认为这种竞争现象也是小尺度不稳定性的物理规律.

\* 图中所示 Strehl 比均为相对 Strehl 比, 即以初始时刻光束的 Strehl 比为 1 而归一化.

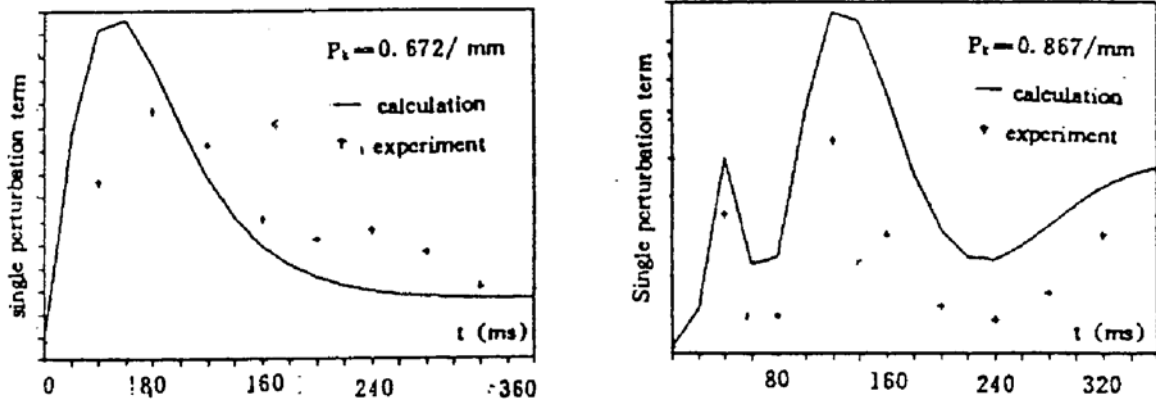


Fig. 7 Variation of the single term of perturbation spectrum with time

**小 结** 本文较详细地给出了热晕小尺度不稳定性对光束质量 Strehl 比光斑半径的影响, 并且将它们同整束热晕的结果进行了比较, 同时还讨论了多扰动谱项的竞争问题. 这些都有别于 Karr 等人的实验研究<sup>[2]</sup>. 研究表明, 热晕速率  $N_h$  和实验中的热扩散速率  $DK^2$  与小尺度不稳定性的表现形式关系十分密切. 实验对数值模型的初步检验, 使我们基本了解了热晕小尺度不稳定性的物理规律. 而在研究实际大气湍流和大气风速切变对热晕小尺度不稳定性的影响必须具备数值模拟的手段. 这也是本实验研究工作的意义所在.

### 参 考 文 献

- [1] Frederick G. Grebhart, Twenty-Five years of thermal blooming; an overview. *Proc. SPIE*, 1990, 1221: 33~54
- [2] T. J. Karr, M. C. Rushford, J. R. Murray *et al.*, Measurement of the stimulated thermal rayleigh scattering instability. *Proc. SPIE*, 1990, 1221: 328~340

## Study on the Small Scale Thermal Blooming Instability

Wu Yi    Wang Yingjian    Gong Ziben    Wang Cao    Hou Zaihong

(Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031)

(Received 7 June 1993; revised 6 August 1993)

**Abstract** Research of experiment and numerical competition for the small scale thermal blooming instability is reported. The beam quality strehl ratio, the increase of perturbative energy, the competition among perturbative terms and the temporal variation of beam radius in near-field are described.

**Key words** thermal blooming, small scale instability.