

文章编号 1004-924X(2014)08-2032-07

## 镜面热变形及吹气流场对光束的联合影响

柳建<sup>1\*</sup>, 李树民<sup>2</sup>, 赵杰<sup>1</sup>, 王世庆<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学工程技术学院, 四川乐山 614007; 2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川绵阳 621000)

**摘要:**采用热弹性力学模型、可压缩流体力学模型和标量波动方程,通过数值模拟定量研究了激光系统中高功率密度光束在弹性支撑反射镜上的热沉积造成的镜面热变形以及镜面变形对光束的影响;同时分析了抑制热晕的对称多孔吹气方式在不同吹气速度下通道流场对光束的影响。然后,通过空间顺序耦合得到了两者对光束的联合影响。实验结果显示:在中心固定的弹性支撑条件下,反射镜的镜面变形有效作用面比较平滑,主要表现为镜面总体倾斜导致光束在远场产生的轻微角度偏转基本可忽略或可预调校正,吹气流场在较低吹速下对光束的影响也基本可以忽略;但在较高流速下,流场由于密度非均匀分布加剧,对光束的影响十分严重;二者耦合后对光束的联合影响基本与单独影响一致。

**关键词:**激光系统;光传输;镜面热变形;热弹性力学模型;N-S方程;标量波动方程

**中图分类号:**TH703;TN241 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142208.2032

## Combined influence of mirror thermal deformation and blowing on beam propagation

LIU Jian<sup>1\*</sup>, LI Shu-min<sup>2</sup>, ZHAO Jie<sup>1</sup>, WANG Shi-qing<sup>1</sup>

(1. Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China;

2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

\* Corresponding author, E-mail: emailofliujian@126.com

**Abstract:** On the basis of thermal elastic mechanic equations, N-S equations and scalar wave equation, the thermal deformation of a reflector in a laser system caused by absorbing beam's energy and its effect on beam propagation were researched. Meanwhile, how much the blowing flow field would affect the beam at different blowing speeds was studied too. Then, the two effects were compared and their combined influence with sequential coupling on the beam was studied. Results show when the thin column reflector is free in constraint and is fixed at center point of back side, its deformation is rather small even radiated with a quite high power density laser beam. The effect of the deformation on beam propagation just displays as making beam tilted slightly in the outgoing direction and it is eliminated by pre-checking the optical system or is neglected directly. The results also show that blowing flow field will affect the beam quiet little when its speed is lower than 30 m/s. However, the effect will grow rapidly when the speed increases to rather high. Finally, it gives the conclusion that the combined influence on the beam is not evident when the blowing speed is not high and it could be omitted simply in most cases.

收稿日期:2013-09-26;修订日期:2013-11-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11375055)

**Key words:** laser system; laser propagation; reflector surface deformation; thermal elastic mechanics model; N-S equation; scalar wave equation

## 1 引 言

在某些激光应用系统中,高能量密度光束会在相对封闭的通道中传输<sup>[1-2]</sup>。一般而言,这些系统中总有实现各种功能的光学反射镜,它们一般都具有极高的反射率,因此反射膜和镜体总会吸收部分光束能量,严重时将导致镜面变形,从而在光束波前上产生附加相位差<sup>[3-4]</sup>;与此同时,如果通道中存在气体介质,且介质密度分布不均匀,也将在光束波前上形成相位差<sup>[5-6]</sup>。这两种相位差通常导致光束在远场能量发射、位置偏移。一般通过提高镜面反射率、加强镜体冷却、封闭通道充入非吸收气体、在通道口吹入非吸收气体等手段来减小这些不利影响。

本文对特定应用系统传输通道中的反射镜面和气体介质对光束能量的影响进行了研究,并分别给出了镜面变形、不同速度吹气的通道流场对光束的影响,最终得到了镜面变形与吹气流场对光束联合作用的结果。

## 2 物理模型

考虑固体形变和气体密度分布的联合作用,分别对两者建立相应的物理模型。本文采用热弹性力学模型求解前者,采用可压缩流模型求解后者,并通过相屏法将影响传递进光传输的标量波动方程。

### 2.1 热弹性力学模型

反射镜面吸收光束的能量,通过热传导在整个镜体中形成非均匀的温度场,从而引起对应的应力场,使镜体及镜面产生应变变形<sup>[7-8]</sup>。该变形可以采用热弹性力学模型方程组求解。由于反射镜针对应用波长的反射率非常高,对光能的吸收率一般为万分之几,且如果镜面或镜体变形过大将出现反射膜脱层、破碎或镜体断裂等不在考虑之列的物理破坏情况;因此假设热变形比较小,对反射镜在空间坐标系中的整体位置分布没有明显影响。为简便起见,假设反射镜的热传导系数、热应变张量的各向同性,于是在小变形前提下,反射

镜的热弹性力学方程组在直角坐标系下可写为<sup>[7-8]</sup>:

$$\begin{cases} k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i \partial x_i} = C_\epsilon \frac{\partial \theta}{\partial t} + T_0 \beta \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial u^i}{\partial t^2} \\ \sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} - \beta \theta \delta_{ij} \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $\theta$ 是温度变化场, $T_0$ 是参考温度, $\sigma$ 是应力张量, $\epsilon$ 是应变张量, $u$ 是位移向量, $x$ 是坐标向量, $\mu$ 和 $\lambda$ 是拉梅系数, $k$ 是热传导系数, $C_\epsilon$ 是热容, $x \in \Omega$ , $t \in [0, \infty)$ , $\Omega$ 为空间区域。

为满足反射镜不发生物理损坏的前提,假定反射镜采用弹性支撑,支撑点为背面中心点,边界无约束。这就确定了求解式(1)时的边界条件。给定初始温度为 20 °C,采用有限元法求解式(1)就可以获得镜面变形量<sup>[8]</sup>。

### 2.2 可压缩流模型

为了较好地置换通道中的空气,以避免气体热晕,这里假定采用对称多孔吹气方式吹入对光束能无吸收的气体。由于吹气速度可能比较大,采用不可压缩流假设是不合理的,故在计算中采用了完全可压缩流模型。

可压缩流的流场演变采用完全 N-S 方程组处理,它在直角坐标下的无量纲守恒形式为<sup>[6,9]</sup>:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial E_V}{\partial x} + \frac{\partial F_V}{\partial y} + \frac{\partial G_V}{\partial z} + S, \quad (2)$$

其中: $u$ 为守恒向量, $E, F, G$ 分别表示直角坐标系中  $x, y, z$  方向的流通向量, $E_V, F_V, G_V$ 为黏性项, $S = S_0 = \rho g$ 为源项, $g$ 为重力加速度。对方程(2)的求解有多种方法,本文采用基于 LU 分解的隐式迭代方法,通道入口为 1 个大气压力的自由边界、通道内壁为无滑动黏性边界、通道出口的初始条件为在 5 倍通道总长度处的 1 个大气压力自由边界。

### 2.3 光传输方程及附加相位差的引入

当反射镜面发生形变时,对光束而言,相当于在原波前上叠加了一个不规则的相位面;而光束经过非均匀气体介质光路,同样也相当于被附加了一个不规则的相位面,从而对光束产生聚散焦、

偏移、旋转和局部性能变差等影响<sup>[5-6,9]</sup>。这样就

将镜面变形和流场影响量引入到光传输中。因为这个通道长度较小,镜面吸收率也很小,所以假设光束在通道内的能量分布是不变的,于是在给定光束功率密度、镜面对光能的吸收率后,通过求解式(1)来得出镜面的变形量和位移量。再通过与原镜面对应位置相减就得到镜面各点上随时间变化的光程差,将这个光程差简单转化就可获得附加相位。

同样,在给定吹气速度、密度、边界条件后,通过式(2)可求出气体密度的空间分布。当这个分布达到稳态,就可以通过气体密度与折射率的关系得到光路上介质折射率的分布,进而获得附加相位<sup>[9]</sup>。

在得到附加相位后,通过求解光束传输方程来定量获得二者对光束的影响。在缓变幅值前提下,可采用标量波动方程描述光传输<sup>[10-11]</sup>:

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 A + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) A, \quad (3)$$

其中: $k$ 是对应波长的真空波数, $A$ 是光束的复数幅值, $z$ 是传输距离; $n_0$ 和 $n$ 分别是真空和非真空中的折射率,可以采用快速傅里叶变换方法进行求解。

由于镜面变形比较小,同时光路上气体介质在每个传输步上累积的相位差也比较小,因而可以采用相屏近似方法将它们的影响引入到光束传输中<sup>[5,9]</sup>。对镜面变形,假设光束到达镜面后,在离开镜面前被叠加上了一个不规则的相位面,此时有:

$$A = A_{vac} \exp(ik\Delta z), \quad (4)$$

其中: $A_{vac}$ 为光束到达镜面时的复振幅,而 $\exp(ik\Delta z)$ 就是由镜面变形引入的相屏。使叠加相屏后的光束在自由空间传输,直到到达接收面,就可以算出镜面变形对光束传输特性的影响。气体介质的相屏引入方法类似。

### 3 数值模拟的条件和结果

采用上述的物理模型对图 1 所示的传输通道进行了研究。通过有限元方法求解热弹性力学方程组,基于 LU 分解的隐式迭代求解 N-S 方程,用快速傅里叶变换法(Fast Fourier Transformation, FFT)求解光传输方程。

计算时选取反射镜半径为 20 cm,厚度为 5 cm,对应波长的反射率为 99.95%,初始温度为 20 °C。假设功率为  $2.0 \times 10^5$  W,内外边长分别为 10,20 cm 的方形中、空超高斯光束以 45°角入射到反射镜面,最大照射时间为 30 s。吹气速度采用了 5,10 直到 100 m/s,气流密度归一化为 1.0,即与外部空气密度相等,吹气方式为对称多孔方式。

图 1 为所考察的光束传输通道的中轴截面示意图。图中仅画出了一个吹气孔,实际上有多个对称吹气孔,孔的截面积为  $1 \text{ cm}^2$ ,气流方向与轴向夹角为 75°;光束从吹气口处平行于 X 方向入射、以通道中轴线为对称线,通道的 4 个拐折处各有一个反射镜。

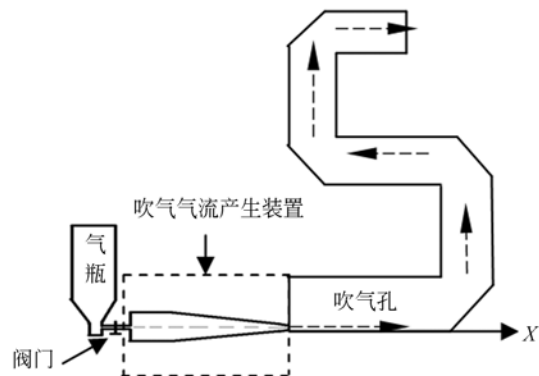


图 1 传输通道的几何模型示意图

Fig. 1 Sketch of geometry model of transmissive path

#### 3.1 镜面变形及其对光束的影响

由于反射镜对光束能量的吸收较小,反射镜的温度变化相对较小,且采用了单点固定的弹性支撑约束,因而在求解热弹性力学方程时,可以采用准静态过程以得到反射镜的热变形量。将变形量代入式(4)和式(3)中求解,就能得到热变形对光束的影响。表 1 给出了反射镜表面温度的历史数据。

表 1 反射镜的温度变化历史数据

Tab. 1 Historical variation of temperatures of reflect mirror (°C)

t/s	MT	TC	MSR
5	20.39	20.01	20.06
10	21.04	20.08	20.17
15	21.81	20.24	20.31
20	22.66	20.49	20.50
25	23.58	20.84	20.71
30	24.56	21.29	20.97

由表 1 可知,反射镜表面的最大温度(MT)的变化大约为  $4.6^{\circ}$ ,而由于光束是中空的,反射镜表面中心的温度(TC)变化仅有  $1.3^{\circ}$ 左右。图 2 给出了中心温度和镜面温度分布均方根(MSR)随时间的变化情况。从图 2 中可以看出,尽管最大温度值的变化显著,但镜面温度均方根的变化却是较小的。

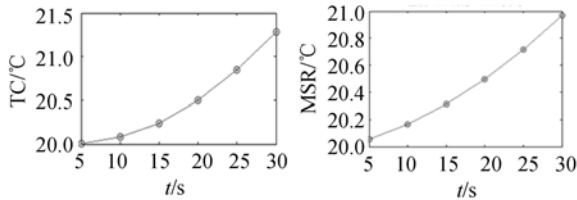


图 2 镜面温度随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation of surface temperature with time

根据前述的分析和计算可知,由于反射镜的温度分布不均匀,反射面会出现变形。表 2 列出了变形量随时间的变化。其中包括反射面中心点的位移 DC,反射面变形的最大点位移 Max,反射面在  $x=0$  剖线的平均位移值  $D_{x_0}$ ,以及该剖线上位移平均值与均方根值之差  $D_{w_0}$ 。

表 2 反射面上代表点位置变化在不同时刻的值

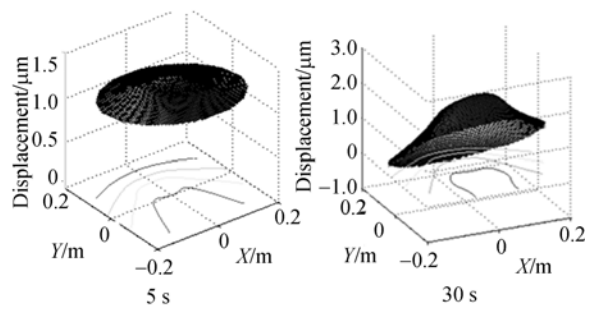
Tab. 2 Displacement and deformation time history

$t/s$	DC	Max	$D_{x_0}$	$D_{w_0}$
10	1.30	1.44	0.28	0.15
20	1.55	1.89	0.72	0.40
30	1.83	2.37	1.19	0.67

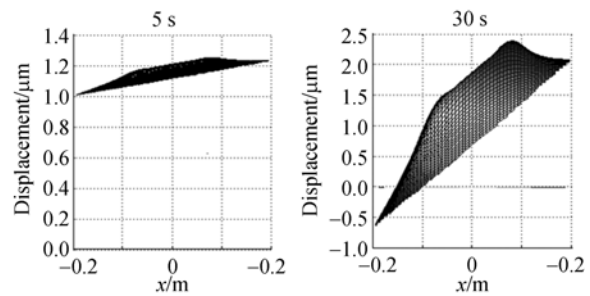
由表 2 可知,随光束辐照时间的累积,反射镜面上点的位移在 30 s 内最大超过了  $2 \mu\text{m}$ ,这对于波长几十到几微米的光束而言,影响是比较剧烈的。但是反射面的整体变形要小得多,即使在 30 s 时,  $D_{w_0}$  也不超过  $0.7 \mu\text{m}$ 。

图 3(a)显示了在 5,30 s 时反射镜面变形的立体形状,图 3(b)为该变形在  $xz$  平面上的投影。可以看到,反射面上各点的位移与变形量之间并不是完全等同关系,位移量要比变形量大得多。事实上在空心光束作用区域,变形量的方差是比较小的,即作用于光束的变形区域本身是比较平滑的,尽管该区域与反射面边缘区域的差异明显。

在获得镜面变形量后,将它转换为工作波长



(a) Three dimensional images

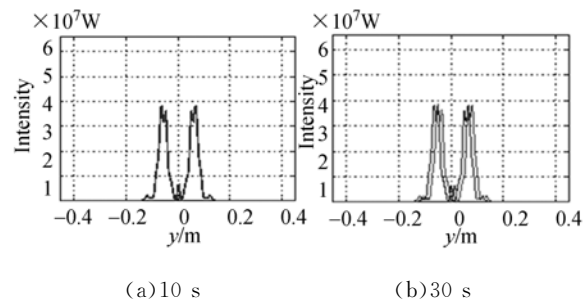


(b) Projections on  $xz$ -plane

图 3 反射面在 5,30 s 时的位移和变形情况

Fig. 3 Displacement and deformation of reflect surface at 5 s & 30 s respectively

的光程差,然后代入式(4)中得到光束离开反射镜时的波前相位;再经过自由空间传输到接收面,与镜面无热变形时接收到的光斑分布进行对比,就得到了镜面热变形对光束的影响。为便于观察,放大这个影响的图像,此处假设出射光的传输距离为 2 km。



(a) 10 s

(b) 30 s

图 4 在 10,30 s 时 2 km 接收面  $x=0$  线上的光强分布

Fig. 4 Beam intensity on 2 km plane with line  $x=0$  at 10 s and 30 s respectively

图 4 为接收面上  $x=0$  剖线上 10,30 s 时的光强分布,其中理想接收光斑以  $y=0$  呈对称分布。可以看出,反射镜热变形对光强分布形状基本上没有影响。虽然采用弹性支撑条件降低了反射面变形量,但是却增大了反射镜面的角位移。

这个位移使得光束在接收面上整体偏转了一个微小角度,在 30 s 时该偏转角仅为  $\arctan(0.9 \text{ cm}/2 \text{ km})$  弧度,基本可以忽略。

### 3.2 不同吹气速度下流场密度及其对光束的影响

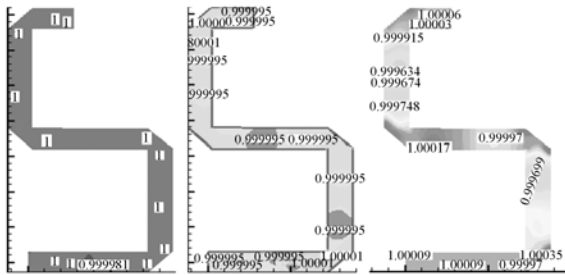
为了抑制吸收气体成分造成的热晕,采用吹气的方式可以获得较好的效果。但是吹气也会导致流场密度不均匀,尤其是在吹气速度较大时。本文就不同吹气速度下流场密度分布对光束的影响进行了比较。吹气方式如前所述,速度选择为 5,10,20,30,100 m/s。当然 100 m/s 的速度是比较大的,在没有引流的情形下是不容易达到的。

表 3 给出了各种吹速下管道内流场归一化密度的最大值、最小值及其变化量的均方根值。图 5 为各吹速下的流场密度云图。

表 3 各种吹速下流场内密度参数值

Tab. 3 Density of gas at different flow speeds

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho_{\max}$	$\rho_{\min}$	rms
5.0	1.000 1	0.999 9	0.001 8
10.0	1.000 3	0.999 6	0.002 5
20.0	1.001 0	0.998 6	0.010 0
30.0	1.001 1	0.997 0	0.029 1
100.0	1.031 8	0.983 0	0.047 3



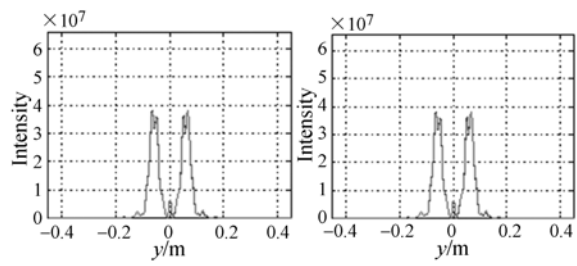
(a) 5 m/s (b) 10 m/s (c) 30 m/s

图 5 不同吹气速度时的流场密度云图

Fig. 5 Density clouds at different flow speeds

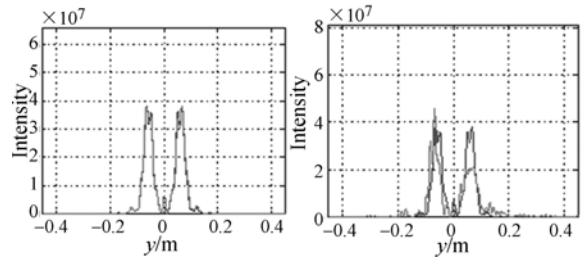
从表 3 和图 5 可见,吹速越大,通道内流场密度差异越大,且流场压力梯度越大,但是整个通道内的流线分布结构大体一致。也就是说,在一定流速范围内流线分布(速度矢量分布)基本上只与通道结构有关。这个密度分布差异较大,为了研究它及较低范围内吹速对光束的影响,采用理论模型进行计算获得了如图 6 所示的远场光能分布。

图 6 中对称的底部图形是不考虑流场影响



(a)  $v=5 \text{ m/s}$

(b)  $v=20 \text{ m/s}$



(c)  $v=30 \text{ m/s}$

(d)  $v=100 \text{ m/s}$

图 6 不同吹速下流场对光束远场能量分布的影响

Fig. 6 Influence of flow field on beam intensity with different blowing velocities

的理想远场能量分布,而上层是考虑吹气流场密度分布不均匀作用时的远场能量分布。可以看到,吹气流速在 0~30 m/s 时对光束能量的远场分布不产生明显的影响,因为底部图形和上层图形基本重叠;但是并不是吹气速度对光束完全没有影响,从图 6(d)中可以看出,当吹气速度达到 100 m/s 时,其形成的非均匀密度分布流场将严重影响光束的远场能量分布。因而,应当综合考虑排空空气需要对较大吹气速度以及密度均匀需要保持较低吹气速度的要求。

### 3.3 镜面变形与吹气流场对光束的联合影响

前面分别考虑了镜面变形和吹气流场各自对光束的影响。而在实际光路中,他们是同时作用于光束的,将它们各自产生的相屏按照光束传输的空间顺序联合起来加入到求解光传输方程中,就得到镜面变形与吹气流场对光束的联合作用。图 7 显示了在光束加热镜面 30 s,吹气速度分别为 5,20,30,100 m/s 且达到稳态时,光束的远场光斑能量分布情况,没有考虑气流对镜面的冷却作用。

图 7 中,关于 0 点对称的图形是理想状态下远场光斑能量的分布情况,具有移位的图形是在镜面变形和吹气流场联合作用下远场光斑的能量

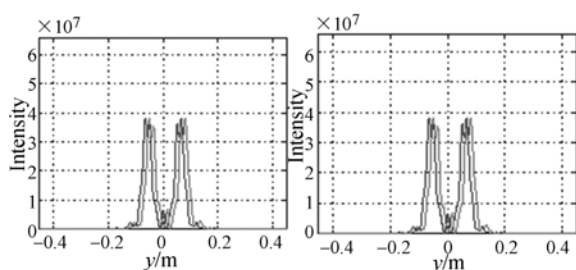
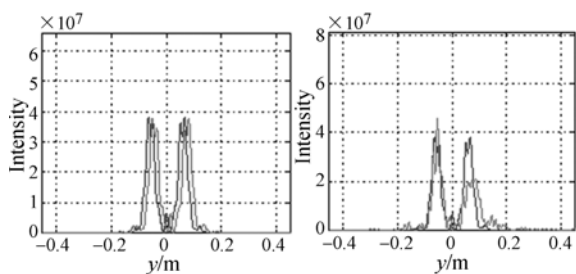
(a)  $t=5\text{ s}$ ,  $v=5\text{ m/s}$  (b)  $t=30\text{ s}$ ,  $v=20\text{ m/s}$ (c)  $t=30\text{ s}$ ,  $v=30\text{ m/s}$  (d)  $t=30\text{ s}$ ,  $v=100\text{ m/s}$ 

图7 镜面与不同吹速流场对光束的联合作用

Fig. 7 Combined influence of mirror deformation and flow density on beam intensity

分布情况。可以看出,在较低吹气速度下,对光束产生主要影响的是镜面变形因素,体现为远场光斑整体发生了轻微的位移;而在吹气速度很大时,如图7(d)所示,吹气流场的非均匀性就成为主要因素。

比较图4、图6、图7可以看出,具有较高反射

率的反射镜在短时间累计的镜面变形对光束的影响很小,热晕气体在较低吹速下对光束的影响也很小;只有当吹气流场中流速较大、气体密度分布不均匀性比较突出时,气体介质才对光束产生严重影响。

## 4 结论

本文通过计算弹性支撑的反射镜在较高功率密度光束下的热变形、以及从较低到较高流速的吹气流场密度,分析了它们各自对光束传输的影响以及两者对光束的联合影响。结果表明,在弹性支撑方式下,由于反射镜能够自由伸缩,累积的热应力级热应变相对较小,且镜面上对光束有效作用区域的热变形总体上比较平滑,对光束的影响很小。这种支撑方式对光束的影响最终体现为引入一个非常小的偏转角,在精度要求不高或出射光与接收面距离不远的情况下,该偏转角可以忽略不计。而为消除热晕的吹气方式,在较低吹气速度下所产生的流场对光束基本没有影响,但在较高流速下对光束的影响将变得十分严重,在能够排空热晕气体的前提下,应当采用较低的吹气速度。二者对光束的联合作用在较低吹速下主要为镜面热变形对光束的影响,而在较大吹速下主要为流场密度不均匀对光束的影响。本文提出的结合热弹性力学、流体力学和标量波动方程的方法可以很好地应用到类似的研究中。

## 参考文献:

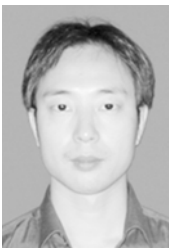
- [1] 蒋志伟, 龚时华, 王启行. 双光束激光双路焊接的跟踪控制技术研究[J]. 激光技术, 2013, 37(1): 1-5. JIANG ZH W, GONG SH H, WANG Q H. Study on the tracking control technology of dual-beam laser welding[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] 王世庆, 柳建, 张翔, 等. 光路交叠对强光传输的影响[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 173-176. WANG SH Q, LIU J, ZHANG X, *et al.*. Thermal effects on laser beam due to superposition of beam path[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 173-176. (in Chinese)
- [3] 杜燕胎, 安建祝, 束小建. 长时热变形下硅反射镜的参量选择[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(5): 1187-

1192.

- DU Y Y, AN J ZH, SHU X J. Parameters design of silicon reflectors in long-time thermal distortion [J]. *High Power Laser and Particle beams*, 2011, 23(5): 1187-1192. (in Chinese)
- [4] 彭玉峰, 吴定允, 张毅, 等. 高功率激光反射镜热畸变补偿结构设计及仿真[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 120-123. PENG Y F, WU D Y, ZHANG Y, *et al.*. Simulation and structure design of a high power laser mirror with self-compensation of thermal distortion[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 120-123. (in Chinese)
- [5] 柳建, 李树民, 金钢, 等. 沿Z型光传输管道轴向吹气对激光传输的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 34(2): 5-9. LIU J, LI SH M, JIN G, *et al.*. Influence on beam

- propagation through Z-shape tube of blowing non-absorbing gas in[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 34(2):5-9. (in Chinese)
- [6] 柳建, 刘顺发, 金钢. 封闭充气管道中气体热效应对激光传输的影响[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(1): 100-103.  
LIU J, LIU SH F, JIN G. Thermal effects on laser propagating in a closed tube with air[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(1):100-103. (in Chinese)
- [7] 王洪纲. 热弹性力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.  
WANG H G. *Introduction of Thermoelasticity Mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989. (in Chinese)
- [8] 尚钢. 热冲击下分区均质材料耦合热弹性问题的变分原理[J]. *武汉大学学报: 自然科学版*, 1999, 45(5)A:610-612.  
SHANG G. Variational principles on coupled thermal-elasticity of zoned homogeneous materials under thermal shock [J]. *J. Wuhan Univ. : Nat. Sci. Ed.*, 1999, 45(5)A:610-612. (in Chinese)
- [9] 金钢, 刘顺发, 李树民, 等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2002, 29(10): 895-899.  
JIN G, LIU SH F, LI SH M, *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2002, 29(10): 895-899. (in Chinese)
- [10] 羊国光, 宋菲君. 高等物理光学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1991.  
YANG G G, SONG F J. *Advanced Physical Optics* [M]. Hefei: Press of Chinese University of Sciences, 1991. (in Chinese)
- [11] FRANK L, PEDROTTI S J, LENO, *et al.* *Introduction to Optics* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.

#### 作者简介:



柳建(1975-),男,四川渠县人,博士,副教授,2005年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位,现为成都理工大学工程技术学院教师,主要从事激光传输与变换、激光光束控制理论和技术、计算物理等方面的研究。E-mail: emailfliujian@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)