

靶场编组站镜箱温度场稳定性影响及优化分析

周 忆 杨 品 廖云飞 刘朋威 左 东

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400030)

摘要 激光惯性约束聚变(ICF)装置中靶场编组站镜箱内的温度控制是实现光学元件最小变形,保证光束质量的重要环节。建立靶场编组站镜箱数学和物理模型,采用流体动力学分析软件对靶场编组站镜箱内温度场分布进行了数值模拟,计算结果与实测结果吻合。分析了不同鼓风速度 v 及鼓风角度 θ 对镜箱内温度场分布的影响及稳定时间,结果表明鼓风速度越大,镜箱内温度场趋于稳定越快,而风速 v 大于 1.3 m/s 后,稳定时间的减小不明显;鼓风角度对镜箱内温度场稳定影响较大,有最佳值。当鼓风速度 v 为 1.3 m/s,鼓风角度 θ 为 20° 时镜箱内温度场稳定时间最短,为 77 min。且在鼓风机关闭后 32 min 内,镜片温差在允许范围内,最大值为 0.009 K。

关键词 光学器件;惯性约束聚变驱动器;靶场编组站;温度场;FLUENT;优化分析

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502002

Stability Impact and Optimization Analysis of Temperature Field of Switchyard Mirror Box in ICF Target Area

Zhou Yi Yang Pin Liao Yunfei Liu Pengwei Zuo Dong

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract In order to achieve minimum deformation of optical components and ensure beam quality, temperature control of switchyard mirror box in target area of the laser inertial confinement fusion (ICF) devices is very important. Mathematical and physical models of switchyard box in target area are established. FLUENT software is used to analyze the temperature field inside mirror box and analysis result is consistent with the measured result. The temperature field distribution and stability time inside mirror box impacted by different wind velocities and angles are analyzed, the results show that the greater the speed, the faster the temperature field inside mirror box stabilized. And when wind velocity v is greater than 1.3 m/s, the decrease of stability time is not obvious. Wind angle shows great impact on the steady of temperature inside mirror box and the best value is obtained. When wind velocity v is 1.3 m/s and wind angle θ is 20° , the stability time inside mirror box is the shortest with the value of 77 min. And within 32 min after the blower turned off, the temperature difference between the mirror is in the allowable range, with a maximum of 0.009 K.

Key words optical devices; inertial confinement fusion driver; switchyard in target area; temperature field; FLUENT; optimization analysis

OCIS codes 350.2660; 140.3460; 120.6780

1 引 言

环境载荷(如地面或结构振动、环境温度变化等)是影响高功率激光装置光学元件稳定性的重要因素,其中环境温度稳定性是稳定性设计的主要指标之一^[1]。如美国国家点火装置(NIF)对温度激励源的稳定性提出了很高的设计要求,在稳定性指标

分配中温度激励源对大口径光学元件稳定性的贡献为 35%^[2];我国原型装置提出由于温度瞬变引起大口径光学元件的转角误差为 $0.24 \mu\text{rad}$ ^[1]。靶场编组站是光路传输的重要组成部分,编组站内的每个镜架支撑 4 个反射镜片,任何一个镜片稳定性不满足要求都会影响光束的指向,导致激光束偏离准直位

收稿日期: 2011-11-21; **收到修改稿日期**: 2011-12-28

基金项目: 中央高校基本科研基金(CDJXS11110021, CDJXS11111140)和高等学校博士学科点专项科研基金(20110191110006)资助课题。

作者简介: 周 忆(1957—),女,教授,博士生导师,主要从事精密机电系统设计分析方面的研究。

E-mail: cdzy@cqu.edu.cn

置,影响其定位精度,甚至造成打靶失败^[3~6]。研究表明,当靶场编组站内温差为 0.01 K 左右或局部温差为 0.1 K 左右时,镜片的镜面转角小于 0.24 μrad ,才能够满足稳定性指标要求^[7]。

靶场编组站处于编组站镜箱内部,靶场编组站镜箱内部的温度场变化对编组站稳定性有着重要的影响^[8,9]。引起镜箱内部温度波动的因素主要有:

1) 上发实验元件吸收主激光热量;2) 外部环境温度不稳定;3) 鼓风机布置局限性而产生的散热不均;4) 在 2 h 后温度不稳定分布状态及对元件影响程度。由于镜箱内的空气流动与送风口的数量、位置,出风口的位置,鼓风参数(鼓风速度、鼓风角度)等有关,镜箱内的空气流动直接影响着镜箱内温度场的分布、温度梯度的大小与稳定时间。文献^[7]研究了鼓风机通风口位置布置对镜箱内部温度场的影响,提出最佳通风口布置方案,论文将主要讨论与镜箱内的空气流动密切相关的鼓风机工作参数对镜箱内的温度场分布的影响。

计算流体力学(CFD)方法可以对空气流动的速度场、温度场等进行模拟和预测,成本低、速度快,并可根据模拟数据进行全方位的控制和优化设计^[10,11]。本文应用 CFD 软件 FLUENT 对编组站镜箱温度场进行数值模拟及鼓风参数优化分析,提出最佳鼓风机鼓风参数设置。

2 编组站镜箱温度场模型

2.1 数学模型

根据雷诺数判据,模型雷诺数 $Re > 4000$,编组站镜箱内空气流动形式为湍流,论文采用 Launder 等^[12]提出的 k-e 二方程模型理论进行计算。模型内空气的流动与传热满足 N-S 方程与导热微分方程^[10,13]。

N-S 方程(粘性流体的运动微分方程):

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) &= \\ F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \nabla^2 u_x & \\ \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) &= \\ F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \nabla^2 u_y & \\ \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= \\ F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \nabla^2 u_z & \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

式中 $\rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$ 为流体质量与速度对时间全微分的乘积,表示惯性力; F 表示外力; $\frac{\partial p}{\partial x}$ 为压力项; $\eta \nabla^2 u$ 为粘性摩擦力。

导热微分方程(描述运动流体中温度场的方程):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

式中 $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ 表示流体各点上温度随时间的变化,其余各项表示在空间中运动时温度的变化, u_x, u_y, u_z 为流场中点 (x, y, z) 处的速度。

FLUENT 中求解模型温度场时需要求解能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j' + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] + S_h, \quad (3)$$

式中 k_{eff} 为有效导热系数($k + k_t$, 其中 k_t 是湍流热传导系数,根据所使用的湍流模型来定义), J_j' 是组分 j' 的扩散流量。(3) 式右边前三项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运。 S_h 包括了化学反应热以及其他用户定义的体积热源项。

(1)~(3) 式构成了编组站镜箱温度场数学模型。

2.2 物理模型

靶场编组站物理模型如图 1 所示,镜箱起封闭隔离作用、两个编组站进行光束传输、两个送风口和一个出风口用来通风。编组站镜箱模型位于靶场内,靶场内安装有连续 24 h 工作的大型恒温空调,以保持靶场内温度稳定。不进行物理实验时开启鼓

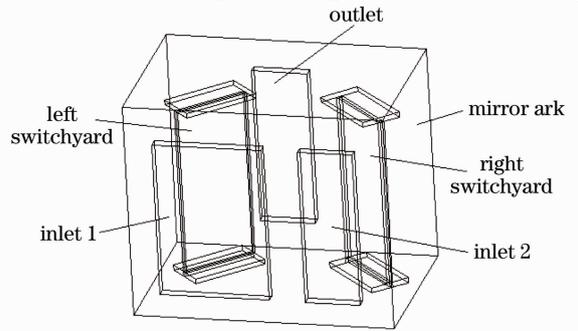


图 1 靶场编组站镜箱物理模型

Fig. 1 Physical modal of mirror ark of switchyard in target area

风机,由两个送风口向镜箱鼓风散热,使镜箱内温度分布更均匀,进行物理实验时关闭鼓风机,避免镜箱内快速流动的空气影响编组站的稳定性。表1为材料的物理性能参数^[14]。

表1 材料的物理性能参数

Table 1 Physical property parameters of materials

	Density / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Heat capacity / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Thermalconductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Air	1.293	1005	0.02454
Mirror mount	7850	460	48
Mirror	2510	840	12.07
Mirror ark	700	2400	0.17

2.3 边界条件与假设

由于镜箱处于大型恒温空调(HAVC)系统中,鼓风机处于稳定工作状态,在实际数值计算过程中,分析物理模型并结合 FLUENT 数值模拟计算特点和条件,建立模型时做出如下假设:

- 1) 鼓风机鼓风速度及温度大小均匀恒定;
- 2) 镜箱外壁面温度恒定。

表2为编组站镜箱模型的边界条件,由实际实验测得。其中,镜箱外壁面设置为恒温壁面,镜箱内部初始温度为296 K,送风口1与送风口2的风速大小与鼓风角度为优化参数,在表2中未列出。

表2 边界条件的设置

Table 2 Table of boundary condition setting

Boundary condition set items	Set content
Inlet 1	Constant velocity, constant temperature 295.8 K
Inlet 2	Constant velocity, constant temperature 295.9 K
Outlet	Constant pressure $P=0.1$ MPa
Right wall of mirror ark	Constant temperature 295.9 K
Top wall of mirror ark	Constant temperature 295.8 K
Left wall of mirror ark	Constant temperature 295.8 K
Front wall of mirror ark	Constant temperature 295.9 K
Back wall of mirror ark	Constant temperature 295.8 K

3 理论分析与实际结果对比

实验工况为鼓风机鼓风速度1.1 m/s,垂直送风口鼓风,两编组站两侧测点布置如图2所示。为验证镜箱分析模型及结果的正确性,在分析模型中设置16个与实验测点一一对应的监视点,并在相同的工况下进行分析计算,将稳定时的监测点温度与

实测温度进行比较,如图3所示。

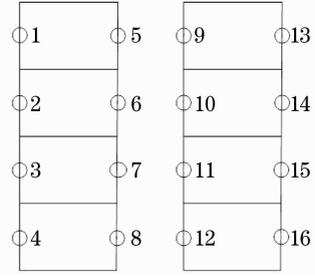


图2 温度监测点示意图

Fig. 2 Distribution sketch map of monitored points

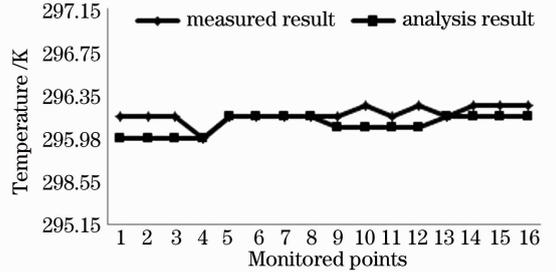


图3 分析结果与实测结果对比

Fig. 3 Comparison of analysis results with experimental results

由图3可以看出,分析结果与实验结果基本吻合,表明所建立的数学物理模型及分析过程是正确的。部分分析结果比实测结果低0.1 K~0.2 K,这是因为分析时镜箱、边界条件及其周围环境均为理想情况,而实际镜箱内部温度场受到各种外界因素的影响,外界因素包括空调、发动机、泵等产生的热量;与支撑结构相接触的局部瞬态热源;放大器散热过程、诊断设备和电动机架的冷却系统等;人体产生的热量;鼓风机布置局限性而产生的散热不均等^[15]。

4 靶场编组站镜箱温度场优化

4.1 鼓风机鼓风速度大小对温度场的影响

根据实际工况,鼓风机鼓的风为空气,鼓风机的鼓风速度可调节:1.3,1.1,0.8,0.6,0.3 m/s。分析镜箱在不同风速下的温度分布,风速分别为1.5,1.3,1.1,0.8,0.6,0.3 m/s。编组站镜片导热性很好,其上温差很小。图4,5分别为镜箱截面在 $v=0.8$ m/s和1.3 m/s时的温度分布。

从图中可以看出:在不同风速条件下,镜箱的温度变化趋势与温度分布情况基本一致。空气温度下降速度较快,几分钟之内即可达到稳定状态,编组站周围温度下降速度相对较慢。风速 $v=0.8$ m/s时,镜箱温度场在152 min时基本稳定;风速 $v=1.3$ m/s

时,镜箱温度场在 93 min 时基本稳定。图 6 为不同风速下镜箱温度场稳定时间。温度变化速度随风速的

减小而降低,当风速 $v > 1.3 \text{ m/s}$ 后,稳定时间下降不明显。建议鼓风速度采用 $v = 1.3 \text{ m/s}$ 。

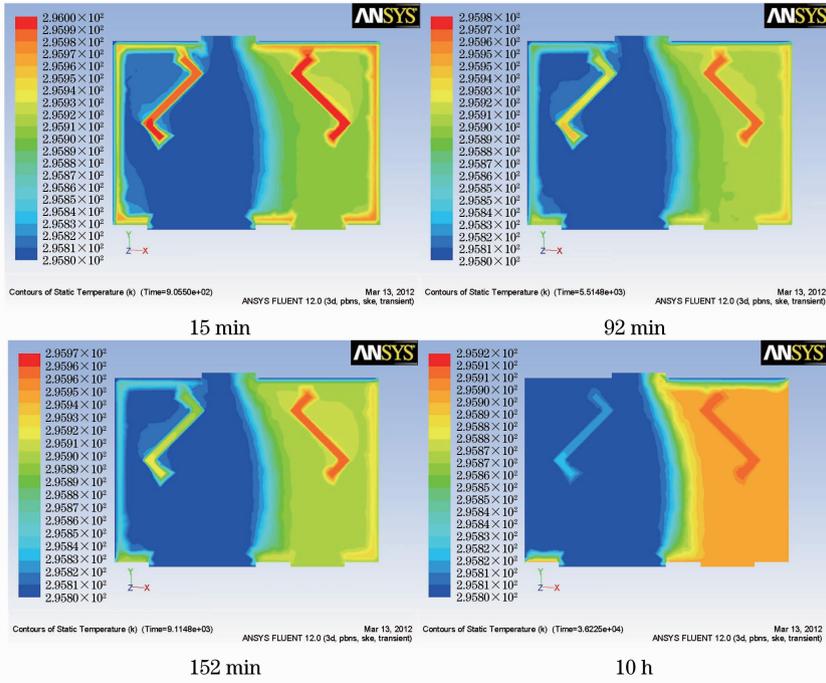


图 4 镜箱在 $v = 0.8 \text{ m/s}$ 时的温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution of mirror box at $v = 0.8 \text{ m/s}$

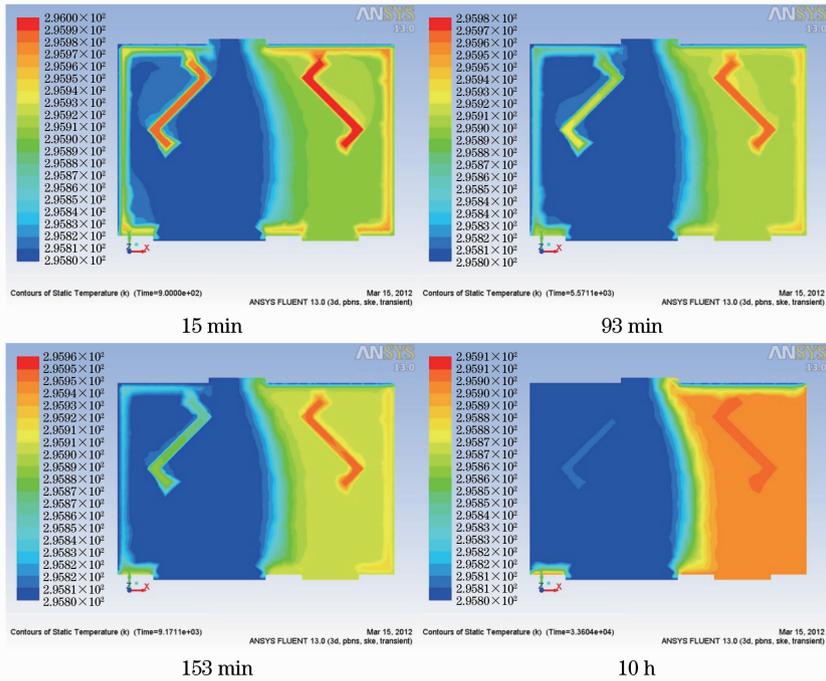


图 5 镜箱在 $v = 1.3 \text{ m/s}$ 时的温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of mirror box at $v = 1.3 \text{ m/s}$

图 7,8 分别为风速 $v = 1.3 \text{ m/s}$ 时镜箱截面的速度矢量图、流线图。从图中可以看出,由于鼓风机的风垂直进入镜箱,大部分空气直接从送风口流出口。靠近镜箱出风口处风速变大,最大风速出

现在出风口右侧拐角处,最大值为 4.07 m/s ;在编组站转角处,鼓风机吹出的风出现分流,小部分绕到编组站后部形成通路,进行热量交换,最终从出口流出。这两小股风由于受到编组站的阻挡,风速有所

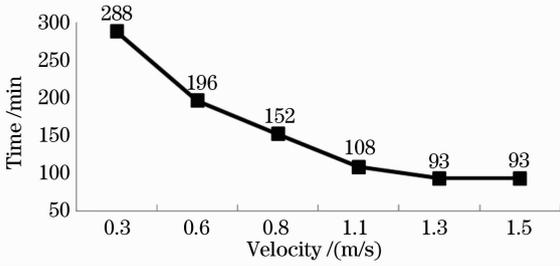


图 6 不同风速下温度场稳定时间

Fig. 6 Temperature field stabilization time at different velocities

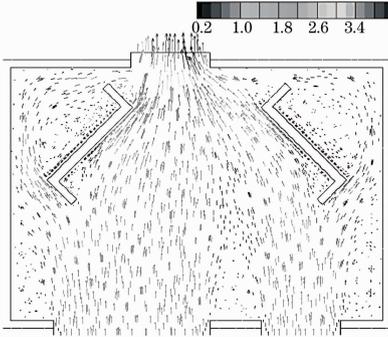


图 7 $v=1.3\text{ m/s}$, $\theta=0^\circ$ 时的速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector at $v=1.3\text{ m/s}$ and $\theta=0^\circ$

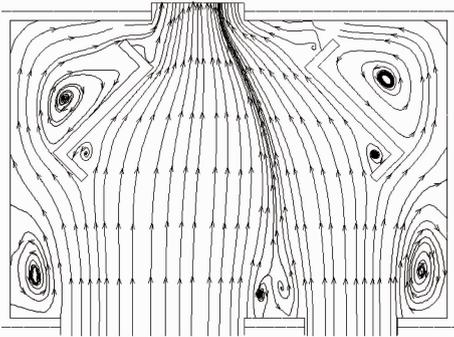


图 8 $v=1.3\text{ m/s}$, $\theta=0^\circ$ 时的流线图

Fig. 8 Flow chart at $v=1.3\text{ m/s}$ and $\theta=0^\circ$

下降,从而导致温度下降速度降低。从图 4 中 $v=0.8\text{ m/s}$, $t=15\text{ min}$ 时的温度分布云图可以看出,编组站后部的温度高于镜箱中间部分;在送风口侧的镜箱两角落处和两送风口之间的位置,在风的诱导作用下形成回旋涡流,温度下降较为缓慢;由于受到编组站的影响,送风射流不断带动和卷吸编组站转角处与编组站后面的空气,使得这两处形成回旋涡流,从而进行空气热量交换,但风速明显降低,约为 0.2 m/s 。从 $v=0.8\text{ m/s}$, $t=92\text{ min}$ 时的温度分布云图可以看出,这些地方的温度明显高于镜箱的其他部分。

4.2 鼓风机鼓风角度大小对温度场的影响

将鼓风角度相对于送风口分别向左右倾斜一定

的角度。以风速 $v=1.3\text{ m/s}$ 、鼓风角度 $\theta=20^\circ$ 为例,即送风口 1 鼓风角度为 -20° ,送风口 2 鼓风角度为 20° ,观察镜箱温度场稳定时镜箱内的温度及风速等分布情况,如图 9~11 所示。

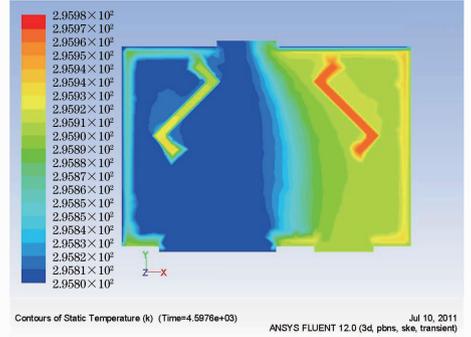


图 9 77 min 时温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution at 77 min

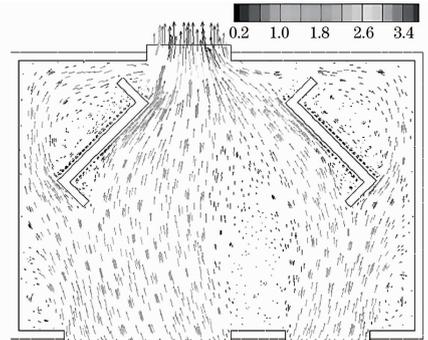


图 10 $v=1.3\text{ m/s}$, $\theta=20^\circ$ 时的速度矢量图

Fig. 10 Velocity vector at $v=1.3\text{ m/s}$ and $\theta=20^\circ$

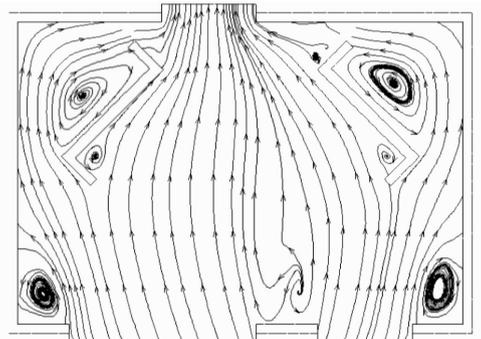


图 11 $v=1.3\text{ m/s}$, $\theta=20^\circ$ 时的流线图

Fig. 11 Flow chart at $v=1.3\text{ m/s}$ and $\theta=20^\circ$

编组站温度场在 77 min 时稳定,所用时间少于垂直送风口鼓风情况所用的 93 min;最大速度亦出现在出口右侧拐角处,最大值为 3.75 m/s ,小于垂直送风口送风时的最大速度,说明鼓风角度为 20° 时的鼓风分布较均匀;与垂直鼓风的流线图相比,由于鼓风存在一定角度,在镜架后部的分流明显增大,热量交换能力增强,致使镜片温度下降速度加快;两送风口中间的涡流增大,导致此处的温度梯度变大。

在送风口侧的镜箱两角落处及镜片后面产生的涡流减小,从而使热量分布更均匀。

分析鼓风角度分别为 $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 的工况,镜箱温度场稳定时间如图 12 所示。鼓风角度从 0° 变化到 20° 时,稳定时间逐渐减小, 20° 之后开始变大, 20° 时稳定时间最短,为 77 min,建议采用此角度鼓风。

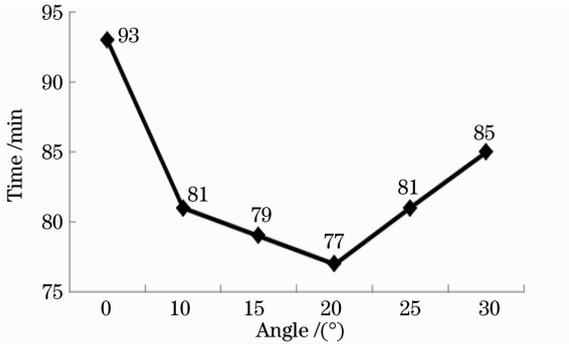


图 12 不同角度下温度场稳定时间

Fig. 12 Temperature field stabilization time at different angles

图 13 中曲线 1~4 为鼓风速度 $v=1.3$ m/s、鼓风角度 $\theta=20^\circ$ 时,监测点 1~4 温度在前 100 min 内随 FLUENT 迭代计算的变化曲线,为方便说明,横轴为迭代计算次数所对应的时间。曲线 A~D 分别为与监视点 1~4 距离 20 mm 处的空气温度变化曲线,从图 13 中可明显看出,在鼓风 77 min 后,编组

站周围空气温度达到稳定状态,编组站监测点温度变化平稳,下降速度明显减缓,镜箱温度场趋于稳定,打靶可在此时间段进行。

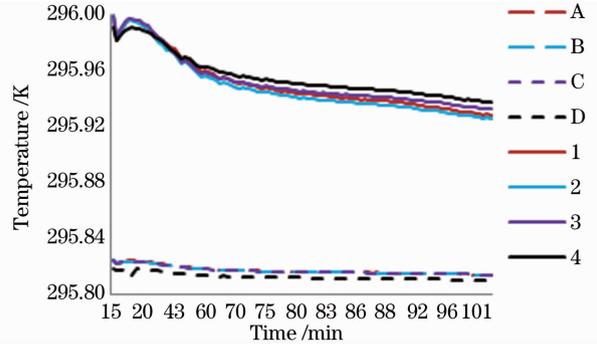


图 13 监测点温度变化曲线

Fig. 13 Temperature curve of monitoring points

77 min 后关闭鼓风机,停止鼓风,镜箱内空气温度在无外载情况下,逐渐趋近于周围镜箱壁面温度。83 min 之后,镜片周围空气温度开始吸收镜片温度,逐渐升高,两者温度趋于一致,如图 14 所示。表 3 为关闭鼓风机后 32 min 内 16 个监视点的温度变化。在整个变化过程中,镜片温差最大值为 0.009 K,在允许范围内。即鼓风机关闭后 32 min 内,镜片仍处于稳定状态,可进行打靶。但实际情况中,镜箱内外温度场均受到多个激励源的影响,稳定性较差,故鼓风机关闭后应尽快进行激光发射。

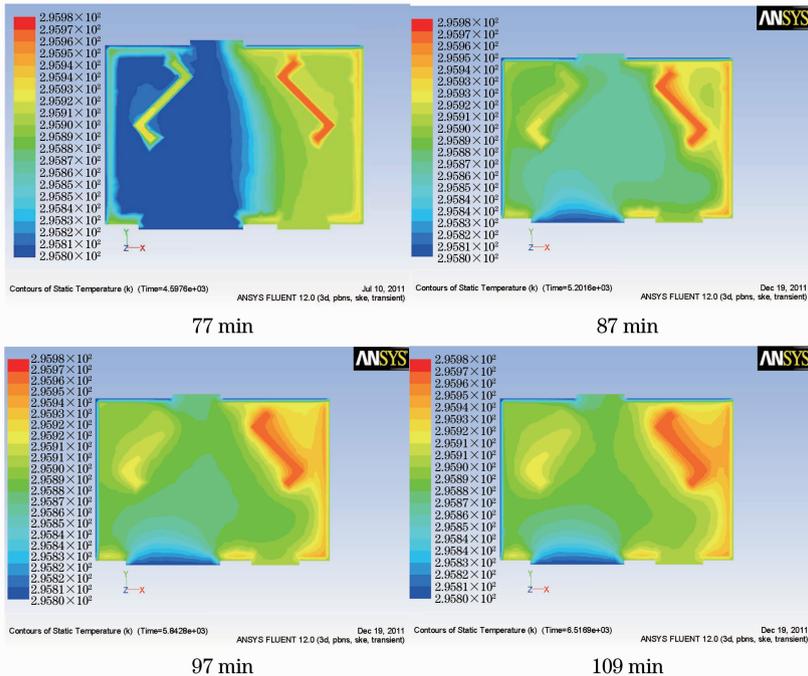


图 14 鼓风机关闭后镜箱温度分布图

Fig. 14 Temperature distribution of mirror box after blower turned off

表 3 鼓风机关闭后各监视点温度(单位:K)

Table 3 Temperature of monitored points after blower turned off (Unit: K)

Point number	77 min	87 min	97 min	109 min	The maximum temperature difference of each monitored point
1	295.911	295.915	295.916	295.917	0.006
2	295.910	295.913	295.913	295.913	0.002
3	295.909	295.912	295.913	295.913	0.004
4	295.918	295.918	295.920	295.921	0.003
5	295.918	295.915	295.916	295.917	0.003
6	295.917	295.913	295.913	295.913	0.004
7	295.916	295.913	295.913	295.913	0.003
8	295.916	295.914	295.916	295.917	0.003
The maximum temperature difference of the left mirror	0.009	0.006	0.007	0.008	
9	295.962	295.962	295.964	295.964	0.002
10	295.960	295.960	295.960	295.961	0.001
11	295.957	295.958	295.958	295.959	0.002
12	295.962	295.963	295.965	295.965	0.003
13	295.965	295.964	295.964	295.964	0.001
14	295.963	295.961	295.961	295.961	0.002
15	295.961	295.959	295.959	295.959	0.002
16	295.966	295.964	295.965	295.966	0.002
The maximum temperature difference of the right mirror	0.009	0.006	0.007	0.007	

5 结 论

对编组站镜箱温度场及其稳定时间进行数值模拟,分析结果基本符合实际温度分布情况,为编组站镜箱温度控制提供了理论依据。根据不同鼓风速度对编组站镜箱温度场及其稳定时间的分析表明,在不同风速作用下,镜箱内温度场分布趋势及变化趋势一致,温度场稳定时间随风速的增大而减小,但当风速 $v > 1.3 \text{ m/s}$ 后,稳定时间下降趋势明显减缓。鼓风角度对镜箱内温度场的稳定影响较大,鼓风角度 θ 从 0° 变化到 20° 时,稳定时间逐渐减小, 20° 之后又开始变大。当鼓风速度 $v = 1.3 \text{ m/s}$, 鼓风角度 $\theta = 20^\circ$ 时编组站镜箱内温度达到稳定的时间最短,为 77 min。关闭鼓风机后 32 min 内,镜片温差最大值为 0.009 K,在允许范围内。

参 考 文 献

- Shi Zhiqian. The Existence and Asymptotic Property of the Solutions for Some Nonlinear Evolution Equations [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2003. 84~89
师智全. 大型固体激光装置光学元件结构稳定性分析研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2003. 84~89
- David J. Trummer, Richard J. Foley, Gene S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building[C]. SPIE, 1999, **3492**: 363~371
- Erik A. Swensen, Alex A. Barron, Charles R. Farrar *et al.*. Random vibration sensitivity studies of modeling uncertainties in the NIF structures[C]. Proceedings of the International Modal Analysis Conference-IMAC, 1997, **2**: 1172~1180
- Zhang Junwei, Zhou Yi, Zhou Hai *et al.*. Effect of transient change of temperature on large-aperture optical element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 333~337
张军伟, 周 忆, 周 海等. 瞬态温度变化对大口径光学元件的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 333~337
- Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1425~1428
赵东峰, 戴亚平, 尹宪华等. 高功率激光装置靶场光学系统的误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1425~1428
- Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping *et al.*. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded lens[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808002
王汝冬, 田 伟, 王 平等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0808002
- Yang Shujuan. Thermal Stability Analysis and Research of Switchyard in ICF Driver's Target Area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. 1~11
杨淑娟. ICF 驱动器靶场编组站热稳定性分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. 1~11
- Zhou Yi, Yang Shujuan, Zhang Junwei *et al.*. Thermal transfiguration analysis for the large aperture optical element of switchyard in ICF driver target area[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 125~130
周 忆, 杨淑娟, 张军伟等. 惯性约束聚变靶场编组站大口径光学元件的热变形分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 125~130
- Huang Hongbiao, Zeng Taiying, Zhang Tao *et al.*. Stability design and analysis of target chamber system in SG II upgrade

- facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1986~1990
 黄宏彪, 曾台英, 张涛等. 神光II升级装置中靶室系统的稳定性设计与分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 1986~1990
- 10 Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 1~12
 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 1~12
- 11 Yang Jia, Wu Xiangsheng, Zhang Jinsong. Research of the CFD technology in indoor air-flow organization[C]. Academic Papers of HVAC Power and Air Conditioning in Southwest Area, 2001. 95~98
 杨嘉, 吴祥生, 张锦松. CFD在室内气流组织模拟中的应用研究[C]. 西南地区暖通动力及空调制冷学术文集, 2001. 95~98
- 12 B. E. Launder, D. B. Spalding. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M]. London: New York Academic Press, 1972. 90~110
- 13 B. J. Lee, Z. M. Zhang. Coherent thermal emission from modified-periodic multilayer structures[J]. *J. Heat Transfer*, 2007, **129**(1): 17~26
- 14 Horst Stocker. Physical Handbook[M]. Wu Xizhen, Li Zhuxia, Chen Shiping Transl.. Beijing: Peking University Press, 2003. 176~705
 斯托克. 物理手册[M]. 吴锡真, 李祝霞, 陈师平译. 北京: 北京大学出版社, 2003. 176~705
- 15 Feng Bin, Zhou Yi, Zhang Junwei *et al.*. Preliminary analysis of thermal influence on the large aperture optical elements[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2006, **29**(10): 74~77
 冯斌, 周忆, 张军伟等. 大口径光学元件热稳定性初步分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, **29**(10): 74~77

栏目编辑: 宋梅梅