

文章编号 1004-924X(2015)08-2236-07

大口径宽波段激光发射通道的正压密封

陈文韬^{1,2}, 高云国^{1,*}, 邵 帅¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:针对大口径宽波段高能激光发射系统内通道的防尘除湿问题,提出了内通道正压通风密封方法。该方法利用净化后的干燥洁净空气排出原有的空气,并在发射端口形成正压气流阻挡外界空气向内通道扩散,从而达到密封防护的目的。借助计算流体力学软件 Fluent 对发射系统内通道的正压通风流场进行了数值模拟和分析研究,研究显示洁净气流在发射端口处产生一定的风速和压差,从而形成了内部正压抵挡通道外空气的回流。对于 10.6 μm 的长波激光,根据压力变化估计了通道内的折射率变化在 10^{-7} 量级,引起的光程差约为 1 μm 。最后,通过实验验证了仿真结果。结果表明:监测面的速度值比仿真结果稍大,但是速度变化基本相同,而且洁净气流在监测面保持有 0.64 m/s 的正压速度,洁净空气的相对湿度从 59% 降至了 29%,基本达到了正压通风系统防尘除湿的密封设计要求。

关键词:高能激光;激光发射系统;密封;正压通风;数值模拟

中图分类号: TN243; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2236

Positive seal in large-diameter and wide-band laser emission pipe

CHEN Wen-tao^{1,2}, GAO Yun-guo^{1,*}, SHAO Shuai¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)
** Corresponding author, E-mail: gaoyg_gjs@163.com.cn*

Abstract: To prevent dust and moisture to enter the laser emission pipe of a high-energy laser emission system with large-diameter and wide-band, a positive pressure ventilation seal method for the laser emission pipe is proposed. This method uses purified, dry and clean air to exhaust original air, and allow a positive pressure flow on an emission port to resist the air diffusion into the laser emission pipe from outside and to achieve the sealing for the pipe. The numerical simulation and analysis for a flow field of the positive pressure ventilation in the laser emission pipe are performed by the CFD software-Fluent, and it shows that the clean air keeps a certain velocity and pressure on the emission port and could form a positive pressure airflow to resist the backflow from outside. For a long wavelength 10.6 μm laser, the variation of refractive index in the pipe is estimated to be a magnitude of 10^{-7} based on the pressure change, which causes a 1 μm optical path difference. The simulation results are

收稿日期:2014-09-20;修订日期:2014-11-03.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 057X22C050)

experimentally verified and the results show that the velocity varies of interior have nearly no difference, though its' velocity is a litter bigger than that of simulation, and there is a positive pressure air-flow with 0.64 m/s. Moreover, the relative humidity of clean air has dropped to 29% from 59%, which basically reaches the design sealing requirements of the positive pressure ventilation system for dust-proof and dehumidification.

Key words: high energy laser; laser emission pipe; seal; positive pressure ventilation; numerical simulation

1 引言

主动光学和自适应光学技术的应用和成熟,推动着大型激光发射系统向大口径、高分辨率发展^[1-2]。以往的大口径宽波段高能激光发射系统只在载体上装备有防护罩,但是在发射设备上却没有如透射窗口这样的任何密封防尘措施,因此空气中的灰尘和水分等很容易进入内通道。水分中的成分会增强内通道中空气对激光的热吸收,而灰尘和气溶胶等会因为散射等使激光能量产生衰减,更严重的是水分和灰尘在腔镜等光学元件上凝结和沉积,会对镜面造成严重损坏,影响光学元件的工作质量和使用寿命,空气中的某些气体会成分会直接对光学元件和机械结构产生破坏性影响,这些因素都将严重影响激光发射质量和能量^[3-7]。因此,为了保护激光发射系统的内部元件,保证设备的正常工作,增强系统的环境适应性,提高设备的使用寿命和可靠性,对内通道采取一定的防护措施非常必要。

国内外学者研究了激光器的通道密封和激光发射内通道的热效应^[8-12],但很少有文献研究如何实现激光发射内通道的密封防护,特别是对于大口径宽波段激光发射系统。研究表明,在发射筒端口安装一个晶体透射窗口,在单波段的激光发射系统中是可以实现的,但是在口径宽波段的激光发射系统中却很难实现。由于制备困难,适合透射波段宽的窗口材料如硒化锌等价格极高,而且大口径窗口只能通过拼接得到,生产、装调和维护难度都很大,其使用寿命也偏低^[13]。另外,晶体窗口存在一定的热吸收,当激光功率较高时,窗口温度会急剧升高,产生的热变形会使激光波前畸变,影响光束质量和传输特性,甚至会使窗口严重损坏,激光发射系统无法正常工作^[14-16]。

基于此,本文提出了大口径宽波段激光发射

内通道正压通风密封的方法,通过正压净化设备向内通道持续送入净化空气,在发射端口保持一定的风速和压差,利用正压气流阻挡通道外的空气向内通道扩散,使内通道保持干燥洁净。采用计算流体力学分析软件 Fluent 对发射系统内通道的正压通风流场进行了数值模拟和分析研究,并在实验中得到了验证。

2 理论模型

2.1 工作机理

如上文所述,为了提高大口径宽波段激光发射系统的性能,需要对其内部光学元件和精密机械结构采取保护措施,而空气中的水分、灰尘等会严重损害光学元件,并且会使激光产生相位畸变和能量衰减,因此有必要考虑发射内通道的防尘除湿的密封设计。本文提出的内通道正压通风密封方法通过正压净化设备去除空气中对内通道元件有破坏影响的水分、灰尘颗粒以及某些酸性气体等,向内通道持续送入干燥洁净的净化空气,使之充满整个内通道,并在发射端口保持一定的风速和压差,形成正压气流阻挡通道外的空气向内通道的扩散,保护通道内部元件。此时,内通道中充满净化后的干燥洁净空气,可实现内通道防尘除湿的目的。

2.2 模拟设置

以某大口径宽波段高能激光发射系统的正压通风流道为例,入口通道直径为 120 mm,连接 1 120 mm×360 mm×360 mm 的镜腔,弯曲通道直径为 160 mm,出口通道直径为 600 mm,嵌有直径为 160 mm,高为 280 mm 的次镜组件,通道总长为 6 m。首先利用 UG 软件进行实体建模,然后导入前处理软件 Gambit 中,采用 Tgrid 划分网格,具体内通道模型如图 1 所示。最后,利用计算流体力学软件 Fluent 对发射内通道的流场进

行分析。

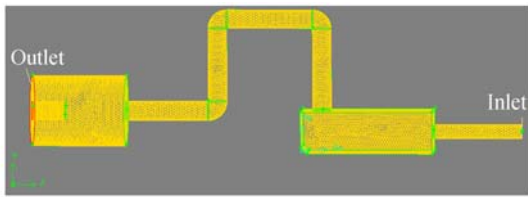


图 1 激光发射通道模型

Fig. 1 Model of laser emission pipe

正压净化送风设备采用苏州艾美乐公司生产的特种净化风机,采用可更换的高效纤维过滤网,可以直接从环境中吸入空气,并高效过滤其中的颗粒和水分。风机最大送风量为 $500 \text{ m}^3/\text{h}$,可在 $0\sim 12 \text{ m/s}$ 内无级调速。

基于上述条件,送风设备吹入的气体速度较低,不超过 15 m/s ,因此马赫数远小于 0.1 ,流体可认为是不可压的。在 Fluent 中对内通道流场采用稳态不可压模拟,流体材料采用不可压理想气体。另外,因为内部的正压气流是从环境中直接吸入净化所得,可认为内外温度基本不变,即不考虑环境温度对气体分布的影响。

分析中采用速度入口条件,其速度值 v 表示入口的平均速度,与流量 Q 的关系为:

$$Q = v \cdot S = v \cdot \pi d^2 / 4, \quad (1)$$

其中: S 表示入口通道截面积, d 为通道直径, $d=120 \text{ mm}$ 。

3 数值模拟和结果分析

3.1 数值模拟

入口边界 Inlet 采用速度入口条件,对于出口边界根据环境不同分两种情况分析:(1)设备处于室内等空气基本不流动或流动很小的环境;(2)设备处于空气流动较大的环境。对于净化气流的正压效果,采用截面速度矢量方向的方法进行判断:若某一截面的每个单元的法向速度矢量均向外,则认为在这个截面上净化气流抵挡了外界空气的回流,达到了正压密封效果。

当设备处于室内等空气基本不流动或流动较小的环境时,按照经验,洁净气流应向外流动。按图 1 的流道模型进行模拟,出口 Outlet 采用压力出口,压差为零,壁面边界采用恒温无滑移条件,湍流模型选定 Realize $k-\epsilon$ 模型,运用压力-速度耦

合采用 Simple 算法求解。根据正压净化风机的参数,设置入口 Inlet 的速度为 $v=1, 2, \dots, 10, 11 \text{ m/s}$,分别进行迭代计算直到收敛,发现结果如先前所预计的,每一个入口速度条件下出口面都可以实现正压,此时可以在具体情况选择合适入口速度。考虑的重点为空气流动较大的环境。

当设备处于空气流动较大的环境时,为了模拟外界流动空气向内通道的扩散,采用扩大区域法处理,即在出口处添加一个延伸域,直径为 $3\ 600 \text{ mm}$,高为 $2\ 000 \text{ mm}$,模型如图 2 所示,Inlet 为正压通风入口,Inlet-1 为外界空气入口,延伸域的圆柱面为对称面(symmetry),出口 Outlet 采用压力出口,压差为零。

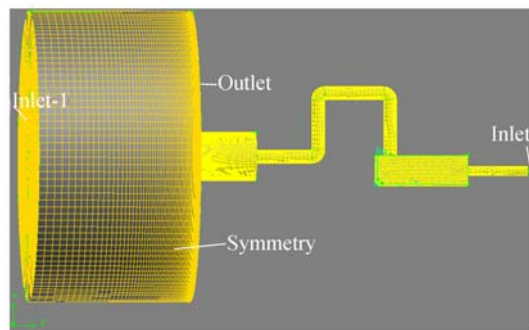


图 2 添加延伸域的激光发射通道

Fig. 2 Model of laser emission pipe added extension domain

在此环境下,设计要求为外界六级风($10.8\sim 13.8 \text{ m/s}$)的条件下,正压通风系统的正压气流可抵挡外界空气扩散到内通道的次镜(出口面以内 280 mm)。发射筒为方位和俯仰 2 个轴系转动,因此考虑极限位置,假设外界空气为垂直进入,设定 Inlet-1 为速度入口,速度值为 13 m/s ,监测面(Interior)的位置设为出口面以内 250 mm 。同样的,分别采用一系列的净化空气入口 Inlet 速度 $v=1, 2, \dots, 10, 11 \text{ m/s}$ 进行模拟计算,分析在此条件下正压气流能否在监测面形成正压,抵挡外界空气的回流。

3.2 正压流场密封效果分析

图 3 所示为按照模拟结果生成的监测面 Z 方向的面最小速度、面最大速度和面平均速度与入口速度的关系曲线。Z 轴的负方向向外。仿真结果显示,当入口速度增大时,监测面的最小速度值、最大速度值和平均速度值也随之增大,尤其面平均速度值与入口速度基本呈线性关系。按照截

面速度矢量方向判断方法,当 $v < 4 \text{ m/s}$ 时,监测面的最大速度大于零,即此时在监测面向有内气流,不能完全抵挡外界空气的扩散到监测面以内。而当 $v \geq 4 \text{ m/s}$ 时,监测面的每个单元 Z 向速度都小于零,即每个单元的法向速度矢量均向外,达到了正压密封效果。因此,在空气流动较大的环境下,基于曲线的正相关性,有必要根据实际情况选择较大的入口速度以确保正压效果。

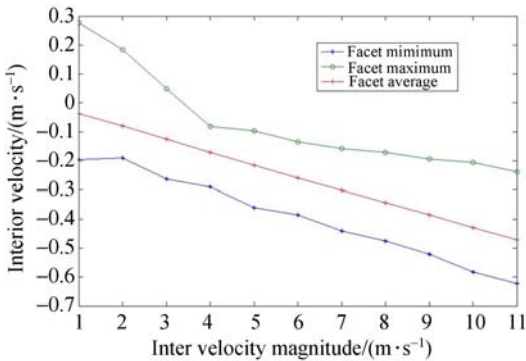


图 3 监测面 Z 方向速度随入口速度变化

Fig. 3 Interior velocity in Z direction vary with inlet velocity

图 4 所示为 $v=10 \text{ m/s}$ 时的流线图,可以看到内部洁净气流进入出口通道,且在次镜的阻挡下向壁面运动,又经过壁面的碰撞向中间运动,然后和反方向的外部气流交汇,形成了 2 个漩涡,最终从中间部分流出。虽然内部气流进入出口通道并且碰撞次镜后速度下降较多,但是由于气流的不可压缩和外部漩涡的作用,内部洁净气流将外部空气阻挡在了监测面以外。图 5 所示为 $v=10 \text{ m/s}$ 时监测面 Z 方向速度等值线图,等值线基本呈同心圆分布,并且速度分布为边缘大、中心小,这是因为稳定的气流速度面碰撞次镜后,还没有经过壁面的再次碰撞。另外,此时监测面每个单元法向速度均小于零,可达到正压密封的目的。

3.3 正压流场对激光传输的影响分析

正压流场对激光传输的影响主要体现在流体折射率的非均匀分布上,气体介质折射率的常用计算公式为^[17]:

$$n=1+[0.775(1+0.006\lambda^{-2})\frac{p}{T}+0.1126\frac{e}{T}]\times 10^{-4}, \quad (2)$$

式中: λ 为激光波长(μm), p 为气体压强(Pa), T 为温度(K), e 为与湿度有关的水气压(Pa)。

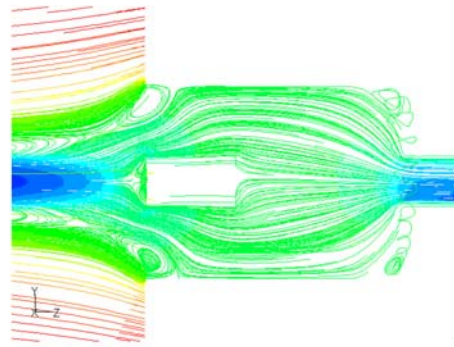


图 4 中心截面的流线图

Fig. 4 Path lines of center face

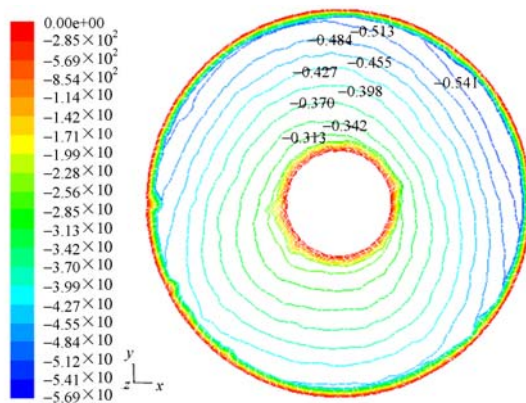


图 5 监测面 Z 方向速度等值线图

Fig. 5 Contours of interior velocity in Z direction

在通道内的杂质气体被排净后,通道内充满净化后的干燥洁净空气,水气压变化较小,同时气体吸热系数大大减小,而且通风对于气体热效应有明显的削弱作用^[5-6],因此激光加热气体产生的温升较小,小于 1 K。在流场速度较低的情况下(一般认为 $M_a < 0.3$),气体的总压强可近似表示为:

$$p_t = p_s + \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (3)$$

其中: p_s 表示静压, ρ 为气体密度, v 为气体速度。图 6 所示为监测面相对于入口的静压和总压损失,可以看到 2 条曲线都是正相关的, $v=11 \text{ m/s}$ 时总压的最大损失为 248.80 Pa。带入式(2)中,假设波长为 $10.6 \mu\text{m}$,温度为室温 293.15 K(20 °C),此时折射率的变化 Δn 的数量级为 10^{-7} 。另外,可以看出通道内的压力变化是分段的,整个通道中平均的变化量还要小很多,由此在长度为 6 m 的内通道中引起的光程差约为: $L \times \Delta n \approx 1 \mu\text{m}$ 。由于吹入内通道的正压气流速度比较低,这

种不均匀性带来的折射率变化较小,对于长波激光来说,这种影响是可以接受的。

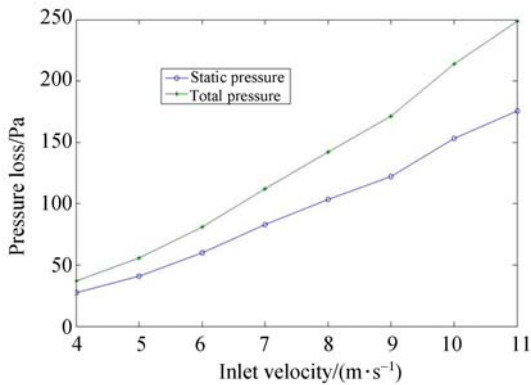


图 6 压力损失曲线
Fig. 6 Curves of pressure loss

4 正压通风实验

为了验证正压通风密封系统的有效性和防护性能,进行了相应的实验研究,验证系统在空气流动为六级风环境下的正压效果,图 7 所示为正压通风系统实验平台。实验过程中,特种净化风机持续向通道中送入净化后的干燥洁净空气,使之充满内通道,然后用风扇模拟六级风的空气流动,将热球式风速仪的测杆置于内通道监测面处,测点位置如图 8 所示,采用多次测量求平均值的方法,得到如表 1 所示的监测面的速度分布,图 9 所示为通风前后气体的湿度变化。将表 1 中实验数据与图 3、图 5 所示仿真结果对比发现,实验测得

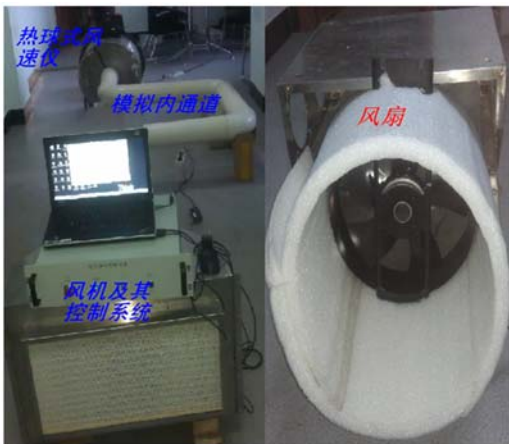


图 7 正压通风实验平台
Fig. 7 Platform of positive pressure ventilation experiment

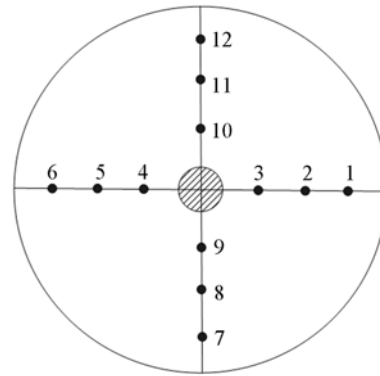


图 8 出口面风速测点位置
Fig. 8 Measuring points for wind velocities on outlet

的平均速度比仿真结果稍大,而速度分布都是边缘值大中间值小,整体速度值要比仿真结果大。

表 1 出口面的风速测量值

Tab. 1 Measuring results of wind velocities on outlet (m/s)

位置 次数	1	2	3	4	5	6
1	0.64	0.54	0.48	0.46	0.54	0.62
2	0.56	0.48	0.51	0.49	0.58	0.64
3	0.58	0.52	0.46	0.54	0.61	0.68
平均	0.596	0.513	0.483	0.496	0.576	0.646
	7	8	9	10	11	12
1	0.83	0.66	0.58	0.59	0.86	0.94
2	0.86	0.71	0.56	0.66	0.83	0.88
3	0.85	0.72	0.62	0.61	0.80	0.90
平均	0.846	0.696	0.586	0.620	0.830	0.906
面平均	0.643					

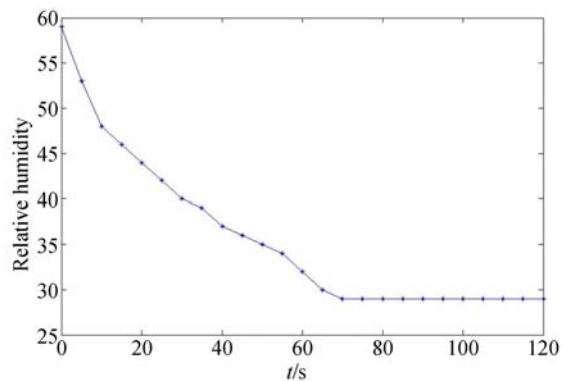


图 9 出口气体相对湿度随时间变化
Fig. 9 Relative humidity on outlet varies with time

产生这个结果的原因,一是实验中风扇模拟

的空气流动要经过一段距离才能到达内通道,这个过程中速度和能量有所减小,不能完全达到仿真中设置的边界条件;二是风扇产生的空气流动是旋转前进的,而不是仿真中设置的垂直入射。但是,总体来说,风机送入的净化空气在监测面保持有一定的风速,形成了内部正压,说明内通道正压通风密封方法可行。图9所示为出口处气体的相对湿度变化,开始时测量的是室内空气的湿度,相对湿度约为59%,至送风达到稳定状态时,测得是通道内净化空气的湿度,相对湿度下降至29%。可以看出,风机送入的净化空气将原来的空气排出了通道,使通道内充满了干燥洁净的净化空气,达到了最初的设计要求。

5 结 论

针对大口径宽波段激光发射内通道的防尘除

湿问题,本文提出了内通道正压通风密封方法。介绍了它的工作原理,分两种情况对内通道的正压通风流场进行了数值模拟。结果表明,在空气基本不流动或流动较小的环境下,正压设备以较小的速度送入净化空气就可以实现正压。在空气流动较大的环境下,正压设备以较大的速度送入净化空气也可以将外界空气抵挡在要求的截面,从而使内通道中充满干燥洁净空气,达到正压密封的目的。对于 $10.6\ \mu\text{m}$ 的长波激光,根据压力变化估计得到通道内的折射率变化在 10^{-7} 量级,引起的光程差约为 $1\ \mu\text{m}$,这在应用中是可以接受的。最后,正压通风实验表明,虽然监测面的速度值比仿真结果稍大,但是速度分布相同,都是边缘值大中间值小,并且洁净气流在监测面保持有 $0.64\ \text{m/s}$ 的正压速度,能阻挡外界空气向内通道扩散,洁净空气的相对湿度从59%降至了29%,基本达到了发射通道防尘除湿的密封设计要求。

参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4):327-336.
ZHUANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):327-336. (in Chinese)
- [2] BELY P. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*[M]. US:Springer, 2003.
- [3] 沈娜,张祥金,郭婧. 水雾对激光引信的衰减[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4):864-869.
SHEN N, ZHANG X J, GUO J. Attenuation of laser fuse through fog [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4):864-869. (in Chinese)
- [4] 冯峰,贺少勃,袁晓东,等. 污染物致光学元件损伤特性研究进展[J]. 激光与红外, 2012, 42(10):1098-1102.
FENG F, HE SH B, YUAN X D, *et al.*. Progress of study of damage characteristics caused by pollutants to optical components[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(10): 1098-1102. (in Chinese)
- [5] 孙超,王红霞,傅关新,等. 雾对激光的衰减特性研究[J]. 光散射学报, 2011, 23(3): 201-205.
SUN CH, WANG H X, FU G X, *et al.*. Study of the attenuation characteristics of the laser transmitting in fog[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2011, 23(3): 201-205. (in Chinese)
- [6] 肖韶荣,汪坤,刘娟. 大气气溶胶浓度检测及检测系统设计[J]. 中国光学, 2012, 4(6): 633-638.
XIAO SH R, WANG K, LIU J. Detection of atmospheric aerosol concentration and detection system design[J]. *Chinese Optics*, 2012, 4(6): 633-638. (in Chinese)
- [7] 阴俊燕,尹福昌,陈明,等. 影响激光大气传输因素分析[J]. 红外与激光工程, 2009(S3):399-402.
YIN J Y, YI F CH, CHEN M, *et al.*. Impact on laser transmission in atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009 (S3): 399-402. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 柳建,王世庆,金刚,等. 吹气抑制气体热效应时管道结构对光传输的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 391-393.
LIU J, WANG SH Q, JIN G, *et al.*. Effect of tube structure on beam propagation when depressing thermal effect by blowing[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3): 391-393. (in Chinese)

- [10] 柳建,李树民,金刚,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,2005,17(2):164-168.
LIU J, LI SH M, JIN G, *et al.*. Influence of blowing non-absorbing gas on beam propagation through Z-shape tube [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(2):164-168. (in Chinese)
- [11] 孙运强,刁锋杰,陈洪斌,等.内通道气帘的设计与分析[J].激光与光电子学进展,2011,48(5):051404.
SUN Y Q, XI F J, CHEN H B, *et al.*. Design and analysis on gas curtain of beam path indoor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(5):051404. (in Chinese)
- [12] 孙运强.激光内通道传输的气体热效应研究[D].长沙:国防科学技术大学,2011.
SUN Y Q. *Study on the thermal blooming of beam propagation in the inner channel* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 钱彥,杜洪兵.大功率二氧化碳激光器窗口材料的选择与发展[J].新材料产业,2007(6):63-68.
QIAN X, DU H B. Selection and development of window materials for high-power carbon dioxide laser [J]. *Advanced Materials Industry*, 2007(6):63-68. (in Chinese)
- [14] 冯志庆,白兰,张增宝,等.高能激光反射镜热变形补偿[J].光学精密工程,2010,18(8):1781-1787.
FENG ZH Q, BAI L, ZHANG Z B, *et al.*. Thermal deformation compensation of high-energy laser mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1781-1787. (in Chinese)
- [15] 刘巨,董得义,辛宏伟,等.大口径反射镜组件的温度适应性[J].光学精密工程,2013,21(12):3169-3175.
LIU J, DONG D Y, XIN H W, *et al.*. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3169-3175. (in Chinese)
- [16] APOLLONOV V V. 用于高功率激光器的光学元件[J].中国光学,2013,6(1):1-8.
APOLLONOV V V. Optics for high power lasers [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1):1-8. (in Chinese)
- [17] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.
SONG ZH F. *Applied Atmospheric Optics Foundation*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990. (in Chinese)

作者简介:



陈文韬(1988—),男,湖南湘潭人,博士研究生,2010年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学精密机械结构的研究。E-mail: chenwentaotao880229@163.com

导师简介:



高云国(1955—),男,山东乳山人,研究员,博士生导师,1982年于哈尔滨科技大学获得学士学位,1991年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电仪器总体设计的研究。E-mail: gaoyg_gjs@163.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)