

大口径宽波段激光发射通道的防尘方法

陈文韬^{1,2}, 高云国¹, 邵帅¹, 刘旭堂^{1,2}, 孙毅^{1,2}

(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 100049)

摘要: 针对大口径宽波段激光发射通道密封防护较难的问题, 提出了正压净化通风密封方法。该方法利用送入内通道的干燥洁净的净化气流, 排出原有空气并充满内通道, 基于正压原理阻挡外界空气和微粒, 实现发射通道的密封。借助计算流体力学软件 Fluent 对激光发射内通道的正压通风流场进行了连续相和离散相的数值模拟, 发现正压通风方法形成的正压净化气流不仅可以阻挡外界空气, 而且在小于 $4.71\text{E}-3 \text{ kg/m}^3$ 的颗粒浓度范围内, 净化气流对空气中各种粒径的尘埃颗粒也起到很大阻挡作用。另外, 通过分析流场的气体折射率的非均匀分布发现, 对于 $0.8\sim 10.6 \mu\text{m}$ 波段范围的激光, 正压通风引起的光程差约为 $0.32 \mu\text{m}$ 。正压通风实验的测量结果显示, 颗粒浓度与仿真曲线变化趋势基本一致, 证明了正压通风方法的有效性。

关键词: 正压密封; 数值模拟; 大口径宽波段; 激光发射通道

中图分类号: O351.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2918-08

Dustproof method for large-diameter and wide-band laser emission pipe

Chen Wentao^{1,2}, Gao Yunguo¹, Shao Shuai¹, Liu Xutang^{1,2}, Sun Yi^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In view of the problem that the seal protection for a laser emission system with large-diameter and wide-band is very difficult, the purification positive pressure ventilation seal method has been put forward. This method was to achieve the purpose of sealing by exhausting the original air and making the pipe full of purified and dry and clean air, so the air and particles from outside will be resisted based on the positive pressure principle. For the flow field of the positive pressure ventilation in laser emission pipe, the numerical simulation of the continuous phase and discrete phase has been made by the CFD software-Fluent, found that the purified positive pressure airflow formed by the positive pressure ventilation could resist the air backflow from outside, but also made a barrier function for the dust particle with kinds of sizes in the air, when the concentration was less than $4.71\text{E}-3 \text{ kg/m}^3$. In addition, this paper found that the positive pressure ventilation flow caused a $0.32 \mu\text{m}$ optical path difference when

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械研究所三期创新工程(057X22C050)

作者简介: 陈文韬(1988-), 男, 博士生, 主要从事光学精密仪器方面的研究。Email: cw880229@163.com

导师简介: 高云国(1955-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电仪器总体设计方面的研究。Email: gaoyunguo@163.com

laser's band was within 0.8 –10.6 μm , based on the analysis of refractive index in the pipe. Measurement results from the positive pressure ventilation experiments show that trends of vary of particle concentration and simulation curve are basically consistent, which demonstrates the effectiveness of the method of positive pressure ventilation.

Key words: positive pressure seal; numerical simulation; large-diameter and wide-band; laser emission pipe

0 引言

光学元件的破坏是限制高功率激光系统发展的主要问题,而光学表面污染是导致光学元件破坏的重要因素之一。光学表面污染通常可以分为分子污染和颗粒污染,分子污染主要来源于环境中水分等物质的冷凝,颗粒污染主要是灰尘颗粒、短纤维和冷凝物质等颗粒物的沉积。在激光发射系统中,只要这些分子和颗粒散布在激光发射内通道中,就会容易发生光学表面污染。而光照射到污染的光学表面上时,会影响光学表面的透射和反射,而且,光照射到非均匀介质还会引起散射^[1]。同时这些分子和粒子也会增强内通道的气体热效应并且引起激光散射,严重影响激光传输质量和能量^[2-3]。因此,为了提高激光发射系统的性能,必须考虑内通道的防尘除湿等密封设计。

随着计算机、自动控制和精密机械等领域技术的不断发展,特别是主动光学和自适应光学技术的成熟,激光发射系统的发展趋势是口径越来越大,分辨率越来越高,作用距离越来越远^[4]。但是,口径的增大虽然带来了远场单位面积能量增大等优势,但是增加了光机结构设计和装调检测的难度,同时也带来了内通道密封防护的问题。波段窄的激光发射系统可以在发射端口安装一个晶体透射窗口^[5],口径小的激光发射系统还可以采用气动窗口密封^[6]。然而,透射波段宽的大口径晶体窗口制备困难,价格昂贵,使得这些方法在大口径宽波段激光发射系统中难以实现^[7],因此要求笔者寻找更经济有效的内通道密封防护方法。

基于此,文中提出采用正压通风密封的方法来实现大口径宽波段激光发射内通道的密封防护。首先通过净化设备去除空气中的水分、灰尘以及某些酸性气体等,然后向内通道持续送入干燥洁净的净

化空气,排出原有的空气并使内通道充满净化空气,在发射端口保持一定的风速和压差形成正压气流,以此阻挡通道外的空气和其中的尘埃颗粒向内通道扩散,实现内通道的防尘除湿密封效果。文中借助现有的计算流体动力学软件 Fluent 对内通道的正压通风流场进行了数值模拟,并在此基础上采用 Discrete Phase Model, DPM 模型对尘埃颗粒在内通道中的运动轨迹进行了模拟和跟踪。最后,搭建了正压净化通风试验平台并进行了实验。

1 模型设置

为了模拟正压净化气流对外界空气及其尘埃颗粒的阻挡和密封作用,要考虑连续相的空气和离散相的尘埃颗粒的耦合作用。如果固体颗粒相在连续相中所占体积比浓度小于 10%,则把其视为离散相,可以采用 Fluent 中 DPM 模型来描述和追踪颗粒在连续相影响下的运动轨迹。采用 DPM 模型进行稳态计算时,一般先计算连续相直到收敛,然后设置颗粒射流源并初始化,最后进行连续相和颗粒相的耦合计算。而且,因为离散相非常稀薄,因而颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒对连续相的影响均不必考虑。因为连续相流动和离散相基本方程在很多文献中已经列出^[8-9],在此不做重点介绍。

文中以某大口径宽波段激光发射系统为例,研究其内通道正压通风流场,图 1 是其简化内通道示意图。设备的设计要求是在外界六级风(10.8~13.8 m/s)的条件下,正压通风系统送入的正压净化气流能阻挡外界空气和尘埃颗粒,实现正压密封作用。为了模拟外界空气向内通道的扩散,采用扩大区域法处理,在出口处添加一个延伸域,直径为 3 600 mm,高为 2 000 mm,经过实体建模以及划分网格后得到三维内通道仿真模型如图 2 所示。

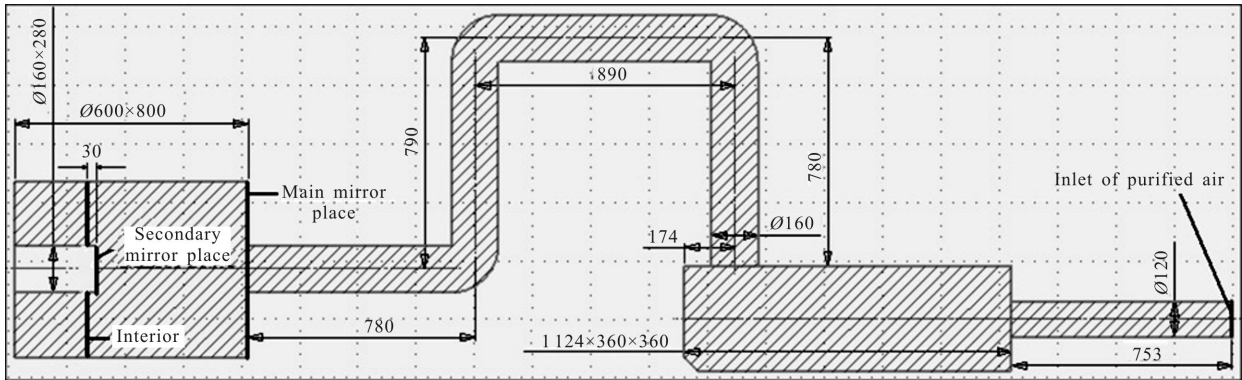


图 1 激光发射通道的示意图

Fig.1 Diagram of laser emission pipe

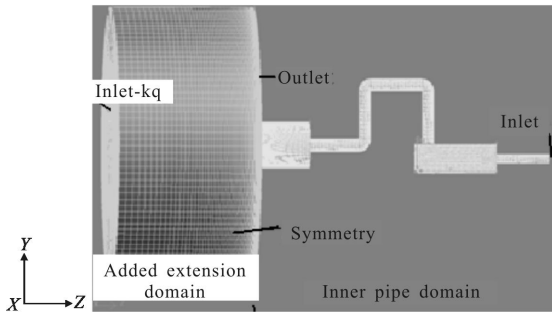


图 2 内通道仿真模型

Fig.2 Simulation model of the pipe

首先, 正压气流速度较低, 马赫数远小于 0.1, 流体可认为是不可压的。另外, 因为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。图 2 中, 设置 inlet-kq 为外界空气入口, 采用速度入口条件, 考虑到六级风垂直入射的极限情况, 速度值设为 13 m/s; 出口 outlet 采用压力出口条件, 压差为零; 壁面边界采用恒温无滑移条件, 湍流模型选定 Realize $k-\varepsilon$ 模型, 迭代计算采用 SIMPLE 压力-速度耦合算法; inlet 为正压净化气流入口, 采用速度入口条件。为了分析在外界六级风条件下, 正压净化气流在什么条件下才能实现正压效果, 笔者赋予 inlet 入口一系列的速度值 $V=1, 2, \dots, 12$ m/s, 分别进行模拟计算。

2 数值模拟和分析

2.1 连续相正压通风流场

在外界六级风条件下, 为了分析正压净化气流在多大的送风速度下才能实现正压效果, 笔者赋予净化空气入口 inlet 一系列的速度值 $V=1, 2, \dots, 12$ m/s,

分别进行模拟计算。结果发现, 在所有入口速度下, 外界空气都不能到达主镜位置, 净化气流送风速度越大外界空气进入内通道的距离越短, 因为气体的不可压缩, 这是符合常识的。在这种情况下, 将目标设定为阻挡外界空气到达次镜, 因此将监测面 (interior) 设在次镜向外 30 mm, 见图 1。

图 3 表示监测面法向速度随入口速度 V 的变化关系。可以看到, 当 $V < 4$ m/s 时, 监测面的法向速度有正有负, 即此时在监测面处有向内的气流, 不能完全抵挡外界空气扩散到监测面以内。当 $V \geq 4$ m/s 时, 监测面的法向速度都小于零, 即速度方向均是向外的, 此时净化气流在此保持了一定的风速和压差形成了正压密封。因此, 只考虑外界空气的话, 当净化气流的送风速度大于 4 m/s 时, 可以在监测面实现正压密封, 阻挡外界空气向内通道的扩散。

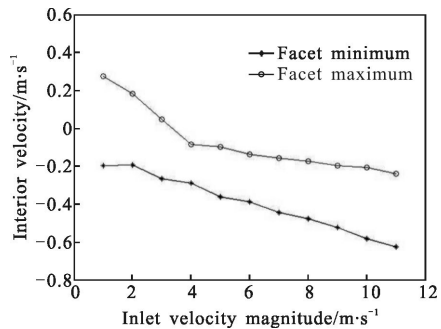


图 3 监测面法向速度与入口速度关系

Fig.3 Min-velocity of interior in normal direction vary with inlet velocity

2.2 颗粒相的模拟分析

2.2.1 模拟设置

从上节内容知道, 在一定条件下, 正压净化气流

能将外界空气完全阻挡在监测面以外,达到预计的正压效果。但是,这些都没有考虑外界空气中含有的尘埃颗粒,现在还有必要研究一下这些尘埃颗粒能否同时被阻挡。很明显的,空气中的尘埃颗粒的体积分数是非常小的,因此,可以采用 Fluent 的 DPM 模型追踪颗粒的运动轨迹,了解颗粒进入内通道的深度和截面的颗粒平均浓度等。

DPM 模型的设置主要是射流源的设置,为了与实验结果进行验证,颗粒射流源采用实验环境下的粒径分布(见表 1)。因为有多个直径的颗粒,所以文中采用 R-R(rosin-rammler)分布根据实际的工况来设定不同的粒径。首先,由表 1 的粒径分布,按照 R-R 分布的规则^[10],可以得到 Fluent 中的所需的 R-R 分布的设置参数:最大直径为 10.0 μm ,最小直径为 0.3 μm ,平均直径为 1.02 μm ,传播系数为 0.594,颗粒种类为 6 个。其次,颗粒材料的密度设置为 2 650 kg/m^3 ,初始速度假定与空气风速相同,为 13 m/s 。再次,颗粒射流源面本应该选择整个 inlet-kq 入口面,但是其网格太多会占用大量内存并且计算时间很长,另一方面,从连续相的计算结果发现,inlet-kq 面边缘区域出发的质点流线轨迹直接从出口面 outlet 流出,基本没有影响内通道出口区域的流场。因此,可以在 inlet-kq 面上截取一个小面来代替,根据连续相的结果最终选择以 inlet-kq 面圆心为中心的边长为 1 200 mm 的正方形面作为颗粒射流源面。最后,考虑重力和 Saffman 升力,在连续相流场的基础上继续离散相计算。

表 1 实验环境的颗粒测量数据

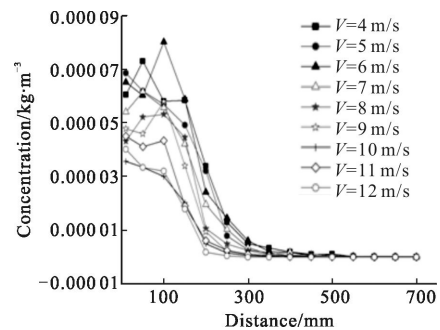
Tab.1 Measurements of particle in the laboratory

Particle diameter/ μm	Measurement/number
0.3	568 863
0.5	270 661
1.0	11 841
3.0	454
5.0	62
10.0	15

2.2.2 内通道颗粒浓度分布

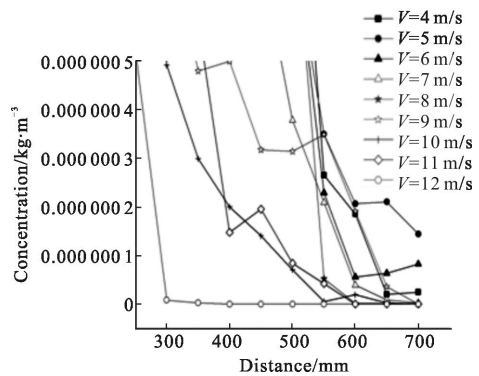
在 2.1 节的基础上,对大于 4 m/s 的送风速度的连续相流场继续进行离散相计算,得到各个送风速

度下外界空气中的尘埃颗粒进入内通道的情况,此时设定空气中颗粒浓度为 $1\text{E}-04 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。图 4 是各送风速度下内通道发射筒内各个截面的颗粒平均浓度曲线,横坐标表示截面距离内通道出口的距离,纵坐标表示该截面的颗粒平均浓度,其中图(b)是(a)中距离 250 mm 后的放大图。首先说明的是,横坐标的范围只观察到 700 mm,是因为内通道发射筒的长度为 800 mm,后面连接着主镜组件,而笔者的主要目的就是防止尘埃颗粒对主镜等光学元件产生影响,并且减少整个内通道中颗粒浓度,提高激光发射质量。从图 4 中可以看到,在总体的趋势上,在内通道出口



(a) 浓度曲线

(a) Curve of the concentration



(b) 图(a)的部分放大图

(b) Partial amplification of (a)

图 4 不同送风速度下各截面的颗粒平均浓度

Fig.4 Sections' average particle concentration with different inlet-velocity

附近颗粒平均浓度下降到了源面的一半左右,这是因为正压送风气流流出内通道时对外界空气的分流作用导致的;另外,图中一个明显的特征是,浓度最大值都是在距离 100 mm 左右,然后曲线呈急剧下降的趋势,到距离 250~300 mm 时平均浓度基本下降了

一个量级,这是因为内部流出的正压净化气流和外界挤入的空气在距离 100 mm 左右形成了漩涡;距离 400 mm 以后浓度再次下降了一个量级,到距离 600~700 mm 时平均浓度只有源面的万分之一甚至更低。另一方面,比较各个送风速度下的曲线可以发现,虽然曲线在距离 100 mm 以后都呈现急剧下降趋势,但是速度越大时,颗粒浓度下降越快;而且,从图(b)中看到,当速度较大,达到 9 m/s 以上时,平均浓度在距离 700 mm 之前变为了零;速度越大,浓度为零的截面距离越小,甚至 $V=12$ m/s 时,浓度在距离 400 mm 以前就变为了零。

从上面的计算结果和分析中,可以看到正压通风方法不仅可以利用正压净化气流将外界空气阻挡在监测面以外,而且同样可以对空气中各种粒径的尘埃颗粒起到阻挡作用,当送风速度较大时,内通道中颗粒平均浓度在进入内通道不久就会很快的急剧下降,最终将颗粒全部阻挡在了主镜之外,使得内通道中激光传输基本在干燥洁净的净化空气下进行,大大提高了激光的传输质量和能量。

2.2.3 环境颗粒浓度对内通道中颗粒分布的影响

因为设备的应用环境比较复杂,空气中尘埃颗粒的浓度也会有很大的区别,因此分析不同环境下,空气中颗粒浓度对正压通风内通道中的颗粒分布的影响是很有必要的。由表 1 计算得到实验室环境下颗粒的浓度为 $4.71\text{E}-8$ kg/m^3 ,而通过查阅文献得知国内最大的沙尘暴中心颗粒浓度为 $1.016\text{E}-3$ kg/m^3 ,因此文中选择了 4 个颗粒浓度: $4.71\text{E}-8$ kg/m^3 、 $4.71\text{E}-6$ kg/m^3 、 $4.71\text{E}-4$ kg/m^3 和 $4.71\text{E}-3$ kg/m^3 ,分别在送风速度为 $V=11$ m/s 时进行计算和比较分析。

图 5 是四种颗粒浓度下,颗粒在正压通风气流阻挡下进入内通道中的浓度分布。可以发现,在四种颗粒浓度下,虽然内通道中各截面浓度大小不同,但

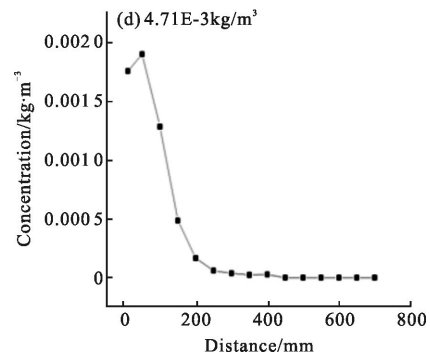
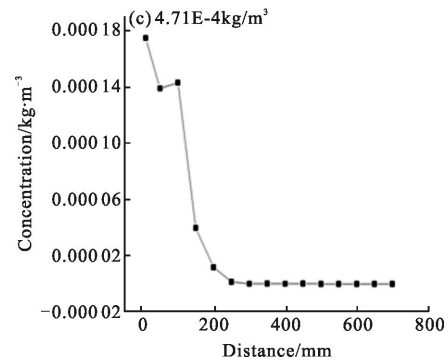
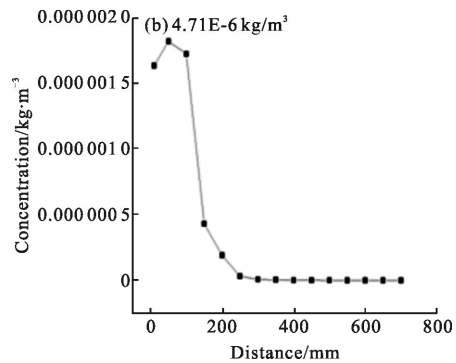
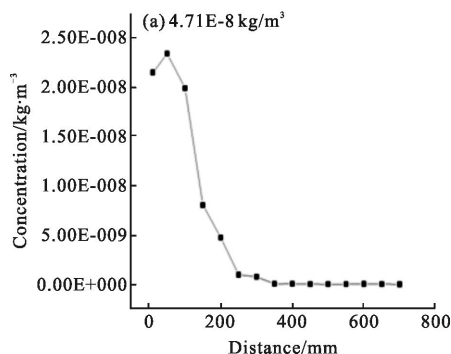


图 5 四种颗粒浓度下内通道中的颗粒分布

Fig.5 Particle distribution in the pipe with four concentration

是颗粒浓度的分布曲线是大致相同的。因此,可以认为在整个浓度范围内,因为颗粒相的体积分数都很小,正压气流对颗粒的阻挡作用和颗粒浓度大小关系不大。

3 正压流场对激光传输的影响

由第 2 节可知正压通风方法对大口径多波段激光发射通道的密封是简单有效的,此时内通道中激光传输基本在干燥洁净的净化空气下进行,大大提高了激光的传输质量和能量。但是,正压通风形成的内通道流场对激光传输的影响是必须要考虑的。一方面净化气流在内通道中形成了轴向气流,而且二

氧化碳和水等杂质的含量被大量降低,吸热系数大大降低,这些都能有效减小热效应,提高激光质量;但是,净化气流速度提高到一定程度后,因为湍流、抖动等因素,反而会影响光束质量及光束的稳定,主要体现在流场气体折射率产生了非均匀分布。

参考文献[11]介绍了气体介质折射率的常用计算公式:

$$n=1+\left[0.775(1+0.006\lambda^{-2})\frac{P}{T}+0.1126\frac{e}{T}\right]\times 10^{-6} \quad (1)$$

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 。从上文分析可知,因为吸热系数很小,通风产生的热交换也很快,在正压通风流场中 e 和 T 的变化很小,可认为是不变的,我们主要考虑压强 P 的变化。从仿真结果知道入口速度越大时,监测面相对于入口的总压损失越大,当 $V=12\text{ m/s}$ 时, ΔP 约为 243.5 Pa ,但是这些压强损失绝大部分是在反射镜腔体等各种局部装置处产生的局部压力损失,激光直线传输部分的压强损失小于 20 Pa 。现在假设 $\Delta P=20\text{ Pa}$, $T=293.15\text{ K}$, $\lambda=0.8\sim 10.6\ \mu\text{m}$,代入公式(1)得到 $\Delta n\approx 5.3\text{E}-08$,在长度为 6 m 的内通道中引起的光程差为: $L\times\Delta n\approx 0.32\ \mu\text{m}$ 。因此,在正压通风速度范围内,这种不均匀性带来的折射率变化和光程差较小,这种影响可以接受的。

4 正压通风实验

为了验证正压通风密封系统的正压效果,观察系统在空气流动为六级风的环境下对空气中尘埃颗粒的阻挡效能,文中进行了相应的实验研究,图6是按照图1搭建的系统实验平台。其中,特种净化系统通过超细防水玻璃纤维对水分和颗粒等进行高效过滤,其过滤效率为f7(en779)(80%~90%),尤其对于 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上的微粒过滤效率能到达99.995%;在相对湿度大于50%时,除湿效率大于50%。实验过程中,先开启特种净化系统并调节到最大风量,持续向内通道中送入净化后的干燥洁净空气,一方面尽量除去通道内壁上的灰尘,另一方面使内通道在实验开始前即充满净化空气。然后,先用大型风扇模拟六级风的空气流动,再调节特种净化系统到实验风量,等待一段时间使流场达到稳定。最后,采用热球式风速仪测量通道内的相对湿度,采用激光粒子计数器

测量环境空气和内通道截面上的粒子分布,采用多次测量求平均值的方法得到表2(采样时间:1 min,体积:2.83 L)。

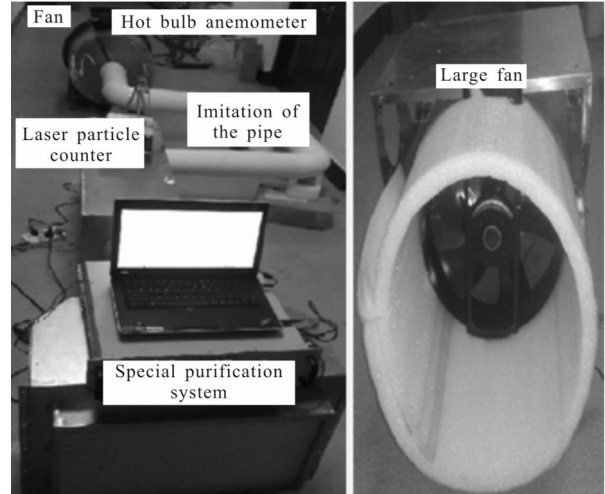


图 6 实验平台

Fig.6 Platform of the experiment

由表2得到图7所示的实验中内通道浓度分布曲线,可以看到,在内通道出口处颗粒浓度较空气中浓度 $4.71\text{E}-8\text{ kg/m}^3$ 下降约2/3,在距离 100 mm 附近范围内存在最大值,然后开始急剧下降,到距离 $600\sim 700\text{ mm}$ 时浓度下降了两个量级。上文提到实验室环境下颗粒浓度为 $4.71\text{E}-8\text{ kg/m}^3$,对比图5(a),仿真结果显示出口面浓度相比源面的浓度也下降约2/3,同样在距离 $50\sim 100\text{ mm}$ 内存在最大值,然后开始急剧下降,而且下降速度更快,程度更大,基本到距离 300 mm 以后就下降了几个量级,甚至到距离 $600\sim 700\text{ mm}$ 内浓度显示为零。这种不一致主要是因为,在实验中,管道内壁还是存在很多细小的灰尘,这从激光粒子计数器的测量数据上也可以看出来,因为粒径 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上的微粒过滤效率达到了净化系统的性能,而像灰尘这样粒径小于 $0.3\ \mu\text{m}$ 浓度偏高很多。因此图7所示的实验测得的浓度曲线会平缓一些,同时浓度显示偏高。另一方面,相对湿度测量结果也显示通道内空气的相对湿度比外界空气下降了约50%。总体来说,曲线说明了正压通风方法的有效性,正压气流可以阻挡绝大部分颗粒进入内通道,如果保证通道内壁的清洁,那么正压通风可以将颗粒阻挡在内通道主镜组件之外,达到设备的设计和使用要求。

表 2 通风实验的测量数据(单位:个)

Tab.2 Measurements of pressure ventilation experiment (Unit: number)

Distance/mm	Diameter/ μm						Concentration /(10^{-8} kg/m^3)	Average concentration /(10^{-8} kg/m^3)
	0.3	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0		
0	121 265	41 777	2 401	316	37	5	1.424	1.536
	181 586	65 757	2 050	108	20	6	1.303	
	251 237	96 039	3 192	163	32	8	1.881	
100	267 051	103 826	3 721	168	31	7	1.927	1.553
	169 225	62 397	2 065	102	17	5	1.192	
	147 685	50 674	2 729	324	37	5	1.540	
200	206 426	76 448	2 447	99	5	0	1.023	1.089
	224 419	85 191	2 801	110	6	0	1.138	
	200 714	73 941	2 318	95	13	2	1.135	
300	70 783	24 135	1 054	89	10	1	0.522	0.522
	78 320	23 023	1 235	101	8	0	0.448	
	98 100	29 531	960	43	7	2	0.555	
400	59 757	21 202	710	77	1	0	0.352	0.309
	49 441	16 500	752	57	5	0	0.309	
	47 718	17 333	237	13	3	1	0.265	
500	54 554	20 610	1 132	27	2	0	0.302	0.225
	44 741	14 927	433	17	0	0	0.194	
	44 015	14 658	395	8	0	0	0.178	
600	36 542	4 134	122	2	0	0	0.082	0.079
	33 425	3 112	110	2	1	0	0.078	
	35 321	3 413	126	3	0	0	0.077	
700	32 015	1 972	54	1	0	0	0.058	0.057
	31 530	2 154	45	0	0	0	0.057	
	31 264	2 045	42	1	0	0	0.057	

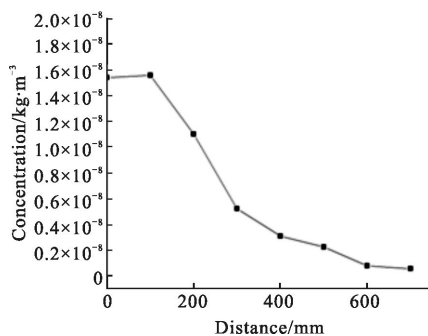


图 7 内通道颗粒浓度分布

Fig.7 Distribution of particle concentration in pipe

5 结论

针对大口径宽波段激光发射通道的密封防护较

难的问题,文中提出了内通道正压通风密封方法,介绍了它的工作原理,并分别对内通道的正压通风流场进行了连续相和离散相的数值模拟。连续相模拟结果表明,在外界空气流动为六级风的情况下,正压净化空气的送风速度大于 4 m/s 时可以实现对外界空气的正压密封。离散相模拟结果表明,正压净化气流同样可以对空气中各种粒径的尘埃颗粒起到阻挡作用,保证微粒不会对主镜等光学元件造成影响,送风速度越大时,颗粒浓度下降越快;比较分析发现,在小于 $4.71\text{E}-3\text{ kg/m}^3$ 的颗粒浓度范围内,正压净化气流对颗粒的阻挡作用和颗粒浓度大小关系不大。对于 $0.8\sim 10.6\ \mu\text{m}$ 波段范围的激光,根据压力变化估计了折射率变化在 10^{-8} 量级,正压通风引起的光

程差约为 $0.32\ \mu\text{m}$, 在应用中是可以接受的。最后, 正压通风实验验证了正压净化气流对外界空气及其中的微粒具有正压密封作用, 表明正压通风方法是一种经济有效的大口径多波段激光发射通道密封方法。

参考文献:

- [1] Feng Feng, He Shaobo, Yuan Xiaodong, et al. Progress of study of damage characteristics caused by pollutants to optical components [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(10): 1098–1102. (in Chinese)
- [2] Yin Junyan, Yi Fuchang, Chen Ming, et al. Impact on laser transmission in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 37(9): 399–402. (in Chinese)
- [3] Gong L, Wu Z S, Li Z J. Radiation forces exerted on redundant particles on optical surface by oblique incident and off-axis Gaussian laser beams [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 289–295.
- [4] Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327–336. (in Chinese)
- [5] Li Yanwei, Yang Hongbo, Cheng Zhifeng, et al. Thermal structural optical integrated design for optical window in aerial remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2102–2106. (in Chinese)
- [6] Sun Yunqiang. Study on the thermal blooming of beam propagation in the inner channel [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] Qian Xun, Du Hongbing. Selection and development of window materials for high-power carbon dioxide laser [J]. *Advanced Materials Industry*, 2007(6): 63–68. (in Chinese)
- [8] Yang Xichen, Li Li, Zhang Ye. Numerical simulation of temperature field of coaxial powder flow in laser cladding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3114–3120.
- [9] Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [10] Fluent Inc. Fluent Users' Guide[Z]. Fluent Inc, 2003.
- [11] Song Zhengfang. Applied Atmospheric Optics Foundation[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990. (in Chinese)