

内通道气帘的设计与分析

孙运强^{1,2,3} 习锋杰^{1,2,3} 陈洪斌¹ 刘顺发¹ 王继红¹ 许晓军² 陆启生²

¹ 中国科学院光电技术研究所光束控制国家重点实验室, 四川 成都 610209
² 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
³ 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 保持光传输通道内单一均匀的低吸收系数气体,对削弱内通道中的气体热效应有重要意义。采用气帘作为封装设备,对气帘的结构进行了设计。取气帘入口气体为氮气,出口气体为空气,借助现有计算流体力学软件 FLUENT 提供的组分输运模型,对气帘进行了数值模拟。结果表明,气帘入口段形成的平面射流可以阻挡外界空气的回流;在氮气与氧气相混合的区域内,尽管气体密度存在一定起伏,但气体密度变化的梯度方向与光传输方向基本是平行的,这种密度起伏只会对光场相位的活塞项产生影响,不会影响激光的远距离传输。最后,对气帘的性能进行了实验测试,实验结果表明,设计的气帘能够对管道内的气体进行密封,并避免了较大光程差的引入。

关键词 激光光学;气帘;气体热效应;内通道;数值仿真

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.051404

Design and Analysis on Gas Curtain of Beam Path Indoor

Sun Yunqiang^{1,2,3} Xi Fengjie^{1,2,3} Chen Hongbin¹ Liu Shunfa¹

Wang Jihong¹ Xu Xiaojun² Lu Qisheng²

¹ State Key Laboratory of Beam Control, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract It is greatly significant to weaken the thermal blooming of beam path indoor by keeping the tube filled with single specific gas of uniform density and low absorption. The gas curtain is applied as sealing device, and the structure of gas curtain is elaborately designed. The fluid characteristic of gas curtain with nitrogen-filled inlet and air-filled outlet is modeled and simulated by the species transport model which is provided by the computational fluid dynamic software FLUENT. The simulated results indicate that the planar jet flow can indeed block off the reflucence of the outside air. The gas density is undulant at the region with mixed nitrogen and air. However, the gradient direction of the gas density variation is parallel to the direction of beam transmission. This type of density variation only affects the piston item of optical phase, whereas it has no influence to the beam propagation. Finally, the experimental platform is established. The experimental results indicate that the designed gas curtain can seal the beam path indoor and reduce optical path difference.

Key words laser optics; gas curtain; thermal blooming; beam path indoor; numerical simulation

OCIS codes 140.6810; 010.1290; 010.3310

1 引言

激光在复杂的管道中传输时,管道中的气体会吸收激光能量,导致气体密度和折射率发生变化,进而影

收稿日期: 2010-12-08; 收到修改稿日期: 2011-01-17

基金项目: 中国科学院重点实验室预研基金(A09k002)资助课题。

作者简介: 孙运强(1978—),男,博士研究生,主要从事激光大气传输方面的研究。E-mail: sunyunqiang203@163.com

导师简介: 陈洪斌(1953—),男,博士,研究员,主要从事光学、光束控制技术等方面的研究。E-mail: chbin@ioe.ac.cn

响激光的远距离传输^[1~4]。为了削弱内通道中的气体热效应,人们提出了在管道注入低吸收系数气体的方法,取得了一定的成效^[5~7]。然而,对于复杂的管道结构,气流的非均匀性本身也会对光传输产生一定的影响^[8]。为了消除气体热效应以及气流不均匀性对光传输的影响,人们提出了抽真空置换低吸收系数气体的方法^[9]。由于管道中无气体流动,故不存在气流非均匀性的问题,对于低吸收系数的气体,气体的热效应也很小。但是该方案需要一定的封装设备,以阻挡管道内外不同气体成分之间的混合。考虑到传输通道内的激光功率密度相对较高,封装材料必须具有耐高温和高透过率的双重特性,固体材料很难满足其要求。因此,采用低吸收系数气体的气帘作为封装设备,将是一种非常有效的途径。

本文借助现有的流体力学分析软件 FLUENT,运用组分输运模型,对包含多种气体成分的气帘结构进行了设计,并对气体速度分布和气体所占组分比进行了相应的数值模拟。

2 气帘工作机理

为了阻挡通道内外不同气体成分之间由于扩散而产生的混合,设计了一种封装内通道入口和出口的气帘。利用平面射流的屏蔽作用,将通道内外压强相等的不同气体成分进行分离。从而达到减小气体吸收系数的目的,同时削弱气流不均匀性对光传输的影响。图 1 所示是内通道气帘的工作原理。

在气帘开始工作之前,首先封闭内通道的入口端和出口端。然后对通道进行抽真空,将通道内的空气置换低吸收系数气体。待通道内气体置换完毕,保持通道内外压强一致。此时,打开气帘入口,并注入与通道内相同气体成分的气体,保持气帘正常工作状态。最后,打开通道的入口端和出口端,气帘的封装过程完成。

与固体封装材料相比,气帘具有结构简单、成本低和高激光透过率的特点,并且不存在由于固体封装材料热变形而引入的附加相差。因此,运用气帘的方式对内通道进行密封,将是一种非常有效的内通道气体热效应消除方法。

3 理论模型

3.1 基本结构

对于内通道气帘,考虑到不同区域网格精度要求差别比较大,分两部分进行处理,如图 2,3 所示。第一部分是气帘入口段,即是平面射流形成段。入口段长度取为 220 mm,宽度取为 32 mm,高度取为 40 mm,如图 2 所示。为了形成较为均匀的平面流,在每个接口处加入导流片。第二部分是导引段,即气帘的主体部分,由长宽高分别为 220,32 和 220 mm 的长方体构成,如图 3 所示。为了防止出口端有回流进入通道内部,长方体外侧置一遮风罩。内通道管道直径为 120 mm,在与内通道匹配的圆形管道中置一内径为 100 mm 的圆形挡板。

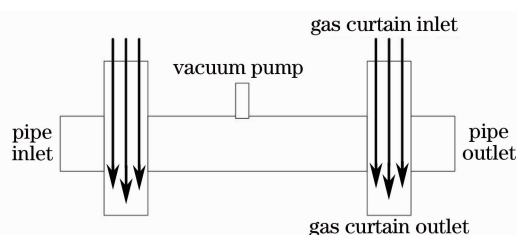


图 1 气帘的工作原理

Fig. 1 Principle of gas curtain

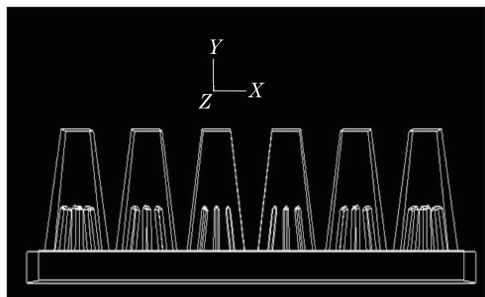


图 2 气帘入口段

Fig. 2 Inlet part of gas curtain

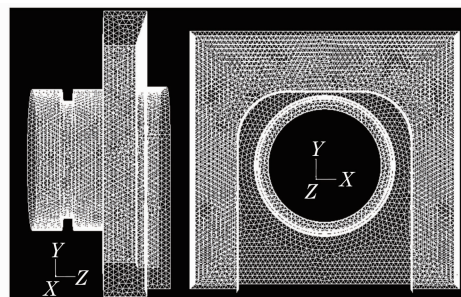


图 3 气帘主体部分

Fig. 3 Main part of gas curtain

3.2 计算条件

在内通道中,气流速度相对较低($v < 30$ m/s),气体的密度变化主要由温度变化引起,因此,可视流体为不可压缩流体。壁面取为恒温边界条件。尽管流体速度较低,但是射流形成的流体雷诺数($Re_i = 2bu/\nu$)远大于 30,其中 $2b$ 为射流出口宽度, u 为出口平均速度, ν 为流体的运动粘度。因此,可以认为是紊动流体。对于正常工作状态下的激光波长,气帘入口处气体成分为低吸收系数的气体,而出口处为空气。计算时要考虑不同气体成分间的扩散作用,本文采用组分输运模型进行处理。

3.3 数学模型

根据紊动射流的基本特性,对不可压缩流体的纳维-斯托克斯方程组进行时均处理,即将瞬时量分解为时均量和脉动量之和。可得表征紊流时均运动的雷诺兹方程组^[10]。连续方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

时均运动方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + F_i, \quad (2)$$

式中 $i, j = 1, 2, 3$, u_i 为时均速度分量, u'_i 为脉动速度分量, p 为时均压强, F_i 为单位质量体积力的时均值; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为脉动速度的二阶相关项,也称为雷诺兹或者紊动应力项。

对于紊动应力项的处理,也即湍流模型的选取,本文采用标准的 $K-\epsilon$ 模型。对应的紊动动能 K 方程为^[10]

$$\frac{\partial K}{\partial t} + u_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_K} + \nu \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P - \epsilon, \quad (3)$$

紊动动能耗散率 ϵ 方程为

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} P - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K}, \quad (4)$$

式中 $\nu_t = C_\mu K^2/\epsilon$ 为涡粘度, $\sigma_K, \sigma_\epsilon$ 分别为 K 方程和 ϵ 方程的紊流普朗特数, P 为紊动动能产生项, $C_\mu, C_{\epsilon 1}$ 和 $C_{\epsilon 2}$ 为经验常数。文中各参数的取值为: $C_\mu = 0.08, C_{\epsilon 1} = 1.43, C_{\epsilon 2} = 1.91, \sigma_K = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

设计气帘的目的在于阻止管道内外不同气体成分之间的相互混合。因此,管道内外气体成分是不同的,在进行仿真分析时,要考虑组分输运模型。对于组分输运模型,在 FLUENT 软件中,通过求解第 i 组分的对流扩散方程,来计算每个组元的当地质量分数 Y_i ,对流扩散方程可表示为^[11]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \nu Y_i) = -\nabla J_i + S_i, \quad (5)$$

式中 J_i 是由于存在浓度梯度第 i 组分所产生的扩散流量, S_i 是扩散项加上用户定义的源项得到的净生成速率。

质量扩散流量可表示为

$$J_i = -(\rho D_{i,m} + \mu_t / S_{ct}) \nabla Y_i, \quad (6)$$

式中 S_{ct} 是湍流施密特数 ($S_{ct} = \mu_t / (\rho D_i)$, 其中 μ_t 是湍流黏度, D_i 是湍流扩散率)。

4 数值模拟及结果分析

运用 GAMBIT 默认的网格函数,对气帘结构模型进行网格划分。划分体网格时,所有的体采用 Tgrid 方法生成四面体非结构化网格。对气帘入口段,最小网格尺寸约为 0.4 mm,最大网格尺寸约为 1.4 mm。对于气帘主体部分,最小网格尺寸约为 1.1 mm,最大网格尺寸约为 3.2 mm。

为了分析气帘的作用效果,运用 FLUENT 软件分别对气帘入口段和气帘主体部分进行了数值模拟。

4.1 气帘入口段流场模拟与分析

对气帘入口段,入口边界采用速度边界条件,速度均匀分布;出口边界采用压力边界条件,压差为零。壁面边界采用恒温边界条件。因气帘入口段不存在气体混杂现象,数值计算时采用单一气体介质模型。运用压力修正的半隐式(SIMPLE)算法求解控制方程。计算结果如图 4,5 所示。

图 4 是气帘入口段数值计算的残差收敛曲线,横坐标表示迭代计算所采用的迭代步数,纵坐标表示归一

化流体参量(密度、速度、紊动动能以及紊动动能耗散率)的残差,从图4可以看出,迭代计算约400步后,各归一化流体参量的残差达到预定收敛阈值(1×10^{-3})。图5为气帘入口段 $z=0$ 截面上和出口截面上的流体速度分布。从模拟结果可以看出,气流由图5中的速度入口进入,通过导流片分流后,气流均匀性有了较大的改善。在出口截面上, p_1 位置处的速度约为 $v_1=2.7$ m/s, p_2 位置处的速度约为 $v_2=3$ m/s。因此,在出口处,气流速度分布基本上是均匀的,这可以为气帘主体部分提供较为均匀的入口速度边界条件。从结构模型可以看出,该气流注入方式不仅结构紧凑、简单,而且也便于工程实现。

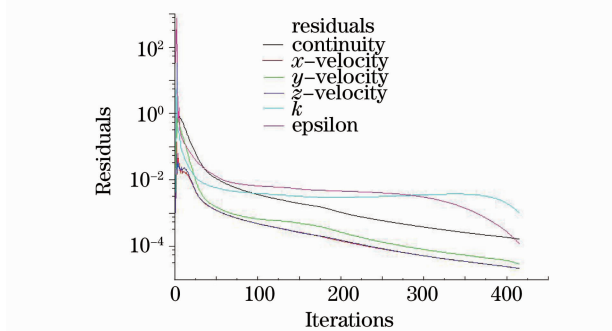


图4 气帘入口段数值计算残差收敛曲线

Fig. 4 Residual curves for the inlet part of gas curtain

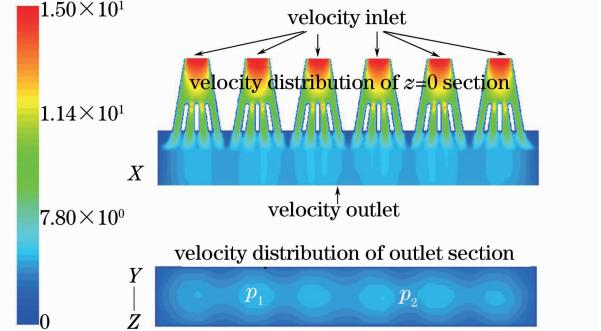


图5 气帘入口段流体速度分布

Fig. 5 Velocity distribution for the inlet part of gas curtain

4.2 气帘主体部分流场模拟与分析

对于气帘的主体部分,除了含有气帘入口段注入的低吸收系数气体外,在出口处,还存在其他气体成分,如空气。因此,在该部分进行流场模拟时,要考虑不同气体成分间的相互混合效应。针对只含氮气和氧气的混合气体,本文采用FLUENT软件提供的组分输运模型,对内通道气帘主体部分的流场进行了模拟。

与气帘入口段相接的端口,设置为速度入口边界条件,速度大小采用气帘入口段计算得到的出口速度。与内通道相接的端口,设置为压力入口边界条件,压差为零;对于气帘主体部分的出口,都设置为压力出口边界条件,压差为零。另外,所有的入口边界上,设置氮气所占质量分数为100%,氧气所占质量分数为零;所有的出口边界上,设置氮气所占质量分数为78%,氧气所占质量分数为22%。湍流模型同样采用标准的 $K-\epsilon$ 模型。壁面边界采用恒温边界条件。运用一阶迎风格式及SIMPLE算法进行求解。模拟结果如图6~9所示。

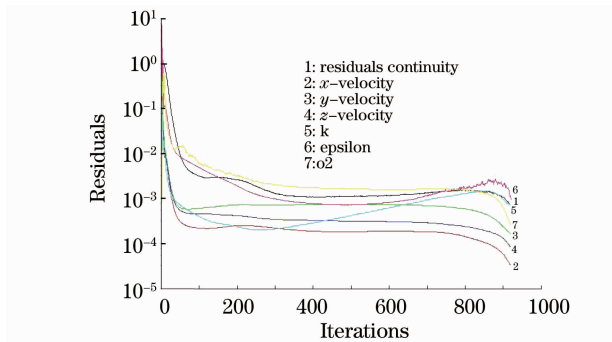


图6 气帘主体部分数值计算残差收敛曲线

Fig. 6 Residual curves for the main part of gas curtain

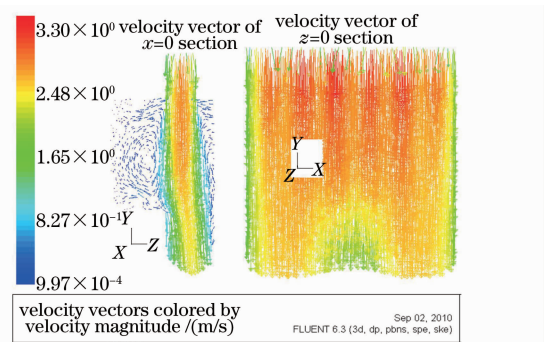


图7 气体的速度矢量分布

Fig. 7 Velocity vector distribution for the main part of gas curtain

图6是气帘主体部分数值计算残差收敛曲线,横坐标和纵坐标所表示的物理量与图4相同,对气帘主体部分的数值计算,迭代900步后,各归一化流体参量的残差达到预定收敛阈值(1×10^{-3})。图7为气帘主体部分 $x=0$ 截面和 $z=0$ 截面上的流体速度矢量分布。设计气帘的目的在于阻挡管道内外气体的混合。从模拟结果可以看出,入口段形成的平面射流可以阻挡外界空气的回流,尽管气体速度的分布不均匀,但是在气体速度较低的情况下,气体速度的非均匀分布不会改变气体的密度分布,因此不会对光传输产生影响。图8和图9分别为混合气体中氮气所占百分比和混合气体的密度分布。从图8中可以看出,通道内只包含氮气,空气只在出口处很小区域的边界层内。空气中除氮气外,绝大部分为氧气,因此,混合边界层内主要是氮气

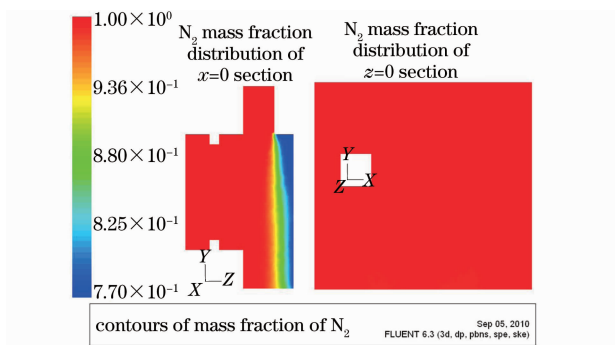


图 8 不同气体成分的质量分数

Fig. 8 Mass fraction of the different gas component

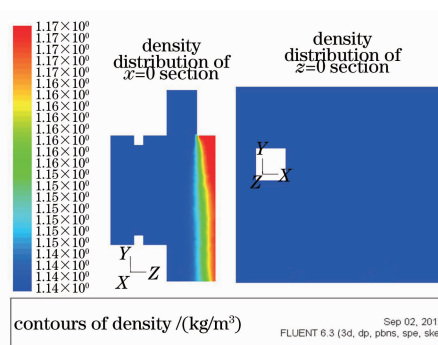


图 9 气体的密度分布

Fig. 9 Density distribution of the mixed gas

与氧气的混合。在边界层内氮气所占质量分数由 100% 减小至 78%。由于不同气体成分(主要是氮气和氧气)间存在密度差异,在混合区域存在一定的气体密度起伏。但从图 9 可以看出,气体密度变化的梯度方向与光传输方向(即管道轴线方向)基本是平行的。考虑到氮气与氧气之间的密度差也很小,因此,在光通过的区域,气体密度起伏引起的光程差也较小。从数值模拟的结果看,气帘的上述设计基本能够满足实际工程的需求。

5 气帘实验

为了验证气帘的密封性能和气流均匀性,将管道中抽真空充氮气,进行了相应的气帘实验研究。图 10 为气帘实验平台。实验过程中,首先将管道密封、抽真空;然后关闭真空泵,打开氮气供给阀,向通道内充氮气至一个大气压。打开气帘供气系统,使气帘处于正常工作状态,此时打开与气帘相接的通道窗口。最后对气流速度、气体湿度以及通道内气体密度不均匀引起的光程差(OPD)进行测量。速度传感器和湿度传感器

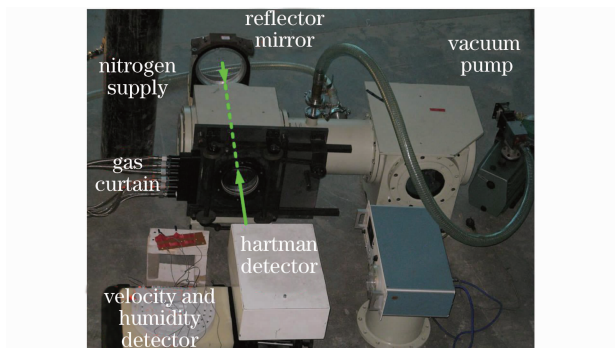


图 10 气帘实验平台

Fig. 10 Platform of the gas curtain experiment

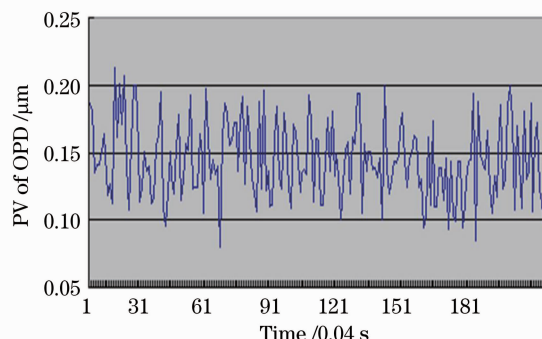


图 11 气帘诱导光程差的峰谷值随时间变化

Fig. 11 PV of OPD induced by gas curtain varies with time

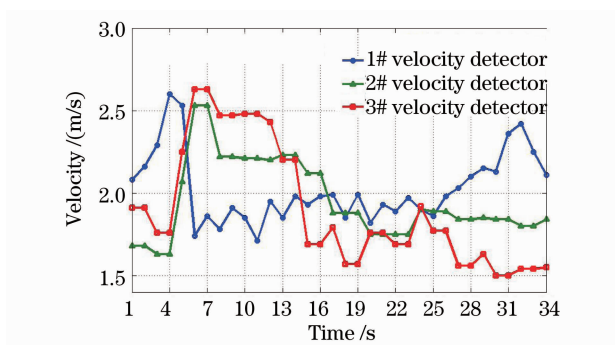


图 12 气帘横截面内的速度随时间变化

Fig. 12 Velocities vary with time

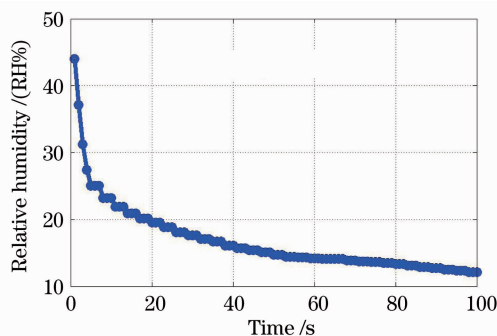


图 13 气体湿度随时间变化

Fig. 13 Humidity varies with time

摆放在通道出口处,光程差测量设备发射自准直光,经过反射镜反射回哈顿曼传感器进行测量。测量气帘诱导的光程差时,首先要进行标定,消除反射镜镜面以及系统固定相差。实验测量结果如图 11~13 所示。

从实验结果可以看出,气帘引起光程差的峰谷(PV)值小于 $0.2 \mu\text{m}$,而且随时间变化不明显。气帘横截面内的速度随时间有一定的变化,这与供气系统的气流稳定性以及速度传感器的摆放位置有关。气帘打开后,将湿度传感器放入通道内,开始时测量的是室内空气湿度,相对湿度约为 45,至稳定状态时,湿度传感器测量的将是通道内的湿度,相对湿度约为 12。从湿度传感器的测量结果可以看出,通道内外的气体是互不混合的,这也达到了最初的气帘设计要求。

6 结 论

内通道中的气体热效应严重影响着激光能量的远距离传输,降低通道内气体的吸收系数将有助于减小激光热晕效应。针对将管道抽真空置换低吸收系数气体的方法,本文对其中的关键部件气帘进行了设计,并借助现有的计算流体力学分析软件 FLUENT,对气帘进行了数值模拟。考虑到数值计算的效率和计算精度,将气帘分为两部分进行模拟。气帘入口段主要是生成气体速度较为均匀的平面射流;气帘主体部分则采用组分输运模型进行模拟,以气帘入口段的出口速度作为气帘主体部分的入口速度边界条件。模拟结果表明,气帘形成的平面射流可以阻挡外界空气流向内通道,从而保持光传输通道内单一均匀的氮气成分。另外,由于不同气体成分间会相互扩散,在氮气与空气中的氧气相混合的区域内,气体密度存在一定起伏,从而引起气体折射率的变化。但是,由扩散而引起的气体密度变化,其梯度方向与光传输方向基本是平行的,这种密度起伏引起的折射率变化只会对光场相位的活塞项产生影响,不会影响激光的远距离传输。实验结果也验证了该气帘的密封性能和光传输特性。

参 考 文 献

- 1 F. G. Gebhardt. Twenty-five years of thermal blooming- an overview [C]. *SPIE*, 1992, **1221**: 2~25
- 2 D. C. Smith. High-power laser propagation; thermal blooming[C]. *IEEE*, 1977, **65**(12): 1679~1714
- 3 B. Johnson. Thermal-blooming laboratory experiments[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*. , 1992, **15**(1): 151~169
- 4 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 895~899
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, **A29**(10): 895~899
- 5 Robert E. Kelly. Thermal blooming in axial pipe flow: the effects of beam shape and thermal conditions at the pipe wall [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18): 3037~3039
- 6 Gavrielides, Phillip Peterson. Time-dependent thermal blooming in axial pipe flow [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3359~3365
- 7 Liu Jian, Wang Shiqing, Jin Gang. 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
柳 建, 王世庆, 金 钢. 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
- 8 Liu Jian, Li Shumin, Jin Gang. Influence on beam propagation through Z-shape tube of blowing non-absorbing gas [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(2): 164~168
柳 建, 李树民, 金 钢. 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
- 9 C. McClellan. Optical effects of gas flow through an optical train; an experimental determination [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(23): 3984~3989
- 10 Liu Peiqing. *The Theory of Free Turbulence Jet Flow* [M]. Beijing: Beijing Aviation and Spaceflight University Press, 2008
刘沛清. *自由紊动射流理论*[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008
- 11 Wen Zheng, Shi Liangchen, Ren Yiru. *FLUENT Fluid Computational Applications Tutorial* [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2009
温 正, 石良辰, 任毅如. *FLUENT 流体计算应用教程*[M]. 北京:清华大学出版社, 2009