

高功率激光装置中空间滤波器洁净控制的优化设计

李养帅^{1,2} 朱健强¹ 庞向阳¹ 焦翔^{1,2} 吴永忠^{1,2}

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用计算流体力学(CFD)技术,对有机污染物在空间滤波器内的扩散情况进行了数值模拟,得到了在不同洁净控制设计方案下,有机污染物在空间滤波器真空系统中随扩散时间的浓度分布情况,而后在优选设计的基础上对模型进一步优化,最终减少了有机污染物对空间滤波器内光学元器件的污染,对于实现高功率激光装置的高效、精密运行具有重要意义。

关键词 光学设计;空间滤波器;优化设计;计算流体力学;有机物污染

中图分类号 TN202 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s102015

Optimum Design of Cleaning Control of Spatial Filter in High Power Laser System

Li Yangshuai^{1,2} Zhu Jianqiang¹ Pang Xiangyang¹ Jiao Xiang^{1,2} Wu Yongzhong^{1,2}

¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By simulating the diffusion of organic contaminants in the spatial filter with the method of computational fluid dynamics(CFD), the concentration distribution of organic contaminants, in different diffusion times and design models, are got in the spatial filter. Then the model is further optimized on the basis of a preferred design. Ultimately the chance that the organic contaminating optical components is reduced. It has important significance to realize the high power laser system efficient and precise operating.

Key words optical design spatial filter; optimal design; computational fluid dynamics; organic contaminant

OCIS codes 340.4600;220.4830

1 引 言

空间滤波器的结构比较简单,即由一对共焦的正透镜和由机械运动结构支撑的焦面上的滤波小孔所组成^[1],是大型惯性约束聚变激光装置不可或缺的重要组成部分和高效、精密运行的重要保证。但随着高功率激光装置输出能力的不断提升,空间滤波器焦面和共焦透镜上需要承担的激光功率密度越来越高,而污染物粘附在透镜表面,当激光通过透镜表面时,可诱发透镜损伤^[2-5],所以,这就对该系统的洁净度提出了越来越高的要求。

常用的控制污染物的办法是空间滤波器采用密闭真空结构、清洁空间滤波器内壁管道、选用低油真空设备和低油滤波孔支撑调节结构等,但是在长时间使用后,发现透镜表面仍有污染物。经分析发现,主要是有机污染物,如润滑脂、芳香类的化合物和硅树脂等^[6-8]。因此优化设计该真空系统的结构对于提高空间滤波器的洁净度很有必要。

收稿日期: 2014-12-01; **收到修改稿日期:** 2015-01-06

基金项目: 中以高功率激光技术国际合作研究(2010DFB70490)

作者简介: 李养帅(1986—),男,博士研究生,主要从事光学机械设计与制造工艺方面的研究。E-mail:yshli@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,主要从事激光器件设计,光学精密机械设计与制造工艺等方面的研究。

E-mail:jqzhu@mail.shenc.ac.cn

本文通过构造流场改变污染物扩散轨迹和利用计算流体动力学(CFD)技术分析不同情况下有机污染物在空间过滤器真空系统内扩散和分布情况,获得了一种控制有机物污染的方法,最终实现了空间过滤器洁净控制的优化设计。

2 模型建立

采用的洁净控制方法是低压抽排法,主要为在原来密闭的真空装置某一位置上加装一抽排系统,采用更低的压力进行抽排,构造流场,改变污染物扩散轨迹,实现污染物的定向排除,从而减少污染物对透镜的污染。

利用 CFD 进行数值计算和图像显示,是了解流场的重要手段,运用数值分析技术实现对流场基本物理量(如速度、压力、温度、浓度等)的分布以及流体轨迹的预测是现在流体研究的主流^[9]。利用 CFD 的前处理软件 Gambit 进行几何建模和网格划分,Fluent 进行计算求解,后处理软件 Tecplot 进行图形的编辑和数据的可视化处理。

2.1 计算模型

由于要了解污染物浓度的分布情况,二维模型能很好地满足这一点,所以采用二维模型。模型包括:压力入口,压力出口和壁面边界。由于甲苯具有较高的挥发性(在 293 K 时蒸汽压约为 2900 Pa)特点,所以选择甲苯作为有机污染物。为了简化模型,假设:1)支撑空间过滤器小孔的机械结构为污染源;2)污染源以甲苯达到饱和蒸汽压时的质量流量进行扩散;3)空间过滤器为以滤波小孔所在面为对称面的对称结构,选取一半进行模拟;4)壁面为光滑壁面,无滑移,甲苯与壁面接触时能量没有损失,无吸附,并且对称反射。

以原始模型图 1 为例,由 Gambit 2.4.6 进行几何建模和采用四边形结构进行网格划分,共划分为 57000 个网格,Fluent 进行求解。采用二阶迎风格式离散,压力基求解器、非稳态计算方式进行求解,模型为标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型,收敛的准则是质量残差和能量残差小于 10^{-5} ^[10-11]。

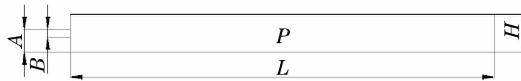


图 1 洁净控制系统原始模型

Fig. 1 Original model of cleanliness control system

2.2 边界条件及相关设置

原始洁净控制模型的边界条件如图 1 所示,边界 H 为透镜,设置为 Wall, 293.15 K;边界 B 为污染源,为质量流量入口,质量流量为 5.24×10^{-12} kg/s, 293.15 K;其余边界为用默认参数无滑移壁面边界,温度为 293.15 K;真空系统内部压力 P 为 0.01 Pa,温度为 293.15 K;其余参数均为默认参数; $L=1063$ mm, $H=94$ mm, $A=57$ mm, $B=20$ mm。

而采用低压抽排法后的洁净控制的模型如图 2 所示,主要是在图 1 的基础上添加一低压压力出口 M ,其位置分别位于位置 1 到位置 5。其中位置 1 到位置 5 沿着直线 L 均匀分布。其边界条件设置与原始洁净控制模型的边界条件设置基本相同,不同的是添加了一压力出口 M ,其压力为 0.001 Pa,温度同样为 293.15 K,其中 $M=63$ mm,流体为湍流。

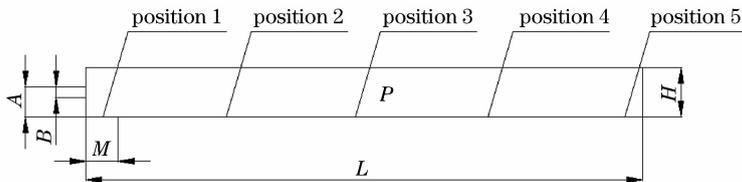


图 2 洁净控制系统抽排法模型

Fig. 2 Model of cleanliness control system using pumping method

2.3 控制方程

控制方程主要包括:流体分析基本方程、湍流流动控制方程和组分扩散方程,其中湍流流动控制方程选择的是标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型^[9]。

3 数值模拟结果及分析

通过以上模型及其设置,主要模拟了3种扩散时间下,洁净控制原始模型和采用五种抽排位置的抽排法模型下甲苯扩散情况及其浓度大小分布,因为主要是考虑减少污染物对透镜H(图1和图2)的污染,所以这里采用真空系统内甲苯浓度大小分布和透镜H处甲苯浓度大小分布两个标准来同时表征甲苯对透镜H的污染程度,即浓度越大,则对透镜污染越严重,反之,污染较小。

3.1 真空系统内污染物浓度分布

图3和图4分别是采用抽排法下五种抽排位置时真空系统内的甲苯浓度分布和原始真空系统内的甲苯浓度分布,由图3和图4可知,采用抽排法时真空系统内的甲苯浓度均低于原始真空系统的甲苯浓度分布;同一模型,不同扩散时间时,真空系统内的甲苯浓度不同,这是因为当甲苯的挥发量和抽排未达到平衡,随着扩散时间的变化,浓度分布不同;同种扩散时间,不同模型时,甲苯浓度也不同;五种抽排位置,在位置2、3和5处采用抽排法真空系统内甲苯浓度整体较低,其中采用位置2时抽排获得的真空系统内甲苯浓度整体最低。造成以上结果的原因如图5所示。

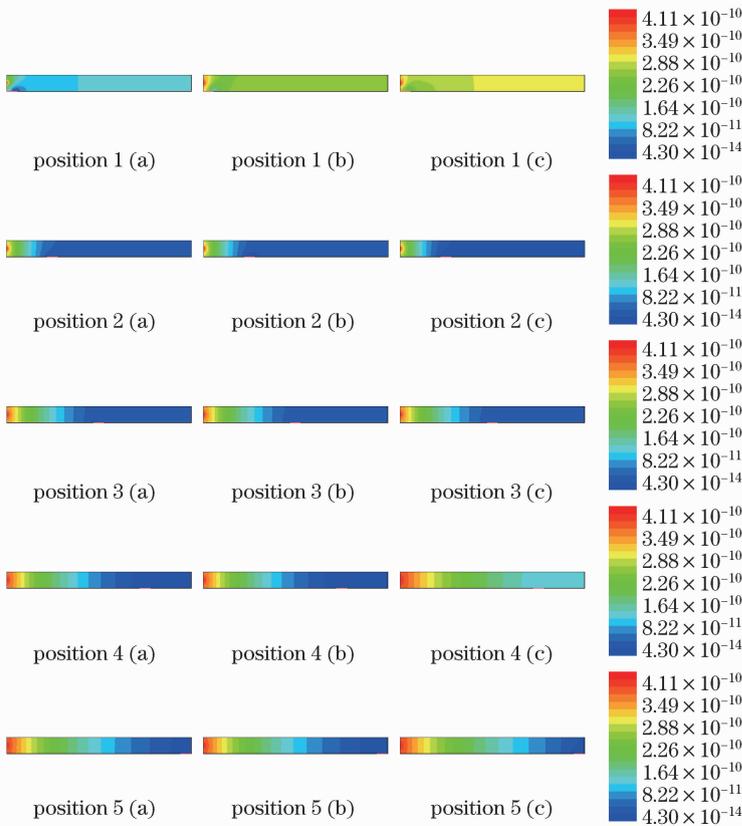


图3 抽排法真空系统内甲苯浓度分布.(a)、(b)、(c)对应的扩散时间分别为1、2、4 h

Fig.3 Concentration distribution of toluene in vacuum system using pumping method.

(a), (b), (c) are corresponding to the diffusion time of 1, 2, 4 h

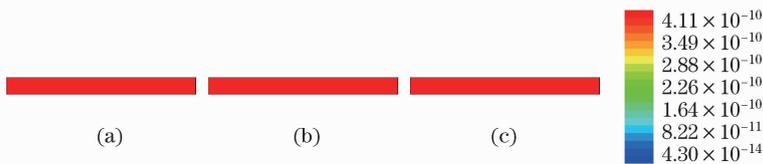


图4 原始真空系统内甲苯浓度分布。(a)、(b)、(c)对应的扩散时间分别为1、2、4 h

Fig.4 Concentration distribution of toluene in original vacuum system pumping method.

(a), (b), (c) are corresponding to the diffusion time of 1, 2, 4 h

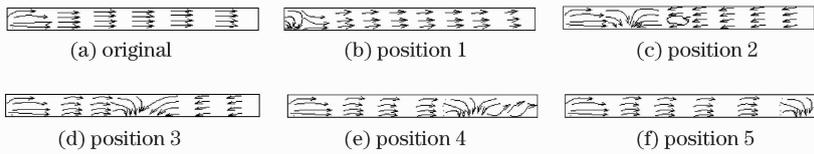


图 5 真空系统内甲苯速度流场简图

Fig. 5 Simplified diagram of velocity field of the toluene in vacuum system

图 5 为某时刻甲苯速度流场迹线图。由图 5(a)可知,未采用抽排时,甲苯自挥发源沿着管路向右侧透镜处扩散,而采用抽排法后,流场迹线就发生了改变,如图 5(b)~(b),均有向抽排位置流动趋势,所以大部分污染物沿着抽排位置的出口排出真空系统,尤其位置 2、位置 3 和位置 5 处抽排时,污染物迹线几乎是全部向抽排位置的出口运动,如图 5(c),(d)和(f),因而真空系统内污染物浓度较低。虽然图 5(c)中有少许涡流,但是影响不大。而在位置 1 和位置 5 进行抽排时,污染物除了流向抽排位置的出口外,部分还是经过真空管道,流向了远端的透镜,因而真空系统内很大一部分浓度相对较高。

3.2 透镜处污染物浓度分布

图 6 是甲苯在透镜处浓度取平均值后的分布情况,从图中可以看到,采用排气法的五种情况下的透镜处甲苯浓度均低于原始模型的情况。这是因为采用排气法构造了流场,改变了甲苯的扩散轨迹,并且经过压力出口排出了部分甲苯,所以导致真空系统中甲苯浓度降低,进而透镜处甲苯浓度也降低;在位置 2、3 和 5 处进行抽排气时,精密处甲苯浓度较低。这是因为在位置 2、3 和 5 处进行抽排时真空系统内的甲苯浓度如图 3 所示,靠近透镜端的真空系统中甲苯浓度均较低,因而透镜处甲苯浓度也较低。

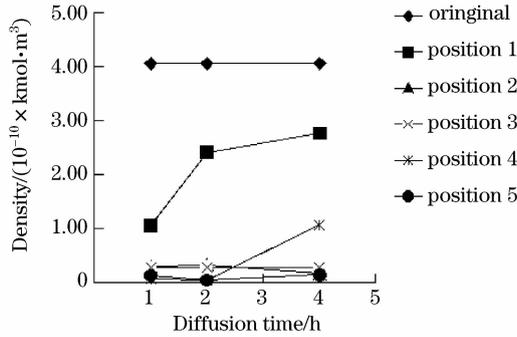


图 6 不同模型、不同扩散时间下透镜处甲苯浓度均值分布

Fig. 6 Average density of toluene near the lens under the conditions of different models and different diffusion time

4 模型的进一步优化和结果分析

通过对以上排气法模型和原始模型的模拟结果对比分析可知,在采用真空系统内甲苯浓度和透镜处甲苯浓度双重评价标准的情况下,采用位置 2 进行排气[单向(DP)]是一种较优的减少甲苯对透镜污染的方法。为了探求更优的降低甲苯对透镜污染的方法和真空系统结构,设想了两种模型和方法:低温排气法[单向(LT)]和双向排气法(DP)。低温排气法即在原来较优排气法(单向,位置 2)的基础上,在压力出口施加一低温(273.15 K),借助低温可以降低污染物在真空管内的扩散速度原理,模型其他设置与排气法(单向,位置 2)相同。而双向排气法即在原来较优单向排气法(位置 2)的基础上添加一排气位置,该排气位置位于位置 2 的对立面,其孔径大小以及其他参数设置与位置 2 处相同,从而实现双向抽排。两种探索的优化方法与较优排气法(单向,位置 2)模拟结果对比如图 7 和图 8。

从图 7 和图 8 的模拟结果可知,采用低温单向排气法时获得的真空系统内以及透镜处的甲苯浓度与采用单向排气法(位置 2)基本相同,但在透镜处的总污染浓度降低了,所以也是一种较优的控制污染物浓度的方法和设计。而采用双向排气法获得真空系统内以及透镜处甲苯浓度相对单向排气和单向低温排气法都低,这是因为双向排气能更好的构造流场,引导夹杂甲苯的气流从两个压力出口流出,更好地减少甲苯向透镜处扩散的几率,因而对透镜造成的污染程度最低,是一种更好的减少污染物对透镜污染的方法和设计。

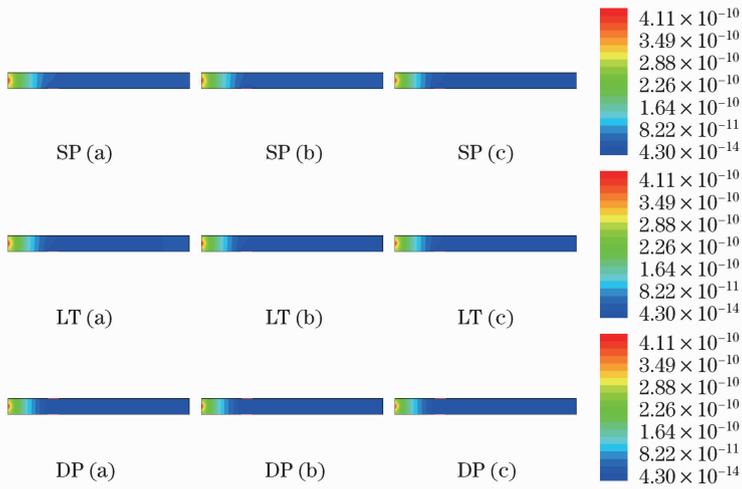


图 7 抽排法真空系统内甲苯浓度分布. (a)、(b)、(c)对应的扩散时间分别为 1、2、4 h

Fig.7 Concentration distribution of toluene in vacuum system pumping method.

(a), (b), (c) are corresponding to the diffusion time of 1, 2, 4 h

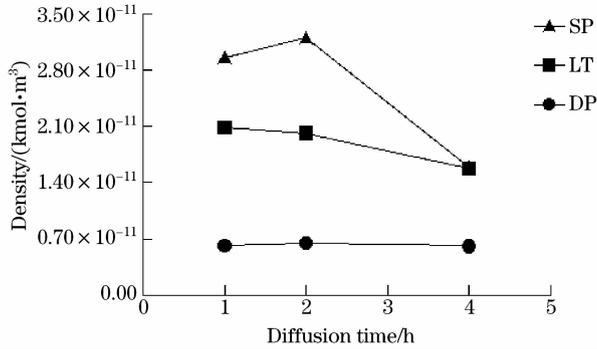


图 8 透镜处甲苯浓度均值分布

Fig.8 Average density of toluene near the lens

5 结 论

针对高功率激光装置中空间滤波器,设计和构造不同的洁净控制模型,利用 CFD 技术对污染物在真空系统内和透镜处污染物的扩散和浓度分布进行了模拟,得到了一种减少污染物对透镜污染的方法和一种较佳的洁净控制设计模型,即单向排气法和较佳的抽排位置(位置 2,见图 2),在优选模型的基础上,进一步探索了其他洁净控制方法和洁净控制设计方案,如低温单向排气法和双向排气法,最终证明低温排气法和双向排气法都是较优的控制空间滤波器洁净度的方法,并且双向排气法下真空系统和透镜处污染物浓度均相对最低,是文中涉及方法中最优的一种方法。当然,扩散时间只采用了四个小时,也可以继续延长扩散时间,进一步验证所述模型或者控制方法的正确性。此外,空间滤波器中除甲苯为代表的芳香烃以外,还有其他污染物,可以进一步探索文中较优的设计方案或者方法对其他污染物的适用情况。

参 考 文 献

- 1 Wang Guiying, Zhao Jiuyuan, Zhang Mingke, *et al.*. Basic study on spatial filter used in nd-glass high power laser system[J]. Acta Physica Sinica, 1985,34(2):171-181.
王桂英,赵九源,张明科,等. 钎玻璃高功率激光系统中空间滤波器的基本研究[J]. 物理学报,1985,34(2):171-181.
- 2 Yun Cui, Yuanan Zhao, Hua Yu, *et al.*. Impact of organic contamination on laser-induced damage threshold of high reflectance coatings in vacuum[J]. Applied Surface Science,2008,254(18): 5990-5993.
- 3 K. Bien-Aimé, C. Belin, L. Gallais, *et al.*. Impact of storage induced outgassing organic contamination on laser induced damage of silica optics at 351 nm[J]. Opt Express,2009, 21(17):18703-18713.
- 4 G. Gue'henneux, M. Veillerot, I. Tovenat. Evaluation of the airborne molecular contamination inside the LIL[J]. Nuclear Instruments and

- Methods in Physics Research, 2006, 557(2): 676-683.
- 5 Floyd E. Hovis, Bart Shepherd, Chris Radcliffe, *et al.*. Mechanisms of contamination induced optical damage in lasers[C]. SPIE, 1994, 2428: 72-82.
 - 6 Wolfgang Riedel, Paul Allenspacher, Helmut Schröder, *et al.*. Laser-induced hydrocarbon contamination in vacuum[J]. SPIE, 2005, 5991: 59910H1.
 - 7 A Pereira, J-G Coutard, S Becker, *et al.*. Impact of organic contamination on 1064 nm laser induced damage threshold of dielectric mirrors. [C]. SPIE, 2007, 6403: 64030I.
 - 8 Christopher Scurlock. A phenomenological study of the effect of trace contaminants on lifetime reduction and laser-induced damage for optics [C]. SPIE, 2004, 5647: 86-93.
 - 9 Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis-CFD Software Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004, 7-12.
王福军. 计算流体力学分析—CFD软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004. 7-12.
 - 10 Qu Wei, Wang Xiaoyi, Yuan Zhongxian. Application of simulation to study the change rules of pollutant concentration in rooms[C]. Proceedings for the third Seminars of Engineering Computational Fluid Dynamics, Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006, 58-64.
屈 伟, 王小逸, 苑中显. 应用数值模拟研究室内污染物浓度场的变化规律[C]. 第三届工程计算流体力学会议文集哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006, 58-64.
 - 11 Tan Wenyi, Zhang Xuan, Wang Yougli, *et al.*. Diffusion model of indoor formaldehyde in an unventilated cabin and its verification[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(4): 94-96.
谭文轶, 张 旋, 王永莉. 密闭舱内甲醛气体的扩散模型及其验证[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(4): 94-96.

栏目编辑: 韩 峰