



·大科学装置运维·

# 大口径片状放大器片箱腔内气体吹扫过程模拟\*

强永发, 吴文龙, 刘建国, 王振国, 陈林, 林东晖,  
傅学军, 蒋学君, 刘勇, 王琳, 姚轩

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900)

**摘要:** 为更快地置换片状放大器片箱内部的气体、带走片箱内部因氙灯辐照产生的  $\mu\text{m}$  级气溶胶颗粒, 以延长钕玻璃增益介质使用寿命, 提出了几种不同的片箱隔板气体流道设计并对其吹扫效果进行对比。基于计算流体力学手段和分散相模型, 求解了片箱腔内的吹扫流场并模拟了微米级粒子污染物的吹扫过程。片箱隔板采用开孔设计, 通过对比分析发现, 不同开孔孔径和排列方式的片箱吹扫效果差异明显。当开孔孔径为  $\phi 14\text{ mm}$ 、且上下隔板都采用整齐排列的圆形通孔时, 片箱内的气体压力损失更小 ( $424.3\text{ Pa}$ ) 且吹扫达到百级的时间更短 ( $205\text{ s}$ )。最后片箱吹扫实验显示了采用该结构的片箱其腔内吹扫达到百级的时间为  $2\sim 3\text{ min}$ 。

**关键词:** 高功率固体激光器; 片状放大器; 气体吹扫; 气体流道; 数值仿真

中图分类号: TN248.1; O368

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220354

## Simulation of gas purging process in the slab cassette of a large-aperture slab amplifier

Qiang Yongfa, Wu Wenlong, Liu Jianguo, Wang Zhenguo, Chen Lin, Lin Donghui,  
Fu Xuejun, Jiang Xuejun, Liu Yong, Wang Lin, Yao Ke

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** To replace the gas in the slab cassette of slab amplifier more quickly, thus to transport micro aerosol particles produced by xenon lamp irradiation, and prolong the operating life Nd:glass, this paper proposes several different designs of gas flow channel on the baffle of slab cassette and compares their purging effects. Based on computational fluid dynamics (CFD) and dispersed phase model (DPM), the purge flow field in the chamber was obtained, and the purging process of micro contaminant particles was simulated. Through comparative analysis, it is found that the time required to achieve a cleanliness of 100 class is significantly different for different apertures and arrangements of the holes. When the hole diameter is  $14\text{ mm}$ , and the holes on the upper and lower baffles are orderly round through-holes, the purging time to achieve 100 class is  $205\text{ s}$ , and the gas pressure loss in the cassette is  $424.3\text{ Pa}$ . Finally, gas purging experiments of a  $4\times 2$  combined slab amplifier show that a purging time of  $2\sim 3\text{ min}$  is needed to achieve 100-class cleanliness by the optimized design.

**Key words:** high-power solid-state laser device, slab amplifier, gas purge, gas channel, numerical simulation

作为开展惯性约束聚变实验研究的重要平台, 大型高功率固体激光器装置以钕玻璃作为增益介质, 采用氙灯泵浦的方式为聚变实验提供高功率激光输出。随着聚变实验对输出激光能量要求的提高, 固体激光器的规模也随之扩大, 钕玻璃受氙灯的直接辐照达到  $18\sim 25\text{ J/cm}^2$  [1-2]。有研究表明, 片状放大器腔内的反射板、钕玻璃包边等材料在高能量密度的泵浦光辐照下会产生大量  $\mu\text{m}$  级的气溶胶颗粒, 这些气溶胶颗粒作为污染物悬浮在片箱腔体内, 运动到钕玻璃附近时会附着于钕玻璃片上 [3]。在泵浦光再次照射下气溶胶颗粒被分解融化, 形成局部的温度梯度, 并对钕玻璃表面造成缺陷 [4-6], 从而极大地降低钕玻璃的增益性, 劣化通光激光的光束近场均匀性, 减少光学

\* 收稿日期: 2023-01-01; 修订日期: 2023-03-02

基金项目: 中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFPD6-2022-7)

联系方式: 强永发, yfjiang@zju.edu.cn。

通信作者: 王振国, wangzhenguo\_82@163.com。

元件的使用寿命并增加激光装置的运行成本。在目前已建成的高功率激光装置中,如神光 II 和美国国家点火装置(NIF)等<sup>[7-10]</sup>,洁净度和污染物颗粒控制被认为是保证激光器中放大器高增益性能和使用寿命的关键<sup>[11]</sup>。

目前关于片状放大器腔内污染物颗粒控制的研究主要集中在污染物颗粒的产生与沉降、吹扫前后洁净度的变化<sup>[12]</sup>等。对于片状放大器吹扫中腔内的流体动力学特性和吹扫优化的研究较少。杨晓伟和任志远等人<sup>[13-14]</sup>运用 CFD 数值模拟方法对神光 II 装置中单路排布的放大器腔内氮气吹扫流场进行了模拟分析,并对放大器氮气进出口的结构及排布方式进行了优化,获得了更短的吹扫时间。张攀政等人<sup>[15]</sup>提出了间断多次氮气吹扫法,使神光 II 装置中放大器片箱腔内的涡流经历多次破坏和重建过程以提高片腔洁净度,并对吹扫的过程进行了模型仿真。万阳<sup>[16]</sup>利用 Fluent 软件以及 DPM 模型对反射镜箱内动态吹扫及粒子浓度变化进行了数值模拟,得到了反射镜箱内的洁净度变化规律。

随着装置能量需求的提升,片状放大器系统由最初的单束扩展到多束阵列组合,使得片箱内部空间更大、气体流道更复杂、气溶胶颗粒清洁难度更大。然而关于多束阵列组合的大口径片状放大器腔内的吹扫流场及颗粒动力学特性研究鲜见公开报道。根据某大型装置的运行统计情况,其 4×2 组合放大器的气体吹扫需要 8 min 以上的时间才能获得期望的洁净度。并且在维护拆卸时发现,片箱内的钽玻璃和反射器等表面积灰较多,说明该构型的放大器内部气体流道不顺畅,气体吹扫洁净效果欠佳,因而大量气溶胶无法被吹扫带走。为获得更快速的置换时间和更优的洁净吹扫效果,本文针对这种 4×2 组合的大口径片状放大器腔内吹扫流场以及吹扫过程中污染颗粒的运动特性进行了计算模拟,提出了片箱隔板的不同开孔方式并进行了吹扫效果和吹扫时间对比分析,获得了更优的隔板开孔方案。

## 1 数值模型方法

### 1.1 三维模型

图 1 所示为 4×2 组合的片状放大器结构模型及简化处理完成后的片箱模型,片箱尺寸为 2145 mm×791 mm×502 mm,安装 4 块钽玻璃片作为增益介质,每块钽玻璃片尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm。模型处理过程中提取整体模型中的片箱模型部分并将四周进行封闭,进行适当的简化处理(忽略对流场影响不大的台阶等)并作为数值模拟的外场边界,由于两侧片箱结构对称且相互独立,实际计算中针对单侧片箱开展。

### 1.2 理论公式

本研究的对象为低速不可压两相流,连续相为洁净空气,箱体内速度分布计算求解低速定常不可压雷诺平均 Navier-Stokes 方程,离散相粒子吹扫过程应用 DPM 方法进行数值模拟。其中连续相流场求解低速不可压雷诺平均 Navier-Stokes 方程,采用基于压力求解的 Simple 方法;采用格心格式的有限体积法进行离散,空间离散采用二阶迎风格式;湍流模型选择标准  $k-\varepsilon$  模型。连续相的控制方程如下

$$\begin{aligned} \rho \nabla \cdot \mathbf{V} &= S_m \\ \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial t} + \mu \nabla^2 u + \rho f_x + F_x \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial t} + \mu \nabla^2 v + \rho f_y + F_y \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial t} + \mu \nabla^2 w + \rho f_z + F_z \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为连续相在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的速度,  $\rho$  为密度,  $f$  为连续相受力,  $\mu$  为黏度,  $S_m$  为质量源项,  $\mathbf{V}$  为体积源项,  $t$  为时间,  $F$  为分散相对连续相的附加力,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别表示三个方向。

低速不可压流不需要求解能量场,因此该方程组不包含能量方程。相对于单相流控制方程,两相流控制方程的连续方程中多了一项分散相作用在连续相的质量源项  $S_m$ , 动量方程中多了一项分散相对连续相的附加力  $F$ 。

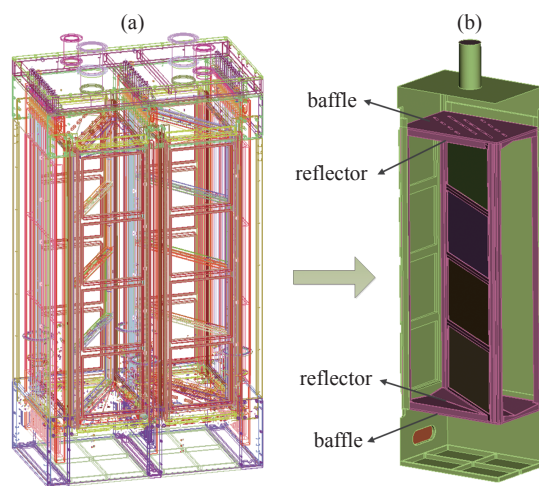


Fig. 1 Preliminary model and simplified model of slab house in slab amplifier

图 1 片状放大器模型及简化后片箱模型

本文将流体相视为连续介质，分散相视为离散介质处理，故采用欧拉-拉格朗日方法，颗粒运动方程根据牛顿运动定律写出，该运动方程形式如下

$$\frac{du_p}{dt} = f_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (2)$$

式中： $f_D(u - u_p)$ 表示单位颗粒质量受到的阻力； $u$ 为连续相速度， $u_p$ 为颗粒相速度， $\rho$ 为连续相的密度； $\rho_p$ 为颗粒密度； $\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 表示单位质量颗粒的浮力与重力的合力； $F$ 为单位质量颗粒的附加加速度项，包含压力梯度产生的附加力、Saffman 升力、“虚质量”力、Basset 力、静电力、布朗力、Magnus 升力等产生的加速度。其中由于 $\rho/\rho_p > 0.1$ ，因此虚质量力和压力梯度力对颗粒的作用更加明显，而其它的力对颗粒影响不大，在计算中可以忽略；在计算中假设颗粒为球形颗粒，而且不会发生形变。虚质量力 $F_{vm}$ 和压力梯度力 $F_P$ 分别表示如下

$$F_{vm} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \left( \frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (3)$$

$$F_P = \frac{\rho}{\rho_p} (u_p \nabla u) \quad (4)$$

在阻力项中的系数 $f_D$ 的计算公式如下

$$f_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \quad (5)$$

式中： $\mu$ 为连续相粘性系数； $d_p$ 为颗粒直径； $Re_p$ 为相对颗粒的 $Re$ 数，可表示如下

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (6)$$

式中： $C_D$ 为阻力系数，对于球形颗粒可表示为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \quad (7)$$

式中： $a_1, a_2, a_3$ 为常量，对于本文中相对雷诺数 $Re_p < 0.1$ ， $a_1 = 0$ ， $a_2 = 24$ ， $a_3 = 0$ 。标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍流动能方程和扩散方程分别表示如下

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (8)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

式中： $k$ 为湍流动能， $\varepsilon$ 为耗散系数， $G_k$ 表示平均速度梯度引起的湍流动能产生， $G_b$ 表示由浮力影响引起的湍流动能产生， $Y_M$ 表示可压缩湍流动能膨胀对总耗散率的影响， $C_{1\varepsilon}$ ， $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为常量， $\sigma_k$ 和 $\sigma_\varepsilon$ 为湍流普朗特数。

本文计算采用了双向耦合计算方法，考虑分散相和连续相的相互影响。首先计算连续相流动得到初步收敛流场，然后开启DPM模型并继续迭代，此后分散相轨迹和源项与连续相流场将交替计算。每次计算连续相流场时，前一步两相之间的动量、质量和能量交换被更新并计入连续相的源项。

### 1.3 网格划分及边界条件

首先是网格无关性验证。本文采取网格数量为 $1.2 \times 10^7$ 、 $2.3 \times 10^7$ 和 $3.8 \times 10^7$ 时，测得流出粒子总数的变化趋势如图2所示。可以看出，当采取 $3.8 \times 10^7$ 数量的网格时，最终流出粒子的总数接近，因此本文采用片箱模块的空间网格数量约为 $3.8 \times 10^7$ 网格单元。

图3为本次计算网格的总体表面网格示意图及缝道附近的局部网格示意图，可以看到，在气流流经的缝道等部位进行了加密。为了模拟壁面附近附面层内的流动，在壁面附近采用三棱柱的形式生成附面层网格，附面层的第一层高度约为 $5 \times 10^{-5}$  m，增长率1.2，总层数24层。进气口采用速度入口边界条件，进口速度15.0 m/s，操作压强为103325 Pa（即静压值比标准大气压（101325 Pa）高2000 Pa。无特别说明，本文提到的压强均为静压）；出气口采用自由流出口边界条件。本文模拟计算中使用的粒子直径0.5  $\mu\text{m}$ ，初始粒子浓度 $3520000 \text{ m}^{-3}$ （国际标准ISO14644-1中洁净度的等级分级标准中洁净度 $10^5$ 级），预期在5 min内元件箱体内空气洁净度由十万级降低到百级。此外，



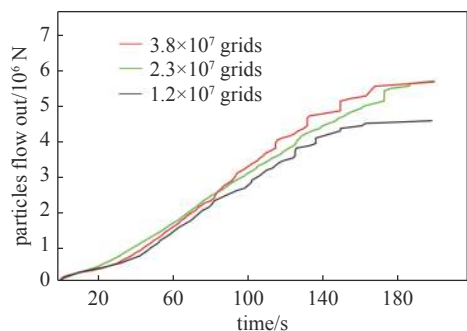


Fig. 2 Total particles flowing out of slab cassette under different numbers of grids

图 2 不同网格数量流出粒子总数变化趋势

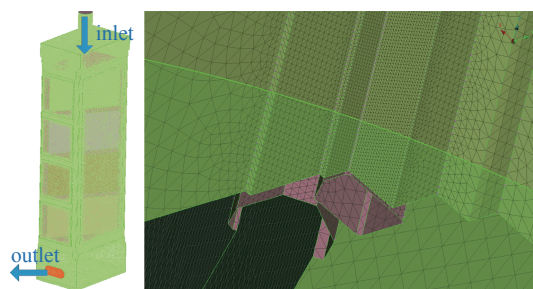


Fig. 3 Meshing of slab cassette model

图 3 片箱计算模型网格划分

模型壁面采用反射边界条件, 出口采用逃逸边界。

### 1.4 开孔方式

气体吹扫优化的目的是快速置换和洁净吹扫, 腔内流场以整体层流加局部小湍流为宜。为实现吹扫优化设计, 本文在 4×2 组合的大口径片状放大器主体结构定型(图 1)的基础上进行隔板开孔方式、气体流道优化。在放大器片箱吹扫过程中, 气流由片箱顶部入口进入过渡气室, 经过上隔板和反射器减速后, 通过隔板及反射器上的多排缝隙或孔隙进入片箱中部。与此同时, 气流进入片箱内带动污染物颗粒向出口运动, 流过底部的反射器及下隔板的孔隙后, 再流入片箱底部的过渡气室, 然后最终由侧壁出口流出, 如图 3 所示。在吹扫压力和流速给定的情况下, 整个吹扫过程主要受片箱上下隔板和反射器上的开孔方式影响。因此本文对于 4×2 结构的片箱吹扫优化主要是从上下隔板及反射器的开孔方式着手。由于隔板和反射器对于吹扫过程的作用相同, 都是分散和减速气流。为方便表述, 后文将隔板和反射器上的开孔方式统称为隔板开孔方式。

图 4 为片箱上、下隔板开孔方式示意图。其中(a)为开孔方式 1, 在隔板上平行于镜片长边开设 16 个排孔, 反射器开设排缝; (b)为开孔方式 2, 在隔板上呈“V”型开设 16 个排孔, 反射器开设排缝, 并且其中一列排孔平行于反射器的排缝, 另一列排孔平行于镜片长边; (c)为开孔方式 3, 除了在隔板开设 8 个排孔, 还开设约 72 个圆孔, 圆孔的直径为 20 mm, 杂散分布, 各孔距相邻孔之间的距离相等; (d)为开孔方式 4, 在隔板开设约 90 个圆孔及 8 个排孔, 各圆孔的排列是在隔板的空白位置上平均分布 9 行 9 列。此外, 开孔方式 3 和开孔方式 4 中的上、下隔板和反射器之间可采取通孔或交错孔的方式, 具体排列方式如图 5 所示。不同的开孔方式及计算模拟条件见表 1, 后续将对不同开孔组合方式的效果进行详细讨论。

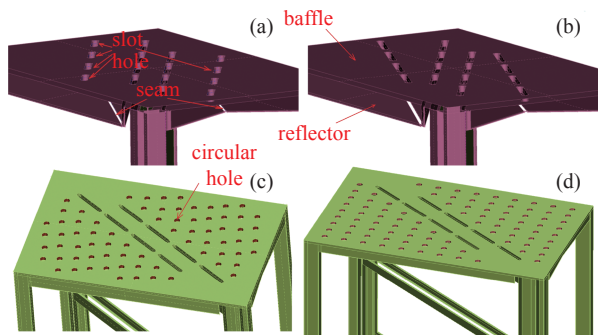


Fig. 4 Schematic of hole arrangements on the baffle

图 4 隔板开孔排列方式示意图

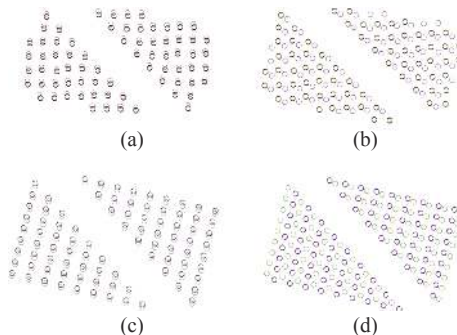


Fig. 5 Circular hole arrangements on the baffle

图 5 隔板圆孔排列方式

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 粒子污染物浓度变化情况

基于 DPM 方法, 片箱中粒子污染物浓度随吹扫时间的变化能够以可视化的方式展现出来。图 6 为上下隔板 14 mm 通孔的开孔方式下不同时刻粒子污染物在箱体内的分布示意图。可以看出, 吹扫进行 1 s 后, 粒子污染物分布在箱体空间中, 并开始向下运动, 箱体内的上半部分污染物浓度较低, 而下半部分浓度较高; 吹扫进行 20 s 时, 箱体中绝大部分的粒子污染物已经被吹出箱体; 在吹扫进行至 200 s, 片箱内粒子污染物的浓度达到百级, 污染



表 1 隔板开孔方式计算模拟条件及结果

Table 1 Calculation conditions and results of different holes opening ways

Case	inlet pressure/Pa	inlet velocity/(m/s)	outlet pressure/Pa	differential pressure/Pa	time spent/s	notes
Case1	103 325.8	15.0	102 863	462	248	type 1, 16 slot holes with a seam
Case2	103 325.8	15.0	102 845.6	480.2	223	type 2, 16 slot holes with a seam, "V" type
Case3	103 325.8	15.0	102 929	396.8	422	type 3, 20 mm through holes (top and bottom)
Case4	103 325.8	15.0	102 927.8	398	268	type 3, 20 mm holes, through (top), staggered (bottom)
Case5	103 325.5	15.0	102 709.4	616.1	205	type 1, 16 slot holes with a wider seam
Case6	103 325.5	15.0	102 620	705.5	365	type 1, 16 slot holes with a narrower seam
Case7	103 325.5	15.0	102 955.2	370.3	425	type 4, 20 mm through holes (top and bottom)
Case8	103 325.5	15.0	102 957.8	367.7	405	type 4, 20 mm holes, through (top), staggered (bottom)
Case9	103 325.5	15.0	102 901.2	424.3	205	type 4, 14 mm through holes (top and bottom)
Case10	103 325.8	15.0	102 853.1	472.7	247	type 4, 14 mm holes, through (top), staggered (bottom)

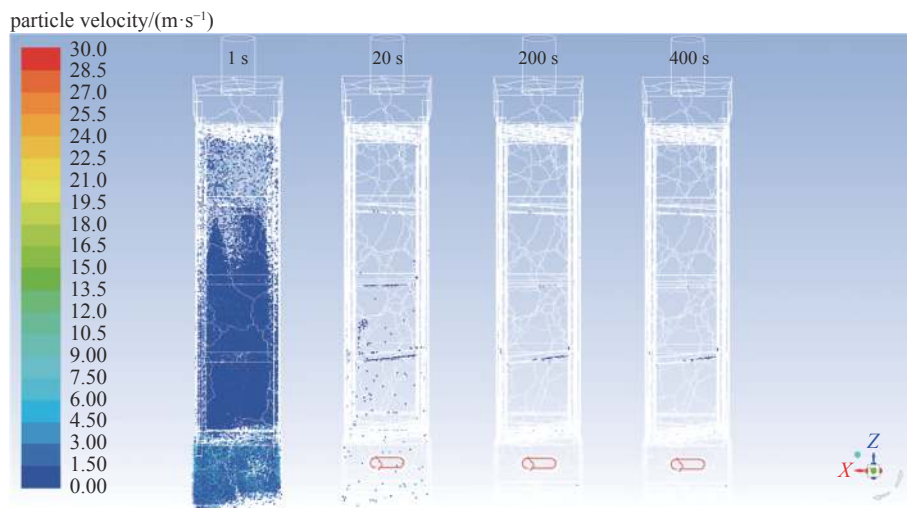


Fig. 6 Schematic of aerosol particle concentration at different purging time

图 6 不同时刻粒子污染物在箱体内分布示意图

粒子浓度随时间变化速度变缓,且污染物粒子的分布位置始终集中在镜片的框架部分;当吹扫持续到 400 s 时,片箱内粒子污染物浓度与 200 s 的浓度相差无几,说明 200 s 后,粒子吹扫效果达到稳定状态。

## 2.2 不同开孔方式吹扫曲线

表 1 为片箱上、下隔板不同开孔方式下吹扫计算的条件及模拟仿真结果。在此共有 10 组不同开孔方式的模拟计算,不同开孔方式参见表 1 备注以及图 4、图 5。其中 Case1 的开孔方式为片箱的原始构型,另设 9 组优化构型进行对比,以获得更优的开孔方式。每组计算的进气速度都为 15.0 m/s,入口压力都为 103 325.8 Pa,通过计算可以得到每组的出口压力以及片箱内部达到百级洁净度所需的吹扫时间。

图 7 为片箱隔板不同开孔方式吹扫曲线,其中横坐标为气体吹扫时间,纵坐标为气溶胶颗粒浓度。可以明显看出前 50 s 内,随着吹扫时间增加,片箱内的颗粒急剧下降到千级以内,然后再随着时间缓慢下降至百级以内。从 Case1、3、4、7 和 8 可以看出,孔直径 20 mm 时,开孔方式 3 和 4 的片箱构型达到百级洁净所需的时间相比原始构型均变长,但气流在由入口流经箱体流出口的过程中,开孔方式 3、4 相对于原始构型的压力损失减小,气阻减小,相应的箱体内气体置换率会有所提高;从 Case 9 可以看出,孔直径 14.14 mm 时,开孔方式 4 的上下隔板开通孔相比原始构型达到百级洁净度的时间变短,压力损失减小,而方式 4 的上隔板开通孔、下隔板开错开孔相比开缝达到百级洁净度的时间变长,压力损失略有减小,气阻减小,箱体内气体置换率有所提高;从 Case5、6 可以看出,增加反射器上的条缝后吹扫时间会有所减少,但相应的压力损失明显增加。

此外,由 Case3、Case4 和 Case7~Case10 可以得到如下结论,当圆孔大小为 20 mm 时,上隔板开通孔、下隔板开交错孔相比于上下隔板都开通孔效果更好,其达到百级洁净度的吹扫时间更短;当圆孔大小为 14 mm 时,上下隔板都开通孔相比于上隔板开通孔、下隔板开交错孔达到百级洁净度的吹扫时间更短。而当圆孔尺寸为 20 mm 或

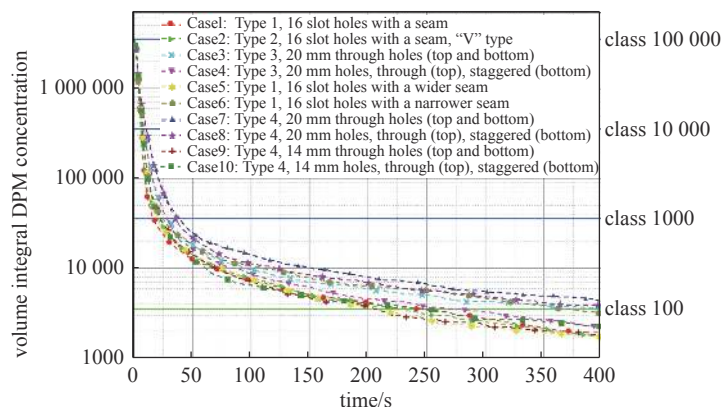


Fig. 7 Purging curves of baffles with different hole

图7 隔板不同开孔方式吹扫曲线

14 mm 时, 无论通孔或者交错孔方式, 其片箱内的压力损失几乎相当, 说明圆孔孔径一定时, 开设圆孔的方式对系统的压力损失影响不大。

### 2.3 不同开孔方式的吹扫流场

图8为隔板开孔方式的片箱构型(Case2、Case3、Case4)的空间流线图。可以看到, 隔板工况 Case2 中箱体内流场在镜面两侧的下半部分流线有较大偏折(图8(a)中红色虚线圆圈内所示), 流线偏折越多造成压力损失越大, 也更易形成漩涡。Case2 中片箱进出口压差为 480.2 Pa。而隔板工况 Case3 及 Case4 镜面两侧箱体内流动基本直接通过下方隔板, 压力损失相对较小, 分别为 396.8 Pa 和 398 Pa。其原因是由于在隔板开孔方式二时(Type2), 气流主要由镜面两侧的缝隙流入, 而在隔板开孔方式三(Type3)中, 流入两侧箱体内部的气流能量增大, 导致箱体内部的主流动更靠近镜面。

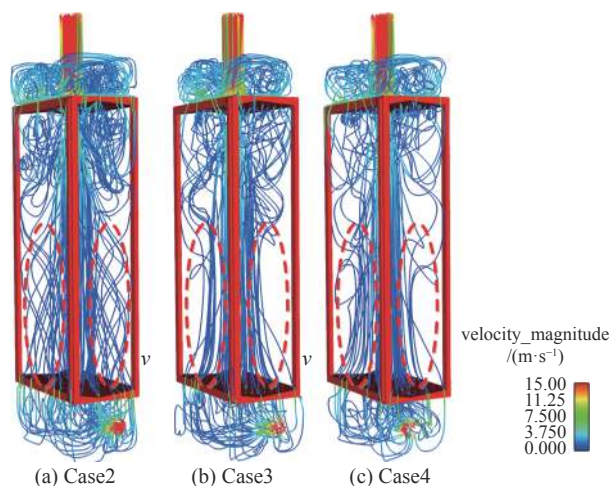


Fig. 8 Streamline of different hole opening ways in slab cassette space

图8 不同开孔方式片箱内空间流线对比

同时, 图9~图11为片箱同截面的速度云图及表面极限流线图, 其中  $z$  方向截面位置见图中黄色虚线所示。从图中可以看到, 隔板采取开孔方式二(Type2)时, 由缝流入的流动很快就耗散(图9红线所示), 但箱体内只有一个绕整个箱体的主流动。隔板采取开孔方式三(Type3)时, 箱体内流动分为由镜面两侧缝隙流入的流动及由隔板孔流入的流动(图10红线所示)。此外, Case3 和 Case4 片箱中下部靠近下隔板的位置会形成一个涡旋, 其流场没有 Case2 中的顺畅, 因此吹扫时间相对更长。由图9~图11中  $z$  方向的截面更能明显的看到在箱体的下半部分横向流动的情况。

隔板采取开孔方式三(Type3)时, 下隔板开直径 20 mm 通孔(图10, Case3)与下隔板开直径 20 mm 交错孔(图11, Case4)的箱体空间内流场变化不大, 压力损失也基本一致。但下隔板开交错孔时, 在片箱中下部形成的涡旋强度更小, 回流更少。因此当开孔孔径为 20 mm 时, 下隔板开交错孔的吹扫时间为 268 s, 其效率优于下隔板开通孔。

### 2.4 气体吹扫实验

根据对比分析, 本文的 4×2 片状放大器最终采用了开孔方式 4 的片箱构型, 隔板开设 14 mm 圆形通孔。在吹扫条件相同的情况下, 该开孔方式的片箱吹扫达到百级洁净度所需的时间相对较少而压力损失更小。针对该构型的片箱开孔方式, 本文在 400 mm 口径 3 片长的 4×2 口径片状放大器上开展了气体吹扫验证实验, 实验中分别设置了 6、8、10 和 12 m/s 的进气速度, 吹扫实验持续 10 min 左右。参考目前最常用的监测腔内洁净度的方法, 本文采用尘埃粒子计数器测量片箱内污染物颗粒浓度以获得片箱腔内的洁净度。从图12可以看出, 吹扫达到百级洁净度所需的时间随着片箱入口流速的增大而减少, 当入口流速为 6~12 m/s 范围时, 片箱腔内达到百级洁净度的时间在 2~3 min。该实验结果相比于模拟计算结果更优, 其主要原因有两点: (1) 在吹扫过程结束后, 片箱内剩余粒子存留区域主要为近壁面空间, 因此吹扫过程中远壁空间浓度下降速度相对近壁空间更快。本文使用的粒子计数器

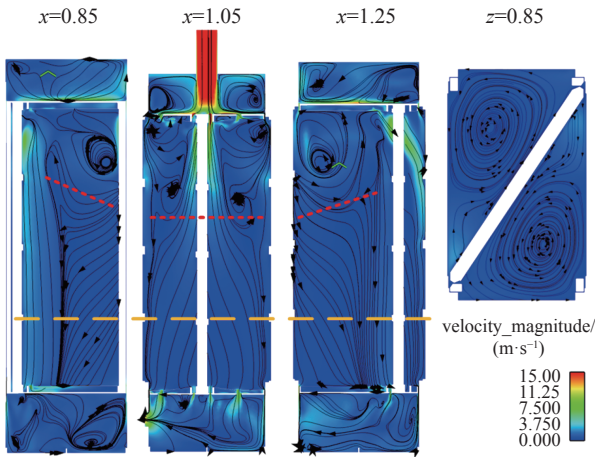


Fig. 9 Velocities and streamlines at different cross sections of slab cassette (Case2)

图9 不同截面速度云图及流线图(Case2)

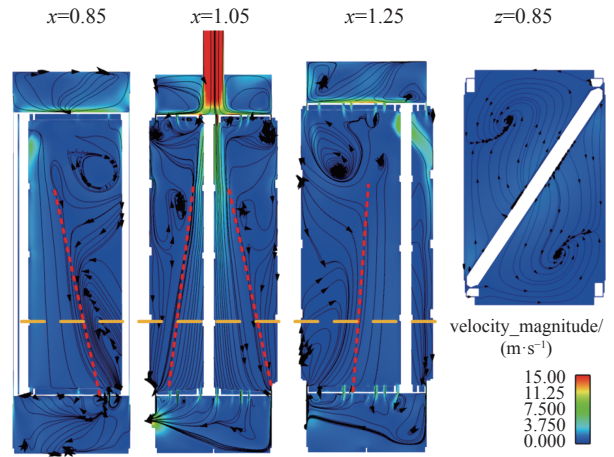


Fig. 10 Velocities and streamlines at different cross sections of slab cassette (Case3)

图10 不同截面速度云图及流线图(Case3)

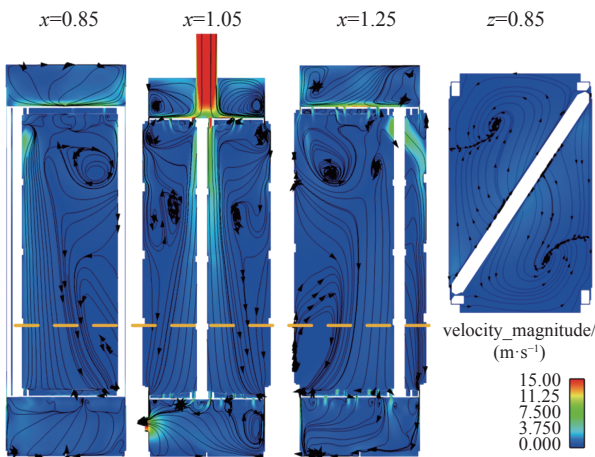


Fig. 11 Velocities and streamlines at different cross sections of slab cassette (Case4)

图11 不同截面速度云图及流线图(Case4)

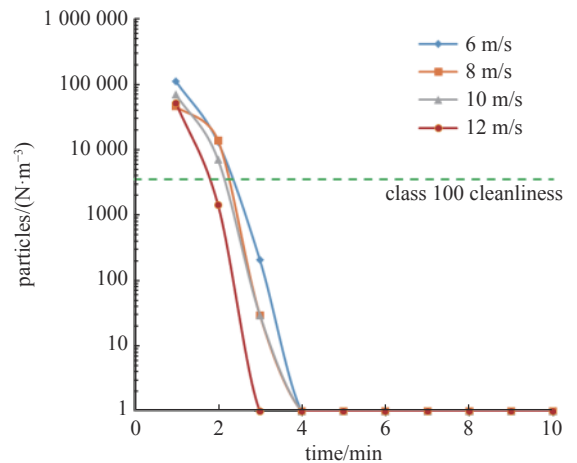


Fig. 12 Concentration change of contaminant particles with time

图12 污染物颗粒随时间变化曲线

主要用于测量远壁空间内的粒子浓度，而由于统计难度，本文的模拟计算统计的是整个片箱腔内的粒子浓度，因此会存在一定的偏差；(2)考虑到计算简化，本文数值模拟中建立的片箱模型和实际加工的片箱模型存在一定的差异，因此也会导致实验和模拟存在一些偏差。但总体来说，采用优化后的片箱构型(开孔方式：直径4、14 mm 圆形通孔)在不同流速下吹扫都能在2~3 min 内达到百级洁净度，说明该优化后的片箱构型的实际效果比预期更好，达到了5 min 内使片箱内空气洁净度降低至百级的吹扫要求，对于减少吹扫时间是可行的。

### 3 结论

本文通过计算流体力学(CFD)数值仿真手段以及 DPM 方法研究了不同的隔板开孔方式对片状放大器中片箱吹扫过程和吹扫时间的影响，并基于片状放大器主体结构定型的基础上提出了优化的片箱隔板气体流道设计。从以上对比分析与讨论可以看出，单纯的圆孔开孔方式不一定比条孔开孔方式更优，只有选择更详细的开孔参数(如开孔孔径和排列方式)，才能获得更优的吹扫效果和更短的吹扫时间。针对新的开孔排列方式(整齐排列圆孔)，不同开孔直径对吹扫结果的影响较大，开孔直径 20 mm 时，下隔板开通孔与下隔板开交错孔的压力损失差别不大，但下隔板开交错孔的吹扫时间较短；开孔直径 14 mm 时，下隔板开通孔相比下隔板开交错孔的压力损失较小且吹扫时间短。因此，若考虑压力损失作为主要因素，则采用开孔直径 20 mm，下隔板开圆形交错孔的开孔方式；若考虑吹扫时间作为主要因素，则采用开孔直径 14 mm，下隔板开圆形通孔的开孔方式。最后本文采用了开孔直径 4、14 mm 圆形通孔的片箱构型并开展了气体吹扫实验，在吹扫流速 6~12 m/s 时，该片箱内达到百级洁净所需的时间为 2~3 min。



## 参考文献:

- [1] Burnham A K, Horvath J A, Letts S A, et al. Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifiers[C]//Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion. 1998: 609-620.
- [2] Honig J. Cleanliness improvements of National Ignition Facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 2904-2911.
- [3] Glass A J, Guenther A H. Laser induced damage of optical elements—a status report[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(4): 637-649.
- [4] 於海武, 郑万国, 唐军, 等. 高功率激光放大器片腔洁净度实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(3): 272-276. (Yu Haiwu, Zheng Wangguo, Tang Jun, et al. Investigation of slab cavity cleanliness of high power laser amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(3): 272-276)
- [5] Honig J. Offline slab damage experiments comparing air and nitrogen purge[R]. NIF-0070328, 2001: 22-29.
- [6] Honig J, Ravizza D. Nova retrospective and possible implications for NIF[R]. NIF-0110227, 1999.
- [7] 景峰, 彭志涛, 朱启华, 等. 高功率固体激光驱动器的优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(s1): 117-121. (Jing Feng, Peng Zhitao, Zhu Qihua, et al. Design optimization of high power solid-state lasers for ICF driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s1): 117-121)
- [8] 江梦春, 朱健强, 刘志刚, 等. 钕玻璃片状放大器玻璃腔的概念设计[J]. *光子学报*, 2016, 45: 1114001. (Jiang Mengchun, Zhu Jianqiang, Liu Zhigang, et al. Conceptual design for glass cavity in Nd: glass slab amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45: 1114001)
- [9] 程晓锋, 苗心向, 陈远斌, 等. 神光-III 主机激光装置片状放大器洁净控制进展[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(1): 1-2. (Cheng Xiaofeng, Miao Xinxiang, Chen Yuanbin, et al. Development on cleanliness control of slab amplifiers for Shenguang-III laser driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 1-2)
- [10] Lowdermilk W H. Status of the National Ignition Facility project[C]//Proceedings of SPIE 3047, Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion: Second Annual International Conference. 1997: 16-37.
- [11] Spaeth M L, Manes K R, Honig J. Cleanliness for the NIF  $1\omega$  laser amplifiers[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 250-264.
- [12] 程晓锋, 王洪彬, 苗心向, 等. 高功率固体激光驱动器污染控制及片状放大器洁净度改进[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(5): 1147-1151. (Cheng Xiaofeng, Wang Hongbin, Miao Xinxiang, et al. Contamination control for high-power solid-state laser driver and improvement of cleanliness in slab amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1147-1151)
- [13] 杨晓伟, 刘志刚, 任志远, 等. 高功率激光片状放大器片腔内流场模拟及优化[J]. *中国激光*, 2016, 43: 0901002. (Yang Xiaowei, Liu Zhigang, Ren Zhiyuan, et al. Simulation and optimization of internal flow field in high power laser slab amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43: 0901002)
- [14] Ren Zhiyuan, Zhu Jianqiang, Liu Zhigang, et al. Optimizing the cleanliness in multi-segment disk amplifiers based on vector flow schemes[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e1.
- [15] 张攀政, 冯滔, 谢静, 等. 间断多次氮气吹扫法提高片状放大器在线洁净度研究[J]. *中国激光*, 2018, 45: 0401014. (Zhang Panzheng, Feng Tao, Xie Jing, et al. Disk amplifier on-line cleanliness improvement achieved by intermittent nitrogen gas purge[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 0401014)
- [16] 万阳. 反射镜箱动态吹扫数值模拟与试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. (Wan Yang. The numerical simulation and experiment research of the reflect mirror trunk transient blow[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017)