

# 高功率激光片状放大器片腔内流场模拟及优化

杨晓伟<sup>1,2</sup> 刘志刚<sup>1</sup> 任志远<sup>1</sup> 张海青<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 片状放大器腔内钕玻璃表面的洁净度是保证放大器高工作性能和长寿命的关键指标, 而合理的腔内流场分布是放大器保持腔内洁净的前提条件。运用计算流体力学方法, 利用 Fluent 软件对纯氮气冲洗片状放大器过程中的腔内流场进行模拟, 并在样机上验证了模型的有效性; 通过调整放大器的进出气口结构及位置排布, 获得了最佳的流场分布。实验结果表明, 相比未优化放大器, 优化后的放大器仅使用一半时间就可以达到相同的腔内洁净度等级, 且钕玻璃表面洁净度更高。

**关键词** 激光技术; 片状放大器; 计算流体力学; 流场模拟; 洁净度; 优化

中图分类号 O368

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901002

## Simulation and Optimization of Internal Flow Field in High Power Laser Slab Amplifiers

Yang Xiaowei<sup>1,2</sup> Liu Zhigang<sup>1</sup> Ren Zhiyuan<sup>1</sup> Zhang Haiqing<sup>1</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The cleanliness of neodymium glass surface in the slab amplifier is a key indicator of guaranteeing high performance and long lifetime of amplifiers, and the reasonable internal flow field distribution is the prerequisite for keeping clean in the amplifier cavity. By means of computational fluid dynamics method and with the Fluent software, the internal flow field of slab amplifier cavity in the purging process of pure nitrogen is simulated, and the model validity is verified on the prototype system. By adjusting the structure and location arrangement of air inlets and outlets of the amplifier, the optimal flow field distribution is obtained. The experimental results show that compared with those of the non-optimized amplifier, the optimized amplifier not only takes only half time to obtain the same required cleanliness, but also the cleanliness of neodymium glass surface is higher.

**Key words** laser technique; slab amplifier; computational fluid dynamics; flow field simulation; cleanliness; optimization

**OCIS codes** 140.3280; 350.4600; 220.4880

## 1 引言

高功率激光器是惯性约束聚变(ICF)实验的重要装置, 以钕玻璃片为增益介质的片状放大器是高功率激光器的主要模块, 提供了 80% 以上的输出激光能量, 很大程度上决定了整个装置的能量指标、效率和造

收稿日期: 2016-04-15; 收到修改稿日期: 2016-05-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505228)、中以惯性约束聚变能源先期关键技术合作研究(2012DFG62040)

作者简介: 杨晓伟(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学精密机械设计和制造工艺方面的研究。

E-mail: yxw\_cad@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、光学精密机械设计和制造工艺等方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shnc.ac.cn(通信联系人)

价<sup>[1-3]</sup>。片状放大器运行过程中受到高强度的氙灯辐照,腔内的反射板、钹玻璃包边等材料产生热解作用,从而形成大量的微米级悬浮颗粒(气溶胶)。这些气溶胶很容易凝结在钹玻璃片的表面,若不及时消除,在后续氙灯光和激光的作用下,会损伤钹玻璃表面,导致放大器的增益下降,使用寿命缩短,并可能对后面的光学元件造成自聚焦破坏<sup>[4]</sup>。因此,高效去除气溶胶,维持片状放大器腔内钹玻璃表面的洁净度是保证放大器高工作性能和长寿命的关键<sup>[5]</sup>。

目前美国国家点火装置(NIF)和神光系列装置都通过严格的洁净清洗及装配工艺获得较高的初始洁净度,在此基础上引入大气流量的纯氮气冲洗腔体内,以此提升片状放大器内部的洁净度,并起到冷却钹玻璃片的作用。国内外该领域的相关报道都集中在氮气冲洗后腔内洁净度的变化过程<sup>[6]</sup>,及利用计算流体力学(CFD)数值模拟的方法分析钹玻璃片的热畸变恢复过程<sup>[7-9]</sup>等方面。而对利用 CFD 数值模拟的方法对片状放大器腔内气流场进行分析,以高效获取腔内洁净度和获得钹玻璃表面最佳洁净度的研究却鲜有报道。目前生物安全实验室微生物气溶胶污染物控制技术的研究<sup>[10-11]</sup>,及生物安全柜气流组织形式的模拟与优化设计<sup>[12-13]</sup>都应用 CFD 数值模拟的方法分析一定密封体积的内部流场特性,对本研究有一定的借鉴意义。

放大器腔内气溶胶污染物粒径小、质量轻,在运动气流中,小微粒几乎以完全相同的速度跟随气流运动,微粒的轨迹与流线相差很小<sup>[14-15]</sup>,所以可以根据放大器腔内流场得到污染颗粒的运动轨迹。运用 CFD 数值模拟方法,利用 Fluent 软件对纯氮气冲洗过程中的腔内流场进行了模拟,在验证模型真实有效的基础上,通过优化不同进出气口的结构及排布,提出了在保证钹玻璃表面最佳洁净度的情况下,最高效地获取整个腔内洁净度的优化方案,并将该方案与最初方案进行腔内洁净度实验对比。

## 2 数值模拟方法

CFD 的基本思想是:把原来在时间域和空间域上连续的物理量场,用一系列离散点上的变量值集合来代替,并通过一定的原则和方式建立起反映这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得场变量的近似解。

### 2.1 计算模型

以某项目片状放大器原型机的片腔腔体为基础模型,如图 1 所示。片腔腔体尺寸为 1360 mm × 220 mm × 204 mm,安置了 4 块尺寸为 325 mm × 200 mm × 46 mm 的钹玻璃镜片组件,并在组件顶部和底部安装了反射板。

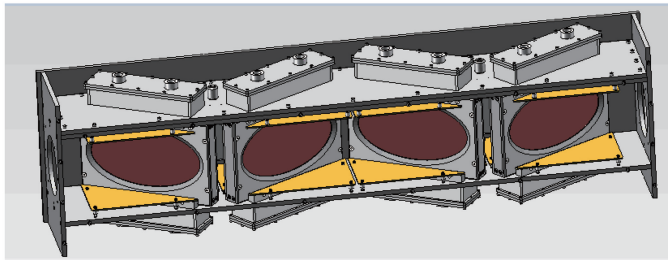


图 1 放大器片腔腔体结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of amplifier slab cavity

为了获得腔体内钹玻璃表面的气流分布、速度场分布,考虑到计算域的面对称性等特点,在不影响模拟计算结果的前提下,对计算模型进行简化。最终简化结果如图 2 所示。

### 2.2 理论公式

假设氮气为不可压缩流体,采用压力基求解器,利用 SIMPLE 算法处理压力-速度耦合关系,湍流模型选择标准  $k-\epsilon$  模型。所用到的控制方程和湍流模型公式如下。

连续方程

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

动量守恒方程

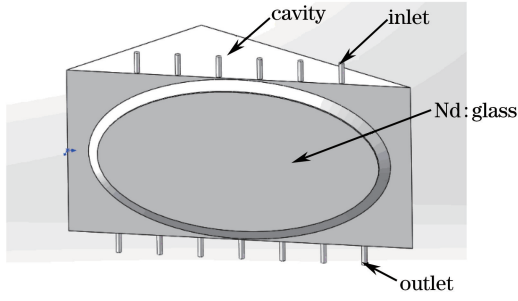


图 2 放大器片腔腔体计算模型(6 孔入 7 孔出)

Fig. 2 Simulation model of amplifier slab cavity(6 inlets and 7 outlets)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (2)$$

湍流动能  $k$  方程

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon, \quad (3)$$

湍流耗散率  $\epsilon$  方程

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (4)$$

式中  $i$  表示应力作用表面的外法线方向;  $j$  表示应力方向;  $\rho$  为流体的密度;  $u_i$  为流体速度沿  $i$  方向的分量;  $p$  为静压力;  $\tau_{ij}$  为应力矢量大小;  $\rho g_i$  为  $i$  方向的重力分量;  $F_i$  为阻力和能源引起的其他能源项;  $k$  为湍流动能;  $\epsilon$  为湍动能耗散率;  $\mu_1$  为层流黏性系数;  $\mu_t$  为湍流黏性系数且  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ;  $\mu$  为有效黏性系数;  $G_k$  为层流速度梯度引起的湍流动能;  $G_b$  为浮力引起的湍流动能;  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$  均为经验常数,  $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{3\epsilon} = 0.8, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

### 2.3 网格划分及边界条件

放大器模型的网格密度直接影响到求解精度和求解收敛性。在该研究中,网格离散格式选取一阶迎风格式,对放大器 6 孔入 7 孔出的模型(孔直径均为 5 mm,间距为 40 mm,出气口每两个孔之间的中心线与入气孔同轴)进行网格划分。当网格数分别为 479189, 615432, 719575 时,出气口最大速度分别为 29.93, 30.10, 30.07 m/s,所得结果的相对偏差均小于 0.56%,证明了网格无关性。

根据实际工作状态,设置入口边界条件为压力入,出口边界条件为压力出,压力差为 0.2 MPa。环境压力值为 101325 Pa,放大器出口用管道连接,直接排放到大气中,所以设置入口压力值为 301325 Pa,出口压力为 101325 Pa;湍流动能取默认值  $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;湍流动能耗散率取默认值  $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,壁面为无滑移壁面。

## 3 腔内流场模拟及模型的验证

对放大器 6 孔入 7 孔出的模型进行模拟,可以获得整个腔内的三维流线、速度场、压力场等信息,由此得到腔内气流流动的方向和组织形式。

由于现有的 CFD 是建立在 Navier-stokes 方程近似解基础上的计算技术,再加上现实边界条件的复杂性,当使用 CFD 解决问题时,首先必须要验证计算模型的准确性。

为了验证模拟结果,以某项目 130 片状放大器原型机为平台,进行放大器腔内气流烟雾实验。由于钕玻璃制造成本昂贵,为减少成本,用相同尺寸的黑橡胶代替。同时,黑橡胶作为黑色背景更有利于气流烟雾的观察。图 3 所示为腔内气体三维流线模拟图,图 4 所示为烟雾实验所得到的腔内气体流动图。

由图 3、4 可以看到,进入放大器腔内的气体,少部分气体直接从出气口排出,大部分气体沿腔体四壁流动,形成一个漩涡。图 3 中的漩涡形状和位置与图 4 均有明显的一致性,在一定程度上说明了整个模拟过程中的参数、计算模型及计算公式都比较合理,模拟结果和实际情况吻合。

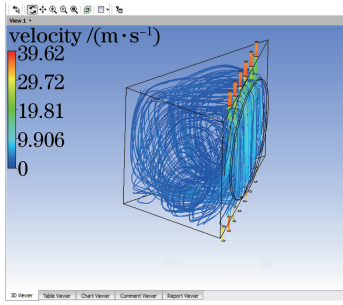


图 3 腔内气体三维流线模拟图

Fig. 3 Simulated 3D streamline map of gas in cavity



图 4 腔内气体流动实验图

Fig. 4 Experimental map of air flow in cavity

## 4 优化模拟与实验

利用氮气冲洗放大器腔内,以获得最佳的钕玻璃表面洁净度和腔内洁净度。受现有放大器钕玻璃的放置方式和放大器光学性能及构造等因素的影响,腔内会形成一个漩涡,由于漩涡内部速度较低,部分污染物在漩涡内旋转,不易排出腔外。在实际应用中,钕玻璃作为激光放大介质,其表面洁净度相比腔内洁净度更为重要。因此,应在保证最佳钕玻璃表面洁净度的前提下,尽可能地获取较高腔内洁净度,为此探讨了儿种现有放大器的优化方式。

### 4.1 进出气口形状对气流分布和腔内速度场的影响

研究了三种不同结构进出气口对钕玻璃表面及腔内流场的影响。

1) 6 孔入 7 孔出的进出气口结构。结构参数如上文所述。

2) 6 孔入槽出的进出气口结构。进气口与 1) 方式相同,不同的是在同一位置将出气孔改成宽为 2 mm、长为 300 mm 的槽。

3) 槽入槽出的进出气口结构。出气口与 2) 方式相同,不同的是将进气孔改成宽为 2 mm、长为 300 mm 的槽,槽距钕玻璃表面 12 mm。

图 5 所示为腔内钕玻璃表面速度流线图,图 6 所示为腔内速度分布云图,模型上方为进气口,下方为出气口。

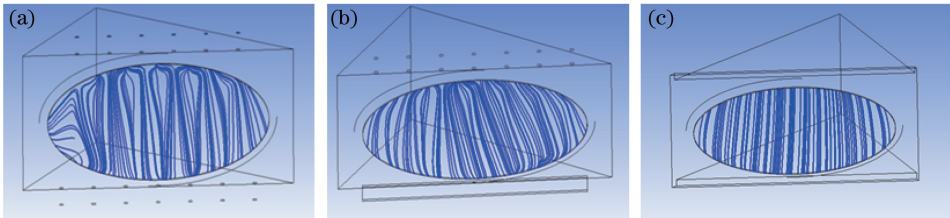


图 5 不同进出气口结构下的钕玻璃表面速度流线。(a) 6 孔入 7 孔出; (b) 6 孔入槽出; (c) 槽入槽出

Fig. 5 Velocity streamlines on neodymium glass surface with different structures of inlets and outlets.

(a) 6 inlets and 7 outlets; (b) 6 inlets and groove outlet; (c) groove inlet and groove outlet

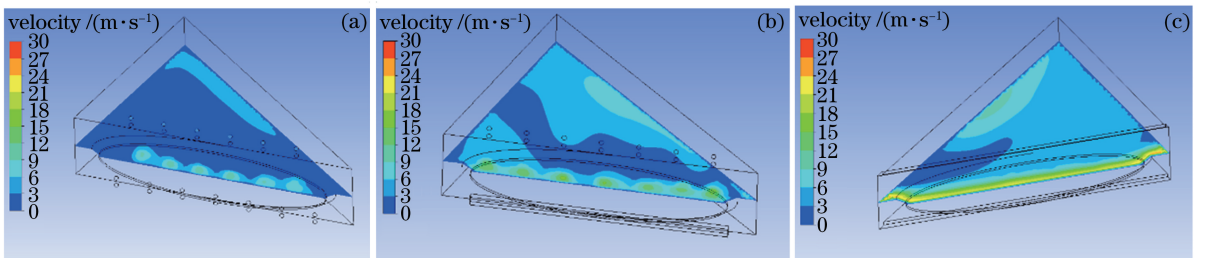


图 6 不同进出气口结构下的腔内速度云图。(a) 6 孔入 7 孔出; (b) 6 孔入槽出; (c) 槽入槽出

Fig. 6 Velocity cloud map in cavity with different structures of inlets and outlets. (a) 6 inlets and 7 outlets;

(b) 6 inlets and groove outlet; (c) groove inlet and groove outlet

由图 5 可以看到,在 6 孔入 7 孔出结构的钕玻璃镜片表面,靠近顶部及左侧的速度分布不均匀,左侧有发展为速度滞止涡旋区的趋势;6 孔入槽出结构的钕玻璃表面的速度分布有明显改善,仅顶部出现轻微的速度分布不均匀现象;槽入槽出结构能够获得分布均匀的钕玻璃表面气流。

由图 6 可以看出,6 孔入 7 孔出和 6 孔入槽出这两种进出气口结构,钕玻璃表面区域的气流分布不均匀,仅入气口正下方的钕玻璃表面的气流有较高速度,而腔内大部分区域的气流速度较低;槽入槽出的进出气口结构能获得速度均匀分布的钕玻璃表面气流,且腔内大部分区域的气流速度较高。

#### 4.2 进出气口排布对气流分布和腔内速度场的影响

模拟了三种不同排布对钕玻璃表面及腔内流场的影响情况,三种不同排布的进出气口均采用宽为 2 mm、长为 300 mm 的槽。

- 1) 两槽对应。进出气口均距钕玻璃表面 12 mm。
- 2) 入槽远离镜面。进气口距钕玻璃表面 50 mm,出气口距钕玻璃表面 12 mm。
- 3) 出槽远离镜面。进气口距钕玻璃表面 12 mm,出气口距钕玻璃表面 50 mm。

图 7 所示为不同进出气口排布腔内钕玻璃表面速度流线图,图 8 所示为腔内速度分布云图。由图 7 可以看出,无论是入槽远离镜面还是出槽远离镜面,都会导致钕玻璃镜面成为两涡旋区的交界面,形成速度为零的死角。由图 8 可以看出,出槽远离镜面的进出气口排布获得的腔内流场速度较高的区域最大。

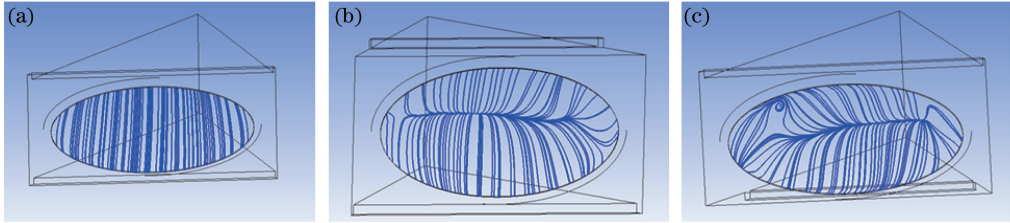


图 7 不同进出气口排布下的钕玻璃表面速度流线。(a) 两槽对应; (b) 入槽远离镜面; (c) 出槽远离镜面

Fig. 7 Velocity streamlines on neodymium glass surface with different locations of inlets and outlets.

(a) Two grooves being homologous; (b) groove inlet far from mirror surface; (c) groove outlet far from mirror surface

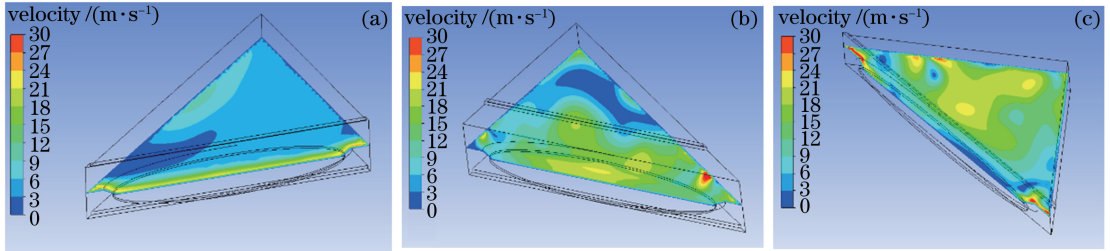


图 8 不同进出气口排布下的腔内速度云图。(a) 两槽对应; (b) 入槽远离镜面; (c) 出槽远离镜面

Fig. 8 Velocity cloud maps in cavity with different locations of inlets and outlets. (a) Two grooves being homologous;

(b) groove inlet far from mirror surface; (c) groove outlet far from mirror surface

#### 4.3 洁净度实验

根据上述优化分析,进出气口均采用槽结构,且两槽上下对应,在保证钕玻璃表面最佳洁净度的前提下,该排布可获得较高的腔内洁净度。分别测量了最初设计方案(6 孔入 7 孔出的进出气口结构)和最佳优化方案(槽入槽出的进出气口结构,且两槽上下对应的排布)对应的片腔内的洁净度。

采用目前最常用的监测片腔洁净度变化的方法,即利用尘埃粒子计数器,通过测量放大器片腔内悬浮颗粒浓度得到片腔的洁净度。对放电后吹气 20 min 及停止吹气后 2 h 内腔内的洁净度变化情况进行了监测,并对比两个结果,如图 9 所示。

由图 9 可以看到,前 20 min 为吹气过程中腔内洁净度的变化,槽入槽出的进出气口结构能在 5 min 以内达到洁净度 10 级的需求,而 6 孔入 7 孔出的结构则需要 10 min;从停止吹气后 2 h 的监测结果中可以看出,两种结构的放大器腔内洁净度都是先上升后趋于平稳,但可以明显地看出,相比于 6 孔入 7 孔出结构,槽

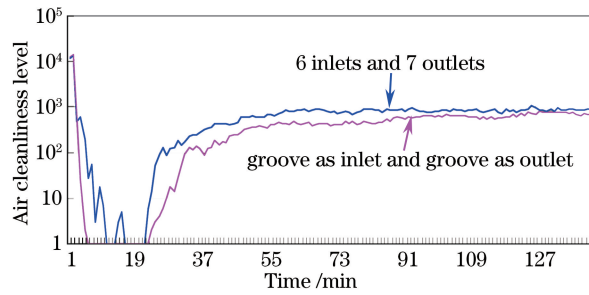


图 9 放大器腔内洁净度变化

Fig. 9 Cleanliness variation in amplifier cavity

入槽出结构的洁净度上升缓慢,而且值较小。这说明经过优化后,槽入槽出的进出气口结构使洁净度达到10级以内所需时间比原有方案缩短一半,且排出的污染物颗粒更多。

吹气使腔内形成一个漩涡,部分污染物始终在漩涡内旋转而无法排出,停止吹气后漩涡消散,污染物开始稀释扩散,这也在一定程度上验证了模拟计算模型的正确性。

## 5 结 论

运用数值模拟与实验验证相结合的方法,获得了放大器腔内流体的流动状态,并对如何获取更高洁净度的腔体进行了优化分析。结果表明,将进出气口改为槽入槽出的结构,且两槽上下对应排布,在保证铍玻璃表面最佳洁净度的前提下,可最高效获取整个腔内洁净度。利用CFD方法可准确模拟出放大器腔内气流流场,达到对放大器进行有效洁净控制的目的。该方法可以推广到后续不同尺寸的放大器设计,为将来高功率固体激光器的主放大器进出气口结构、排布方式等参数的设计提供一定参考。

## 参 考 文 献

- Lowdermilk W H. Status of the National Ignition Facility project[C]. SPIE, 1996, 3047:16-37.
- Li Yangshuai, Zhu Jianqiang, Pang Xiangyang, *et al.* Numerical simulation of debris removal trajectories on transport mirrors in high power laser system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102010.  
李养帅, 朱健强, 庞向阳, 等. 高功率激光装置中传输镜表面颗粒物去除轨迹的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102010.
- Horvath J A. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design[R]. California: LLNL, 1996.
- Yu Haiwu, Zheng Wanguo, 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.  
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.
- Stowers I F, Horvath J A, Menapace J A, *et al.* Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifier[R]. California: LLNL, 1998.
- 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.  
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.
- Ren Z Y, Zhu J Q. Evaluation method of thermal recovery uniformity for high energy amplifier[C]. SPIE, 2012, 8551: 855109.
- Ren Z Y, Zhu J Q, Liu Z G, *et al.* Analysis of convective heat transfer coefficient for SG II prototype[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(s2): s21410.
- Ren Z Y, Zhu J Q, Huang H B, *et al.* Numerical research and optimization of convective heat transfer for multi-segment amplifiers[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 189-193.
- Li Yanju, Wu Jinhui, Zhang Jinming, *et al.* Application of CFD in airflow study for biosafety laboratories [J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2007, 1: 15-17.  
李艳菊, 吴金辉, 张金明, 等. CFD在生物安全实验室气流组织研究中的应用[J]. 洁净与空调技术, 2007, 1: 15-17.

- 11 Geng Wenqing, Ma Zonghu, Shang Hong, *et al.* Influence of BSL-3 laboratory ventilation pattern and location of contaminant source on distribution of aerosol particles by numerical method[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2011, 32(1): 7-11.  
耿文清, 马宗虎, 尚 红, 等. BSL-3 实验室通风方式及污染源位置对气溶胶颗粒分布的数值研究[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(1): 7-11.
- 12 Zhao Minqi. Numerical simulation of air distribution mode and optimization on biological safety cabinet[D]. Shanghai: Donghua University, 2006.  
赵民琪. 生物安全柜的气流模拟和分析[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- 13 Jiang Shengnan. The simulation and analysis of airflow in biological safety cabinet[D]. Shanghai: Donghua University, 2008.  
姜胜男. 生物安全柜气流模拟及优化设计[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- 14 Meng shaoxian. Amplified medium surface damage induced by particulate in high power laser systems [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2000, 37(8): 28-31.  
孟绍贤. 灰尘引起高功率激光系统放大介质的表面破坏[J]. 激光与光电子学进展, 2000, 37(8): 28-31.
- 15 Xu Zhonglin, Zhang Yizhao, Zhang Yangguo, *et al.* Discussion on the place of supply air outlet and return air inlet in biosafety laboratories[J]. Contamination Control & Air-conditioning Technology, 2005, 4: 15-20.  
许钟麟, 张益昭, 张彦国, 等. 关于生物安全实验室送、回风口上下位置问题的探讨[J]. 洁净与空调技术, 2005, 4: 15-20.