间断多次氮气吹扫法提高片状放大器在线洁净度研究

张攀政[1]，冯滔[1*]，谢静[1]，任志远[1]，杨晓伟[1]，王利[1]，李菁辉[1]，张志祥[1]，曹兆栋[2]，夏志强[1]，胡静芬[1]，柴志豪[1]，刘志刚[1]，周申蕾[1]，马伟新[2]，朱俭[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]中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所，上海 201800

摘要 高功率片状放大器在线运行时氙灯辐照导致片腔内产生大量气溶胶，易引起钕玻璃污染，影响其使用寿命。采用洁净氮气吹扫恢复片腔内的洁净环境是片状放大器在线运行时的主要洁净手段。研究了氮气吹扫过程中片腔内涡流对洁净度的影响，结果显示涡流对气溶胶颗粒的禁锢作用会导致腔内气溶胶颗粒的大量残留，且无法通过延长吹扫时间或调整吹扫流速加以解决。针对这一问题，提出了间断多次氮气吹扫对腔内气溶胶进行循环稀释的在线洁净控制方法，该方法使腔内涡流经历不断破坏和重建过程，涡流场内滞留的气溶胶颗粒含量也得到不断稀释，从而大幅提高片腔洁净度。针对 Φ130 mm 单口径片状放大器进行了对比实验研究。采用间断吹扫法之后，腔内残留气溶胶颗粒为连续吹扫时的 1/100，片腔洁净度在 15 h 的观测时间内始终保持在 40 级以内。该方法普适有效，为避免片状放大器钕玻璃气溶胶污染，增加其在线使用寿命提供了重要参考。

关键词 激光光学；片状放大器；在线洁净；气溶胶；间断多次吹扫；涡流

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL201845.0401014

Disk Amplifier On-Line Cleanliness Improvement Achieved by Intermittent Nitrogen Gas Purge

Zhang Panzheng[1], Feng Tao[1], Xie Jing[1], Ren Zhiyuan[1], Yang Xiaowei[1], Wang Li[1], Li Jinghui[1], Zhang Zhixiang[1], Cao Zhaodong[2], Xia Zhiqiang[1], Hu Jingfen[1], Chai Zhihao[1], Liu Zhigang[1], Zhou Shenlei[1], Ma Weixin[2], Zhu Jian[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]*Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai* 201800, *China*

Abstract While the disk amplifier is operated, the aerosols originating from the decomposition of organic material exposed to flash lamp light is inevitable, which can cause the disk contamination and damage consequently. The nitrogen gas purging is routinely employed to re-achieve the slab cavity cleanliness, which is fundamentally required for disk amplifier reliable performance. The influence on aerosol dissipation by swirl is measured, demonstrating that the desirable cleanliness can not be achieved simply by prolonging the purging time or adjusting the flowing rate as plenty of aerosol is slaved in swirl. So we propose the aerosol dissipation by intermittent purging. The decaying of aerosol concentration is achieved rapidly by repeated dilution as the swirl is destructed time after time. The comparative experiment is carried out at a Φ130 mm disk amplifier specially. After intermittent purging, the residual aerosol concentration in slab cavity is 1/100 of that after a continuous but longer purging. The slab cavity environment

收稿日期：2017-09-27；**收到修改稿日期**：2017-10-21

基金项目：中国科学院青年创新促进会

作者简介：张攀政(1983—)，男，博士，副研究员，主要从事光纤激光器、大口径片状放大器及高功率激光系统集成技术等方面的研究。E-mail：nwpuzhangpanzheng@163.com

* **通信联系人**。E-mail：fengtao1987@siom.ac.cn

cleanliness remains lower than level 40 in the following 15 h, which is much more desirable to prevent neodymium glass from contamination and damage.

Key words laser opyics; disk amplifier; on-line cleanliness; aerosol; intermittent purge; swirl

OCIS codes 140.3280; 130.6622; 140.3330

1 引　言

用于惯性约束核聚变实验研究的高功率激光驱动器中，片状放大器提供了系统80%以上的输出能量，很大程度上决定了系统的输出能力，同时在造价和维护成本上也占据了很大的比例[1-3]。高功率片状放大器采用氙灯对钕玻璃进行面抽运，钕玻璃抽运面同时也是激光系统的通光面。该通光面直接接受约10 J·cm^{-2}的高强度氙灯光辐照，如果表面不洁净，极易引起通光面发生损伤[4-6]，直接影响激光输出质量。所以片状放大器的洁净控制是高功率激光驱动器污染控制的首要任务[7]。

片状放大器的洁净控制包括设计、加工、超净清洗、超净装校、运行期间的在线洁净控制等各个环节。目前工程上还无法实现放大器的绝对洁净，无法避免运行时氙灯辐照导致片腔内气溶胶的产生。在运行过程中钕玻璃包边粘结材料、片腔密封材料以及在清洗和超净装校中残留的有机污染物在氙灯辐照下会发生热化学分解，产生大量微米尺度的悬浮碳颗粒(气溶胶)[8]。这些悬浮颗粒在自然沉降过程中会再次聚合形成更大的颗粒并粘附在钕玻璃表面造成污染，导致钕玻璃在放大器后续运行发次的氙灯辐照下产生损伤[4-6]。所以，片状放大器的洁净控制要从结构上进行优化使其有利于污染物的控制[9-10]，采用科学的超净清洗工艺，并且在装校中实行严格的洁净控制[11-12]，从而获得尽可能高的初始洁净度。同时，必须采用科学有效的在线洁净控制技术，迅速去除运行中片腔内产生的气溶胶，恢复片腔洁净度，避免钕玻璃受到污染，为下一发次的运行提供洁净的片腔环境。目前工程上一般采用洁净氮气连续吹扫进行在线洁净控制，但由于片状放大器片腔空间结构的复杂性，氮气吹扫过程中在片腔内易形成涡流并在涡流场内滞留气溶胶颗粒[13-15]，无法满足片状放大器洁净要求。其中文献[15]通过改进放大器的进出气口结构及位置排布，以获得最佳的流场分布。但仍然无法有效消除腔内涡流及其影响，实验结果显示吹扫后1 h内腔内洁净度便上升到千级水平。

针对上述问题，本文提出了间断多次氮气吹扫法实现在线洁净控制的方案，通过多次间断性的氮气吹扫，使片腔内的涡流经历多次破坏和重建过程，使涡流场内滞留的气溶胶颗粒被不断稀释，从而降低气溶胶颗粒在片腔内的残留，大幅提高片腔洁净度。利用Φ130 mm单口径片状放大器进行了氮气间断吹扫在线洁净技术的实验研究，得出适合于该放大器的具体的间断吹扫方案。通过4次间断吹扫之后，片腔内洁净度可长期保持在40级以内，相比连续吹扫后的2500级得到了明显改善，满足放大器洁净要求。实验结果证明了间断多次氮气吹扫在线洁净方法的科学有效性，对高功率激光系统片状放大器在线洁净度控制和高效运行具有重要的参考价值。

2 实验设备及原理

实验装置是利用Φ130 mm单口径片状放大器，如图1(a)所示，每台放大器有4片钕玻璃，以布儒斯特角安装在由片腔框架、上下盖板、隔板玻璃、窗口玻璃共同组成的密封片腔内。放大器水平放置，对应片腔内钕玻璃呈竖直放置状态。氙灯水平排布，分布在片放两侧对钕玻璃进行面抽运。如图1(b)所示，片腔上下盖板在钕玻璃对应位置处各设有一个气体缓冲室。每个气体缓冲室在片腔一侧有两排各12个沿钕玻璃表面方向分布的小孔作为片腔氮气吹扫的进气孔和出气孔。如图1(c)所示，每个气体缓冲室外侧盖板设有3个气体接口，分别通过内径8 mm洁净软管与氮气供应系统和排气系统连接。如图1(d)所示，放大器氮气吹扫方向采用上方进入下方排出的方式，洁净氮气通过软管进入片腔上方气体缓冲室后通过两排均匀分布的小孔以相同的流速平行于钕玻璃表面进入片腔，排出气体从片腔底部小孔进入气体缓冲室后通过连接软管进入排气系统。尘埃粒子计数器通过长0.5 m、内径8 mm的洁净软管连接一个出气接口。当进行氮气吹扫时，氮气顺着出气口被压入粒子计数器，测量排出气体内的颗粒含量；当氮气吹扫结束时，粒子计数器内置气体泵自动启动，抽取片腔内气体监测片腔内洁净度。文中实验测试均以0.5 μm以上的颗粒数浓度作为气体洁净度的判断标准。吹扫实验所用氮气为小于10级的洁净干燥氮气。

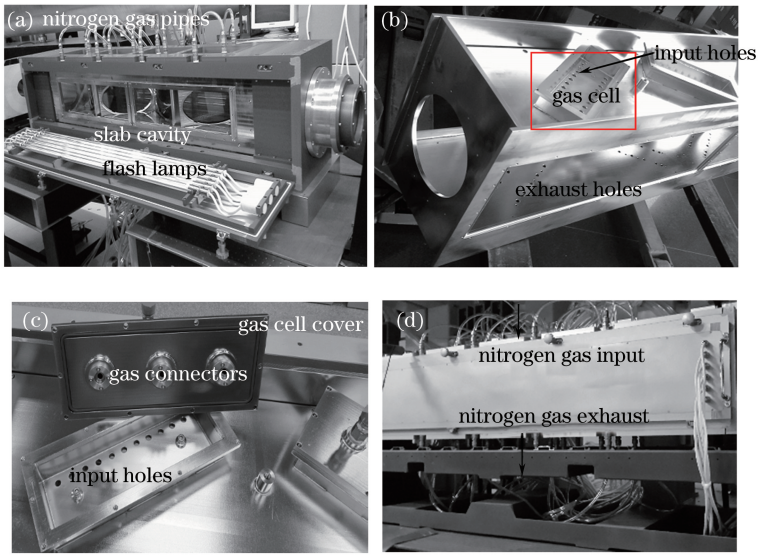

图 1　实验用片状放大器结构示意图。(a)片腔结构图;(b)气室及吹扫孔分布;(c)气室及吹扫孔实物图;(d)氮气软管及连接图

Fig. 1　Schematic of the disk amplifiers used in experiment. (a) Slab cavity; (b) distribution of gas cell and gas purging holes; (c) gas cell and gas purging holes; (d) photo of nitrogen gas pipes and connection

由于片腔上下表面都设有高反射率的三角反射板用以提高片状放大器的增益和能量转换效率,氮气吹扫孔无法均匀遍布整个片腔上下表面;钕玻璃、机械框架、支撑结构也使片腔内部空间结构复杂。所以,吹入片腔的氮气无法在整个片腔内均匀流动,吹扫过程中会在片腔内产生涡流,严重影响放大器的在线洁净。间断多次氮气吹扫可以使片腔内的涡流被多次破坏,残留在片腔内的污染颗粒被多次稀释,从而达到洁净效果。基本原理如下:在充入吹扫氮气初期,腔内气体流场处于非稳定状态,大量气溶胶随氮气排出腔外。随着腔内涡流区的形成和逐渐稳定,涡流区内的气溶胶颗粒做循环往复运动而被滞留在涡流区内无法排出。当涡流区外的气溶胶颗粒全部被排出片腔后则停止充气,腔内稳定涡流破坏,涡流场内滞留的气溶胶颗粒迅速向腔内空间扩散,腔内气溶胶颗粒的平均浓度得到稀释。当腔内残留颗粒扩散充分时再次开启氮气吹扫,重新在片腔内逐渐形成稳定涡流并将涡流场外分布的气溶胶颗粒充分排出片腔,此时涡流场内滞留的气溶胶颗粒作为第二次吹扫的残留颗粒。再次停止氮气,则腔内涡流被再次破坏,残留颗粒再次向空间扩散,腔内平均颗粒浓度再次得到稀释。待颗粒扩散充分之后再次开启氮气吹扫,如此反复则腔内气溶胶颗粒得到不断稀释,最终达到在线洁净的要求。

3　模拟分析

以 Φ130 mm 单口径片状放大器为原型,采用计算流体力学(CFD)数值模拟了氮气吹扫时片腔内的气体流场和粒子运动轨迹。如图 2(a)所示,腔内气体流场存在明显的涡流。图 2(b)为模拟得出的涡流区内气溶胶颗粒的运动轨迹。可以看出,一旦稳定的涡流形成,则处于其中的气溶胶颗粒将滞留在涡流区内进行循环往复运动而无法随氮气排出腔外。

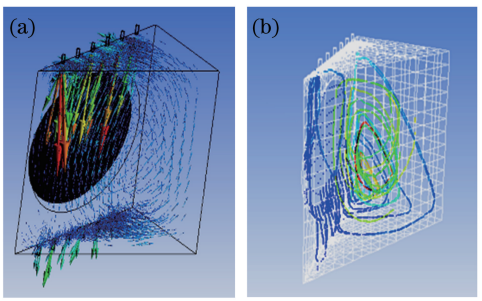

图 2　片腔内氮气流场模拟结果。(a)腔内氮气流场模拟结果;(b)涡流场内颗粒运动轨迹模拟结果

Fig. 2　Simulated flowing trail in slab cavity. (a) Simulated nitrogen gas flowing trail; (b) simulated motion trail of the particles within vortex area

图 3 为氮气连续吹扫时腔内颗粒数变化模拟结果。理论模型中以 0.5 μm 颗粒作为考虑对象,由于运算量的关系,取初始颗粒数为 3000 并均匀分布。连续吹扫时间为 30 min,进气口氮气流速分别为 25,35,45 L·min^{-1}。可以看出,腔内颗粒残留量随着氮气流速不同会有所差别。三种流速下对应的颗粒残留量分别为 5%、4%、3.7%,都无法满足放大器在线洁净要求。说明通过调整氮气流速难以有效

克服涡流对片腔洁净度的影响。另外，三种氮气流速下，腔内气溶胶颗粒大幅减少的吹扫时间只有最初的几分钟，在后续的吹扫时间里腔内颗粒残留量保持不变。说明将颗粒排出片腔的时间主要集中在稳定涡流的形成过程中以及形成后的很短时间内，通过延长吹扫时间无法克服涡流对洁净度的影响。所以，在无法对放大器片腔结构及氮气孔配置进行大幅更改从而彻底消除腔内涡流的情况下，涡流对片腔洁净度的影响成为高功率激光工程中连续氮气吹扫难以克服的问题。

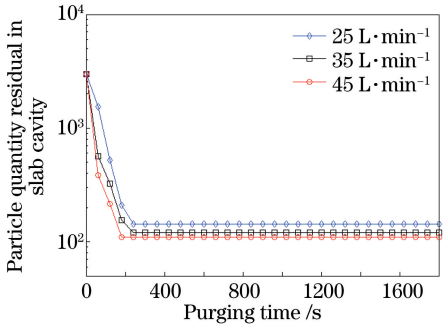

图 3　不同氮气流速下连续吹扫过程中腔内残留的颗粒数变化

Fig. 3　Particle quantity residual in slab cavity during continuous purging with different flowing rates

图 4 为氮气间断多次吹扫时腔内颗粒数变化的理论模拟结果。吹扫时间分别为 9，5，3，3 min，多次吹扫之间的间隔时间均为 5 min。模型中取三种不同的进气口氮气流速，分别为 25，35，45 L·min^{-1}。

由图 4 模拟结果可知，每次开启吹扫初期腔内颗粒数会迅速下降，而中后期保持不变直到下次吹扫开启，所以腔内颗粒数总体上呈现阶梯型的下降。4次间断吹扫之后，不同流速对应的腔内颗粒残留

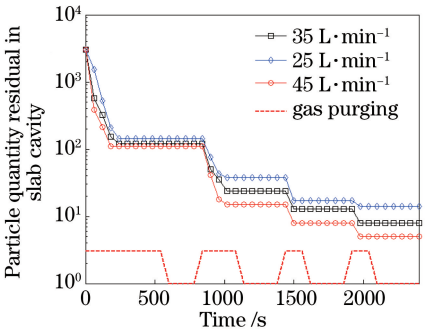

图 4　不同氮气流速下间断多次吹扫过程中腔内残留的颗粒数变化

Fig. 4　Particle quantity residual in slab cavity during intermittent purging with different flowing rates

量分别为 0.47%、0.27%、0.17%。与 30 min 连续吹扫相比，残留量分别降低了 10，15，22 倍。间断多次氮气吹扫通过腔内涡流的多次破坏和重组，增加了吹扫过程中稳定涡流形成过程所经历的总时间，从而增加了颗粒排出腔外的总有效时间。结合间隔等待期间腔内颗粒的充分扩散，使腔内颗粒浓度得到多次稀释，从而大幅改善了放大器在线洁净效果。

4　实验结果

图 5(a)为 Φ130 mm 单口径片状放大器片腔内的气体流场实验观测图，可以明显观察到涡流的存在。为了说明涡流对片状放大器在线洁净度的影响，采用相同的连续吹扫时间，分别测试对比了不同出气口分布和不同氮气流速时片腔排出气体的洁净度及吹扫结束后片腔内的洁净度，结果如图 5(b)、(c)所示。实验中通过在出气口施加特定气阻来模拟不同的片腔出气口分布，图中无数据点的时间部分表示粒子计数器测得 0.5 μm 以上颗粒数为 0。

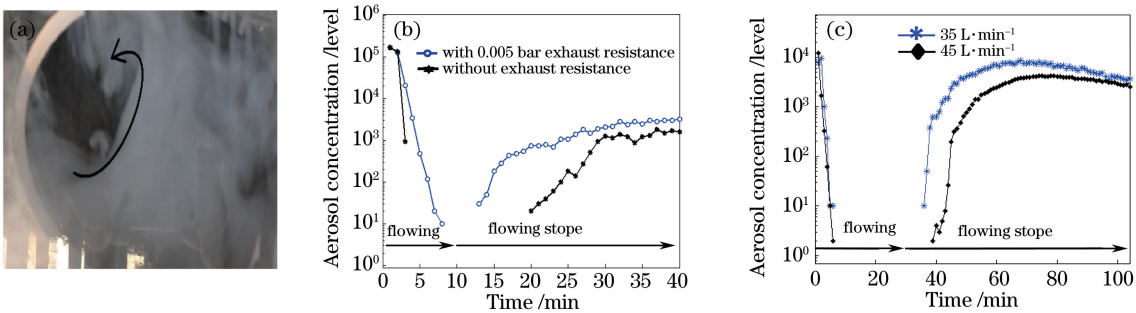

图 5　腔内涡流场及不同流场下腔内洁净度变化对比。

(a)腔内涡流场烟雾实验图；(b)不同出气口分布的洁净度对比结果；(c)不同氮气流速的洁净度对比结果

Fig. 5　Swirl in slab cavity and cleanliness comparison with different flow fields. (a) Smoking experiment for swirl in slab cavity; (b) cleanliness comparison with different outlet settings; (c) cleanliness comparison with different gas flowing rates

可以看出，在连续吹扫情况下，无论改变出气口分布还是更改吹扫氮气流速或吹扫时间，吹扫结束后腔内洁净度都会变差，说明腔内含有大量的残留颗粒，无法满足放大器在线洁净度要求。同时，吹扫后期排出气体都不含气溶胶颗粒，说明通过延长氮气吹扫时间无法进一步减少腔内颗粒残留。只是不同情况下腔内形成涡流所需要的时间、涡流区域的大小以及将涡流区域以外颗粒排出片腔所用的时间会略有差别，所以表现出排出气体达到零颗粒所用的时间不同且吹扫结束后腔内洁净度变差的程度也略有不同。其中，采用 35 L·min^{-1}进气口流速进行 30 min 连续吹扫后 1 h，腔内洁净度逐渐稳定在 2500 级左右，说明腔内仍然残留了体积分数约 25%的气溶胶颗粒。

图 6 所示为 Φ130 mm 单口径片状放大器测得的不同氮气流速所对应的排出气体洁净度变化情况。可以看出，氮气流速越小，片腔内建立稳定涡流并充分排出涡流场外气溶胶所需的吹扫时间越长。结合氮气供应系统等具体实验条件及图 4 中的模拟结果，多次间断吹扫实验中采用的进气口氮气流速为 35 L·min^{-1}。

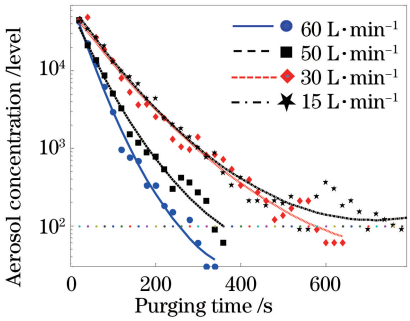

图 6　不同氮气流速下腔内气溶胶浓度随吹扫时间的变化

Fig. 6　Change of aerosol concentration with purging time under different nitrogen flowing rates

间断多次吹扫实验的具体过程如下：放大器运行之后，保持粒子计数器始终处于监测状态，开启氮气吹扫并保持 35 L·min^{-1}进气口流速，当粒子计数器测得颗粒数为 0 时说明腔内已经建立稳定涡流并且涡流场外气溶胶颗粒已经充分排出片腔，此时停止氮气，第一次吹扫结束；当粒子计数器重新监测到气溶胶颗粒，说明腔内残留气溶胶已经充分扩散，此时重新开启氮气吹扫，第二次吹扫开始；当粒子计数器测得颗粒数再次降为 0 时说明腔内又重新建立稳定涡流并且涡流场外气溶胶颗粒已经充分排出片腔，此时停止氮气，第二次充气结束。如此循环直至吹扫结束后测得片腔内颗粒浓度不再出现上升。

针对 Φ130 mm 单口径片状放大器，间断吹扫实验的具体参数为间断吹扫 4 次，单次吹扫时间分别为 9，5，3，3 min，间隔时间均为 5 min。图 7(a)、(b)所示为间断多次氮气吹扫过程中测得的片腔洁净度变化过程。吹扫过程中排出气体洁净度重复出现的临时性的洁净状态正是腔内涡流不断形成和破坏的具体表现。同时，单次吹扫初期排出气体的气溶胶颗粒浓度也在不断降低，表明随着吹扫次数的增加，片腔内滞留的气溶胶颗粒浓度得到不断稀释。

图 7(c)为吹扫结束后片腔洁净度的长时间监测结果，放大器片腔洁净度在 900 min 的监测时间里始终保持在 40 级以内。与图 4(c)中 30 min 连续吹扫的洁净效果相比，通过采用间断多次吹扫的在线洁净方法，腔内气溶胶残留量降低了至少 100 倍，为片状放大器的运行提供了良好的片腔在线洁净环境。对比吹扫前 1.6 万级的腔内洁净度，吹扫后腔内气溶胶残留量约为 0.25%，与模拟结果中 0.27%的颗粒残留量基本匹配。

两种吹扫方式下片腔洁净度的鲜明对比证明了

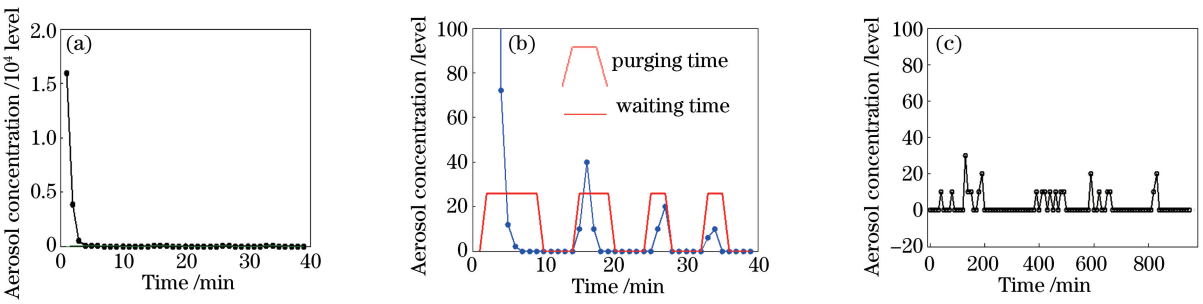

图 7　间断多次氮气吹扫片腔洁净度变化情况。(a)片腔洁净度变化整体过程；(b)间断多次氮气吹扫过程及对应的片腔洁净度变化细节；(c)吹扫结束后片腔洁净度长时间监测结果

Fig. 7　Change of the cavity cleanliness during intermittent purging procedure. (a) Overview of the cavity cleanliness change; (b) details of cavity cleanliness change corresponding with purging procedure; (c) long-term monitoring results of cavity cleanliness after intermittent purging

间断多次氮气吹扫在线洁净方法的科学有效性。但必须指出的是，间断吹扫能够大幅改善片腔在线洁净度的前提条件是吹扫过程中的单次吹扫都能够使片腔内的气溶胶颗粒得到充分稀释，即吹扫流速及单次吹扫时间满足腔内建立涡流并将涡流区外的气溶胶颗粒充分排出腔外的要求。由于不同规格片状放大器的片腔规格、内部结构、气孔配置等有所不同，所以不同放大器所必需的氮气流速、吹扫时间会有所不同。同时氮气停止以后腔内气溶胶颗粒充分扩散所需的具体时间也会有所不同。所以针对不同规格的片状放大器，在采用间断多次吹扫在线洁净方法时，须对吹扫氮气流速、单次吹扫时间、间隔时间等进行具体实验优化。既能充分达到片放在线洁净效果，又不会造成洁净氮气资源的浪费。

5 结　论

片状放大器在线洁净是高功率激光系统洁净工程的重要内容，决定了系统的运行效率和运行成本。由于片腔机械结构的复杂性，吹扫氮气在片腔内不可避免形成涡流，导致气溶胶颗粒残留。本文提出氮气间断多次吹扫的在线洁净方法，通过间断性的多次氮气吹扫，使腔内的涡流被多次破坏和重建，不断降低涡流场内滞留气溶胶颗粒浓度，达到腔内气溶胶多次稀释的效果，有效提升了片腔在线洁净度。利用 Φ130 mm 单口径片状放大器进行了间断多次氮气吹扫的对比实验研究。采用优化后的间断多次吹扫方式，片腔洁净度得到大幅改善，可长期保持在 40 级的水平，腔内残留气溶胶颗粒与连续吹扫方式相比降低了 100 倍。有效避免了钕玻璃的污染和损伤，为片状放大器安全有效的在线运行提供了保障。

在不改变片腔机械结构、不影响放大器增益性能、不增加有效氮气吹扫时间的前提下，采用间断多次吹扫的方法有效降低了腔内气溶胶残留量，大幅改善片状放大器的在线洁净度。该方法科学有效且具有普适性。但必须指出的是，由于不同片状放大器的规格、结构不尽相同，对吹扫氮气流速、间断吹扫次数、单次吹扫时间、间隔时间等的具体要求也不同。所以文中针对 Φ130 mm 单口径片状放大器得出的具体吹扫参数并不能完全适用于所有片状放大器。在具体应用间断多次氮气吹扫在线洁净方法时，还需针对具体放大器进行具体实验测试。

参 考 文 献

[1] Lowdermilk W H. Status of the National Ignition Facility project[C]. SPIE, 1996, 3047: 16-37.

[2] Erlandson A C, Rotter M D, Frank D N, *et al*. Design and performance of the Beamlet amplifiers [R]. UCRL-LR-105821-95, 1996.

[3] Hayden J S, Campbell J H, Payne S A. Development of a laser glass for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 2007, 6545: 654508.

[4] Stowers I F, Horvath J A, Menapace J A, *et al*. Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifiers[C]. SPIE, 1999, 3492: 609-620.

[5] Honig J. Offline slab damage experiments comparing air and nitrogen purge[R]. NIF-0070328, 2001.

[6] Honig J, Ravizza D. Nova retrospective and possible implications for NIF[R]. NIF-0110227, 1999.

[7] Cheng X F, Wang H B, Miao X X, *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.

[8] Honig J. Cleanliness improvements of National Ignition Facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers[J]. Optical Engineering, 2004, 43 (12): 2904-2911.

[9] Horvath J A. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design[C]. SPIE, 1996, 3047: 148-157.

[10] Yu H W, Zheng W G, Tang J, *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.

[11] Shen T H. The cleaning of aluminum frame assembly units[R]. UCRL-ID-14393, 2001.

[12] Sommer S C, Stowers I F, van Doren D E. Clean construction protocol for the National Ignition Facility beampath and utilities [J]. Journal of the IEST, 2003, 46(1): 85-97.

[13] Ren Z Y, Zhu J Q. Evaluation method of thermal recovery uniformity for high energy amplifier [C]. SPIE, 2012, 8551: 855109.

[14] Li Y J, Wu J H, Zhang J M, *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.

[15] Yang X W, Liu Z G, Ren Z Y, *et al*. Simulation and optimization of internal flow field in high power laser slabe amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901002.
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(9)：0901002.