

文章编号: 0258-7025(2009)11-2849-04

# 延时水冷实现组合式钕玻璃片状放大器的主动热恢复

刘建国 贺少勃 陈远斌 刘勇 杨东 陈林

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 针对组合式片状放大器(MSA)只能进行被动热恢复的现状,研究了放大器中各关键单元器件的热恢复时序。结果表明,抽运结束后,钕玻璃和隔板玻璃之间的热传递存在交互变化的特点,在隔板玻璃升温之前采用主动冷却可消除钕玻璃主要热源。提出了采用延时全腔水冷的设计,从而在不影响放大器效率的基础上实现了主动热恢复,并就典型放大器给出了延时参数。

**关键词** 惯性约束核聚变; 主动热恢复; 延时水冷; 组合式片状放大器; 钕玻璃

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2849

## Time-Delayed Water-Cooled Design Accelerates Thermal Recovery of the Multi-Segment Amplifiers

Liu Jianguo He Shaobo Chen Yuanbin Liu Yong Yang Dong Chen Lin

(Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** Theory simulation and experiment was carried out for thermal recovery of the multi-segment amplifiers (MSA). New design of time delayed water cooling was developed isolate the heat transferred from flashlamp to Nd glass which contributes more than half of the unwanted heat of Nd glass. The delayed time of  $4 \times 2 \times 3$  amplifiers is about 10 minutes.

**Key words** inertial confinement fusion; thermal recovery; time-delayed water cooling; multi-segment amplifier; Nd glass

### 1 引 言

惯性约束核聚变(ICF)激光装置的运行频率受限于钕玻璃片状放大器的热恢复性能。由于该类装置造价高昂,研究钕玻璃片状放大器的热恢复加速技术,对于提高装置运行效率、降低成本具有重要意义。

目前国内外 ICF 激光装置钕玻璃片状放大器均采用紧凑的组合式结构。这种结构在相对小的体积内集成了氙灯、隔板玻璃、钕玻璃、反射器等单元器件,大大提高了放大器的能量转换效率<sup>[1]</sup>。然而,这种结构也给放大器快速热恢复带来困难<sup>[2~4]</sup>。美国 NIF 装置曾经考虑过采用在 NOVA 装置上成功应用的水对流冷却技术,但该技术中氙灯水冷需要采用水套管,会增加抽运器件体积,导致抽运效率下降及抽运均匀性变差;而如果采用全腔水冷,过厚的

液体层也会带来抽运效率下降的问题,因此该技术最终未被采用,目前国内外该放大器的冷却主要采用被动的自然冷却。

本文基于组合式  $4 \times 2 \times 3$  钕玻璃片状放大器结构,从理论上研究了放大器氙灯、隔板玻璃、钕玻璃、反射器等单元器件的热恢复时序及相互之间的影响,从实验上进行了验证,并在此基础上提出了采用延时全腔水冷的热恢复加速设计方案。

### 2 研究方法

组合式钕玻璃片状放大器(MSA)的典型结构和组成如图 1 所示。理论上将该结构划分为氙灯、钕玻璃、隔板玻璃、金属框架(将反射器包括在内)等单元器件。采用有限元方法将各单元器件进行网格

收稿日期: 2008-12-02; 收到修改稿日期: 2009-03-25

作者简介: 刘建国(1972—),男,硕士,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: franceliu@sohu.com

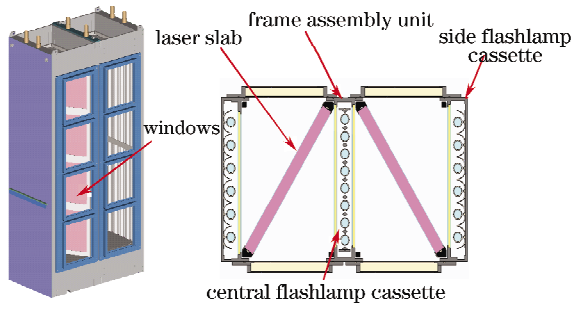


图 1 组合式片状放大器结构图

Fig. 1 Multi-segment disk amplifiers

划分, 节点上的瞬态热平衡遵循热力学第一定律

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\}, \quad (1)$$

式中  $[K]$  为传导矩阵, 包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数;  $[C]$  为比热矩阵, 考虑系统内能增加;  $\{T\}$  为节点温度向量;  $\{\dot{T}\}$  为温度对时间的导数;  $\{Q\}$  为节点热流率向量。  $[K]\{T\}$  项代表节点之间的热耦合, 其中热传导遵循傅里叶定律

$$q'' = -k \frac{dT}{dx}, \quad (2)$$

式中  $q''$  为热流密度 ( $W/m^2$ ),  $k$  为导热系数  $W/(m \cdot ^\circ C)$ , “-”表示热量流向温度降低的方向。热对流用牛顿冷却方程来描述

$$q'' = h(T_s - T_b), \quad (3)$$

式中  $h$  为对流换热系数,  $T_s$  为固体表面的温度,  $T_b$  为周围流体的温度。热辐射用斯蒂芬-玻尔兹曼方程来计算

$$q = \epsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4), \quad (4)$$

式中  $q$  为热流率,  $\epsilon$  为辐射率(黑度),  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 约为  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ,  $A_1$  为辐射面 1 的面积,  $F_{12}$  为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数,  $T_1$  为辐射面 1 的绝对温度,  $T_2$  为辐射面 2 的绝对温度。

边界条件为恒温环境, 取为 300 K, 初始条件为

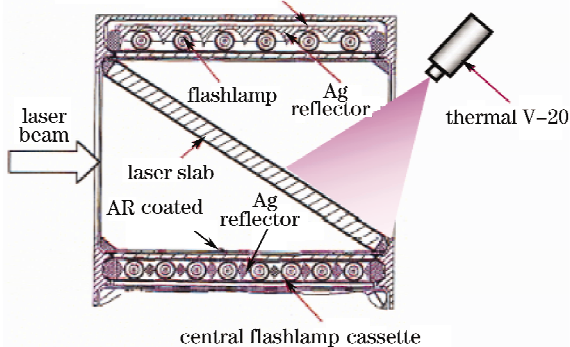


图 2 放大器热恢复测试图

Fig. 2 Measurement of thermal recovery of MSA

抽运结束时刻的各单元器件温度, 分别取平均温度: 氙灯 315 K, 隔板玻璃 302 K, 钕玻璃 305 K。

实验验证的具体参数均采用本实验室的  $4 \times 2 \times 3$  片状放大器参数, 实验的装置示意图如图 2 所示。

实验中, 钕玻璃片温度测试采用红外测温仪, 考虑到石英玻璃窗口对红外波段光的吸收, 拆掉了石英窗口。

表 1 放大器及电路参数

Table 1 Parameters of thermal recovery

Parameters	Value
Number of laser disks	24
Laser disk dimensions /mm	$300 \times 590 \times 40$
Number of flashlamps	60
Discharge length per lamp /mm	1400
Capacitance per circuit / $\mu F$	275
Blast shield dimensions /mm	$700 \times 500 \times 6$
Discharge voltage per circuit /kV	23
Inductance per circuit / $\mu H$	60
Number of flashlamps per circuit	2

### 3 研究结果分析

为了保证器件完全热恢复, 钕玻璃、隔板玻璃和氙灯 3 种单元器件的节点选取为内部节点, 各单元

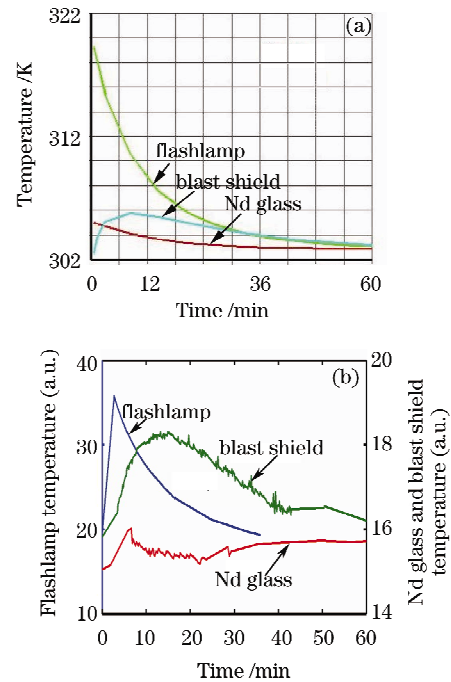


图 3 自然冷却条件下放大器组件热恢复特性 (a)理论模拟结果; (b)实验结果

Fig. 3 Comparison between simulated and experimental results of thermal recovery of MSA. (a) Result of theory simulation; (b) result of experiment

器件的热恢复时序模拟见图 3(a)。图 3(b)为实验结果(根据实验条件,选取相应节点),由于实验中各单元器件温度的测试不是同时进行,所以只研究其变化趋势。图 3 表明理论模拟和实验测试的结果相吻合。

### 3.1 隔板玻璃、氙灯和钕玻璃的热恢复特点

图 3(a)中非常明显的-一个特点就是隔板玻璃的温度变化存在一个拐点,从抽运结束时刻起,隔板玻璃温度开始上升,10 min 左右达到最高温度点,然后开始下降。

在图 3(a)中,氙灯和钕玻璃的温度不存在该特点,它们在抽运结束时刻温度达到最高,之后,温度持续降低。两者的热恢复过程接近指数下降的特点,一开始下降非常快,逐渐变缓,而达到最终完全的热恢复要数小时,这也正是组合式放大器紧凑结构带来的结果。

由于条件所限,实验中的温度测试初始时刻无法从氙灯工作时刻起,因此图 3(b)中氙灯和钕玻璃的温度变化曲线相对于图 3(a)多了一个上升期;另外,由于实验过程历时较长,监测的环境温度在逐渐升高,致使图 3(b)中钕玻璃的温度在后期升高,该原因造成了图 3(b)和图 3(a)中钕玻璃在温度严格的模拟条件下缓慢下降的结果并不完全一致。

### 3.2 氙灯、钕玻璃和隔板玻璃之间的热耦合机制

放大器热恢复中,隔板玻璃是唯一的散热渠道。各单元器件的热恢复特点显示,氙灯始终是散热体,而钕玻璃和隔板之间的热耦合可能存在一个交替进行的过程。隔板玻璃温度出现拐点之前,隔板玻璃向钕玻璃吸热,而拐点之后,由于隔板玻璃仍然向氙灯吸热,此时两者的关系可能是隔板玻璃向钕玻璃散热,因为模拟结果显示,隔板玻璃的温度超过了钕玻璃。而该过程的本质是,隔板玻璃成为了氙灯后

续废热向钕玻璃传递的介质。

实际上,常温附近,氙灯的废热主要通过中远红外辐射传递,该波段的辐射由于隔板玻璃的强吸收无法直接传递至钕玻璃,于是先由隔板玻璃吸收,后者再顺序传递。

### 3.3 钕玻璃热恢复机制

钕玻璃的热恢复要解决的其实是两方面的问题:钕玻璃内部斯托克斯热的散发及氙灯通过隔板玻璃向钕玻璃热辐射的阻止。

在斯托克斯热的散发上,由于钕玻璃唯一散热渠道是向隔板玻璃的辐射,隔板玻璃和钕玻璃的温度差至关重要,并且散热性能和该温度差不是线性关系;氙灯通过隔板玻璃的后续传热,则占整个钕玻璃热量总量相当比例,根据文献[5],氙灯的光效约 45%,因此,如果能消除氙灯后续热量通过隔板玻璃向钕玻璃的传输,钕玻璃的热恢复速度可望提高 1 倍。

### 3.4 延时设计

由前面的分析可知,初始阶段,由于隔板玻璃温度还没有升高,热辐射的指数特点使得钕玻璃的热恢复速度仍然是有保障的,而随着隔板玻璃温度的升高,钕玻璃的热恢复速度下降比线性下降快许多,因此,如果在隔板玻璃的温度升高到严重影响钕玻璃热恢复速度之前,采用水对流等主动热恢复手段,则可以保持钕玻璃的较高速度的热恢复。同时,采用延时水冷,还减少了后续过程中氙灯通过隔板玻璃引入钕玻璃的将近一半热量。

模拟结果见图 4(a)。对流水的温度设为 288 K,对流系数取为 1000。图 4(b)为水冷和空气冷却条件下隔板玻璃的热恢复实验结果对比。结果证明,水冷中,隔板玻璃的温度基本上保持不变,与图 4(a)中的结果吻合。

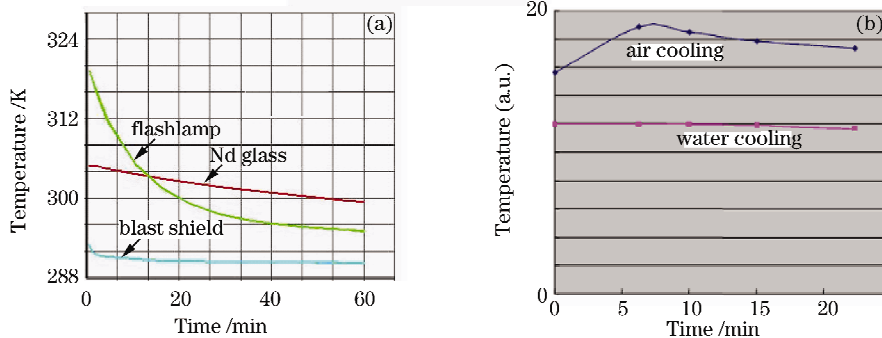


图 4 放大器组件热恢复模拟及实验。(a)隔板玻璃水对流条件下各组件理论模拟结果;(b)隔板玻璃热恢复实验

Fig. 4 Comparison between simulation and experiment of thermal recovery of MSA. (a) Result of theory simulation with water cooling; (b) result of experiment of blast shield

## 4 结 论

由于热辐射的指数特点和隔板玻璃的热传输介质作用,放大器的主动热恢复并不一定要求实时,理论和实验均证明,延时水冷设计对于加速放大器热恢复同样有明显效果。

延时水冷设计实际上是实时水冷在不改变放大器结构条件下的折中设计,在不改变放大器结构,不影响放大器效率和抽运均匀性的情况下,牺牲了一定的冷却效率,但还是实现了放大器的主动热恢复。实际中,延时参数和隔板玻璃的温度拐点出现时间相关,模拟计算表明,对于 $4 \times 2 \times 3$ 放大器,该延时参数约为10 min,钎玻璃的热恢复则可以在1 h内达到图4(a)。因而,在放大器抽运结束后采用水等强冷却介质进行对流冷却,可进一步加速放大器热恢复,同时不会带来放大器效率及抽运均匀性的问题。

## 参 考 文 献

- 1 A. C. Erlandson, R. London, K. Manes *et al.*. Accelerated thermal recovery for flashlamp-pumped solid-state laser amplifiers [R]. LLNL: UCRL-ID-135668, 1999
- 2 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo *et al.*. Modeling of residual thermo-optical distortions of the main amplifier of SG-III prototype[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(5): 385~390  
於海武, 郑万国, 贺少勃等. 神光III原型装置主放大器剩余热畸变模拟研究[J]. *中国激光*, 2000, **A28**(5): 385~390
- 3 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo *et al.*. Numerical simulation of thermal recovery of the multi-segment amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(4): 411~415  
於海武, 郑万国, 贺少勃等. 组合式片状放大器热恢复模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(4): 411~415
- 4 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Wang Chengcheng *et al.*. Thermal recovery of disk amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**: 145~148  
於海武, 郑万国, 王成程等. 片状放大器热恢复研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**: 145~148
- 5 W. Koehner. *Solid State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 271  
W. 克希耐尔. *固体激光工程* [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 271