

文章编号: 0258-7025(2010)01-0059-05

400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器的动态热畸变

陈 林 贺少勃 於海武 曹丁象 刘建国 刘 勇 陈远斌 罗亦明 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 氙灯抽运将导致钕玻璃内的不均匀温升, 由此带来空间频率较低的热畸变, 成为整个光路中最主要的畸变源。研究了 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器的动态热畸变问题。初步研究结果表明, 在现有抽运结构下, 抽运能量导致钕玻璃片表面最大温升约为 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$; 由此引起钕玻璃片的“S”形变, 最大形变大约为 $1.7 \times 10^{-6}\text{ m}$, 最大应力约为 65 kPa, 整个动态波前畸变约为 0.3λ , 与美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的实验值相符。在目前的抽运结构下, 动态波前畸变满足设计要求。

关键词 片状放大器; 动态热畸变; 光线追迹; 有限元分析

中图分类号 TL632.⁺1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0059

Pump-Induced Wave-Front Distortion of the 4×2 Assembled Slab Amplifier with 400 mm Aperture

Chen Lin He Shaobo Yu Haiwu Cao Dingxiang Liu Jianguo Liu Yong
Chen Yuanbin Luo Yiming Jing Feng

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

Abstract Pumped with Xe-flashlamp will induce non-uniformity rising of temperature in the Nd:glass and brought wave-front distortion with low space frequency, which is the main aberration source of the amplifier. So the wave-front distortion of the assembled slab amplifier with 400 mm aperture is studied in this text. The calculating results indicate that, with presently pumping configuration, the temperature rise of the Nd:glass is about $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, the non-uniformity temperature distributing induced “S” shape distortion is about $1.7 \times 10^{-6}\text{ m}$, and the thermal-stress is about 65 kPa, the total wave-front distortion is about 0.3λ , which matched the experiment value of the Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). With presently pumping configuration, pump-induced wave-front distortion is acceptable.

Key words slab amplifier; dynamic thermal distortion; ray tracing; finite element analysis

1 引 言

目前,用于惯性约束聚变研究的激光驱动器如在美的美国利弗莫尔实验室的国家点火装置(NIF)、法国里梅尔实验室的兆焦耳激光装置(LMJ)、中国的SG-III装置等,其放大器都采用了 4×2 组合式片状放大器(MSA)多程放大结构,钕玻璃片的尺寸为 $40\text{ mm} \times 460\text{ mm} \times 810\text{ mm}$,与光束成布儒斯特角放置,可提供 400 mm 的正方形通光口径。氙灯抽运将导致钕玻璃内的不均匀温升是产生光束波前畸变的

根本原因,研究结果表明热畸变的主要贡献来自于片的热变形,因此确定片内的温度分布以及变形分布,准确预测由此带来的波前畸变,以使畸变能被每个激光链提供的变形镜修正是十分重要的。因此,放大器热致波前畸变研究已得到了足够的重视^[1~7]。这一问题大致分为两方面来考虑,一是动态热畸变问题,一是剩余热畸变问题。前者主要研究在氙灯抽运过程中,由于氙灯光和片内放大自发辐射(ASE)造成钕玻璃内的温度不均匀分布引起的瞬态热畸变问题;后

收稿日期: 2009-02-12; 收到修改稿日期: 2009-04-08

作者简介: 陈 林(1984—),男,硕士研究生,主要从事固体激光放大器技术方面的研究。E-mail: linxiaqiao@126.com

导师简介: 景 峰(1968—),男,研究员,主要从事大能量固体激光驱动器关键技术方面的研究。

E-mail: jingfeng@my-public.sc.cninfo.net

者的研究内容是,装置在下次运行时,由于前次的剩余温度梯度附加引起的光束波前畸变,从而设计合理的冷却方案,提高装置的运行频率,从而提高整个装置的效费比。

本文主要研究 400 mm 口径片状放大器的动态热畸变问题。利用三维光线追迹和有限元分析的方法详细模拟计算了钕玻璃介质内的三维储能分布、温度分布和变形分布,由此预测了波前畸变,与美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的实验结果进行了对比。在目前的抽运结构下,动态波前畸变满足设计要求。

2 放大器热畸变模型

组合式片状放大器在工作过程中,氙灯抽运能量的绝大部分以热量的形式沉积在放大器的各个部件上,特别是氙灯壁、隔板玻璃和钕玻璃片等^[1,2];由于抽运腔的结构特性以及片内放大自发辐射加热钕玻璃片边缘包边的缘故,钕玻璃片内的初始温度分布也是不均匀的;当钕玻璃片内存在温度梯度分布时,会引起片的机械变形和热应力分布,由于折射率是温度和应力的函数, $n = n(T, \sigma)$, 所以片的机械变形和折射率的改变使得钕玻璃片引入的光程(f_{OPL})分布不均匀。

$$f_{\text{OPL}} = \int n(x, y, z) dr(x, y, z), \quad (1)$$

$$n(x, y, z) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \sigma} \cdot \sigma, \quad (2)$$

式中 n_0 是钕玻璃片在常温下的均匀折射率, $\partial n / \partial T$ 是温度折射率系数, $\partial n / \partial \sigma$ 是应力光学系数张量。显然,温度是产生光束波前畸变的根本原因,文献[2]研究结果表明,热畸变的主要贡献来自于片的热变形。因此为了确定光束波前的变化,必须确定温度、变形以及热应力的分布,如图 1 所示。在文献[5]中对该模型已做了详细介绍,这里不再详述。

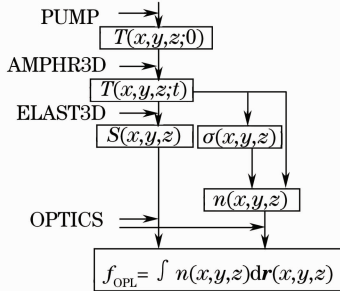


图 1 400 mm 口径钕玻璃放大器热畸变模型

Fig. 1 Model of thermal induced optical distortions for the amplifier with 400 mm aperture

3 计算结果与分析

400 mm 口径组合式片状放大器结构示意图如图 2 所示。钕玻璃片采用的是国产 N31 钕玻璃,以布鲁斯特角放置,并有吸收玻璃包边防止内部寄生激光振荡,去除包边之后钕玻璃片在光束方向的投影口径(硬口径)约为 400 mm × 400 mm;侧灯箱采用镀银的渐开线反射器,使得对氙灯光的反射率高达 95%;隔板玻璃置于灯箱与钕玻璃片之间,用以防止灯箱与片箱之间的相互污染且能为灯箱提供闭合的冷却环路。模拟计算中的 N31 钕玻璃物理参数如表 1 所示。

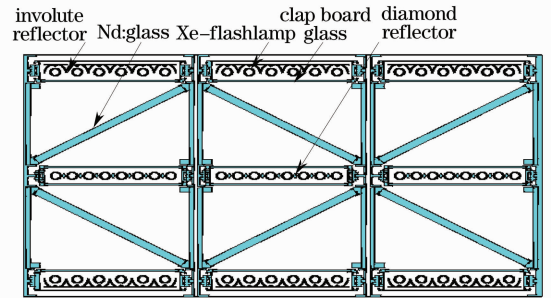


图 2 400 mm 口径 4 × 2 组合式片状放大器示意图

Fig. 2 Schematic of 4 × 2 module of slab amplifiers with 400 mm aperture

表 1 N31 钕玻璃部分物理参数

Table 1 Parameters of N31 material used in the simulations

Thermal conductivity, κ /[W/(m · K)]	0.614
Linear thermal expansion coefficient, α /K	107×10^{-7}
Temperature coefficient of refractive index, (dn/dT) /K	-4.3×10^{-6}
Index of refraction, n_0	1.528
Mass density, ρ /(kg/m ³)	2.83×10^3
Specific heat, C_p /[J/(kg · K)]	0.75×10^3
Elastic modulus, E /GPa	64.95
Poisson's ratio, μ	0.2735

3.1 瞬态温度分布

由于放大器结构的对称性,取单一口径进行分析。基于 Tracepro 光线追迹商用软件,建立放大器单一口径的三维实体模型,并实验测试了所用钕玻璃对氙灯光的吸收率,如图 3 所示。同时根据充电回路,确定单只氙灯时间、光谱分辨的辐射功率,并转换为时刻和能量。光线追迹结果如图 4 和图 5 所示,由于对放大器采取了实体建模,因此光线的传输和实际完全相似。由图 4,5 可见,端部钕玻璃储能略低于钕玻璃中间部分的储能,这是由于在实际情况中(如图 2 所示),端部钕玻璃相邻一侧为窗口玻璃而非抽运氙灯,中间部分钕玻璃对侧灯箱和中灯

箱的氙灯抽运能量均有较好的吸收。对整个钕玻璃片内的储能分布作归一化处理,同时根据氙灯充电回路、尺寸和爆炸系数计算出氙灯辐射能量,与热转化率、归一化分布相乘作为钕玻璃片内抽运结束时温度分布,如图 6 所示。

$$T(x, y, z) = Q \cdot P \cdot S(x, y, z), \quad (3)$$

式中 Q 为氙灯辐射能量, P 为热转化率, $S(x, y, z)$ 为储能归一化分布。钕玻璃介质通光口径内(不含包边玻璃)大面最高温升约 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,沿轴向成下降趋势,内部最高约 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,这与美国 LLNL 报道的

结果相符^[9]。钕玻璃片的左右边缘部分温升均要高于中间部分,上下边缘部分则没有此特点,因为左右边缘部分离氙灯更近一些,上下边缘部分相对于中间则没有该特点。同时由于 ASE 效应主要引起钕玻璃包边的温升^[10],本文只考虑通光口径内的抽运引发温升情况。由于抽运结束时刻与激光产生时刻时间相差很短(约 $200\text{ }\mu\text{s}$,经计算,这一时间过程对热扩散的影响微乎其微),因此可以认为此时的温度分布和热变形分布就是激光产生时的分布,由变形而带来的波前畸变就是抽运引发的动态畸变(PID)。

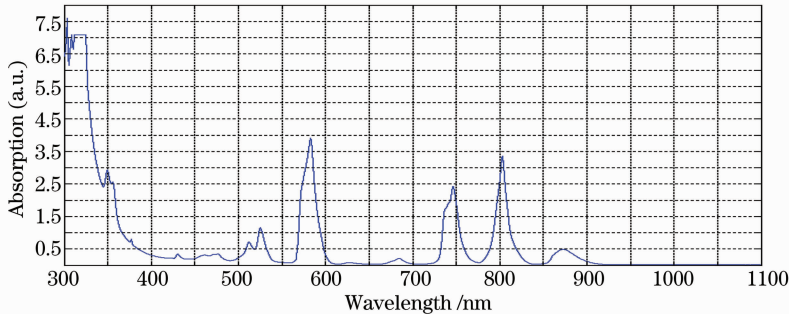


图 3 钕玻璃吸收率

Fig. 3 Absorption rate of the N31 Nd:glass

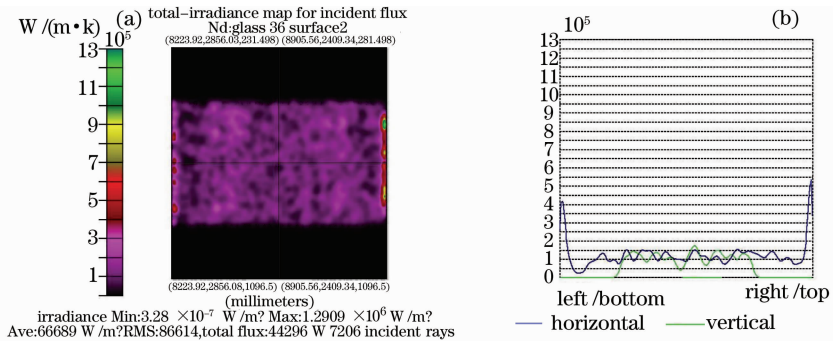


图 4 端部钕玻璃片的储能沉积分布(相对值)

Fig. 4 Energy storage at the end part of the Nd:glass

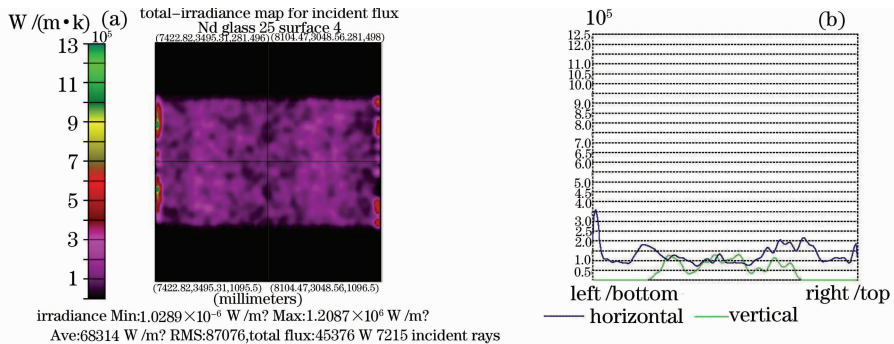


图 5 中间部分钕玻璃片的储能沉积分布(相对值)

Fig. 5 Energy storage at the middle part of the Nd:glass

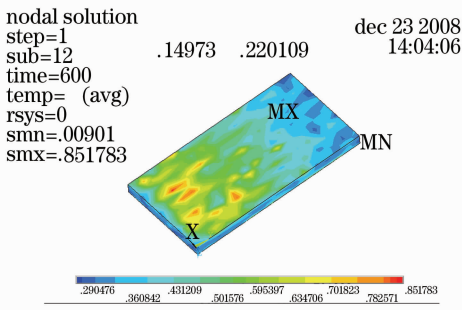


图 6 抽运结束时刻铍玻璃介质内的三维温度分布

Fig. 6 3D temperature distribution at the end of pumping

3.2 应力分布与变形分布

铍玻璃片内非均匀的温升将产生机械变形和应力应变^[11~16]。利用热-应力耦合分析理论,根据铍玻璃激光片内初始温度分布和铍玻璃片的安装结构,利用 ANSYS 有限元分析软件模拟计算了铍玻璃片内应力分布与变形分布,如图 7 所示。抽运结束时,片内最大热应力约为 65 kPa,应力引起整个铍玻璃片的“S”形变,最大形变位于抽运最强的区

域和介质的两端角部,最大形变约为 $1.7 \mu\text{m}$,完全在弹性形变范围之内。

3.3 波前畸变

在计算波前畸变过程中同时探讨了温度、变形和应力三者对光束波前畸变的影响。其中,温度梯度引入的波前畸变仅约为 0.05λ ,相比热变形引入的波前畸变为小量,因此热变形对光束波前畸变的贡献最大,这与文献[2]给出的结果相一致。另一方面,根据胡克定律,弹性材料的应力与变形成正比, $\sigma = D \cdot \epsilon$,其中 D 为材料常数。因此热应力对光束波前畸变的贡献相对热变形而言也是小量,但是热应力将导致光束退偏,从而导致能量损耗却比较严重。对应于图 7 所示的铍玻璃片的变形分布,水平偏振的激光束以布儒斯特角入射至铍玻璃片之后,在通过 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的净通光口径范围内铍玻璃片后的波前分布(即光束波前畸变)如图 8 所示。由图可见,由机械变形引起的波前畸变呈瓦片状,抽运致波前畸变的最大值约 0.3λ 。这一计算结果与美国 LLNL 公布的实验值^[9]相符,证明三维数值计算模型是有效的。

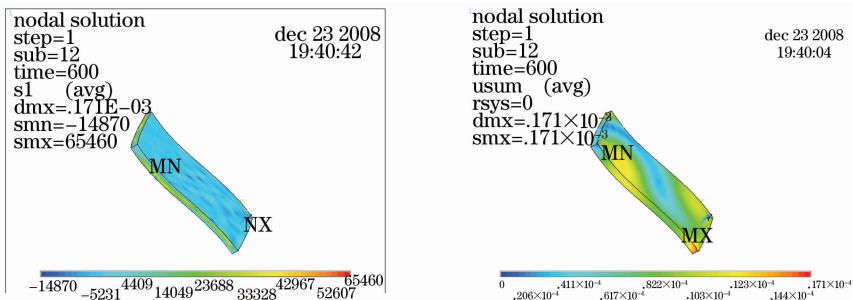


图 7 抽运结束时刻铍玻璃介质内三维热应力与变形分布

Fig. 7 3D distribution of the thermal-stress and distortion at the end of pumping

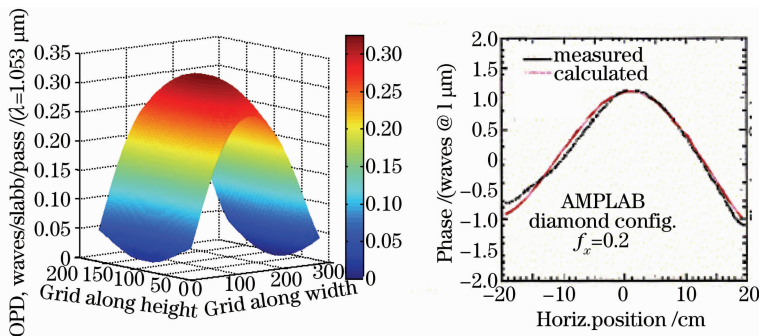


图 8 抽运导致的瞬态波前畸变(PID)。(a) 本文的数值计算值;(b) NIF 的模拟计算值和实验测量值^[13]

Fig. 8 Pumping induced distortion(PID). (a) value of our numerical simulation; (b) value the numerical simulation and experiment of the NIF

4 结 论

利用实体建模——三维光线追迹和有限元分析的方法系统研究了 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器的动态热畸变问题。由于氙灯抽运率的不均匀性,最靠近抽运灯的激光片区域比离灯更远的区域抽运得要强些,从而导致钽玻璃片内非均匀的温度分布,热膨胀引起激光片的“S”形变形。温度梯度和热应力对光束波前畸变的贡献相对热变形是小量,但热应力将导致光束退偏,从而引起较为严重的能量损耗。

参 考 文 献

- 1 D. L. Brown, G. T. Mannell. Thermal analysis of the large close packed amplifiers in the National Ignition Facility (NIF) [C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 82~93
- 2 B. S. Sutton, D. C. Marshall, S. C. Petty *et al.*. Thermal recovery of NIF amplifiers[C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 560~570
- 3 B. S. Sutton, A. E. Erlandson, A. R. London *et al.*. Thermal recovery of the NIF amplifiers[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 665~675
- 4 Ph. Arnoux, G. Le. touze, J. P. Caltagirone *et al.*. Thermal recovery of LMJ amplifiers[C]. *SPIE*, 1999, **3492**: 660~664
- 5 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
- 6 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, Wang Chengcheng *et al.*. Thermal recovery of the disk amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(s2): 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**(s2): 145~148
- 7 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*, 2001, **A28**(5): 385~390
- 8 Jiang Zhonghong. AICF laser glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1265~1276
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1265~1276
- 9 Physics basis for optical performance of the NIF amplifiers [R]. UCRL-ID-132680, NIF-0014142
- 10 Zhang Hua, Fan Dianyuan. Investigation of the amplified spontaneous emission in Nd: glass disk amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(6): 1047~1051
张 华, 范滇元. 钽玻璃片状激光放大器自发辐射放大特性的研究 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(6): 1047~1051
- 11 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Research progress of laser drivers for inertial fusion energy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 55~62
於海武, 徐美健, 段文涛等. 惯性约束聚变能源激光驱动器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 55~62
- 12 Zhang Hua, Gao Yanxia, Fan Dianyuan. Optimized design of xenon flashlamp pumping of Nd: glass amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12): 1616~1623
张 华, 高艳霞, 范滇元. 钽玻璃放大器氙灯抽运的优化设计 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(12): 1616~1623
- 13 Cao Dingxiang. Study on thermal effects & thermal management in high power solid state lasers [D]. *National University of Defense Technology*. 2008, 157~172
曹丁象. 高功率固体激光系统的热效应及热管理研究 [D]. 国防科技大学, 2008. 157~172
- 14 Song Xiaolu, Li Bingbin, Wang Shiyu *et al.*. Transient thermal effect in pulsed laser diode end-pumped solid-state laser. [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1476~1482
宋小鹿, 李兵斌, 王石语等. 脉冲激光二极管端面抽运全固态激光器热效应瞬态过程 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1476~1482
- 15 Li Jingdong, Guo Mingxiu, Fu Wenqiang *et al.*. Thermal distortion influence on single-slab heat capacity laser output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 45~49
李劲东, 郭明秀, 复文强等. 热畸变对单板条热容激光器输出的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 45~49
- 16 Shao Jie, Li Xiaoli, Fen Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd: YVO₄ slab laser and its thermal effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd: YVO₄ 板条激光器及其热效应 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501