

文章编号: 0258-7025(2007)11-1507-05

热容激光器冷却过程的热力学数值模拟

胡 浩, 蔡 震, 蒋建锋, 涂 波, 裴正平, 周唐建, 成 渝, 唐 淳

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了研究热容激光器冷却过程中激光介质的热力学特性,建立了激光介质热力学理论模型。该模型将介质表面的换热作为瞬态导热微分方程的热源,得到冷却过程中热传导模型。获得了激光介质在冷却过程中的瞬态温度场,进一步得到介质的热应力。利用数值模拟,得到了 YAG 介质和 GGG 介质在不同冷却条件下的冷却时间、温差和热应力。表面换热系数从 $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,冷却时间明显缩短;表面换热系数从 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,冷却时间缩短不明显。对于相同体积、相同初始温度场的 YAG 介质和 GGG 介质, YAG 介质的冷却时间少于 GGG 介质的冷却时间。在相同冷却条件下, YAG 介质的温差小于 GGG 介质的温差, YAG 介质的最大等效应力小于 GGG 介质的最大等效应力。

关键词 激光技术;热容激光器;冷却过程热力学;数值模拟

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Thermodynamics in Cooling for Heat Capacity Laser

HU Hao, CAI Zhen, JIANG Jian-feng, TU Bo, PEI Zheng-ping, ZHOU Tang-jian, CHENG Yu, TANG Chun

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The thermodynamic model of laser medium was established to study the thermodynamic characteristic in laser medium cooling of heat capacity laser. The exchange heat on the end surface of laser medium was regarded as the heat source of the transient heat conduction equation. The heat conduction model in cooling was got. The transient temperature field in the laser medium cooling was got. Then, the thermal stress of the laser medium was got. By using numerical simulation, the cooling time, and the different in temperature and thermal stress of the YAG medium and the GGG medium at different cooling condition were obtained. The cooling time is greatly decreased as the convective heat transfer coefficient is increased from $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ to $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. The cooling time is little decreased as the convective heat transfer coefficient increased from $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ to $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. The cooling time of YAG medium is less than that of GGG medium at the same volume and the same initial temperature field. The difference in temperature and the maximal equivalent stress of YAG medium are less than that of GGG medium' at the same cooling condition.

Key words laser technique; heat capacity laser; thermodynamics in cooling; numerical simulation

1 引言

2001 年,美国劳伦斯利弗莫尔(LLNL)实验室成功研制出 10kW 级闪光灯抽运的固体热容激光器,探索了一条高平均功率固体激光器的新途径。2003 年进一步采用 8600 只激光二极管(LD)抽运

三片 Nd:GGG 介质,实现了高于 10 kW 平均功率的激光输出。2006 年采用 5 片 Nd:YAG 陶瓷介质,得到 67 kW 的平均功率输出^[1~4]。热容激光器的工作分为两个周期,一是激光器工作周期,一是冷却周期。激光器工作时产生的热量储存在激光介质中,

收稿日期:2007-04-05;收到修改稿日期:2007-06-26

基金项目:中国工程物理研究院重大基金资助项目。

作者简介:胡 浩(1979—),男,安徽人,研究实习员,硕士,主要从事激光二极管抽运高平均功率固体激光器的研究。

E-mail: haozilpp@sohu.com

激光介质不冷却,冷却周期内再将这些热量排除。热容激光器的应用要求尽量缩短冷却周期^[5~8]。本文通过对热容激光器在冷却周期内的理论分析和数值模拟,得到激光介质的温度及应力变化,为热容激光器系统的合理设计及研制提供必要的参考依据。

2 激光介质热力学理论模型

图1为热容激光器示意图,厚为 l 的激光介质置于绝热装置中,激光二极管阵列(LDA)分别从两端抽运。 M_1 为全反镜, M_2 为输出镜。介质与窗片之间形成冷却通道。

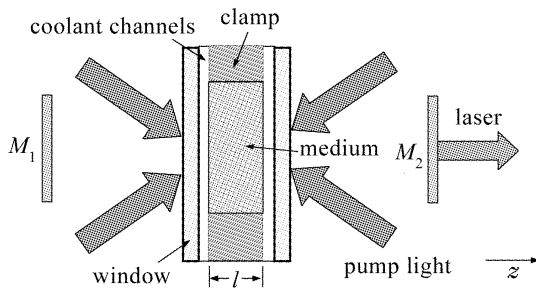


图1 激光二极管阵列抽运的热容激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat capacity laser pumped by laser diode arrays

2.1 激光介质的热传导模型

激光介质在激光工作周期结束后沿径向和纵向的温度分布为不均匀分布,冷却过程中也存在瞬态温度场。表面的换热看作介质的热源,因为介质被冷却,故热源应为负值。激光介质的瞬态导热微分方程为^[9]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q, \quad (1)$$

式中 T 为介质的瞬态温度场, τ 为时间, κ 为介质的热导率, q 为表面的换热, ρ 为材料密度, C 为热容值。表面的换热 q 表示为

$$q = -Ah(t_i - t_w), \quad (2)$$

式中 A 为参与换热的表面面积, h 为表面换热系数, t_i 为冷却介质温度, t_w 为激光介质端面温度。

边界条件是指流出介质边界的热流,用公式表示为

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = -h(t_i - t_w) \Big|_{\Gamma}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{n} 为介质边界的外法线向量, Γ 为物体边界。

初始条件为

$$T(x, y, z) \Big|_{t=0} = T_0, \quad (4)$$

冷却周期开始时激光介质所具有的温度场为 T_0 。

2.2 激光介质的热应力模型

温度的变化导致微元体发生变化以及微元体间的相互约束,因此产生热应力。热容激光器在冷却过程中,其激光介质内存在的是一个分布不均匀的瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$,因此应力场也随时间而变化。根据虎克定律求应力分量,可得^[10]

$$\sigma_{ij} = 2G \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial j} - \Delta \Phi \delta_{ij} \right) + \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \delta_{ij}, \quad (5)$$

式中 G 为剪切弹性模量, $2G = E/(1+\nu)$, E 为弹性模量, ν 为介质的泊松比; δ_{ij} 为克鲁尼彻-迪尔塔符号,当 $i = j$ 时, $\delta_{ij} = 1$,当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$ (式中 $i, j = x, y, z$); Φ 为热弹性位移势。

对于动态热应力,关于 Φ 的泊松方程表示为^[10]

$$\Delta \Phi - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \cdot \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha T, \quad (6)$$

式中 α 为介质的热膨胀系数, t 为冷却时间。

3 数值模拟结果及分析

首先进行假设:激光工作周期开始前介质温度为300 K,当冷却介质最高温度小于305 K时,认为介质冷却到初始状态。

3.1 GGG 激光介质冷却过程的数值模拟

数值模拟条件:GGG 介质大小为 $\phi 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,介质初始温度场为均匀温度场400 K,冷却介质温度300 K,换热表面为介质两端面,表面换热系数分别取 $0.01 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,介质中心和端面温度随时间的变化如图2所示。

表面换热系数为 $0.01 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 是气体强制对流冷却可以达到的表面换热系数,介质冷却到初始状态需750 s,介质端面与中心温差很小。表面换热系数 $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 在水强制对流情况下可以达到;表面换热系数为 $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,介质冷却到初始状态需92 s,介质端面与中心温差在6 s时达到最大26 K;表面换热系数为 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,介质冷却到初始状态需39 s,介质端面与中心温差在3 s时达到最大59 K;表面换热系数为 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,介质冷却到初始状态需33 s,介质端面与中心温差在2 s时达到最大71 K。

不同表面换热系数情况下的冷却时间、最大温差和最大等效力如表1所示。图3是不同表面换热系数时中心温度随时间的变化。表面换热系数从 $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,

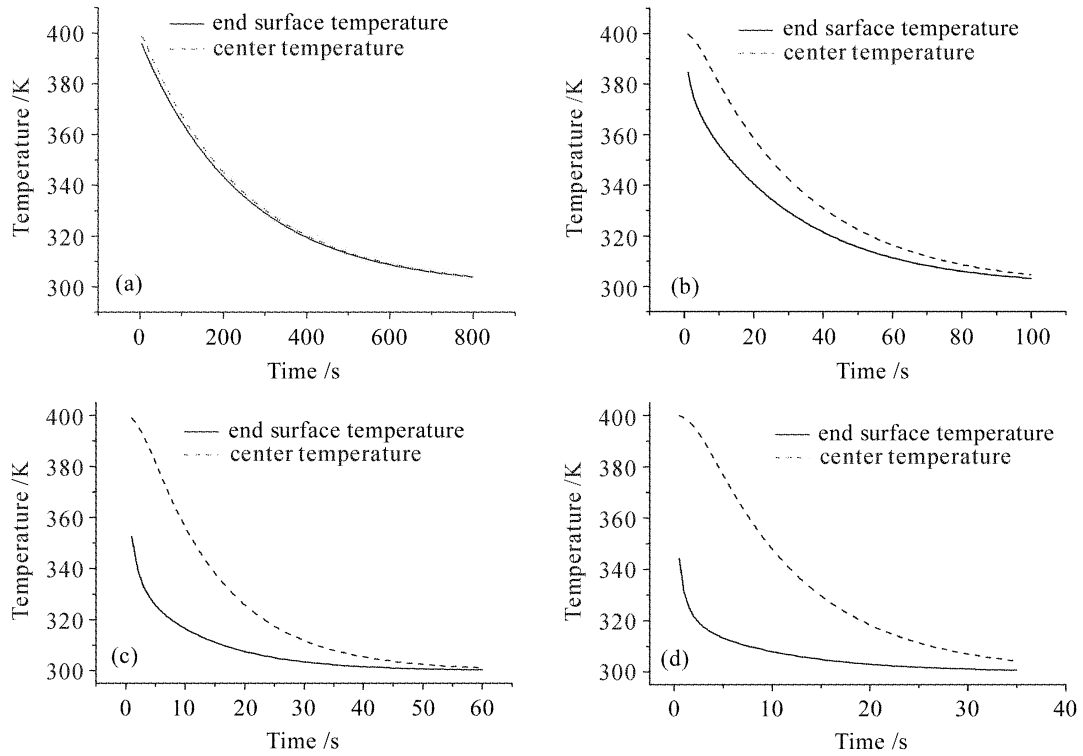


图 2 不同表面换热系数情况下介质端面 and 中心温度随时间的变化

Fig. 2 End surface temperature and center temperature versus time at different convective heat transfer coefficient
(a) $h = 0.01 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; (b) $h = 0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; (c) $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; (d) $h = 1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

表 1 GGG 介质在不同表面换热系数情况下的冷却时间、最大温差和最大等效应力

Table 1 Cooling time, maximal difference in temperature and maximal equivalent stress of the GGG medium at different convective heat transfer coefficients

| Convective heat transfer coefficient / ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) | Cooling time / s | Maximal difference in temperature / K | Maximal equivalent stress / ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$) |
|--|------------------|---------------------------------------|--|
| 0.1 | 92 | 26 | 823 |
| 0.25 | 52 | 44 | 919 |
| 0.5 | 39 | 59 | 1162 |
| 0.75 | 35 | 66 | 1232 |
| 1 | 32 | 74 | 1521 |

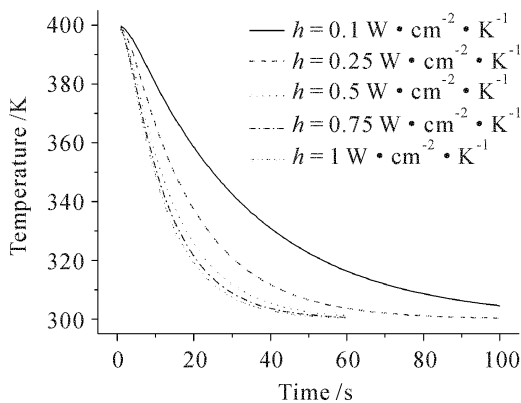


图 3 不同表面换热系数时中心温度随时间的变化
Fig. 3 Center temperature versus time at different convective heat transfer coefficients

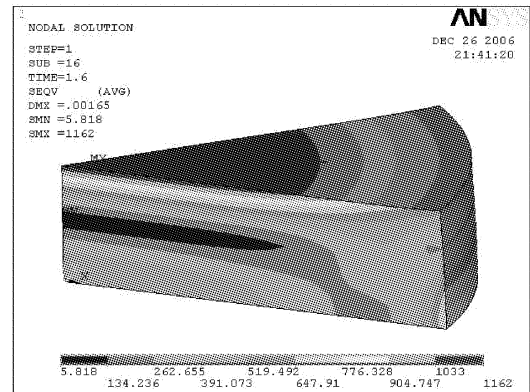


图 4 $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 冷却 1.6 s 时的等效应力
Fig. 4 Equivalent stress in cooling $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, $t = 1.6 \text{ s}$

冷却所需时间从92 s减少到39 s,冷却时间明显减少;表面换热系数从 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,冷却所需时间仅减少7 s;这是因为受热导率的影响,内部的热量不能及时传到换热面经冷却介质带走,此时增大表面换热系数对冷却时间的减少较小。表面换热系数从 $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,介质端面与中心的温差越来越大,从26 K增加到74 K;最大等效应力越来越大,从 $823 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加到 $1521 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。图4是取介质的1/16建立的模型,在表面换热系数 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,冷却1.6 s时的等效应力分布。

3.2 YAG 激光介质冷却过程的数值模拟

数值模拟条件:YAG 介质大小为 $\phi 50 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,介质初始温度场为均匀温度场400 K,冷却介质温度300 K,换热表面为介质两端面。YAG 介质的热导率是 GGG 介质的1.55倍,密度是 GGG 介质的64%,比热是 GGG 介质的1.31倍。图5是表面换热系数为 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时 YAG 介质端面和中心温度随时间的变化,图6是不同表面换热系数的中心温度随时间的变化,不同表面换热系数情况下冷却时间、最大温差和最大等效应力如表2所示。

表面换热系数从 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,冷却时间减少较小,现象与 GGG 介质相同。将 YAG 介质不同表面换热系数情况下的冷却时间与 GGG 相比,YAG 所需时间比 GGG 所需时间少。图7是表面换热系数为 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

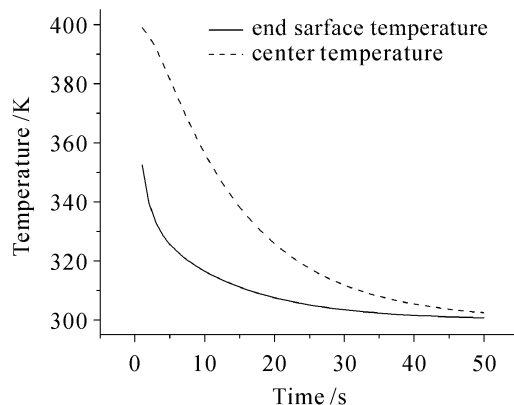


图5 $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时端面和中心温度随时间的变化

Fig. 5 End surface temperature and center temperature versus time at $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

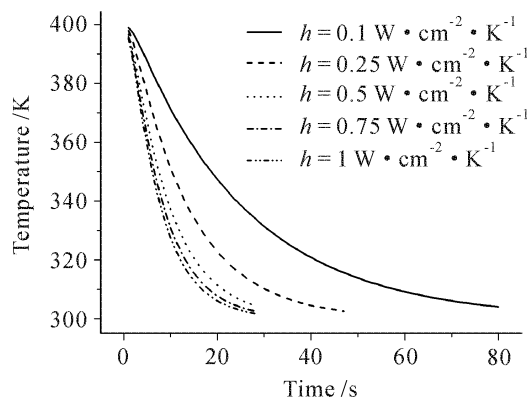


图6 不同表面换热系数的中心温度随时间的变化
Fig. 6 Center temperature versus time at different convective heat transfer coefficients

表2 YAG 介质在不同表面换热系数情况下的冷却时间、最大温差和最大等效应力

Table 2 Cooling time, maximal difference in temperature and maximal equivalent stress of YAG medium at different convective heat transfer coefficients

| Convective heat transfer coefficient / ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) | Cooling time /s | Maximal difference in temperature /K | Maximal equivalent stress / ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$) |
|--|-----------------|--------------------------------------|--|
| 0.1 | 71 | 19 | 454 |
| 0.25 | 37 | 34 | 724 |
| 0.5 | 26 | 48 | 971 |
| 0.75 | 22 | 56 | 1040 |
| 1 | 21 | 61 | 1070 |

时,YAG 中心温度和 GGG 中心温度随时间的变化,YAG 中心温度的下降比 GGG 中心温度的下降要快。相同体积的两种介质,初始温度场相同,YAG 介质的冷却时间短,原因在于 YAG 介质储存的热量较 GGG 介质储存的热量少,YAG 介质储存的热量约为 GGG 介质储存的热量的 84%,另一点

是 YAG 介质热导率是 GGG 介质热导率1.55倍。将表1和表2相比较可以看出,YAG 介质冷却时的温差小于 GGG 介质的温差,原因在于 YAG 介质热导率比 GGG 介质热导率高。YAG 介质的最大等效应力小于 GGG 介质的最大等效应力。

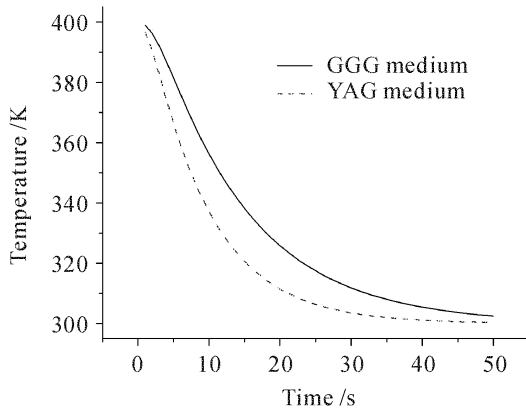


图 7 $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时 YAG 和 GGG 介质中心温度随时间的变化

Fig. 7 YAG and GGG center temperature versus time at $h = 0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

4 结 论

将介质表面的换热作为瞬态导热微分方程的热源,得到冷却过程中热传导模型,进一步得到介质的热应力模型。在一定的数值模拟条件下,得到了 GGG 介质和 YAG 介质的冷却时间、温度随时间的变化和冷却过程中的应力。表面换热系数从 $0.1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,冷却时间明显缩短;表面换热系数从 $0.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 增加到 $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 时,受热导率的影响,内部的热量不能及时传到换热面经冷却介质带走,冷却时间缩短不明显。对于相同体积、相同初始温度场的 YAG 介质和 GGG 介质,由于介质储存热量的不同和热导率的不同, YAG 介质的冷却时间明显较短。因为热导率的不同,在相同冷却条件下, YAG 介质的温差较小且最大等效应力较小。

参 考 文 献

- 1 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4):605~625
- 2 M. D. Rotter, C. D. Dane. Solid-state heat-capacity-laser review [C]. *Solid State and Diode Laser Technology Review*, Albuquerque, NM(US), 2002
- 3 www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/245418.pdf
- 4 R. M. Yamamoto, K. L. Allen, R. W. Allmon *et al.*. A solid state laser for the battlefield [C]. 25th Army Science Conference, 2006
- 5 Hu Hao, Tu Bo, Jiang Jianfeng *et al.*. Numerical simulation of thermodynamics in laser medium for heat capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(Suppl.):180~184
胡 浩,涂 波,蒋建锋等. 热容激光器激光介质的热力学数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊):180~184
- 6 Hu Hao, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. Numerical simulation of laser characteristics for heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1485~1488
胡 浩,蒋建锋,涂 波等. 热容激光器激光输出特性的数值模拟[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1485~1488
- 7 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Operation condition optimization of laser media heat-capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):89~92
蔡 震,胡 浩,蒋建锋等. 热容模式下激光介质工作条件的优化[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):89~92
- 8 Hou Liqun, Zu Jifeng, Dong Yue *et al.*. Numerical simulation of thermal induced effects and cooling characteristics of Nd:GGG laser crystal in the heat capacity operation mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1025~1029
侯立群,祖继锋,董 玥等. Nd:GGG 激光晶体热容工作下的热致效应与冷却特性数值模拟[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1025~1029
- 9 Zhao Zhennan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002
赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002
- 10 Y. Takeiwuchi. Translated by Guo Tingwei, Li Anding. Thermal Stress [M]. Beijing: Science Press, 1977
竹内洋一郎 著. 郭廷玮,李安定 译. 热应力[M]. 北京:科学出版社, 1977