

文章编号: 0258-7025(2004)12-1455-05

激光辐照光学材料热力效应的解析计算 和损伤评估

段晓峰¹, 汪岳峰¹, 牛燕雄^{1,2}, 张 维¹

(¹ 军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003
² 天津大学激光与光电子研究所教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

摘要 光学元件的损伤是高功率激光技术发展的一个瓶颈,为此以连续 CO₂ 激光辐照 K9 玻璃为例,研究了连续激光辐照光学材料的热力损伤机理。通过积分变换方法,求解热传导和热弹性力学方程组,由此得到激光辐照引起的温度场和热应力场的瞬态分布。研究中发现在高斯光束作用下,热扩散长度的概念不再适用,因此通过曲线拟合方法,推导出最大热应力的位置与辐照时间的关系,并由此计算出材料的损伤阈值。由于 K9 玻璃的应力损伤阈值小于熔融损伤阈值,因此当激光作用引起的环向热应力大于材料的抗拉强度时,材料发生永久性损伤,损伤形态为拉伸解理。将理论模型的相关结论与实验结果相对比,两者吻合得很好。

关键词 激光物理;激光与物质相互作用;热应力场;高斯光束;损伤阈值

中图分类号 TN 241 **文献标识码** A

Analytic Calculation and Evaluation of Thermal and Mechanical Damage in Optical Materials Induced by Laser

DUAN Xiao-feng¹, WANG Yue-feng¹, NIU Yan-xiong^{1,2}, ZHANG Chu¹

(¹ Optics & Electron Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China
² Institute of Laser and Optoelectronics, Optoelectronic Information Science
and Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Laser induced damage in optical components is a limiting factor to the improvement of high-power laser. Using K9 glass irradiated with the CO₂ continuous-wave laser as an example, the thermal and mechanical damage mechanism of optical material induced by continuous-wave laser is investigated. The equations of heat conduction and thermoelastic dynamics are solved through integral-transform method. Transient distribution of temperature field and thermal stress field is described. It is found that the definition of the thermal diffusion length is not applicable when incident laser is Gaussian beam; therefore, the dependence of the site of the maximal thermal stress on irradiation time is derived by curve fitting method, then the analytical solution of the damage threshold intensity is calculated. Because the stress damage threshold intensity is smaller than the melting damage threshold intensity, permanent damage in optical material is produced when circumference stress exceeds the tensile strength. The damage morphology of K9 glass induced by laser is proved to be cleavage burst. The model exhibits good agreement with the experiment result.

Key words laser physics; laser irradiating effects; thermal stress; Gauss beam; damage threshold

1 引 言

光学玻璃在激光器件和探测器件中,是重要的

光学元件。受到激光照射会造成其温度以及热应力升高,致使元件熔融或解理。激光对光学元件的损

收稿日期:2003-07-31;收到修改稿日期:2003-10-24

作者简介:段晓峰(1976—),男,军械工程学院光学与电子工程系讲师,理学硕士,主要从事激光应用技术及半导体光电子器件的研究。E-mail:duanxiaofeng@sohu.com

伤已成为发展高功率激光技术和探测器防护技术的重要研究课题。

国内外已经开展了不少有关激光辐照效应理论性和实验性的工作^[1~4]。在理论方面,多以讨论简化的均匀光斑为主^[5],未涉及高斯光斑与均匀光斑作用的不同。在高斯光斑作用时仍沿用“热扩散长度”的概念,会导致所求的热应力最大值位置(最易损伤区)以及损伤阈值与实际情况误差较大。因此本文建立了高斯光束与 K9 玻璃相互作用的物理模型,通过拟合公式给出损伤阈值,并与文献[6]中的相关实验作为对比。

2 理论模型

假定一束空间轴对称分布的高斯光束 $I(r)$ 照射一个半径为 b 的圆形靶材。设 a 为高斯光束的半高宽, h 为靶材厚度 ($h \ll b$), 物理模型如图 1。激光照射到材料上将产生空间非均匀的温度场,从而导致热应力。这一问题的研究,通常采用热传导和热弹性理论。

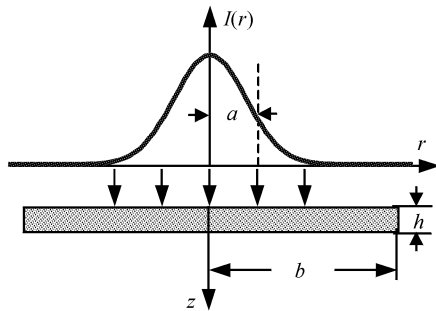


图 1 高斯光束辐照圆板型靶材的物理模型
Fig. 1 A physical model of disk irradiated by Gauss beam

2.1 温度场解析计算

研究靶材的温度场分布是基于热传导理论进行的。具有内热源和瞬态三维温度场的固体导热方程为^[7]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = Q(r) \quad (1)$$

式中, T 为物体的瞬态温升; ρ 为靶材的密度, 作常数处理; c_p 为定压比热; k 为材料的导热系数; Q 为内热源

$$Q(r) = \eta I(r)/h \quad (2)$$

其中 η 为吸收率, $I(r)$ 为激光光束在靶材表面上的面功率密度。

考虑到所研究靶材的厚度远小于直径, 在连续

激光作用下, 厚度方向温度很快趋于均匀, 因此系统可以选用二维平面模型。由于整个系统轴向对称, 所以利用柱坐标系, 导热方程改写为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\eta I(r)}{h} \quad (3)$$

除激光照射面外其他各面与外界绝热, 满足第一类边界条件

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} = 0 \quad (4)$$

初始条件为

$$T|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

利用 Hankel 积分变换的方法^[5,7], 对二维导热方程进行解析求解, 得到

$$T(r, t) = \frac{2\eta I_0}{b^2 h \rho c_p} \times \left\{ f_0 t + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{f_m J_0(\beta_m r)}{D \beta_m^2 J_0^2(\beta_m b)} \times [1 - \exp(-D \beta_m^2 t)] \right\} \quad (6)$$

式中, $\beta_m b$ 是第一类一阶贝塞尔函数的根, $m = 0, 1, 2, \dots$; $D = k/\rho c_p$ 为热扩散系数; I_0 为激光功率密度的最大值。另 $I(r) = I_0 \exp(-r^2/a^2)$ 。 f_m 表示为

$$f_m = \int_0^b \exp(-r^2/a^2) J_0(\beta_m r) r dr \quad (7)$$

2.2 热应力场分析

由热弹性力学理论, 该二维平面模型的平衡方程为^[8]

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (8)$$

几何方程为

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (9)$$

热弹性本构方程为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\nu E}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \epsilon_\theta - 2\alpha T) + \frac{E}{1+\nu} (\epsilon_r - \alpha T) \\ \sigma_\theta = \frac{\nu E}{1-\nu^2} (\epsilon_r + \epsilon_\theta - 2\alpha T) + \frac{E}{1+\nu} (\epsilon_\theta - \alpha T) \end{cases} \quad (10)$$

(8) ~ (10) 式中 σ_r, σ_θ 为应力分量; $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ 为应变分量; u_r 为位移分量; E, ν, α 分别为材料的杨氏模量、泊松比和热膨胀系数。脚标 r, θ 分别表示上述物理量的径向和环向分量。将式(8) ~ (10) 联立起来, 并利用边界条件 $\sigma_r|_{r=b} = 0$, 最后解得

$$\begin{cases} \sigma_r = aE \left(-\frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr + \frac{1}{b^2} \int_0^b T r dr \right) \\ \sigma_\theta = aE \left(\frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr + \frac{1}{b^2} \int_0^b T r dr - T \right) \end{cases} \quad (11)$$

将(6)式代入(11)式得

$$\begin{cases} \sigma_r(r,t) = -\frac{2\alpha EI_0}{b^2 \rho c_p} \cdot \frac{f_m [1 - \exp(-D\beta_m^2 t)]}{D\beta_m^2 J_0^2(\beta_m b)} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_1(\beta_m r)}{\beta_m r} \\ \sigma_\theta(r,t) = \frac{2\alpha EI_0}{b^2 \rho c_p} \cdot \frac{f_m [1 - \exp(-D\beta_m^2 t)]}{D\beta_m^2 J_0^2(\beta_m b)} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{J_1(\beta_m r)}{\beta_m r} - J_0(\beta_m r) \right] \end{cases} \quad (12)$$

表 1 K9 玻璃材料的物性参量
Table 1 Physical parameters of K9 glass

Density $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Heat conduction $k / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	Heat capacity $c_p / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	Coefficient of expansion α / C^{-1}	Elasticity coefficient E / Pa	Melting point $T_{\text{melt}} / \text{C}$	Tensile strength $\sigma_{\text{th}} / \text{Pa}$
2.5	0.0121	0.71	8.5×10^{-6}	8×10^{10}	1400	4.9×10^7

3 计算结果和讨论

3.1 温度场和热应力场分布

根据以上分析,对 CO₂ 连续激光辐照 K9 玻璃进行研究。K9 玻璃的材料参量如表 1。材料的结构参量为:半径 $r = 2 \text{ cm}$,厚度 $h = 0.2 \text{ cm}$ 。CO₂ 连续激光器功率 $P = 215 \text{ W}$,高斯光斑的半高宽(光斑半径)取 $a = 0.5 \text{ cm}$,中心光强 $I_0 = 273.89 \text{ W/cm}^2$,表面反射系数取 $\eta = 0.15$ 。

图 2(a)给出高斯光束照射 K9 玻璃靶材 $t = 6 \text{ s}$

时温升的二维分布情况。可见靶材中心 ($x = 0, y = 0$) 温度最高,如果超过材料的熔点温度,靶材发生熔融破坏,这种破坏由中心开始。图 2(b)为靶材温升与激光作用时间的关系曲线。随着时间的增加温度迅速上升,中心温度上升最快。

二维平面模型的热应力包括环向热应力 σ_θ 和径向热应力 σ_r 。图 3(a)给出高斯光束照射 K9 玻璃靶材 $t = 6 \text{ s}$ 时,环向热应力 σ_θ 的二维分布情况。光斑中心区域温度最高,受热膨胀, σ_θ 表现为压缩应力,为负值, $r = 0$ 处压缩应力最大。随着靶材半径的

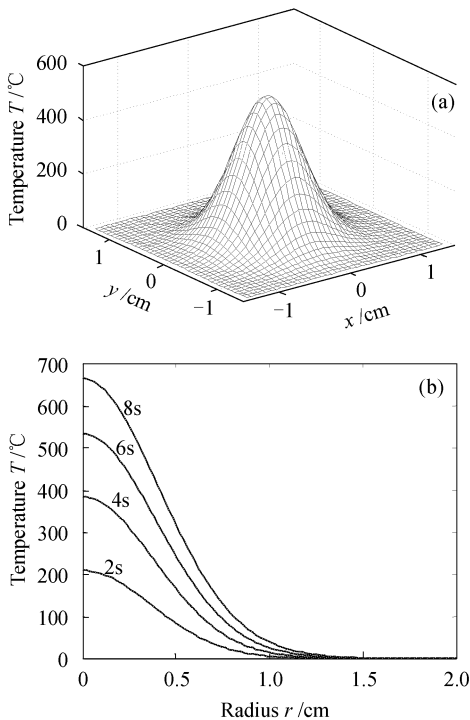


图 2 (a) $t = 6 \text{ s}$ 时的二维温升分布;
(b) 温升与激光作用时间的关系曲线
Fig. 2 (a) Temperature rise distribution in K9 induced by Gauss beam at $t = 6 \text{ s}$; (b) Temperature rise in K9 induced by Gauss beam at different time

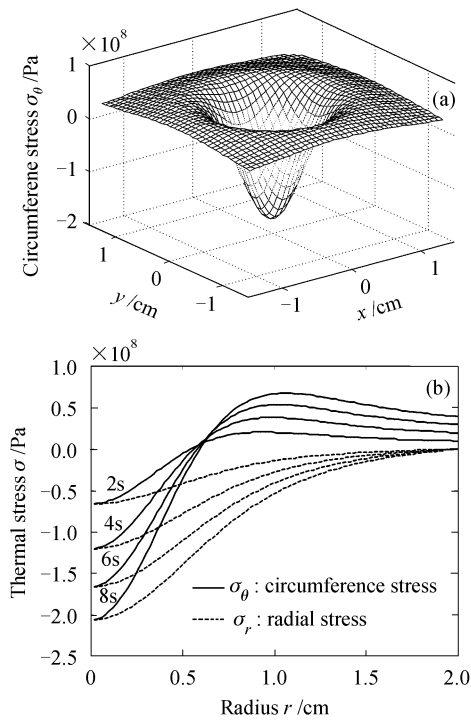


图 3 (a) $t = 6 \text{ s}$ 时的二维环向热应力场分布;
(b) 热应力与激光作用时间的关系曲线
Fig. 3 (a) Circumference stress distribution in K9 induced by Gauss beam at $t = 6 \text{ s}$; (b) Thermal stress in K9 induced by Gauss beam at different time

增加温度下降, σ_θ 仍为负值, 但绝对值减小。远离辐照中心处温度基本没有什么变化, 与辐照区域比可以称为“冷区”, “热区”和“冷区”交界处, 热应力由负值变为正值, 此时 σ_θ 开始表现为拉伸应力。在 $r_p (> a)$ 处达到最大值后逐渐下降。图 3(b) 为靶材热应力与激光作用时间的关系曲线。实线表示辐照 2, 4, 6 和 8 s 时的环向热应力, 虚线表示相应的径向热应力, 径向热应力始终为负值。对于固体来说, 材料的抗压强度(K9 约 690 MPa) 远远大于抗拉强度(K9 约 49 MPa), 所以材料损伤由环向拉伸应力控制, 也就是由图 3(b) 中环向热应力的正值部分。最大环向热应力是否超过材料的抗拉强度, 是后面计算和讨论损伤阈值的标准。

3.2 激光损伤阈值与损伤形态

激光辐照损伤, 主要是由于激光照射而导致材料的温度超过熔点 T_{melt} , 或是材料的热应力大于抗拉强度 σ_{th} 。根据前面的分析, 温度最大值出现在光斑中心($r = 0$), 热应力最大值假设在 r_p 处, 若已知 T_{melt} 和 σ_{th} , 就可以求出熔融损伤功率密度阈值 I_{thm} 和应力损伤功率密度阈值 $I_{th\sigma}$

$$I_{thm} = \frac{b^2 h \rho c_p T_{melt}}{2\eta} \times \left\{ f_0 t + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{f_m}{D\beta_m^2 J_0^2(\beta_m b)} \cdot [1 - \exp(-D\beta_m^2 t)] \right\}^{-1} \quad (13)$$

$$I_{th\sigma} = \frac{b^2 \rho c_p \sigma_{th} h}{2\alpha E \eta} \times \left\{ \frac{f_m [1 - \exp(-D\beta_m^2 t)]}{D\beta_m^2 J_0^2(\beta_m b)} \times \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{J_1(\beta_m r_p)}{\beta_m r_p} - J_0(\beta_m r_p) \right] \right\}^{-1} \quad (14)$$

利用(13)式很容易解出熔融损伤阈值, 但要得到应力损伤阈值, 就要确定 r_p 。从(12)式出发通过求导, 得到 r_p 的解析解是非常困难的。对于均匀光斑, 采用热扩散长度($\delta = 2\sqrt{Dt}$) 近似方法, 在满足条件 $\delta < b - a$ 时 $r_p = a + \delta$, 这一关系普遍成立^[5], 但对于 Gauss 光斑误差较大。 r_p 与 a 和 t 有密切的关系, 同时也受到 I_0, b 以及其他参量的影响, 所以要得到普遍适用的拟合公式困难非常大。利用数值分析, 通过程序, 即对图 3(b) 进行采样, 得到特定条件下($a = 0.5 \text{ cm}, b = 2 \text{ cm}, I_0 = 273.89 \text{ W/cm}^2$), r_p 的拟合公式

$$r_p = 0.9008 + 0.0216t - 0.0002t^2 \quad (15)$$

改变程序中 a, b, I_0 的值, 可得到相应的 r_p , 该方法普遍适用。图 4 显示了分别由拟合公式(15)(实线)和热扩散长度概念所确定的 r_p 值(虚线)的差别。 r_p

对应环向热应力最大值, 由此可以确定某一时刻材料最易损伤的位置。将(15)式代入(14)式, 可求得靶材的应力损伤阈值, 如图 5。

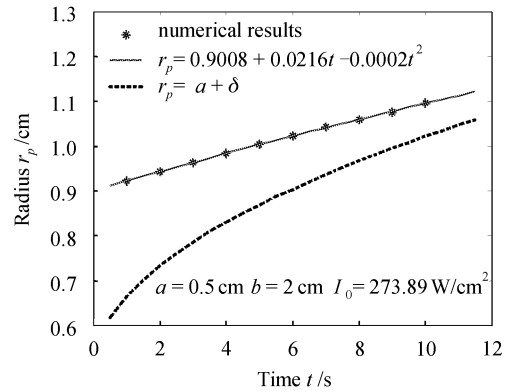


图 4 应力最大值位置与激光作用时间的关系
Fig. 4 Radius with the max thermal stress versus the irradiation time

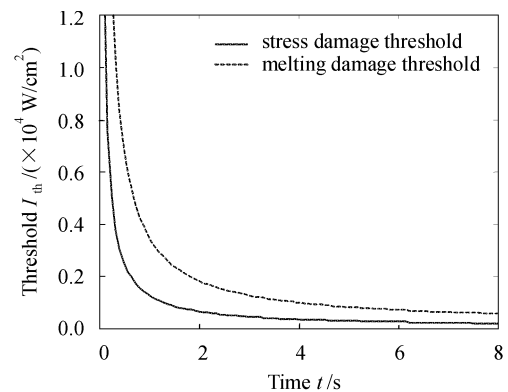


图 5 损伤阈值与辐照时间的关系
Fig. 5 Damage threshold with deferent irradiation time

由图 5 可知, 熔融损伤阈值和应力损伤阈值在激光辐照时间较短时, 由于材料表面沉积的能量少, 两种阈值功率都非常高, 但随着照射时间的增加迅速下降, 而后逐渐趋于平缓。图中 K9 玻璃的应力损伤阈值低于熔融损伤阈值, 所以损伤形态为炸裂或解理, 这与文献[6]的报道一致。因此 K9 玻璃的激光损伤阈值就是其应力损伤阈值, 这与大多数半导体材料的情况正好相反^[1,9]。

3.3 与实验结果对比分析

文献[6]中, 使用 CO₂ 连续激光照射 K9 玻璃材料, 激光功率 $P = 215 \text{ W}$, 光斑半径 $a = 0.5 \text{ cm}$, 功率密度 $I_0 = 273.89 \text{ W/cm}^2$, 当照射 6 s 时靶材解理。

图 6(图 5 的一部分) 中标出了当激光功率密度为 273.89 W/cm^2 时, 达到阈值所需要的照射时间

为 5.389 s, 与实验值的相对误差为 10.183%。误差产生的首要原因是实验不能满足真空条件, 也就使边界不满足绝热条件, K9 玻璃通过热传导会散失掉一小部分能量, 因此实验中达到阈值的时间要长一些。总之理论分析与实验结果基本符合, 说明上述模型的正确性和合理性。

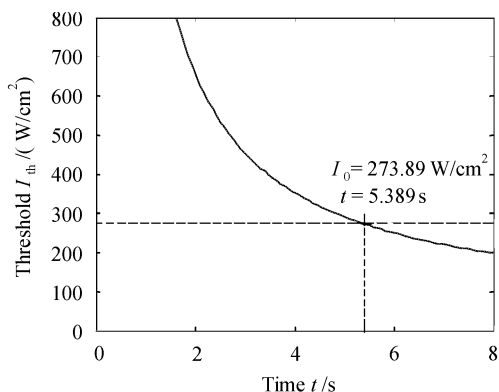


图 6 损伤阈值与辐照时间的关系

Fig. 6 Damage threshold with irradiation time

4 结 论

利用热传导和热弹性理论建立了激光与光学材料相互作用的模型。通过解析计算得到高斯光束作用下, 光学材料的温升和应力场的瞬态分布。通过拟合确定了材料最易损伤的位置, 并由此计算出材料的损伤阈值。研究表明, K9 玻璃材料的损伤形态为解理破坏, 破坏的原因是环向拉伸应力大于材料的抗拉强度。材料的损伤阈值与辐照时间反向相关, 即激光功率密度越高, 造成破坏所需的时间越短。通过与实验结果比较, 以及对误差的分析, 证明了模型的科学性。

理论模型适用于同类激光损伤效应的研究, 以及材料易损性评估分析, 为激光对抗和激光加固技术提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Amit Pratap Singh, Avinashi Kapoor, K. N. Tripathi *et al.*. Laser damage studies of silicon surfaces using ultra-short laser pulses [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**:37~43
- 2 X. Liu, D. Du, G. Mourou. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10):1706~1716
- 3 Li Zhongya, Cheng Lei, Li Chengfu. Investigation of laser damage of BaF₂ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):1029~1034
李仲伢, 程雷, 李成富. BaF₂ 晶体的激光损伤研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):1029~1034
- 4 B. S. Ooi, C. J. Hamilton, K. McIlvaney *et al.*. Quantum-well intermixing in GaAs-AlGaAs structures using pulsed laser irradiation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(5):587~589
- 5 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiang'ai *et al.*. Spot size effect of CW laser induced damage threshold in optical materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9):1055~1058
郭少锋, 陆启生, 程湘爱等. 连续激光辐照下光学材料损伤阈值的光斑效应[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9):1055~1058
- 6 Xia Jinjun, Gong Hui, Cheng Lei *et al.*. CW laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(1):20~23
夏晋军, 龚辉, 程雷等. 光学材料连续波激光热-力破坏效应[J]. *光学学报*, 1997, **17**(1):20~23
- 7 M. N. Özisik, Yu Changming trans. *Heat Conduction* [M]. Beijing: High Education Press, 1983. 596~615
M. N. Özisik 著, 俞昌铭译. *热传导*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 596~615
- 8 Qiang Xiwen, Zhang Jianquan, Liu Feng *et al.*. Thermal stress damage of semiconductors induced by laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):709~713
强希文, 张建泉, 刘峰等. 强激光辐照半导体材料的温升及热应力损伤的理论研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):709~713
- 9 Shen Zhonghua, Lu Jian, Ni Xiaowu. An analytical solution to the problem of laser-induced heating and melting of semiconductors [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(7):632~636
沈中华, 陆建, 倪晓武. 强激光作用下半导体材料的加热与熔融的解析计算[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(7):632~636