

文章编号: 0258-7025(2008)08-1245-05

激光破岩的理论分析与数值模拟

李 密¹ 王岩楼² 王亚丽¹ 张传绪² 刘 军¹

(¹ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900; ² 大庆油田有限责任公司第九采油厂, 黑龙江 大庆 163853)

摘要 激光破岩技术在石油工业上具有广阔的应用前景,但目前国内对激光与岩石相互作用机制的研究还比较少见。根据非正常传热学原理分析了均匀激光光束和高斯激光光束照射砂岩时的温度场分布;根据热应力方程和边界条件模拟了砂岩内部的热应力分布,得到有效切削砂岩所需的激光功率阈值;根据能量守恒定律建立岩石的熔化和气化模型,得到一定激光功率下岩石熔化和气化的速率。模拟结果表明,在深井中采用激光钻井技术,其钻进速度远高于常规的机械旋转钻井技术,具有显著的工业应用潜力。

关键词 激光技术;温度场;热应力;熔化热;气化热

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1245

Theoretical Analysis and Numerical Simulation of Laser to Rock

Li Mi¹ Wang Yanlou² Wang Yali¹ Zhang Chuanxu² Liu Jun¹

(¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

² CY9, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163853, China

Abstract The technology of laser drilling rock has wide applied future in petroleum industry, but there are few mechanism researches of laser to rock interiorly. This thesis analyzed the temperature distribution of the sandstone under the laser with uniform and Gaussian intensity according to the instability heat transfer theory, then simulated the heat stress distribution and the minimum laser intensity to drill sandstone according to the stress equation and boundary condition. The fusion and gasification model was constructed according to the law of conservation of energy and the fusion and gasification speed at certain laser power was calculated. The simulation results show that the speed of laser drilling rock is much faster than mechanical revolving aiguilles technology in deep oil well and has prominent industrial application potential.

Key words laser technique; temperature field; heat stress; heat of fusion; heat of gasification

1 引 言

激光钻井是一种新的钻井方式,它的原理是将激光束的巨大能量辐照在岩石表面,在短时间内将岩石局部加热到很高的温度,从而使得岩石破碎、熔化甚至气化,并通过高速辅助气流将岩石碎块和熔岩转移到激光作用区域外。现有实验结果表明,在地质极坚硬且深度超过4572 m的深井中采用激光钻井的效率远高于传统的机械旋转钻井^[1]。

激光破岩是一个复杂的非稳定的热作用过程,包括热传导、热辐射和热对流等热物理作用过程。在高能激光的作用下,岩石的局部温度迅速升高,可能出现破碎、熔化和气化等。本文根据非正常传热学原理,结合砂岩样本的热物理参数和力学参数,分

析了激光作用于砂岩的上述变化过程,通过数值模拟得到了砂岩的温度场分布、激光功率密度的阈值以及钻进速度等基本参数,为激光钻井技术的发展提供一些依据。

2 岩石温度场分布

图 1 为激光作用于岩石表面的示意图。激光照射到岩石表面时,绝大部分光能在岩石表面被吸收,然后通过热传导将热量传输到岩石内部,可以认为岩石内部没有体热源。岩石的热传导系数较小,因此激光的热作用区域集中在光斑区域部分的岩石表面附近的薄层,从而可等效为半无穷大物体加热模型。假设岩柱外半径为 b ,激光光束可以采用强度

收稿日期:2007-10-24; 收到修改稿日期:2007-12-17

作者简介:李 密(1981—),男,湖南人,硕士,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail:limi@tsinghua.org.cn

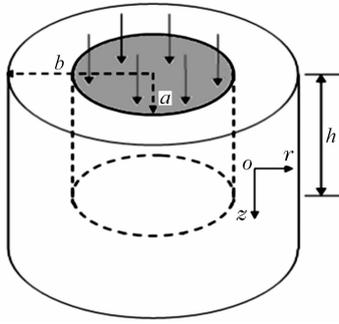


图 1 激光作用于岩石示意图

Fig. 1 Sketch map of laser to rock

均匀的圆形光束(半径为 a) 和高斯光束(束腰半径为 $\sqrt{2}\omega$), 且二者的总功率均为 P_0 。

假设激光强度分布为

$$\text{均匀光束 } I(r) = \begin{cases} P_0/\pi a^2 & 0 < r < a \\ 0 & a < r < b \end{cases}, \quad (1)$$

$$\text{高斯光束 } I(r) = P_0 e^{-r^2/\omega^2} / \pi \omega^2. \quad (2)$$

已知岩石样品的密度为 ρ , 比热容为 C , 热传导系数为 K , 假设岩石对光吸收率为 η , 初始温度 $T_0 = 300 \text{ K}$ 。通常材料热物理参数随温度的变化很小, 因此可忽略温度变化对岩石热物理参数的影响, 则该非定常传热过程的瞬态热传导方程为^[2]

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho C} \nabla^2 T \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{\eta I(r)}{K} \end{cases}, \quad (3)$$

根据边界条件和拉普拉斯变换求解(3)式, 得到岩石内部绝对温度分布函数^[2]:

均匀光束情形

$$T(r, z, t) = T_0 + \frac{\eta P_0 / \pi a^2}{2\rho C k (\pi k)^{1/2}} \int_0^t \int_0^a \frac{1}{(t-s)^{3/2}} \times e^{-\frac{r^2+x^2+z^2}{4k(t-s)}} I_0\left[\frac{rx}{2k(t-s)}\right] x dx ds, \quad (4)$$

其中 $I_0(x)$ 为第一类变形的零阶贝塞耳函数。

高斯光束情形

$$T(r, z, t) = T_0 + \frac{\eta P_0}{\rho C \pi (\pi k)^{1/2}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4k(t-s)} - \frac{z^2}{4k(t-s) + \omega^2}}}{(t-s)^{1/2} [4k(t-s) + \omega^2]} ds \quad (5)$$

若 $\eta = 0.6, a = \omega = 1.6 \text{ cm}, P_0/\pi a^2 = 260 \text{ W/cm}^2, b = 2 \text{ cm}, t = 0.3 \text{ s}$, 岩石热学和力学参数见表 1^[3,4]。根据(4)和(5)式模拟得到砂岩不同深度位置绝对温度沿径向的分布曲线, 如图 2, 3 所示。

从图 2 和图 3 可知, 由于岩石的热传导性能不佳, 砂岩内部的温度沿径向分布与激光光束强度的径向分布趋势几乎完全一致; 温度分布沿着深度方

向迅速下降; 在均匀光束光斑的边缘, 温度沿径向迅速下降, 温度梯度很大。

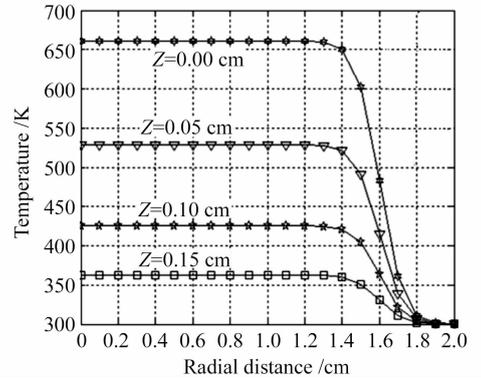


图 2 均匀光束时岩石的温度分布曲线

Fig. 2 Temperature curve at uniform intensity

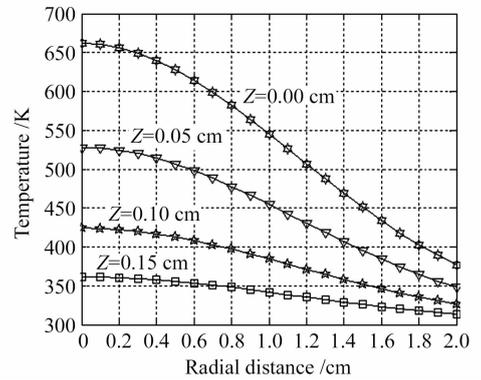


图 3 高斯光束时岩石的温度分布曲线

Fig. 3 Temperature curve at Gaussian intensity

表 1 砂岩热物理参数和力学参数

Table 1 Heat physics parameters and mechanical parameters of sandstone

Density / (g/cm ³)	2.0
Specific heat capacity / (J/(g · K))	0.75
Heat conductivity / (W/(m · K))	4.4
Young's modulus / GPa	15
Line expand coefficient / K ⁻¹	5.6 × 10 ⁻⁶
Poisson's ratio	0.12
Anti-press strength / MPa	110
Anti-tensile strength / MPa	25
Heat of fusion / (kJ/g)	1.8
Heat of gasification / (kJ/g)	13.7

3 岩石热应力分布

由于固体材料内部温度分布不均匀, 每一部分受到不同温度的相邻部分的制约, 因此在固体材料的内部产生了热应力。通常情况下, 固体材料能够承受的最大压应力远远超过最大拉应力, 一旦拉应

力超过极限拉伸应力而且固体表面未达到熔点,则固体可能破碎^[5~7]。

由于砂岩的温度分布呈现中心对称,所以剪应力 $\tau_{\theta r}, \tau_{\theta z}$ 恒为零。在不存在外力作用和外界约束的情形下,柱坐标系下的圆柱体的热位移平衡方程为^[8]

$$\begin{cases} \nabla^2 u - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right] + \frac{\partial v}{\partial z} = \\ 2 \frac{1+\mu}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \nabla^2 v + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) \right] + \frac{\partial v}{\partial z} = \\ 2 \frac{1+\mu}{1-2\mu} \frac{\partial T}{\partial z}, \end{cases} \quad (6)$$

式中 u, v 分别为质点在径向和轴向的位移。方程(6)是一组线性非齐次方程,其解由满足非齐次方程的特解和相应的齐次方程的通解组成。

先求特解,根据方程组(6)得到热弹性位移势 $\phi(r, z, t)$ 的表达式

$$\phi(r, z, t) = \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{K}{\rho C} \int_0^t T(r, z, s) ds + t\varphi(r, z) + c, \quad (7)$$

式中 $\varphi(r, z)$ 为任意调和函数,即 $\nabla^2 \varphi \equiv 0$ 。

假设砂岩在达到热稳定后的温度分布函数为 $T(r, z, \infty)$,不妨假设

$$\varphi(r, z) = -(1+\mu)akT(r, z, \infty)/(1-\mu),$$

则 $\varphi(r, z)$ 必定为调和函数,令 $k = K/\rho C$ 和 $c = 0$ 即可得到

$$\phi(r, z, t) = \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{K}{\rho C} \times \int_0^t [T(r, z, s) - T(r, z, \infty)] ds, \quad (8)$$

根据热弹性位移势理论得到热应力分量的特解^[9]

$$\begin{cases} \sigma_r^1 = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} - \nabla^2 \phi \right), \\ \sigma_{\theta}^1 = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} - \nabla^2 \phi \right), \\ \sigma_z^1 = \frac{E}{1+\mu} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \nabla^2 \phi \right), \\ \tau_{rz}^1 = \frac{E}{1+\mu} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial z}. \end{cases} \quad (9)$$

热应力分量的通解由 Love 位移函数 $L(r, z)$ ($\nabla^2 \nabla^2 L(r, z) \equiv 0$) 来确定。求解 Love 位移函数可根据特解形式进行试算,根据应力分量特解的特点得到 $L(r, z)$ 的形式解,从而得到应力分量通解^[6]

$$\begin{cases} \sigma_r^2 = \frac{E}{1+\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \nabla^2 L - \frac{\partial^2 L}{\partial r^2} \right), \\ \sigma_{\theta}^2 = \frac{E}{1+\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \nabla^2 L - \frac{\partial L}{r \partial r} \right), \\ \sigma_z^2 = \frac{E}{1+\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left[(2-\mu) \nabla^2 L - \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} \right], \\ \tau_{rz}^2 = \frac{E}{1+\mu} \frac{\partial}{\partial r} \left[(1-\mu) \nabla^2 L - \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} \right], \end{cases} \quad (10)$$

特解与通解叠加以后得到最终应力,已知应力边界条件

$$\sigma_r |_{r=b} = 0, \tau_{rz} |_{r=b} = 0.$$

根据应力的边界条件,可以最终确定 Love 函数各项的系数,然后返回代入 Love 位移函数得到最终的应力分布。根据温度曲线和应力分量,计算得到砂岩表面径向、环向和轴向热应力分量沿径向位置的分布曲线,如图 4,5 所示。

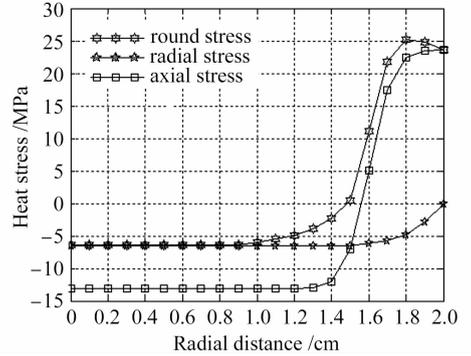


图 4 均匀光束时岩石的热应力曲线

Fig. 4 Heat stress curve at uniform intensity

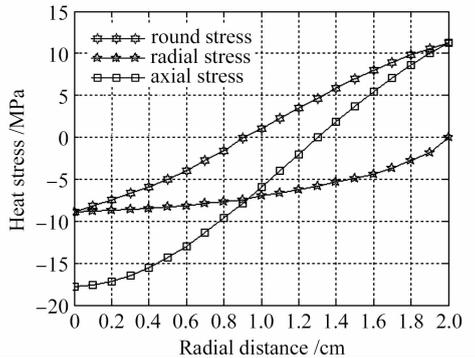


图 5 高斯光束时岩石的热应力曲线

Fig. 5 Heat stress curve at Gaussian intensity

根据图 4,5 可知,温度梯度大的位置所承受的热应力也较大。比较均匀光束和高斯光束作用于砂岩的效果可知:均匀光束辐照在砂岩表面时,热应力分量在光斑以内几乎不随半径变化,而在光斑的边缘处出现了很大的环向拉应力,砂岩最先从光斑边缘破碎;在作用时间和总功率相同的情况下,高斯光

束照射在岩石表面时获得的最大环向拉应力明显小于均匀光束在岩石中产生的拉应力,因此采用均匀光束破碎砂岩所需的激光强度阈值较低。

已知砂岩样本的抗拉强度约为25 MPa,根据图4可知,功率密度为260 W/cm²的均匀光束作用0.3 s就能导致光斑边缘处的砂岩表面热应力过大产生破碎,如果该激光作用于岩石表面的时间足够长,则可能出现熔化。如果激光功率密度更高,则能够在更短的时间内将砂岩破坏。实验中将波长为1.315 μm的激光作用于砂岩约0.4 s,当均匀光斑的功率密度达到300 W/cm²时,砂岩开始出现细微破碎,与模拟结果比较吻合。实验中激光功率密度为1200 W/cm²时,设定激光脉宽为0.4 s,并采用高速辅助气流吹走岩石碎屑防止熔化,其钻进速度最高可达0.5 cm/s。如果岩石碎屑不能及时被移除,岩石碎屑会形成熔融状的玻璃体,严重降低移除岩石的效率,此外还需准确地控制激光作用时间和冷却时间。

4 岩石相变模型

4.1 熔化模型

如果激光加热速度较快,岩石的抗拉强度较大或者延展性较好,则岩石在出现断裂和破碎之前即可能被熔化,岩石在熔化过程中吸收大量的热量。假设岩石熔化成岩浆以后迅速被高速辅助气流转移走,根据能量守恒定律,岩石吸收的能量消耗于四个方面:岩石加热、熔化吸热、岩石内部热传递和岩石表面热辐射,可知均匀光束作用于岩石的熔化模型为

$$\eta P_0 = \pi a^2 (M + CT_m) \rho u + \oint_{S_1} K |\nabla T| ds + \int_{S_2} \epsilon \sigma (T_m^4 - T_0^4) ds, \quad (11)$$

式中 M 为熔化潜热(约 1.8 kJ/g), u 为岩石移除速度, S_1 为热核边界面, S_2 为岩石的外表面, T 为岩石绝对温度分布, ∇ 为梯度算符, T_m 为岩石熔点(>1000 °C), 假设岩石的发射率为 $\epsilon = 0.5$, 斯特藩常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m² · K⁴)。岩石熔化时,其热核形状保持动态稳定,固相和液相的交界面温度为岩石的熔点。

根据(4)式可知,如果岩石碎屑不被吹走,则在0.3 s时砂岩表面的温度达到熔点,此时所需的激光功率密度至少为720 W/cm²,实验中砂岩样本达到熔化所需的激光功率密度至少为750 W/cm²。根据熔化模型可知,激光功率密度达到2000 W/cm²时的

钻进速度约为0.23 cm/s,比能量值 $(M + CT_m)\rho/\eta$ 为8.7 kJ/cm³。

4.2 气化模型

如果激光加热的功率极高,岩浆很快被气化,不采用高速气流带走岩浆的辅助手段,则同样根据能量守恒定律可得到均匀光束作用于岩石的气化模型

$$\eta P_0 = \pi a^2 (G + M + CT_g) \rho u + \oint_{S_1} K |\nabla T| ds + \int_{S_2} \epsilon \sigma (T_g^4 - T_0^4) ds, \quad (12)$$

式中 G 为岩石气化潜热(13.7 kJ/g), T_g 为岩石的气化温度(>3000 °C)。根据(4)式可知,若在0.3 s时砂岩表面达到气化温度,则所需的激光功率密度至少为2300 W/cm²,实验中化学氧碘激光器(COIL)的功率密度未能达到该数值,未能测量砂岩气化过程。假设功率密度达到4000 W/cm²,则此时岩石的气化速率约为0.06 cm/s,比能量值 $(G + M + CT_g)\rho/\eta$ 高达60 kJ/cm³。

根据模拟和实验结果可知,如果采用高速辅助气流带走岩浆的作业方式,在激光功率密度为2000 W/cm²时的钻进速度约为0.23 cm/s;如果采用气化作业方式,由于砂岩的气化潜热极高,即使激光功率密度高达4000 W/cm²时钻进速度仅为0.06 cm/s;而采用应力破碎岩石的速率明显高得多,因此适宜采用应力破碎岩石的作用方式。

5 结 论

模拟结果表明,砂岩温度的径向分布与光斑强度分布极其相似;总功率相同时均匀光束比高斯光束能够产生更大的拉应力;温度发生突变的位置能够产生较大的热应力,因此在均匀光斑内部加多个光阑以形成多个温度突变区域有利于提高岩石的破碎速度。

破碎、熔化和气化破除岩石所需要的激光功率密度阈值依次上升,而破除岩石的效率依次下降,因此利用应力破碎岩石最合理。实验中激光功率密度为1200 W/cm²,激光脉宽为0.4 s时,并采用高速辅助气流迅速吹走岩石碎屑防止熔化,其钻进速度最高可达0.5 cm/s,远高于传统钻井技术在深井(>4572 m)中的平均钻进速度(约0.04 cm/s)^[10],因此利用激光钻井技术在深井和坚硬的地质条件下开采油气资源具有明显的优势。

参 考 文 献

- 1 Dou Hong'en. The technology of laser drilling oil well in 21st

- century [J]. *Oil Forum*, 2004, **23**(2):59~62
- 窦宏恩. 21 世纪的激光钻井技术[J]. *石油科技论坛*, 2004, **23**(2):59~62
- 2 Zhen Qiguang, Gu Jianhui. The Effect between Laser and Material [M]. 1st ed.. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. 31~39
- 郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用[M]. 第一版. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996. 31~39
- 3 Sun Jianguo. The Physical Foundation of Rock [M]. 1st ed.. Beijing: Geology Press, 2006. 40~122
- 孙建国. 岩石物理学基础[M]. 第一版. 北京: 地质出版社, 2006. 40~122
- 4 Ye Jinhan, Chi Qixia, Xia Wanren *et al.*. Handbook on Mechanical Properties of Rocks [M]. 1st ed.. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1991. 474~493
- 叶金汉, 郗绮霞, 夏万仁 等. 岩石力学参数手册[M]. 第一版. 北京: 中国水利水电出版社, 1991. 474~493
- 5 Huang Feng, Niu Yianxiong, Wang Yuefeng *et al.*. Calculation of thermal and mechanical effect induced by laser in optical window materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):576~580
- 黄 峰, 牛燕雄, 汪岳峰 等. 光学窗口材料激光辐照热力效应的解析计算研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):576~580
- 6 Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng *et al.*. Research on thermal distortion of Nd:GdVO₄ crystal with laser diode end-pumped cinder section [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1324~1328
- 史 彭, 李 隆, 甘安生 等. 激光二极管端面抽运圆形截面 Nd:GdVO₄ 晶体的热形变[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1324~1328
- 7 Shenjin Zhang, Shouhuan Zhou, Xiaojun Tang *et al.*. Investigation of laser diode face-pumped high average power heat capacity laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11):658~660
- 8 Li Weite, Huang Baohai, Bi Zhongbo. The Analysis and Apply of Heat Stress Theory [M]. 1st ed.. Beijing: Chinese Electric Power Press, 2004. 89~94
- 李维特, 黄保海, 毕仲波. 热应力理论分析及应用[M]. 第一版. 北京: 中国电力出版社, 2004. 89~94
- 9 Zhang Jianquan, Luo Qiang, Liu Feng *et al.*. The distribution of the thermal stress which produced by laser radiated on the cylinder [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1999, **16**(4):123~129
- 张建泉, 罗 强, 刘 锋 等. 激光照射圆柱体产生热应力的分布[J]. *应用力学学报*, 1999, **16**(4):123~129
- 10 R. M. Graves, D. G. O'Brien. Star wars laser technology applied to drilling and completing gas well [P]. Society of Petroleum Engineers, 1999, SPE49259:761~770

激光二极管抽运 3 W 量级小型全固态中波红外激光器

3~5 μm 激光由于在大气传输中具有良好的穿透性, 在光谱学、遥感、医疗、环保等方面有着广泛的用途。此外, 在军事制导、目标探测、成像激光雷达、定向红外对抗等国防领域中也有重要的应用价值。

最近, 我们采用激光二极管(LD)抽运光参量振荡器(OPO)的技术研制出平均功率达 3 W 量级的小型全固态中波红外激光器样机, 具备在 -20~+40 $^{\circ}\text{C}$ 环境条件下工作的能力。激光器输出波长为 3.7~5 μm , 平均功率 ≥ 3 W, 激光重复频率为 10 kHz。样机包括激光头和电源两部分。其中, 激光头采用热电独立制冷结构, 实现了全固态无液体

冷却方式工作, 体积小于 350 mm \times 100 mm \times 200 mm, 重量小于 10 kg; 配套电源体积小于 500 mm \times 500 mm \times 200 mm, 重量小于 30 kg。激光器具有体积小、重量轻、结构紧凑、系统电光效率高、操控简单、功能全面、可靠性高等技术特点, 可满足机载、车载等使用要求。

固体激光技术国家级重点实验室, 北京 100015

王克强 韩 隆 魏 磊 吴军勇

收稿日期: 2008-07-03