

文章编号: 0258-7025(2006)06-0842-04

基于数值模拟的激光热负荷光强分布设计

宋宏伟, 李少霞, 虞 钢

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 激光活塞热负荷模拟实验需将高斯光束调制成按特定光强分布的多个同心光环, 为此提出了基于有限元(FE)分析的激光热负荷光强分布反求设计思想。应用最初设计的整形器对有限元模型进行校核, 在合理的范围内调整边界条件参数和活塞材料热物性参数, 使模拟结果与实验结果吻合; 对于校核后的有限元模型, 通过调整光强分布和加载条件以接近目标温度场, 从而获得整形器优化设计方案。基于上述方法可实现由目标温度场反求设计出光场分布。研究表明, 采用数值模拟方法进行研究, 可大幅度缩短整形器设计周期、降低设计费用, 并起到虚拟实验的作用, 从而提高了热负荷实验的可控性和可预见性。

关键词 激光技术; 热负荷; 有限元; 激光光束整形

中图分类号 TK 401; TN 249 **文献标识码** A

Intensity Distribution Design for Laser-Induced Thermal Loading Based on Numerical Simulation

SONG Hong-wei, LI Shao-xia, YU Gang

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract To accomplish laser-induced thermal loading simulation tests for pistons, the Gaussian beam was modulated into multi-circular beam with specific intensity distribution. A reverse method was proposed to design the intensity distribution for the laser-induced thermal loading based on finite element (FE) analysis. Firstly, the FE model is improved by alternating parameters of boundary conditions and thermal-physical properties of piston material in a reasonable range, therefore it can simulate the experimental results of the originally designed shaping lens. Secondly, with the validated FE model, the target temperature field is achieved by alternating the intensity field and loading conditions, and the optimal design for the beam shaping lens is subsequently obtained. This reverse design method bridges temperature field and intensity field. The results show that numerical simulation can reduce design cycle and design expense efficiently. Meanwhile, this process can be taken as a kind of virtual experiment which makes the thermal loading test more controllable and predictable.

Key words laser technique; thermal loading; finite element; laser beam shaping

1 引言

以激光为热源进行活塞热负荷实验是一项探索性研究。柴油发动机活塞的直径在150 mm左右, 在工作状态下顶部各区域在不同的温度范围内波动^[1,2]。而激光直接照射形成焦斑面积很小, 光强一般呈高斯分布, 不能满足热负荷实验所需的较大加热范围和特定温度分布的要求。因此, 需制作多圆环光束整形器, 对入射高斯光束进行空间调制, 以

实现对不同区域的温度控制。

在高斯光束的空间调制方面已开展了广泛的研究^[3~7]。可通过理论推导或数值方法获得满足特定温度分布所需的光强分布, 据此设计制作基于二元光学原理的整形器。激光光束经整形器调制后按设计方式投射, 使相应区域满足温度分布要求。由于活塞尺寸较大、结构复杂且随激光加载和卸载产生温度波动, 通过数值模拟求解更为有效。

收稿日期: 2005-07-19; **收到修改稿日期**: 2005-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(10502049)资助项目。

作者简介: 宋宏伟(1973—), 男, 黑龙江人, 中国科学院力学研究所副研究员, 博士, 主要从事计算固体力学及激光智能制造工艺力学等研究。E-mail: songhw@tsinghua.edu.cn

2 设计要求和基本原理

图 1 为 1/2 个活塞结构示意图。根据活塞整机热负荷实验测量结果, 活塞顶面特定区域按一定温度分布波动, 即中心区域、中间区域和外围区域的温度分别在 310~320 °C, 280~290 °C 和 350~360 °C 之间波动。为此, 对激光热负荷实验设计的要求是, 通过激光的加载和卸载使得温度场也满足该分布特征。由于设计难度较大, 在实验过程中主要考察中心区域和外围区域与设计的要求较为吻合即可。

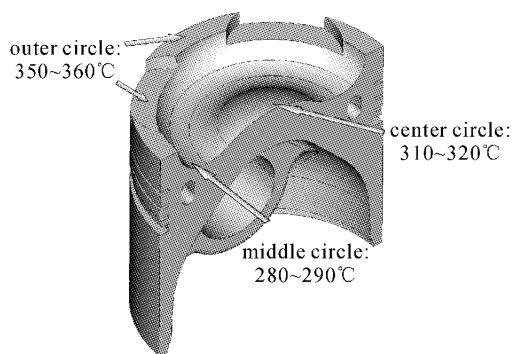


图 1 活塞结构示意图及温度分布和温度波动设计要求

Fig. 1 Illustration of piston structure and the target temperature distribution and fluctuation

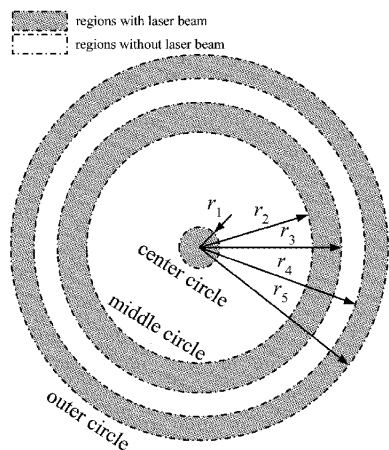


图 2 激光作用区域示意图

Fig. 2 Illustration of laser loading regions

为此需制作多圆环光束整形器, 使得呈高斯分布的激光光束经空间调制后如图 2 形成三个同心圆环投射到活塞顶面上, 各光环的内、外半径用 r_i ($i = 1 \sim 5$) 表示。透过整形器的光强分布可表示为

$$f(R) = \begin{cases} I_1, & R \in [0, r_1] \\ I_2, & R \in [r_2, r_3] \\ I_3, & R \in [r_4, r_5] \\ 0, & R \in [r_1, r_2] \cup [r_3, r_4] \cup [r_5, \infty] \end{cases} \quad (1)$$

其中 I_1, I_2 和 I_3 分别为内、中、外环的相对平均功率密度, r 为作用区域。前期已制备了一个整形器, 其光强分布如图 3 所示, 其中 $I_1 : I_2 : I_3 = 32 : 29 : 37$, $r_1 = 5$ mm, $r_2 = 40$ mm, $r_3 = 50$ mm, $r_4 = 60$ mm, $r_5 = 67.5$ mm。但此整形器不能满足设计要求, 为此需提出新的设计参数。

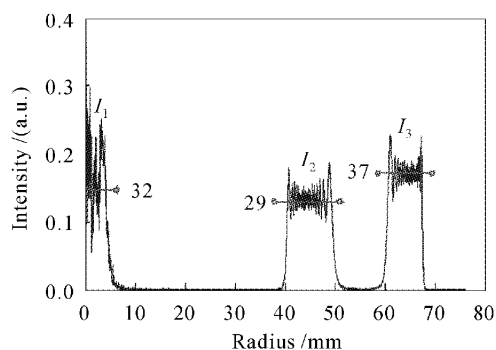


图 3 现有整形器调制的光强分布

Fig. 3 Intensity distribution via original shaping lens

3 基于数值模拟的整形器光场设计

3.1 设计思想

为了获得更为合理的整形器, 提出以下设计思想: 应用现有整形器进行典型热负荷实验, 获取特征区域特征点的温度变化数据; 建立相应的有限元分析模型, 应用实验获得的特征点温度变化对模型进行校核; 通过调整热边界条件参数和微调材料热物性参数使模型结果与实验结果吻合; 应用校核后的模型进行整形器数值模拟设计, 使之满足或接近设计要求。

3.2 有限元模型

对于非轴对称的活塞结构, 需建立三维有限元模型。根据活塞结构特点, 可建立 1/2 模型以节省计算成本。本文借助 ProE 建立起活塞的三维几何模型, 然后导入至 ANSYS 中进行有限元建模。采用四面体单元划分网格, 对顶面激光作用区域采用细化以提高计算精度。活塞初始温度为 $T_0 = 280$ °C。模拟 80 个周期的循环加载, 每个周期为 2 s 升温(激光作用), 3 s 降温(自然冷却), 升温周期加载到活塞顶面的热流密度为

$$q(R) \Big|_r = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \phi(P) f(R), \quad (2)$$

其中 k 为导热系数, n 为边界的外法线量, $\phi(P)$ 为激光功率的函数。根据(1)式, $q(R) \Big|_r$ 随作用区域 R 和 $\phi(P)$ 变化。降温周期加载到活塞顶面的功率密度为零, 即

$$q(R) \Big|_r = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = 0. \quad (3)$$

对称面和与实验台架直接接触的活塞底面采用绝热边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = 0. \quad (4)$$

其他各面均与空气进行自然对流换热,符合第三类边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T - T_a), \quad (5)$$

其中 h 为换热系数, T_a 为环境温度。

3.3 模型校核

采用与数值模拟相同的加载条件进行热负荷实验,激光输出功率为3 kW。用红外高温仪采集特征区域瞬时温度变化,并与数值模拟结果进行比较。活塞材料是铝合金 LD11,通过材料手册可获得热物性参数基本范围,调整热物性参数和热边界条件参数成为校核有限元模型的主要手段。着重针对中心圆环和外围圆环特征温度进行模型校核。如图4所示,经校核后模型获得的温度幅值和温度变化均与实验结果吻合得很好。

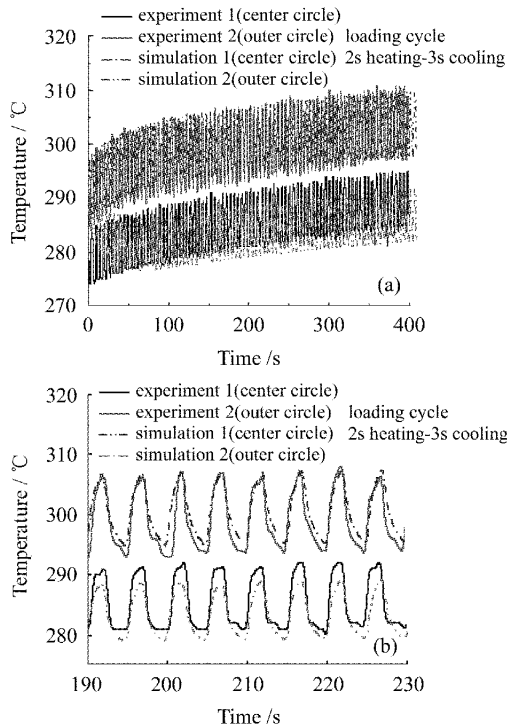


图4 数值模拟与实验结果比较
(a) 80个周期;(b) 局部某8个周期

Fig. 4 Comparison of numerical and experimental results
(a) 80 cycles; (b) selected 8 cycles

3.4 光场改进设计

由图4可知,中心圆环与外围圆环各自的温度

变化在10 °C左右,基本满足设计要求;但是两个环之间的温度差只有15 °C左右,不满足40 °C左右温差的设计要求;此外,从图5(a)的瞬态温度场可以看到,现有整形器的外围光环没有作用在图2指定的区域上。研究发现,光环宽度和功率密度决定着各圆环区域的绝对温度,通过调整各光环的内、外半径以及功率密度比可得到如图5(b)所示的瞬态温度分布。

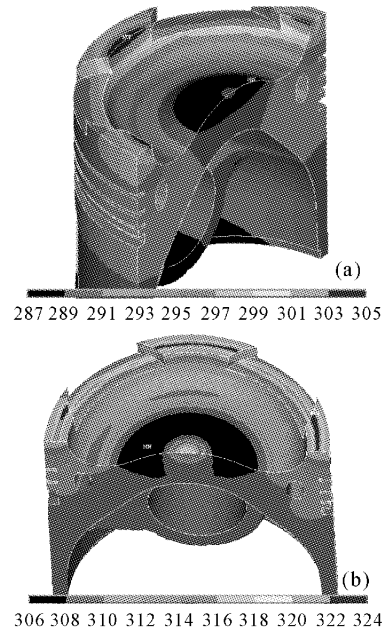


图5 数值模拟瞬态温度场
(a) 原设计;(b) 新设计

Fig. 5 Instantaneous temperature field via numerical simulation
(a) original design; (b) current design

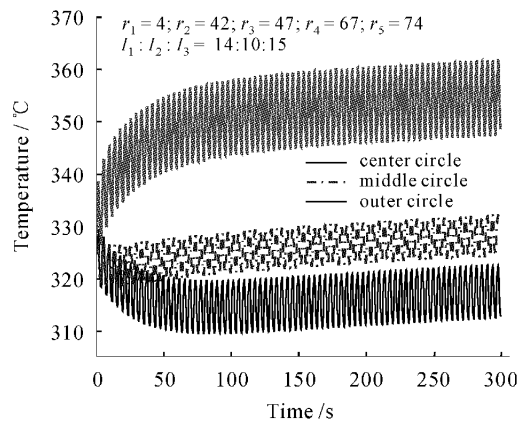


图6 各光环作用区域的特征温度波动

Fig. 6 Temperature fluctuation of laser-acting regions

在激光输出功率为3 kW,初始温度 $T_0 = 320$ °C,周期为2 s升温,2 s降温的循环载荷条件

下,经数值模拟获得的各光环作用区域特征温度波动如图 6 所示。可见,这种结果与设计要求的吻合。这种设计的光强分布如图 7 所示,即 $I_1 : I_2 : I_3 = 14 : 10 : 15$; $r_1 = 4 \text{ mm}$, $r_2 = 42 \text{ mm}$, $r_3 = 47 \text{ mm}$, $r_4 = 67 \text{ mm}$, $r_5 = 74 \text{ mm}$ 。

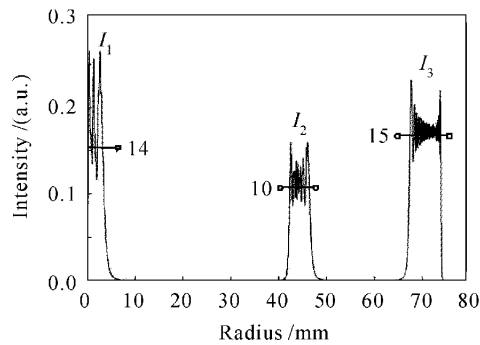


图 7 优化设计的光强分布

Fig. 7 Intensity distribution of optimized design

4 结 论

针对激光热负荷实验,提出了一种基于数值模拟的光强分布反求设计思想。通过实验校核后的有限元模型可以进行光场的优化设计,从而大幅度缩短整形器设计周期,降低设计费用。此外,本文的数值模拟方法还可以达到虚拟实验的效果,从而提高了热负荷实验的可控性和可预见性。由于活塞热负荷实验需要花费大量时间和财力,通过虚拟实验有选择地进行模拟实验意义重大。

参 考 文 献

- 1 Kutsuna Muneharu, Fujita Shinji, Sugita Yuji *et al.*. Thermal fatigue test for turbine housing by a pulse YAG laser [C]. *SPIE*, 1999, **3888**:438~445
- 2 Yu Xiaoli, Jin Ruibin, Shen Yuming *et al.*. Thermal fatigue simulating test bench for the engine piston [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 1997, **18**(4):43~47
俞小莉,金瑞斌,沈瑜铭等. 内燃机活塞热疲劳模拟试验台[J]. *内燃机工程*, 1997, **18**(4):43~47
- 3 Wu Yunfeng, Ye Yutang, Wang Bingxue *et al.*. Flattening of temperature distribution in laser induced diffusion region [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):327~330
吴云峰,叶玉棠,王兵学等. 激光诱导扩散区温度分布的均匀化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):327~330
- 4 Zhang Bin, Lü Baida, Xiao Jun. Study of beam uniformity methods in indirect-driven laser fusion [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(12):1998~2004
张彬,吕百达,肖峻. 激光间接驱动聚变的光束均匀化方案研究[J]. *物理学报*, 1998, **47**(12):1998~2004
- 5 Zheng Xueze, Wang Ling, Yan Yingbai *et al.*. Design binary optics elements for ICF uniform illumination with hybrid optimization method [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):265~269
郑学哲,王凌,严瑛白等. 实现 ICF 均匀照明的二元光学器件的混合优化设计[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3):265~269
- 6 Tian Kehan, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng. Two kinds of improvement on Yang-Gu algorithm for the design of diffractive optical element used for beam shaping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):307~312
田克汉,严瑛白,谭峭峰. YG 算法设计衍射光学光束整形器件的两种改进[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):307~312
- 7 Gao Hongyi, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Beam homogenizer for XeCl excimer laser and its applications [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10):1379~1382
高鸿奕,楼祺洪,董景星等. 准分子激光光束均匀器及其应用[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10):1379~1382