

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0166-04

活塞激光热负荷光强分布优化设计

谭建松^{1,2} 庞 铭¹ 解志民¹ 王建平¹ 吴 波¹ 虞 钢^{2*}

(¹ 中国北方发动机研究所分所, 河北 廊坊 065000; ² 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 活塞激光热负荷, 就是利用二元光学转光片(DOE)改变激光在空间的能量分配, 使用电脑控制激光在时间域上的分布, 从而使活塞实现特定的温度分布和波动。二元光学转光片的设计、加工需要知道各区域激光能量分配比例。为此提出了基于有限元优化的激光热负荷试验光强分布设计思想, 建立了光强优化分布模型。模拟结果表明, 二元光学转光片激光辐照区域的 3 个环(从中心往外)的功率比例为: 0.03:0.01:9.96, 能使活塞的温度分布与设计要求的目标温度一致, 并能模拟活塞的高周、低周疲劳。

关键词 激光技术; 二元光学转光片; 热负荷; 温度

中图分类号 TK401; TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL200936s1.0166

Intensity Distribution Optimal Design for Laser-Dominated Thermal Loading

Tan Jiansong¹ Pang Ming¹ Xie Zhimin¹ Wang Jianping¹ Wu Bo¹ Yu Gang²

(¹ Substation China North Engine Research Institute, Langfang, Hebei 065000, China)
(² Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract To accomplish laser-induced thermal loading simulation tests for pistons, space intensity distribution of laser is changed by diffractive optical element (DOE), and time distribution of laser is controlled with the help of computer. It is necessary to know proportion of intensity distribution for design and process of DOE. Finite mode of intensity distribution is established. Results show temperature distributing of piston is agreement with target temperature distributing when power proportion from center circle to outer circle is 0.03, 0.01 and 9.96. Thermal loading of high cycle and low cycle can be simulated by optimization DOE.

Key words laser technique; diffractive optical element; thermal loading; temperature

1 引 言

活塞作为发动机的主要受热件之一, 在实际工作中承受交变热负荷作用, 如果活塞结构、冷却、材料选用等任何一方面出现问题, 都会出现热损伤现象, 因此研究发动机活塞的热负荷对于提高发动机的整机可靠性具有重要意义^[1~4]。在活塞的非台架试验热负荷研究中, 如何准确有效地模拟出活塞实际工况下特定的温度场, 并在此基础上实现活塞的高周、低周疲劳方法是发动机活塞热负荷研究的一项关键技术。

本文利用二元光学转光片(DOE)改变激光在空间的能量分布, 从而使活塞表面达到特定的温度

分布^[5~12]。由于加工设计一个二元光学元件周期长、成本高, 通过试验来优化二元光学元件上各区域的能量分配比例很不现实。本文通过有限元仿真优化设计方法, 优化二元光学元件各区域的激光能量分配比例, 采用优化的比例设计加工的二元光学转光片能使活塞顶面达到特定的温度场分布, 并能模拟活塞的高周、低周疲劳。

2 设计要求和基本原理

二元光学元件优化设计的目标是使活塞表面能达到如图 1 所示的温度分布。设计原理是通过二元光学元件(DOE)把单光束的激光整形成多圆环光

作者简介: 谭建松(1969—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事热负荷和发动机可靠性等方面的研究。

E-mail: tan_jiansong@163.com

* 通信联系人。E-mail: gyu@imech.ac.cn

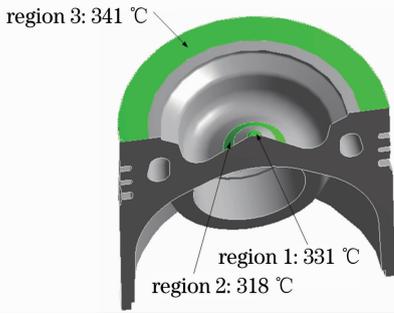


图 1 活塞表面各区域温度分布

Fig. 1 Illustration of the target temperature distribution

束投射在活塞表面,通过优化激光辐照各区域的能量比例从而达到图 1 所示的温度分布,在此基础上通过控制激光的加卸载参数使激光辐照区域产生 10~20 °C 范围内的温度波动幅值。

3 技术方案

建立激光活塞热负荷二元光学元件能量分布数值物理模型,优化 DOE 能量分配比例,使数值模拟温度场与设计要求的温度场一致,其技术方案如图 2 所示。

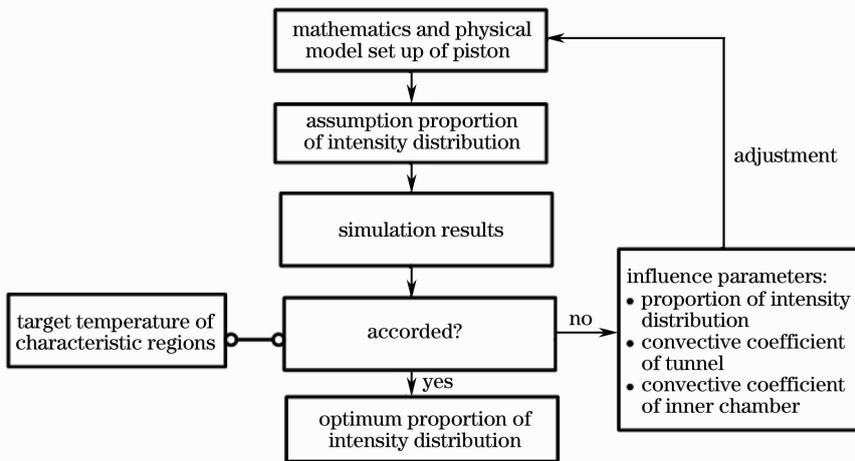


图 2 技术方案示意图

Fig. 2 Illustration of technology project

4 活塞有限元模型

4.1 有限元网格的划分

根据活塞的对称性,建立 1/2 模型以节省计算时间。借助 ProE 建立活塞的三维几何模型,导入 ANSYS 中进行有限元建模。采用四面体单元划分网格,对活塞顶面激光作用区域细化以提高计算精度,如图 3 所示。

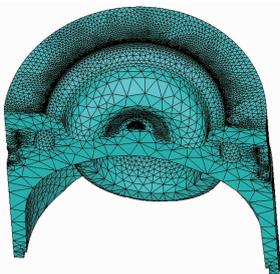


图 3 活塞有限元模型

Fig. 3 Finite mode of piston

4.2 热源模型

活塞顶部的温度场是利用 DOE 整形后的激光加载形成的。激光是多模光束,其光强分布为单束

平顶光束,经 DOE 整形形成多圆环(一个中心圆环和 2 个同心圆环)分布,投射于活塞顶面,如图 4 所示,从中心环到外环激光作用区域的功率密度为 I_1, I_2, I_3 。

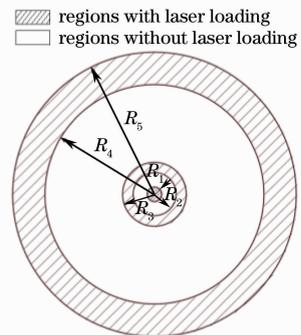


图 4 激光作用区域示意图

Fig. 4 Illustration of laser loading regions

中心环: $R \leq 3 \text{ mm}$, $T = 331 \text{ °C}$;

第二环: $8.5 \text{ mm} \leq R \leq 12.5 \text{ mm}$, $T = 318 \text{ °C}$;

外环: $42.5 \text{ mm} \leq R \leq 55 \text{ mm}$, $T = 341 \text{ °C}$ 。

其中 I_1, I_2, I_3 分别为三个环的相对功率密度, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 为各环的内外半径。激光有效输

出功率 P_0 满足

$$P_0 = I_1 S_1 + I_2 S_2 + I_3 S_3,$$

式中 S_1, S_2 和 S_3 分别为中心、第二环和外环的面积, 即 $S_1 = \pi R_1^2, S_2 = \pi(R_3^2 - R_2^2), S_3 = \pi(R_3^2 - R_1^2)$ 。

4.3 边界条件

活塞表面激光作用区域考虑了热源的加载及作用区域与外界的自然对流换热, 活塞的对称面和实验台架直接接触的活塞底面采用绝热边界条件^[13,14]

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = 0,$$

活塞的通油孔中冷却介质(空气)对活塞的冷却

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h_1 (T - T_a),$$

活塞的其他面与外界的自然对流换热为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h_2 (T - T_b),$$

式中 k 为导热系数, n 为边界的外法线量, h_1 为通油孔表面与冷却介质的对流换热系数, h_2 为活塞表面与外界的对流换热系数, T_a 为冷却介质温度, T_b 为环境温度。

4.4 优化结果

通过对激光二元光学元件能量分配比例优化后, 其优化的 DOE 参数(从中心到外环的激光功率之比)为: 0.03:0.01:9.96, 其优化后的各区域数值模拟温度和设计要求的温度如表 1 所示。

表 1 优化后的各区域温度与设计要求的对比

Table 1 Comparison of optimizing and target temperature

Comparison of temperature	Target temperature / °C	Optimizing temperature / °C
Center temperature	331	332
Second circle temperature	318	320
Outer circle temperature	341	340

5 试验验证

采用优化的比例设计、加工的二元光学镜片做活塞激光热负荷试验, 试验结果如图 5 和图 6 所示。从图 5 可以看出, 加工的二元光学转光片能达到设计要求的温度分布(温度精度 2 °C 范围内), 并能在此基础上模拟活塞的高周疲劳, 即激光辐照区域形成 10~20 °C 范围的温度波动。从图 6 可以看出, 活塞激光热负荷, 在激光卸载过程中活塞顶和通油孔通压缩空气冷却, 200 s 一个循环周期内就能实现激光辐照区域从 170 °C 升到 300 °C, 再快速冷却到

170 °C 的低周热疲劳模拟。

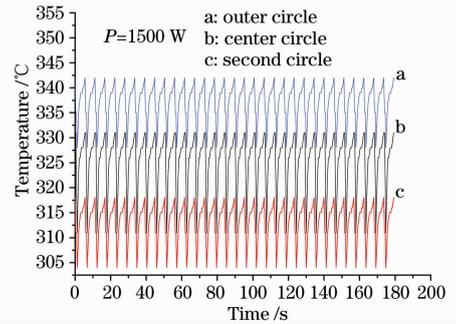


图 5 活塞高周疲劳

Fig. 5 Piston of thermal high cycle fatigue

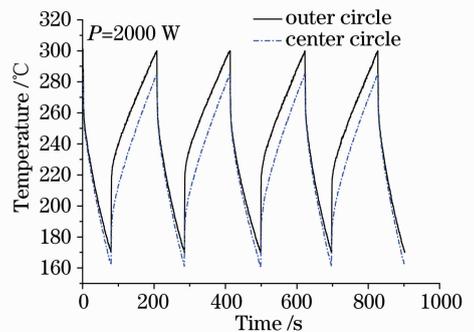


图 6 活塞低周疲劳

Fig. 6 Piston of thermal low cycle fatigue

6 结 论

针对某活塞的激光热负荷试验, 结合活塞在发动机真实工况下试验测量的温度分布, 建立了 DOE 能量优化模型, 其优化的各区域激光能量比例为(从中心环到外环): 0.03:0.01:9.96。采用优化的比例设计、加工的 DOE 能使活塞顶面达到设计要求的温度, 并能模拟活塞的高周和低周疲劳。

参 考 文 献

- Shi Peiwen, Du Aimin. Thermal analysis of pistons[J]. *Internal Combustion Engines*, 2006, **3**: 7~10
施培文, 杜爱民. 发动机活塞热分析[J]. *内燃机*, 2006, **3**: 7~10
- Wang Xizhen, Sheng Jisheng, Ya Zhaoda *et al.*. Finite element analysis of piston thermal shock[J]. *Transactions of CSICE*, 2002, **20**(6): 564~568
王希珍, 沈季省, 严兆大 等. 活塞热冲击有限元分析[J]. *内燃机学报*, 2002, **20**(6): 564~568
- Liu Jinxiang, Zhang Weizheng. Design of thermal fatigue test bed by using infrared heat for the aluminum alloy piston[J]. *J. Hebei University of Science and Technology*, 2000, **21**(3): 37~40
刘金详, 张卫正. 铝合金活塞红外线加热热疲劳实验台架研究[J]. *河北科技大学学报*, 2000, **21**(3): 37~40
- Yu Xiaoli, Jin Ruibing, Shen Yuming *et al.*. Thermal fatigue simulating test bench for the engine piston[J]. *Chinese Internal*

- Combustion 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实验台[J]. 内燃机工程, 1997, **18**(4): 43~47
- 5 Zhang Bin, Lü Baida, Xiao Min. Study of beam uniformity methods in indirect-driven laser fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(12): 1998~2004
- 张彬,吕百达,肖敏. 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
- 6 Zheng Xuezhe, 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
- 7 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
- 8 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
- 9 Song Hongwei, Yu Gang, Wang Lixin *et al.*. Laser-induced thermal loadings on pistons[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 701~704
- 宋宏伟,虞钢,王立新等. 激光诱发活塞的热负荷[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 701~704
- 10 Tu Mengfu, Yu Gang. A method of trace generation for 5-axis robotic laser manufacturing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4): 364~368
- 涂孟夫,虞钢. 五轴框架式机器人激光加工系统轨迹算法研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(4): 364~368
- 11 Song Hongwei, Li Shaoxia, Yu Gang. Intensity distribution design for laser-induced thermal loading based on numerical simulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 842~845
- 宋宏伟,李少霞,虞钢. 基于数值模拟的激光热负荷光强分布设计[J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 842~845
- 12 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
- 13 Hongwei Song, Gang Yu, Jiansong Tan *et al.*. Thermal fatigue on pistons induced by shaped high power laser (Part I: Experimental study of transient temperature field and temperature oscillation) [J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**: 757~767
- 14 Hongwei Song, Gang Yu, Alexander F. H. Kaplan *et al.*. Thermal fatigue on pistons induced by shaped high power laser (Part II: Design of spatial intensity distribution via numerical simulation) [J]. *International J. Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**: 768~778