

气缸盖激光热负荷试验模型相关参数的校核研究

聂树真 虞 钢 何秀丽 郑彩云 宁伟健 李少霞

(中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 气缸盖激光热负荷试验采用整形激光束作为热源模拟实际工况下气缸盖承受的热负荷。为了使整形光束实际作用效果与模拟计算结果一致,需对激光加载下气缸盖有限元模型的相关参数进行校核。针对火力面结构采用不同光斑尺寸的激光束进行加载测温试验。建立了三维有限元分析模型,通过在合理范围内调整模型密度、比热、热导率和吸收率等参数取值,最终使模拟计算温度结果与实测结果相吻合、两者温度值误差与测温试验误差相当。此结果既为后续的热负荷试验奠定模型计算基础,也为其它零部件激光热负荷试验中模型参数的选择和校核提供参考。

关键词 激光技术;气缸盖热负荷;参数校核;数值模拟

中图分类号 TG163 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100518

Verification of Model Parameters Used in Laser Thermal Fatigue Test on Cylinder

Nie Shuzhen Yu Gang He Xiuli Zheng Caiyun Ning Weijian Li Shaoxia

(Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In the thermal fatigue test of cylinder head, the shaped laser beam is chosen as the heating source to simulate the real fatigue. In order to make the experimental and simulated results agree with each other, the model parameters need to be verified. According to the surface structure, different laser loading experiments are proposed to measure the temperature on the cylinder head. The finite element model is set up and the parameters like density, specific heat, thermal conductivity, absorptivity, need to be adjusted until the experimental results are coincident with the simulated one and the error between them is the same as the experimental error. These results build the simulation foundation for the next thermal fatigue test. References for the selection and optimization of the model parameters of other partials in thermal fatigue test are also provided.

Key words laser technique; cylinder head thermal fatigue; parameter verification; numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 350.3850

1 引 言

气缸盖是发动机的关键零部件,在实际工况下,承受很大的温度梯度和热应力,极易出现热疲劳裂纹^[1]。伴随着高功率密度、高紧凑发动机的发展趋势,其热负荷问题更加突出,因此对气缸盖热负荷的研究非常必要^[2]。以激光为热源进行活塞热负荷试

验已经取得一定进展^[3,4],目前也已经开展了气缸盖激光热负荷的试验研究。

激光气缸盖热负荷试验是将整形后的激光束加载到气缸盖火力面上,使产生的温度分布与实际工况下的温度分布一致,通过控制激光的加、卸载,模拟实际工况下的高周热疲劳和热冲击等^[5]。整形后

收稿日期: 2011-03-01; **收到修改稿日期**: 2011-03-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10832011)资助课题。

作者简介: 聂树真(1983—),女,博士研究生,主要从事激光光束整形及其在材料表面处理中的应用等方面的研究。

E-mail: kaolansz@163.com

导师简介: 虞 钢(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光与材料相互作用和激光先进制造工艺力学等方面的研究。E-mail: gyu@imech.ac.cn(通信联系人)

激光束的光强分布是通过建立相应的气缸盖有限元分析模型,并根据实际工况下气缸盖火力面的温度分布反求得到的^[6],因此有限元模拟计算结果与实际加载测温结果是否一致是激光热负荷试验的关键。而有限元模型中材料热物性参数和吸收率的选取是决定模拟温度计算结果与实际温度是否一致的重要因素^[7],故需对气缸盖激光热负荷试验的模型相关参数进行校核。

本文在前期工作的基础上,提出了一种用于气缸盖激光热负荷试验的模型参数校核方法。此方法将校核试验和模拟计算相结合,采用不同激光光斑进行加载测温试验,记录加载区特征点温度随时间变化的数据,并与模拟计算所得结果相比较。根据两者偏差,结合各参数对温度结果的影响规律,不断对参数进行修正校核,最终使模拟计算温度与试验结果相吻合。

2 试验装置和方法

试验选用 HT250 的灰铸铁材料,其热物性参数如表 1 所示^[8]。采用最大功率为 3000 W、波长为 1.064 μm 的 Nd:YAG 连续激光器。气缸盖火力面激光加载区特征点的温度由红外测温仪进行测量,其温度响应范围为 150 $^{\circ}\text{C}$ ~550 $^{\circ}\text{C}$,并利用压缩空气进行冷却,整个试验装置如图 1 所示。试验内容包括小光斑加载测温试验和覆盖火力面的大光斑加载测温试验两部分。

表 1 HT250 气缸盖材料参数

Table 1 HT250 material parameters of the cylinder head

| Density / (g/cm^3) | Specific heat / [$\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$] | Thermal conductivity / [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] |
|--------------------------------------|--|---|
| 7.25~7.35 | 0.50~0.54 | 48.2~52.3 |

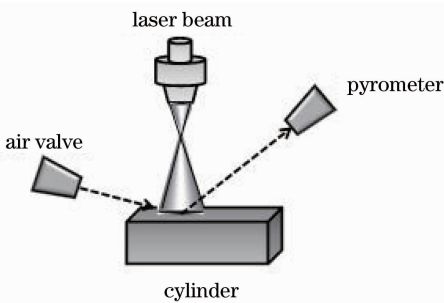


图 1 气缸盖测温试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature testing on the cylinder head

2.1 小光斑加载测温试验

改变激光束离焦量和光斑位置,使激光束垂直

照射到气缸盖表面完整区域内的光斑直径为 30 mm (不包含气门等不完整表面),如图 2 所示的位置 1,并测试初始气缸盖温度 T_0 (30 $^{\circ}\text{C}$)。

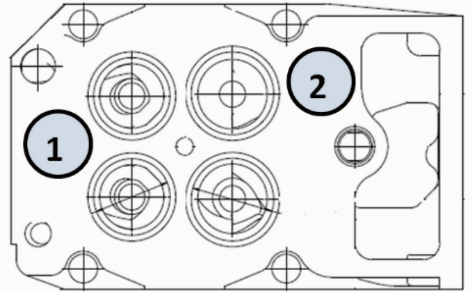


图 2 气缸盖上小光斑加载位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser loading positions on the cylinder head

小光斑加载测温试验具体步骤如下。1)对气缸盖进行表面预热处理:加载较小功率(600 W)的连续激光,用红外测温仪测试光斑中心区域的温度,温度达到热负荷目标工况实际最高温度 T_{max} (260 $^{\circ}\text{C}$) 时,停止加载,然后通过自然冷却或吹空气冷却的方式使得气缸盖整体温度降到 T_0 ;2)激光加载测温试验:分别加载功率为 800 W 和 1200 W 的连续激光,记录温度从 T_0 上升到 T_{max} 所需时间,并记录温度随时间变化的关系(记录时间间隔为 0.4 s)。然后改变激光加载区域,以图 2 中的位置 2 作为新的激光加载区域,分别进行激光功率为 1200 W 和 1300 W 的校核试验。其中单次试验后气缸盖温度很高,需用自然冷却或吹空气冷却方式使气缸盖或活塞整体冷却到温度 T_0 再进行下一次试验。

2.2 覆盖火力面的大光斑加载测温试验

调节激光束离焦量及光斑位置,如图 3 所示。使得激光光束能够完全覆盖整个火力面,此时光斑直径为 132 mm。覆盖火力面的大光斑加载测温试验步骤如下。1)预热处理:加载低功率(600 W)连

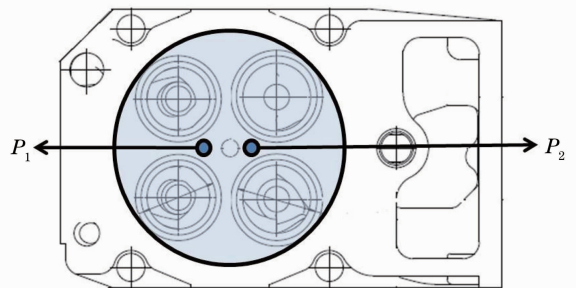


图 3 覆盖火力面光斑加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser loading position covering the fire surface

续激光,使光斑内特征区域的温度上升到 T_{\max} 。停止加载,然后通过自然冷却或吹空气冷却的方式使得气缸盖整体温度降到 T_0 ;2) 激光加载测温试验:分别加载功率 2600 W 和 3000 W 的连续激光,采用红外测温仪测试如图 3 所示的气缸盖热负荷关注特征区域的温度,记录温度上升到 T_{\max} 所需时间及温度随时间变化的关系。

3 激光加载气缸盖有限元模型

根据非对称的气缸盖结构设计模型,利用 ANSYS 软件,建立三维有限元模型,采用四面体单元进行网格划分,对气缸盖顶面细化以提高计算精度。加载激光为平顶光束,且热源参数选用试验中所用的激光光束参数,如作用区域、功率等。

边界条件设定为:火力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,气缸盖火力面的对称面采用绝热边界条件

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (1)$$

式中 k 为导热系数, n 为边界 Γ 的外法线方向, Γ 为物体边界,方向为逆时针方向。

除气缸盖火力面的对称面外,模型其它外表面与外界的自然对流换热表示为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h_1 (T - T_a), \quad (2)$$

式中 h_1 为表面与外界的对流换热系数, T_a 为初始

温度。

气缸盖激光热负荷试验模型参数校核具体分析步骤为:1)在材料热物性各参数的给定范围内,选取一组材料热物性参数和吸收率的初值,采用有限元软件进行瞬态温度场的计算,查看测点位置的温度时间历程;2)比较测点温度时间历程的模拟计算结果与试验结果,根据各参数和吸收率对测点温度的影响规律,不断调整各参数和吸收率的值,直至二者吻合;3)小光斑加载测温试验和覆盖火力面的大光斑加载测温试验的实测结果均与相应的有限元模拟计算温度结果吻合时,即认为此时模型相关参数的取值是一组满足此气缸盖激光热负荷试验的模型参数取值。

4 模拟计算与模型校核结果

由于气缸盖的材料热物性参数的选取具有一定范围,如表 1 所示,因此先在此范围内选取材料热物性参数和吸收率的初值,在相同功率下,加载试验记录的温度从 T_0 上升到 T_{\max} 的时间,计算测量点温度值。分别改变模拟计算中模型的密度、比热、热导率和吸收率的其中一项,其它加载条件保持不变,再次计算测量点温度值,观察每项参数对温度的影响规律,如表 2 所示。计算结果发现,各参数在给定范围内变化时,吸收率对温度影响最大,密度的影响最小。

表 2 各参数对温度影响

Table 2 Influences of the parameters

| Density / (g/cm ³) | Specific heat / [(J·g)/(K)] | Thermal conductivity / [W/(m·K)] | Absorptivity | Time / s | Temperature / °C |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------|----------|------------------|
| 7.25 | 0.5 | 50 | 0.4 | 60 | 220.4 |
| 7.3 | 0.5 | 50 | 0.4 | 60 | 220.1 |
| 7.35 | 0.5 | 50 | 0.4 | 60 | 219.8 |
| 7.3 | 0.5 | 50 | 0.4 | 60 | 220.1 |
| 7.3 | 0.54 | 50 | 0.4 | 60 | 216.8 |
| 7.3 | 0.6 | 50 | 0.4 | 60 | 212.3 |
| 7.3 | 0.54 | 49 | 0.4 | 60 | 219.7 |
| 7.3 | 0.54 | 50 | 0.4 | 60 | 216.8 |
| 7.3 | 0.54 | 52 | 0.4 | 60 | 211.2 |
| 7.3 | 0.54 | 52 | 0.4 | 60 | 211.2 |
| 7.3 | 0.54 | 52 | 0.5 | 60 | 257.1 |
| 7.3 | 0.54 | 52 | 0.6 | 60 | 302.9 |

选取小光斑加载测温试验结果,在模拟计算中加载此试验参数和激光加载区域内温度从 T_0 上升到 T_{\max} 的时间,选定一组材料热物性参数和吸收率的初值,计算气缸盖表面测点的温度值。与试验所

测数据进行比较,结合材料热物性参数和吸收率对温度的影响规律,对模型参数进行校核,使得计算温度值与实测温度值误差与测温试验误差 1%~2% 相当。校核后参数模拟计算结果与小光斑加载测温

试验所测结果比较如图 4 所示。

覆盖火力面的大光斑加载测温试验结果与模拟计算结果进行对比,根据两者的偏差,结合材料热物性参数和吸收率对温度的影响规律,对热物性参数和吸收率进行微调,最终确定一组满足此气缸盖或

活塞热负荷要求的参数。加载激光功率为 2600 W 和 3000 W 时,试验结果与模拟计算结果比较如图 5 所示,计算温度值与实测温度值误差与测温试验误差 1%~2% 相当。

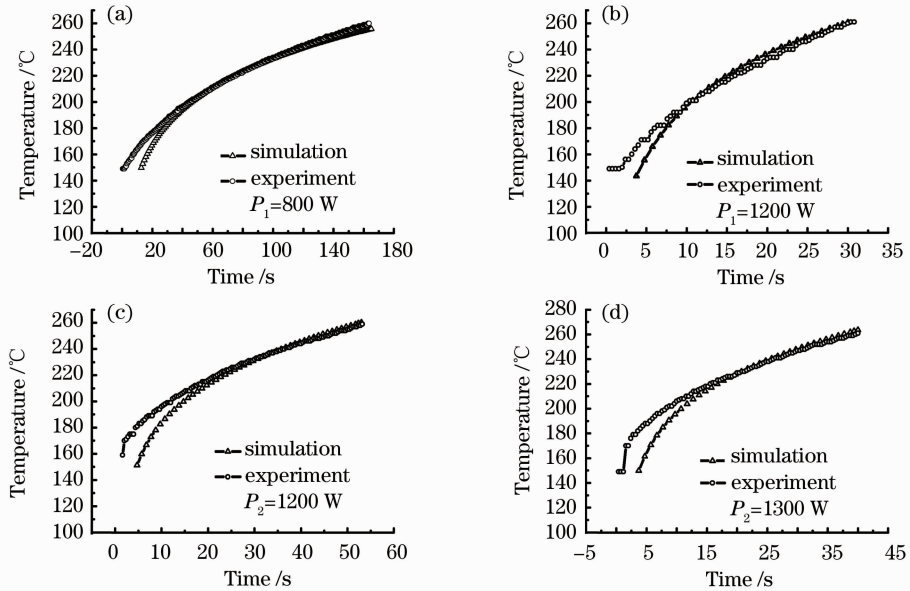


图 4 小光斑加载测温试验与模拟计算结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated temperature results about the laser loading tests

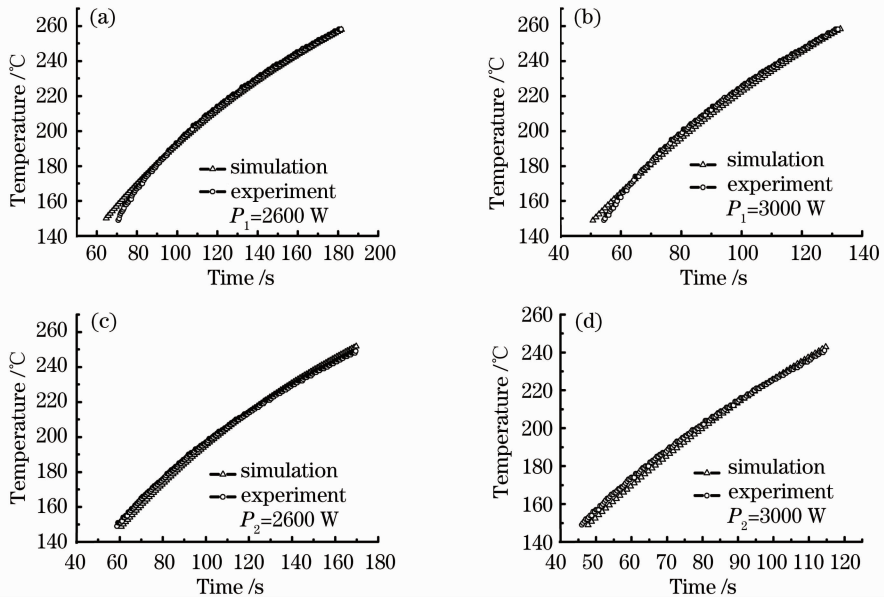


图 5 火力面内测点温度试验与模拟结果对比图

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated temperature results on the fire surface

从图 5 结果可见,气缸盖热负荷火力面关注特征区域的实测温度曲线与模拟计算结果吻合较好。当模拟计算结果与实际试验测试结果一致时,就认为此时选取的材料热物性参数和吸收率就认为是满足此

项气缸盖热负荷试验要求的模型参数。最终 HT250 气缸盖有限元模型校核参数结果为密度 7.3 g/cm^3 , 比热容 $0.54 \text{ J/(g}\cdot\text{°C)}$, 热导率 $52 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$, 吸收率为 0.5。

5 结 论

针对 HT250 气缸盖激光热负荷试验,采用波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ 输出功率为 3000 W 的激光作为光源进行加载,提出了气缸盖有限元模型各相关参数如密度、比热、热导率和吸收率等的校核方法。此方法针对火力面结构采用不同光斑尺寸的激光束进行加载测温试验,并建立气缸盖三维有限元模型计算实测区域的温度。模拟计算表明,密度变化 $0.05\ \text{g}/\text{cm}^3$,温度变化约 0.1% ;比热变化 $0.05\ \text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$,温度变化约 1% ;热导率变化 $1\ \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,温度变化约 1% ;吸收率变化 0.1 ,温度变化约 18% 。将实测温度值与模拟计算结果相比较,最终确定一组模型参数值,使模拟计算结果与实测数据相吻合,两者温度值误差与测温试验误差 $1\%\sim 2\%$ 相当。

参 考 文 献

- 1 Liu Jinxiang, Liao Ridong, Zhang You *et al.*. Finite element analysis for cylinder head of 6114 diesel engine [J]. *Transactions of CSICE*, 2004, **22**(4): 367~372
刘金祥, 廖日东, 张 有等. 6114 柴油机缸盖有限元结构分析 [J]. *内燃机学报*, 2004, **22**(4): 367~372
- 2 Zhang Weizheng, Zhang Guohua, Guo Liangping *et al.*. The thermal fatigue test and modification of high-temperature creep for cast iron cylinder heads [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2002, **23**(6): 67~69

- 张卫正, 张国华, 郭良平等. 铸铁缸盖热疲劳寿命试验及高温蠕变修正[J]. *内燃机工程*, 2002, **23**(6): 67~69
- 3 Tan Jiansong, Pang Ming, Xie Zhimin *et al.*. Numerical simulation of thermal loading on pistons by laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 970~974
谭建松, 庞 铭, 解志民等. 活塞激光热负荷数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 970~974
- 4 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
- 5 Zhou Liang, Song Hongwei, Yu Gang *et al.*. Study on experimental parameters of laser induced pistons thermal fatigue [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(2): 385~388
周 良, 宋宏伟, 虞 钢等. 激光参数对活塞热疲劳实验的影响 [J]. *应用激光*, 2006, **26**(6): 385~388
- 6 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
- 7 Lin Xiuchuan, Shao Tianmin. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(5): 842~845
蔺秀川, 邵天敏. 利用集总参数法测量材料对激光的吸收率[J]. *物理学报*, 2001, **50**(5): 856~859
- 8 Zhu Xianding. Handbook for Ice Engineers [M]. Shanghai: Scientific & Technical Publishers, 2000. 93~95
朱仙鼎. 中国内燃机工程师手册[M]. 上海: 科学技术出版社, 2000. 93~95