

文章编号: 0258-7025(2010)04-0970-05

活塞激光热负荷数值模拟

谭建松^{1,2} 庞铭^{1*} 解志民¹ 虞钢² 胡定云¹

(¹ 中国北方发动机研究所, 河北 廊坊 065000; ² 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 建立了活塞激光热负荷数值模拟模型,研究了不同冷却介质对活塞热负荷的影响。结果表明,激光卸载过程活塞顶和通油孔通气冷却,温度波动发生在活塞顶薄层区域,与活塞在实际稳定工况下的温度响应一致;激光卸载过程活塞内腔和通油孔通气或通油孔通水冷却,温度波动区域都不能反应在实际稳定工况下的状态。低周热疲劳采用激光卸载过程配合活塞顶通气、活塞内腔和通油孔通水能缩短试验周期、加速活塞的热疲劳损伤。数值模拟与试验结果基本吻合,验证了模型的有效性。

关键词 激光技术;活塞;热负荷;温度;损伤

中图分类号 TK401

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103704.0970

Numerical Simulation of Thermal Loading on Pistons by Laser

Tan Jiansong^{1,2} Pang Ming¹ Xie Zhimin¹ Yu Gang² Hu Dingyun¹

¹ China North Engine Research Institute, Langfang, Hebei 065000, China
² Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Numerical simulation model of thermal loading on piston by laser is established. By virtue of the model, the influence of different cooling matters on thermal loading of piston is investigated. The results show that temperature fluctuations occur at thin-layer regional of piston top surface when cooling air is applied to piston top surface and tunnel with cessation laser heating, which is in accordance with actual stable conditions. Temperature fluctuations is not consistent with actual stable conditions of air cooling of piston inner chamber and tunnel or water cooling of tunnel. Low-cycle fatigue with air cooling of piston top surface, water cooling of inner chamber and tunnel can accelerate damage to piston. Meanwhile, these regions of concave, tunnel and inner chamber are most vulnerable to form crack due to the cool medium contacting with them. The numerical results are in agreement with the experimental results, which indicates that the established numerical mode is correct and reliable.

Key words laser technique; piston; thermal loading; temperature; damage

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]。活塞热负荷的研究有整机试验和零部件的热模拟试验,整机试验耗费高且不能得到较为通用的结果,而零部件热模拟试验具有方便、经济的特点^[5]。目前活塞的热模拟试验有燃气加热、感应加热、电阻加热和激光加热等方法,

这些加热系统中除激光加热外都不能有效地模拟活塞的温度分布。活塞温度场分布模拟的准确性决定了热模拟结果的有效性,而激光具有时空分布可控性,通过二元光学转光片改变激光在空间的能量分配,采用电脑控制激光在时间域上的能量输出,从而使活塞实现特定的温度分布。采用激光研究活塞热负荷是一项探索性的工作,国内中国科学院力学研究所宋宏伟研究了 150 活塞的激光热负荷。由于实际工况下活塞的温度分布与发动机的结构和运行工况密切相关,本文针对某新型发动机活塞结构和温

收稿日期: 2009-04-21; 收到修改稿日期: 2009-07-13

作者简介: 谭建松(1969—),男,研究员,主要从事热负荷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: mingpang1980@126.com

度分布的特点,设计了新的光束整形器。新设计的光束整形器与 150 活塞光束整形器的区别是第二环不在活塞顶凹坑位置而是靠近活塞中心环且研究的活塞尺寸也比 150 活塞小^[6,7]。基于新设计的光束整形器,建立了活塞激光热负荷数值模拟模型,数值仿真了活塞温度波动对不同冷却方式的响应。

2 数值模拟模型

2.1 有限元模型

根据活塞的对称性,以活塞的 1/2 模型为研究对象。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,对活塞顶面激光加载区域细化以提高计算精度,如图 1 所示。

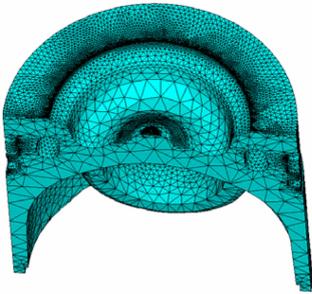


图 1 活塞 1/2 有限元模型

Fig. 1 Finite element model of half piston

2.2 热源模型

激光活塞热负荷热源是利用光学转光片把激光整形成三个圆环光束辐照在活塞顶,作用区域为:中心环 $R \leq 3 \text{ mm}$; 第二环 $8.5 \text{ mm} \leq R \leq 12.5 \text{ mm}$; 外环 $42.5 \text{ mm} \leq R \leq 55 \text{ mm}$, 如图 2 所示。从中心环到外环的激光功率比例为: $0.03:0.01:9.96$ 。

▨ regions with laser loading
□ regions without laser loading

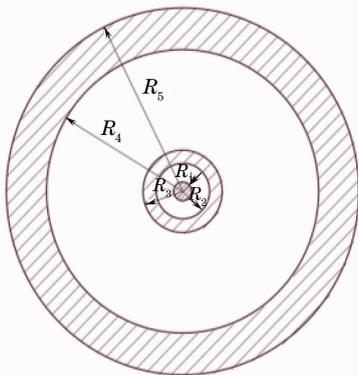


图 2 活塞顶面激光作用区域示意图

Fig. 2 Illustration of laser loading regions

其热源加载方式如图 3 所示, t_h 为激光加载时间, t_l 为激光卸载后冷却的时间, 则每个周期的时间为 $t = t_h + t_l$ 。

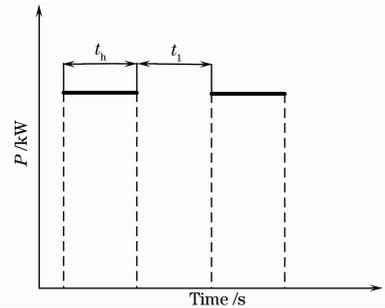


图 3 激光加载方式

Fig. 3 Loading model of laser

2.3 初始和边界条件

激光热负荷(高周、低周热疲劳)用激光把活塞预热到特定温度,在此基础上改变激光的加卸载参数来控制热疲劳的方式。激光加载时活塞与外界是自然换热,激光卸载时与外界的换热方式考虑了下面几种工况:活塞顶面和通油孔采用空气冷却,其他面与外界是自然对流换热;通油孔和内腔空气冷却,其他面与外界自然对流换热;活塞顶面、通油孔和内腔采用空气冷却,其他面与外界自然对流换热;活塞顶面空气冷却、通油孔和内腔喷水冷却,其他面与外界自然对流换热;通油孔采用喷水冷却,其他面与外界自然对流换热。活塞低周热负荷应力场数值模拟以计算的温度场为边界条件。

不同冷却介质的对流换热系数的确定是结合激光热负荷试验通过有限元反求获得,其值如表 1 所示。活塞材料为铝合金,其热物性参数如表 2 所示。

表 1 不同冷却介质的对流换热系数[单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

Table 1 Convective heat transfer coefficient of different cooling mediums [unit: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

Natural cooling	Air cooling	Water cooling
5	100	6000

表 2 活塞材料热物性参数

Table 2 Thermal physical properties of piston material

$T / ^\circ\text{C}$	$\lambda / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})]$	$C / [\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$
20	130	900
100	134	920
150	136	942
200	139	968
250	142	973
300	143	985
350	145	992
400	146	1007

3 数值模拟结果和讨论

在活塞顶面激光辐照区域的中心环和外环分别提取一个考察点,研究整个热负荷过程中特征点温度随时间的波动历程。活塞激光热负荷有高周热疲劳和低周热疲劳,高周热疲劳是温度波动幅度在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,但波动频率高^[8];低周热疲劳是模拟活塞的加速热损伤,温度波动幅度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5-8]。图4~图6是活塞高周热疲劳数值模拟结果,图7和图8是活塞低周热疲劳数值模拟结果。

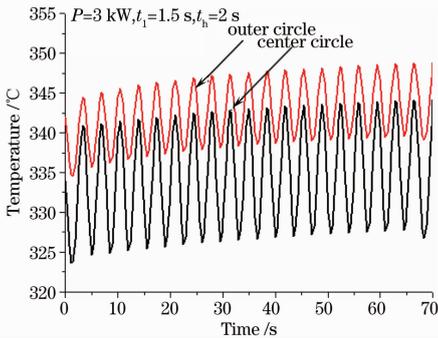


图4 活塞内腔和通油孔空气冷却

Fig. 4 Air cooling through the inner chamber and tunnel of piston

从图4可以观察到:激光功率 $P=3\text{ kW}$,激光加载时间 $t_h=2\text{ s}$,激光卸载时间 $t_l=1.5\text{ s}$,激光卸载时活塞内腔和通油孔配合空气冷却,中心环温度波动幅度 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$,外环温度波动幅度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,且外环和中心环的平均温度呈上升的趋势。这是由于一个周期内输入活塞的能量大于活塞向外界散发的能量,活塞整体还没有达到一个热平衡,随循环周期的进行,激光辐照区域温度最后会在一个热平衡温度值附近波动。

从图5可知,激光功率 $P=3\text{ kW}$,激光加载时间 $t_h=2\text{ s}$,激光冷却时间 $t_l=1.5\text{ s}$,冷却过程活塞顶和通油孔配合通气冷却,中心环温度波动幅度 $18.75\text{ }^{\circ}\text{C}$,外环温度波动幅度 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

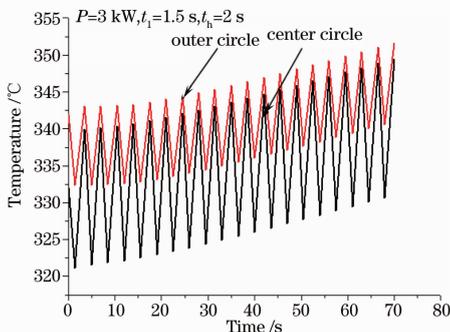


图5 活塞顶和通油孔空气冷却

Fig. 5 Air cooling through tunnel and top surface of piston

对比图4和图5可以看出,活塞被预热到相同的初始温度,选用同样的激光热负荷参数,活塞顶和通油孔通空气的冷却方式比活塞内腔和通油孔通空气冷却激光辐照区域温度波动幅度大且平均温度上升趋势快。这是因为活塞内腔通空气冷却方式是通过整体活塞温度分布的变化来影响活塞顶温度的波动,而活塞顶通空气冷却是通过改变活塞顶表面温度使活塞顶表层区域温度发生改变。活塞在发动机真实稳定工况下运转,在一个工作循环内,虽然作用于活塞顶面的燃气温度变化很大,但由于这种变化的时间很短,在热惯性作用下,只在活塞顶表层 2 mm 内产生温度波动,而在 2 mm 以下,温度基本上是稳定的,且内燃机在稳定运行工况下,活塞顶温度波动一般在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明活塞顶和通油孔空气冷却方式温度波动幅值和区域接近活塞在真实稳定工况下的温度波动。

从图6可以观察到:激光功率 $P=2\text{ kW}$,激光加载时间 $t_h=2\text{ s}$,激光冷却时间 $t_l=1\text{ s}$,外环的温度波动幅度 $3.75\text{ }^{\circ}\text{C}$,中心环的温度波动幅度为 $8.75\text{ }^{\circ}\text{C}$,且激光辐照区域的平均温度下降较快,这是由于通过水冷和活塞与外界的自然对流换热带走的能量多于活塞吸收的激光能量。由于通油孔远离活塞激光辐照区域的中心环和外环及水的快速冷却和热传导滞后效应的综合作用,当中心环和外环对水冷有响应时,通油孔附近温度大幅度降低,导致活塞的温度梯度增加。高的活塞温度梯度导致激光加热活塞通过热传导损耗的能量增加,而被用于使活塞顶升温的能量利用率降低。

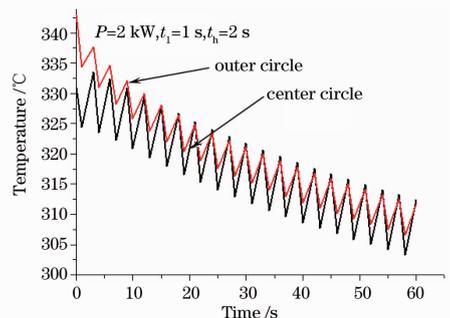


图6 通油孔通水冷却

Fig. 6 Water cooling through tunnel

对比图4~图6不同的冷却方式对活塞温度波动的影响可以看出,活塞顶和通油孔空气冷却方案激光用于升温活塞的能量利用率高,且温度波动主要发生在活塞顶薄层区域,与活塞在发动机真实稳定工况下运行温度波动区域和幅度接近。

从图 7 和图 8 可以看出,采用通油孔、内腔喷水及活塞顶空气冷却的方案比活塞通油孔、内腔和活塞

顶部都通气冷却方案的每个热负荷周期时间短,且由于通油孔和内腔喷水的快速冷却加速了活塞的损伤。

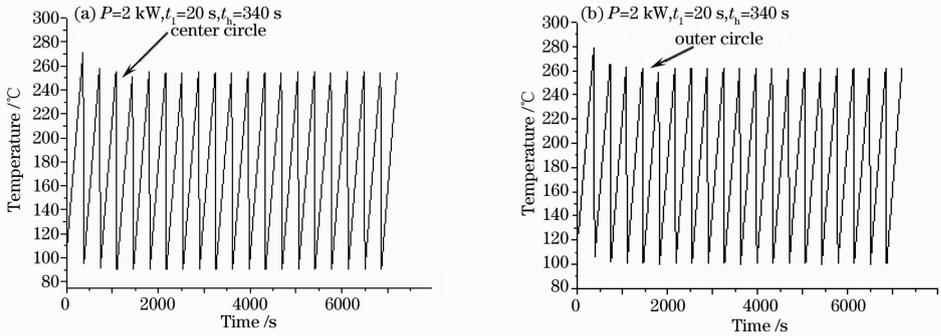


图 7 通油孔、活塞内腔水冷和活塞顶面空气冷却

Fig. 7 Water cooling through tunnel and inner chamber, and air cooling through top surface of piston

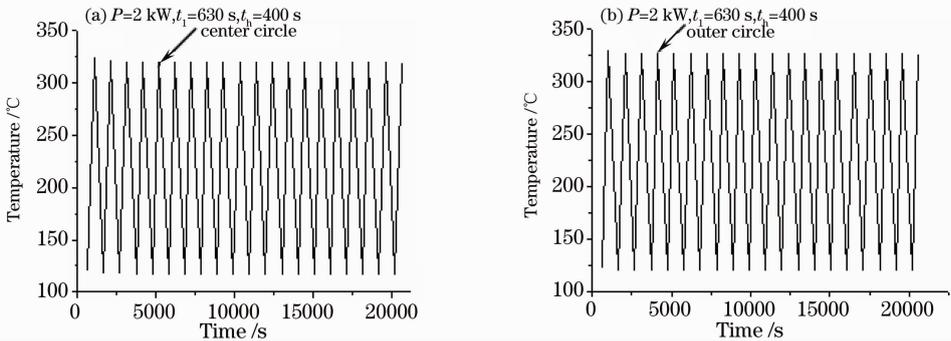


图 8 通油孔、内腔和顶面空气冷却

Fig. 8 Air cooling through tunnel, inner chamber and top surface of piston

4 试验验证

图 9 是激光热负荷试验系统,该系统具有活塞内腔、通油孔通水或通气冷却,活塞顶面通气冷却,通过电脑控制可以实现多路冷却方式的协调控制。采用和数值模拟相同的激光参数做激光热负荷试验,使用红外测温仪测量活塞的中心环和外环的温度,试验与数值模拟的结果比较如图 10 所示。从图 10 可以看出试验与数值模拟的结果基本吻合,说

明模型的有效性。

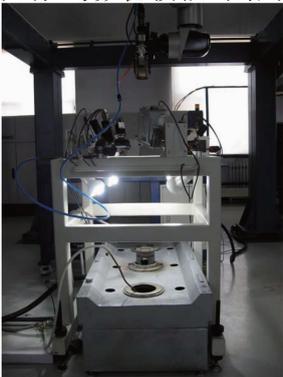


图 9 试验台架
Fig. 9 Trial device

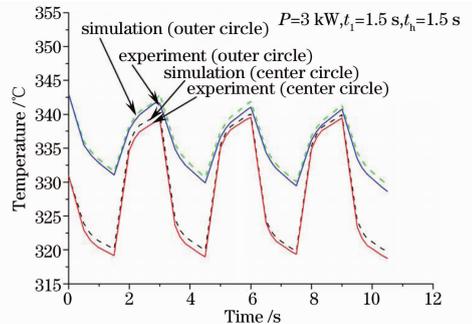


图 10 数值模拟与试验结果的比较

Fig. 10 Comparison of numerical and experimental results

5 结 论

结合活塞激光热负荷系统,建立了活塞激光热负荷数学物理模型,分析了不同冷却方式对活塞热负荷的影响。结果表明,高周热疲劳激光卸载时活塞顶和通油孔采用空气冷却方式能反应活塞在实际运行工况下温度波动幅值和区域;低周热疲劳激光卸载时活塞顶空气冷却、活塞内腔和通油孔喷水冷

却方案能缩短每个周期时间且能加速活塞的热损伤。试验与数值模拟基本吻合,验证了模型的有效性。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Wang Xizhen, Shen Jisheng, Yan 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
- 3 Liu Jinxiang, Zhang Weizheng. Design of thermal fatigue tested by using infrared heat for the aluminum alloy piston[J]. *Journal of 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
- 4 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 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
- 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 H. Song, G. Yu, J. 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]. *Int. J. Heat, Mass Trans.*, 2008, **51**: 757~767
- 8 H. Song, G. Yu, A. 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]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2008, **51**: 768~778