

非对称非均匀分布整形光束用于激光热负荷试验研究

聂树真¹ 孙辉¹ 虞钢² 樊仲维¹

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094

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 激光热负荷研究的关键在于简易、可控、高效、准确地模拟实际工况下零部件表面所承受的热负荷温度场分布,为此采用一种非对称非均匀分布整形光束作为热源加载气缸盖表面,数值模拟的温度场分布与实际工况下一致,并进行气缸盖不同功率下的高周和低周热负荷试验。试验结果表明,采用温度控制和时间控制模式可以有效进行高低周热负荷试验,此结果可为后期疲劳分析奠定基础。

关键词 激光技术;热负荷;整形光束;气缸盖

中图分类号 TK401; TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.091408

Study on Laser Thermal Loading Test with Non-Symmetric and Non-Uniform Shaped Laser Beam

Nie Shuzhen¹ Sun Hui¹ Yu Gang² Fan Zhongwei¹

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

²Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The key point of laser thermal loading test is to simulate the real temperature field on the top surface of the cylinder head with an easy, controllable, effective and accurate way. A kind of non-symmetric and non-uniform shaped laser beam is chosen as the heat source to irradiate on the top surface of the cylinder head, the simulated temperature field is consistent with the real one. The high cycle and low cycle thermal loading tests are realized. The test results show that the thermal loading tests can be effectively carried out with the temperature and time control models, which can provide the foundation for the fatigue life prediction.

Key words laser technique; thermal loading; shaped beam; cylinder head

OCIS codes 140.3390; 140.3300; 050.1940

1 引言

伴随高功率密度、高紧凑柴油机的发展趋势,由高热负荷引起的燃烧室部件热损伤问题更加凸出^[1-2]。热负荷试验平台是评价受热件热强度的有效手段,目前针对试件的热负荷试验平台有燃气、高频感应、石英灯等加热方式。然而,现有加热方式的热负荷试验方法在有效评估受热构件热强度方面还不完善,有必要探索新的热负荷试验方法。

由于激光具有时间和空间能量及功率密度可控的特点,可采用激光作为热源进行加载,开展零部件热负荷试验的研究^[3-7]。激光热负荷研究的关键在于简易、可控、高效、准确地模拟实际工况下零部件表面所承受的热负荷温度场分布。而要模拟零部件顶面在实际工况下的温度分布情况,就需将原始光束整形为具有特定光强分布的激光束^[8],使得作用后零部件顶面的温度分布能够满足实际工况下的要求,以此来开展热负荷试验研究^[9],才能为零部件的热疲劳寿命分析提供可靠的试验依据。

利用非对称非均匀分布整形光束加载到气缸盖顶面,实测产生的温度结果与实际工况下相一致,并在

收稿日期: 2015-01-10; 收到修改稿日期: 2015-02-07; 网络出版日期: 2015-07-11

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ120351)

作者简介: 聂树真(1983—),女,博士,副研究员,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: nieshuzhen@aoe.ac.cn

此基础上开展了高低周热负荷试验,此试验结果可为后期热疲劳分析奠定基础。

2 整形光束加载温度场

2.1 非对称非均匀分布整形光束

通过132柴油单缸发动机缸盖不同测点温度的实时实况测试,反映气缸盖火力面承受热负荷的温度场分布。气缸盖火力面实测温度点分布图如图1所示,测量点主要分布在容易发生断裂的重点关注区域——鼻梁区区域。图中X方向测点从左到右编号为1~6;Y方向测点从下往上编号为7~10。

根据实际工况下气缸盖顶面温度结果,设计了一种具有非对称非均匀分布的整形光束^[10],如图2所示。其中半径 $R_3=10\text{ mm}$ 的圆区域为area3,半径 $R_2=40\text{ mm}$ 的圆区域除去半径 $R_3=10\text{ mm}$ 的圆区域剩余区域为area2,半径 $R_2=40\text{ mm}$ 到 $R_1=66\text{ mm}$ 之间的圆环区域为area1,3个区域的光强之比 $I_{\text{area1}}:I_{\text{area2}}:I_{\text{area3}}=35:5:60$ 。 $R_3=10\text{ mm}$ 的圆与 $R_2=40\text{ mm}$ 的圆内切。

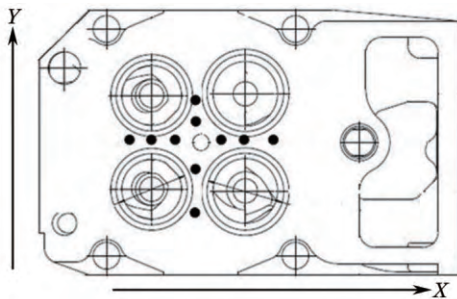


图1 气缸盖火力面测点分布示意图

Fig.1 Test spots locations on the top surface of cylinder head

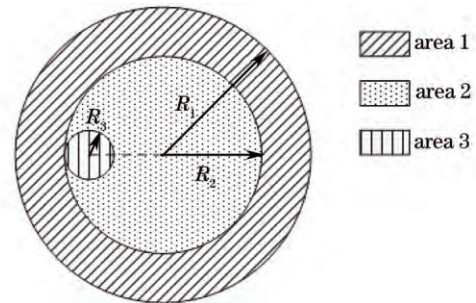


图2 非对称非均匀分布光束分布

Fig.2 Intensity distribution of the non-symmetric and non-uniform shaped laser beam

2.2 整形光束加载实测气缸盖表面温度结果

加载满功率3000 W的整形激光束后,模拟计算所得气缸盖火力面的温度分布与实况结果的对比图如图3所示。从图中可以看出,X轴方向上温度结果与实况实测偏差不大,在Y轴方向上外侧两点温度结果与实况实测偏差较大,但由于气缸盖热疲劳重点关注的是X轴方向的温度分布,故Y轴上火力面外缘各测点温度偏差影响不大。从数值计算的整个火力面温度结果中可以看出,此种非对称非均匀光强分布的加载光束能使气缸盖火力面产生与实际工况相符合的温度结果。

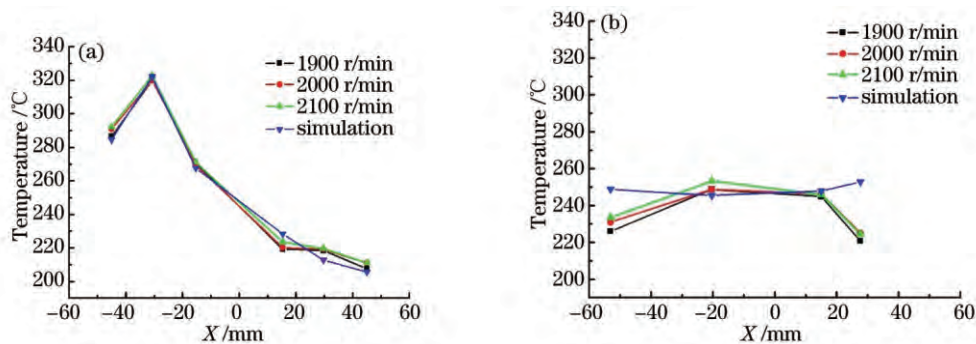


图3 数值计算的温度场分布与实况实测结果的对比。(a) X轴方向;(b) Y轴方向

Fig.3 Relationships between the simulated and tested temperature results. (a) In the X direction; (b) in the Y direction

为得到气缸盖火力面温度随加载功率的变化特性,采用不同满功率百分比激光进行加载,并模拟计算气缸盖火力面的温度分布情况,其中主要讨论热疲劳重点关注的X方向温度分布。整形激光功率为2800 W和2500 W时气缸盖火力面温度分布如图4所示。从图中可以看出,无论是满功率激光加载还是不同满功率百分比激光加载,通过控制加载时间,可得到大致相同的气缸盖火力面温度分布。

针对其他工况的热负荷试验,改变非对称非均匀分布整形光束的光强比和加载区域范围,模拟计算的工况为1500 r/min(27 kW)时的气缸盖火力面温度结果如图5所示;增加激光加载时间,模拟计算的工况为1700 r/min(30 kW)时的气缸盖火力面温度结果如图6所示。从图中可以看出,其他工况的热负荷试验模拟

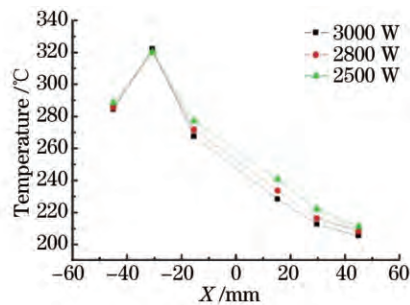


图4 不同功率激光加载下数值计算的气缸盖火力面的温度分布图

Fig.4 Simulated temperature results on the top surface of cylinder head with different powers of laser

结果在某些测点处已经能够产生与实测相似的温度。因而,若要开展其他工况下的气缸盖热负荷试验,可通过进一步优化整形光束光强分布,达到模拟计算的火力面温度与实际工况下的相一致的目的。

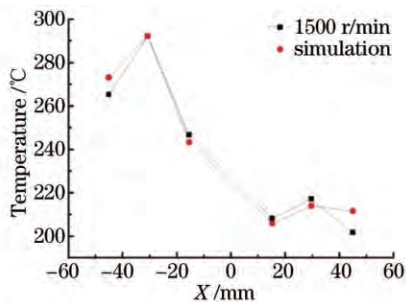


图5 工况为1500 r/min(27 kW)时数值计算的温度与实测的结果对比

Fig.5 Relationship between simulated and tested temperature results under the condition of 1500 r/min(27 kW)

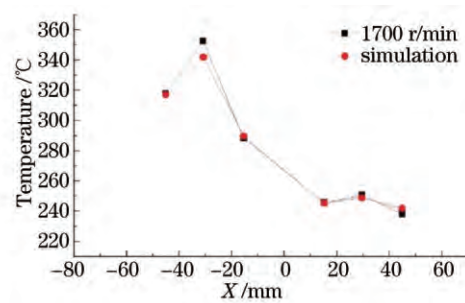


图6 工况为1700 r/min(30 kW)时数值计算的温度与实测的结果对比

Fig.6 Relationship between simulated and tested temperature results under the condition of 1700 r/min(30 kW)

综上所述,非对称非均匀光强分布的整形光束加载模拟气缸盖火力面热负荷温度场的试验,在不同激光功率和不同实际工况下都是可行的。此方法为其他工况下激光热负荷试验的研究奠定了良好的理论和数值计算基础。

3 热负荷高低周试验

高温燃气对气缸盖的循环加载是造成气缸盖热疲劳破坏的主要原因。按照成因可将热疲劳分为两类:高周热疲劳(HCF)和低周热疲劳(LCF)^[11]。将整形元件用于实际气缸盖激光热负荷试验中,通过时间和温度控制模式,结合自然冷却及风冷方式,可开展高周和低周热疲劳模拟试验。时间控制模式是通过设定温度循环的时间来实现的,即设定每个加载周期的加载持续时间和卸载持续时间。温度控制模式是通过设定某一监控点温度波动的上限温度 T_{\max} 和下限温度 T_{\min} 来实现的。在一个温度循环中,激光保持高功率进行加载直到温度达到 T_{\max} ,然后停止激光加载或降低激光加载功率直到温度低于 T_{\min} ,如此反复检测测点处的温度,可控制温度在 $T_{\min} \sim T_{\max}$ 间波动,温度波动稳定控制为 $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ 。

以测点2为例,高低周热负荷试验均采用了温度和时间控制模式,并辅助自然冷却、水腔和火力面通气冷却这两种冷却方式。

3.1 温度控制的自然冷却高周热负荷试验

高周热负荷温度波动要求控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,试验采用温度控制模式,自然冷却。加载激光功率为3000、2800、2600、2500 W时,其试验结果如图7所示。从图中可以看出,温度波动较稳定,能够控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,循环次数不变的情况下,总循环时间随功率的减小而增大。

3.2 温度控制的通气冷却高周热负荷试验

高周热负荷试验采用温度控制模式,结合水腔和火力面通气冷却。加载激光功率为3000、2800、2600、2500 W时,其试验结果如图8所示。从图中可以看出,与自然冷却情况相比,相同功率下通气冷却所需要的时间较长,这是因为虽然两种冷却方式的降温时间相差不大,但是自然冷却的升温时间要比通气冷却的短。

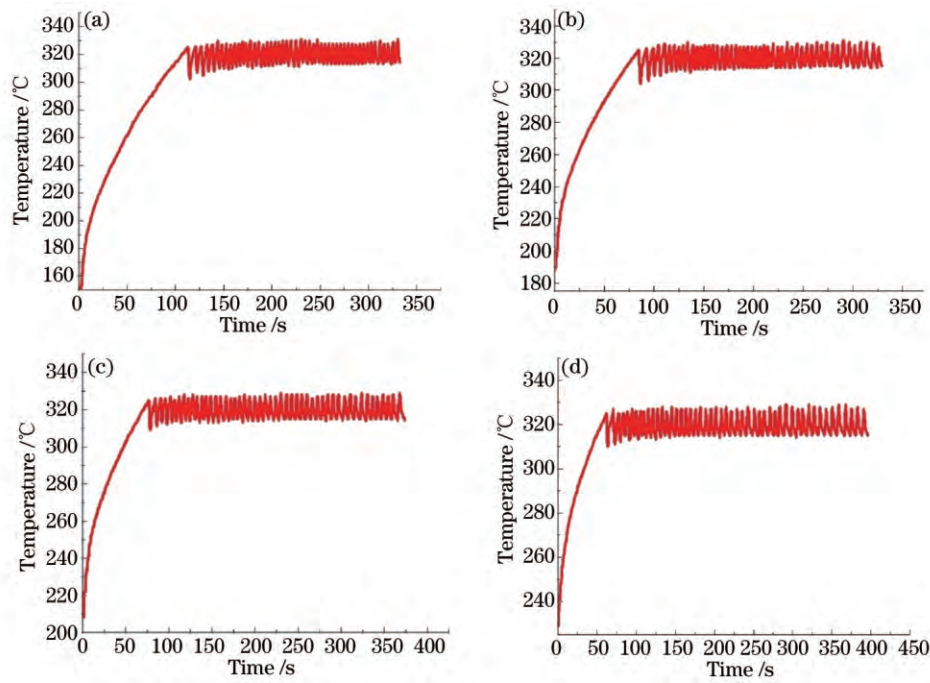


图7 温度控制的自然冷却高周热负荷试验。(a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W; (d) 2500 W

Fig.7 High cycle thermal fatigue tests with natural cooling in the temperature-controlled mode. (a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W; (d) 2500 W

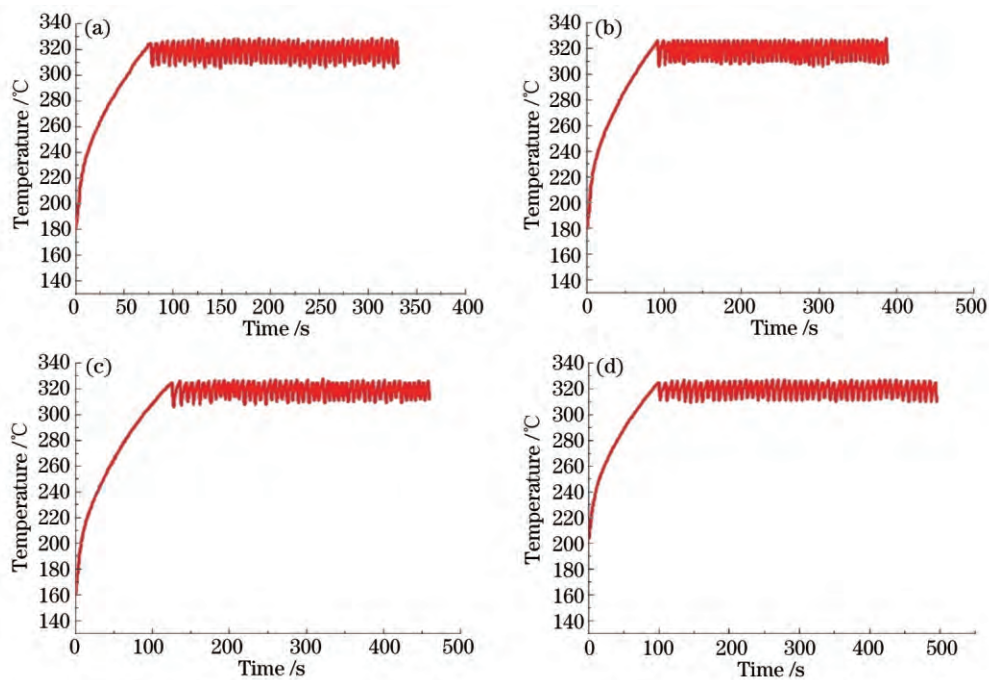


图8 温度控制的通气冷却高周热负荷试验。(a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W; (d) 2500 W

Fig.8 High cycle thermal fatigue tests with air cooling in the temperature-controlled mode. (a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W; (d) 2500 W

3.3 时间控制的自然冷却高周热负荷试验

高周热负荷温度波动要求控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围,采用时间控制模式,自然冷却。当加载激光功率为 3000 W,加热时间为 2 s,冷却功率为 30 W 时,不同冷却时间的试验结果如图 9 所示。从图中可以看出,当冷却时间为 1 s 时,温度波动能够控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,但随着循环次数的增加,整体温度大幅度提高;当冷却时间为 2 s 时,随着循环次数的增加,整体温度还是呈上升趋势;当冷却时间为 3 s 时,整体温度较稳定,因而时间控制模式需要选择合适的加热和冷却时间才能达到稳定的循环加载。相比之下,温度控制模式更易

达到稳定的循环加载,故以下低周热负荷试验均采用温度控制模式进行。

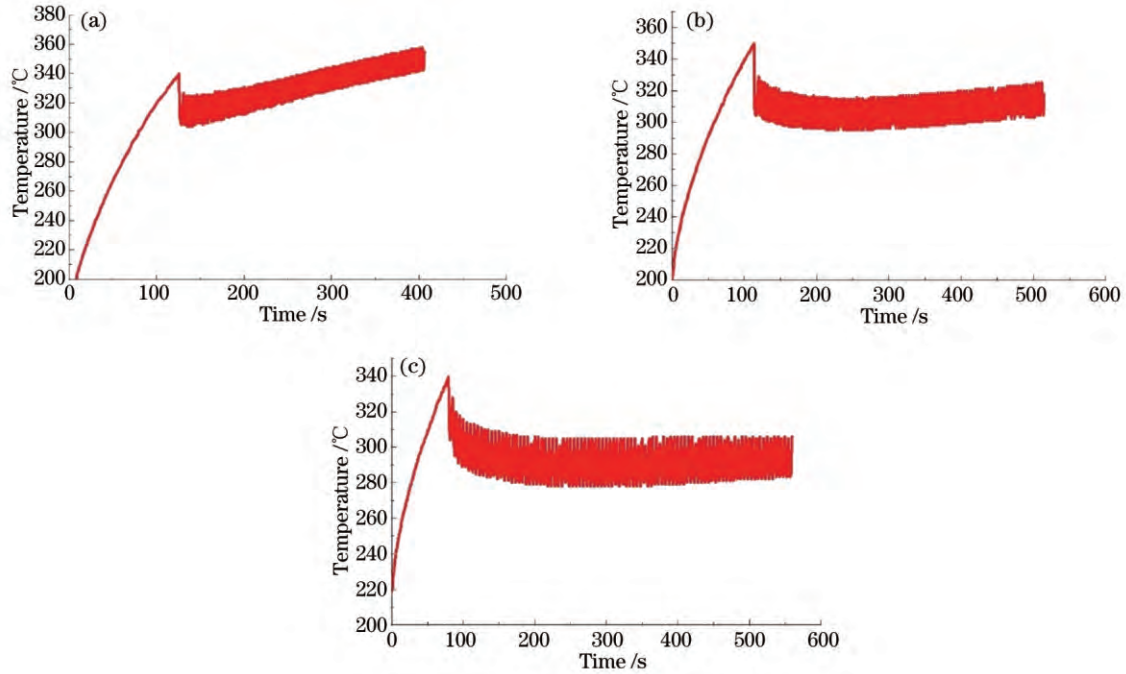


图9 时间控制的自然冷却高周热负荷试验。冷却时间为 (a) 1 s; (b) 2 s; (c) 3 s

Fig.9 High cycle thermal fatigue tests with natural cooling in the time-controlled mode. Cooling time of (a) 1 s; (b) 2 s; (c) 3 s

3.4 温度控制的自然冷却低周热负荷试验

低周热负荷温度波动要求控制在 170 °C~330 °C 范围,采用温度控制模式,自然冷却。当加载激光功率为 3000、2800、2600、2500 W 时,其试验结果如图 10 所示。从图中可以看出,温度波动较稳定,能够控制在 170 °C~330 °C 之间,循环次数不变的情况下,总循环时间随功率的减小而增大。

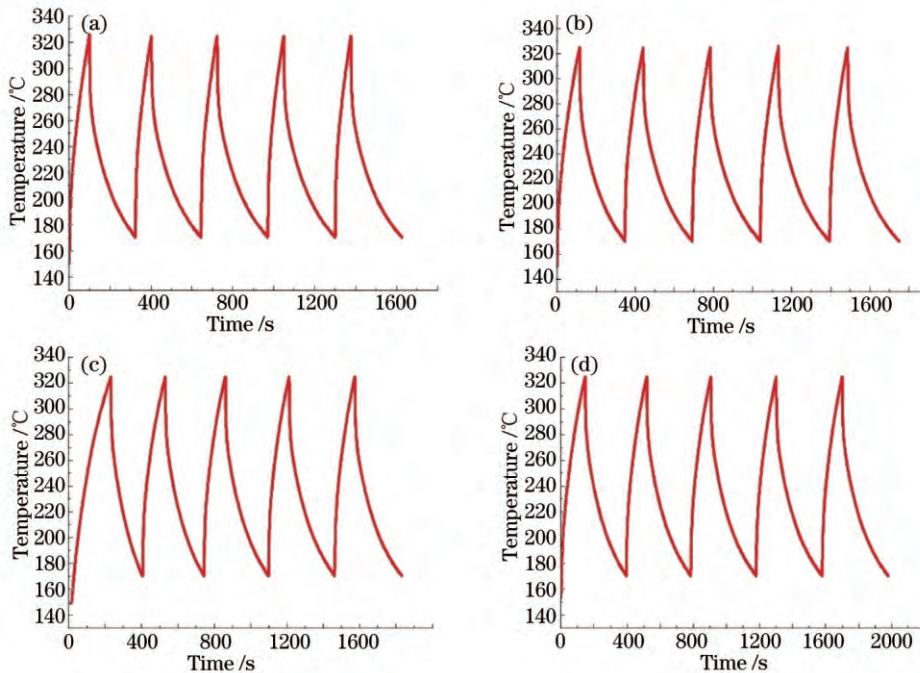


图10 温度控制的自然冷却低周热负荷试验。(a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W; (d) 2500 W

Fig.10 Low cycle thermal fatigue test with natural cooling in the temperature-controlled mode. (a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W; (d) 2500 W

3.5 温度控制的通气冷却热负荷试验

低周热负荷温度波动要求控制在 $170\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 330\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围,采用温度控制模式,结合水腔和火力面通气冷却。当加载激光功率为 3000、2800、2500 W 时,其试验结果如图 11 所示。从图中可以看出,与自然冷却情况相比,相同功率下通气冷却循环所用时间少,主要因为通气冷却降温时间明显缩短。

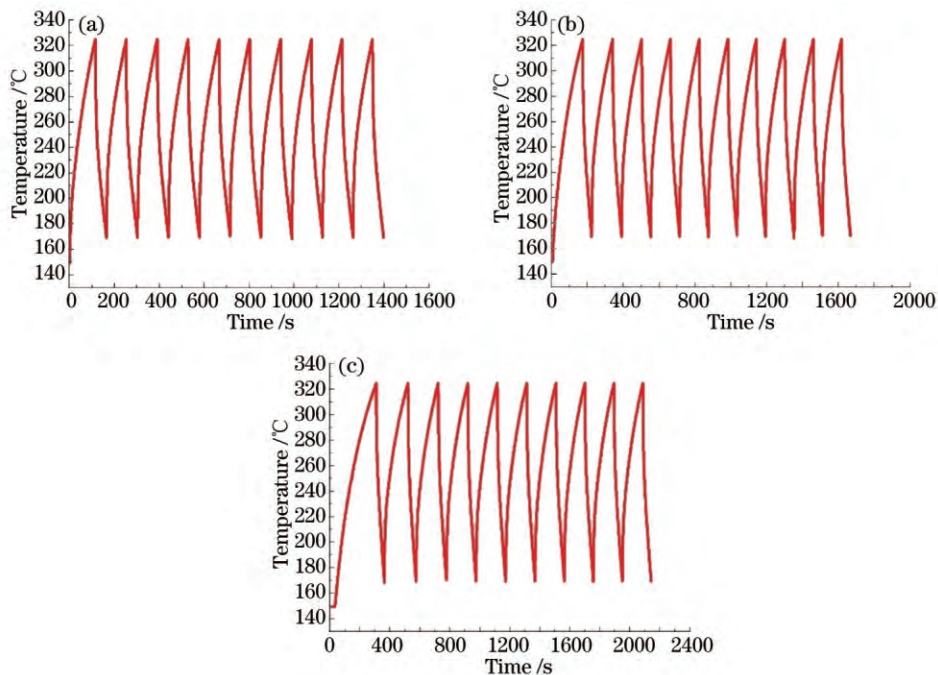


图 11 温度控制的通气冷却低周热负荷试验结果。(a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W

Fig.11 Low cycle thermal fatigue tests with air cooling in the temperature-controlled mode. (a) 3000 W; (b) 2800 W; (c) 2600 W

从以上试验结果可看出,采用温度和时间模式,结合自然冷却或者通气冷却,能够对气缸盖进行高周和低周热负荷试验。温度模式下,为了得到稳定的温度波动范围,需要根据试验设定具体的高温和低温值,以及加热功率和冷却功率。时间模式下,为了得到稳定的温度波动范围,需要根据试验设定具体的加载时间和冷却时间,以及加载功率和冷却功率。

4 结 论

利用激光在时间和空间能量及功率密度可控的特点,将一种具有非对称非均匀光强分布的整形光束加载到气缸盖顶面可产生与实际工况相一致的温度场分布,在此基础上通过时间和温度控制模式开展激光热负荷试验,例如高周和低周热负荷试验,具有能量集中、可控、试验周期短等优点,此试验结果可为后期热疲劳分析奠定基础。

参 考 文 献

- 1 M B Grieb, H J Christ, B Plege. Thermomechanical fatigue of cast aluminium alloys for cylinder head applications - experimental characterization and life prediction[J]. Procedia Engineering, 2010, 2: 1767-1776.
- 2 T Beck, D Löhle, J Luft, *et al.*. Damage mechanisms of cast Al-Si-Mg alloys under superimposed thermal-mechanical fatigue and high-cycle fatigue loading[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 468-470: 184-192.
- 3 Nie Shuzhen, Yu Jin, Yu Gang, *et al.*. Study on the shaped laser beam with linear spot array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s205001.
聂树真, 余 锦, 虞 钢, 等. 线状点阵分布整形光束研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s205001.
- 4 Nie Shuzhen, Yu Jin, Fan Zhongwei, *et al.*. Research on laser beam shaping technology using diffractive optics[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s105001.
聂树真, 余 锦, 樊仲维, 等. 衍射光学用于激光光束整形技术研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s105001.
- 5 Liu Yang, Yu Jin, Zhang Xue, *et al.*. Investigation and application of coaxial output three-wavelength picosecond laser

- micro-machining system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051402.
- 刘 洋, 余 锦, 张 雪, 等. 三波长同轴输出皮秒激光精细加工系统的研制及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 051402.
- 6 Song H W, Yu G, Tan J S, *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 Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(3-4): 757-767.
- 7 Song H W, Yu G, Kaplan A F H, *et al.*. Thermal fatigue on pistons induced by shaped high power laser. Part II: Design of spatial intensity distribution via numerical simulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(3-4): 768-778.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 S Z Nie, J Yu, G Yu, *et al.*. Study on the temperature field loaded by a shaped laser beam on the top surface of a cylinder head for thermal fatigue test[J]. *Journal of the European Optical Society Rapid Publications*, 2014, 9: 14038.
- 11 Song Hongwei, Yu Gang, Wang Lixin, *et al.*. Laser-induced thermal loadings on pistons[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 5(33): 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, 5(33): 701-704.

栏目编辑: 张 雁