

激光参数对活塞热疲劳实验的影响

周 良 宋宏伟 虞 钢 郑彩云

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 基于强度分布变换的高功率激光进行了活塞热疲劳模拟实验。为摸索该实验系统下的实验参数,深入研究了激光能量分布、加载功率、加载周期(升温时间和降温时间)和输出波形等对活塞热疲劳实验的影响,实验表明调节这些参数可以控制活塞顶部温度场分布、温度循环的平均温度、温度差和循环频率,并结合热疲劳相关理论探讨了激光参数对热疲劳寿命影响的规律。

关键词 热疲劳 激光 活塞 模拟实验

Study on Experimental Parameters of Laser Induced Pistons Thermal Fatigue

Zhou Liang Song Hongwei Yu Gang Zheng Caiyan Wang Lixin

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Abstract The thermal fatigue simulation test on pistons is carried out, based on the modulated high power laser. In order to find out the experimental parameters, the influences of intensity distribution of modulated beam, output power, loading period and wave profile on the simulation test have been investigated. It indicates that those factors affect the temperature field, temperature fluctuation and cycle frequency on the thermal stress and thermal fatigue. The influence tendency on the thermal fatigue properties is discussed.

Key words Thermal fatigue Laser Piston Simulation test

活塞作为发动机中的重要受热部件,直接影响到发动机的性能和寿命。为优化产品设计、提高系统可靠性,许多发动机生产厂家和研究机构都建立了热疲劳模拟实验平台。常见的实验平台按加热方式可分为燃气火焰加热,电磁线圈加热,电阻丝加热,石英灯加热等^[1,2]。发动机在不同负载下,汽缸内的燃烧状态并不相同,即使是同一时刻燃烧也不均匀,这就使得活塞顶部的温度场不仅随时间变化,而且空间分布也不均匀。因此需要模拟实验平台的热源在作用时间和空间上都可以控制,而传统的热源很难精确实现上述控制。

近年来国外一些研究机构开始采用激光为热源对材料试样进行热疲劳模拟实验^[3,4]。本文则采用二元光学变换装置^[5]对光束的空间分布进行调制,和 PC 机对激光输出在时间域上进行控制,以实现大型活塞结构的热负荷模拟实验。该模拟实验需在活塞顶面形成特定温度场。本文研究了多种激光参数对生成的瞬态温度场及热疲劳效果的影响。

相关理论

热疲劳是指在无外界机械应力的条件下,材料经受温度的反复变化时,因其自由膨胀或收缩受到约束所引起的循环热应力,最终导致材料破坏的现象^[6]。循环热应力的大小直接影响着热疲劳寿命。

在热弹性条件下,热应力的公式为^[7],

$$\sigma_T = \alpha E T \quad (1)$$

其中 E 为杨氏模量, α 为线膨胀系数, T 为温度变化。当材料确定时, αE 为定值,由式(1)可知,此时热应力 σ_T 的大小只与温度变化 T 有关。

用应力幅来描述疲劳寿命的关系式^[8]:

$$\sigma_a = \Delta\sigma/2 = \sigma_f (2N_f)^b \quad (2)$$

式中 σ_a 为应力幅,等于应力循环中最大应力到最小应力间应力范围的一半,即 $\Delta\sigma/2$; N_f 为发生疲劳断裂时的循环次数,即疲劳寿命; σ_f 为疲劳强度系数; b 为疲劳强度指数或 Basquin 指数。 σ_f 和 b 均为材料常数,而且 b 一般为负值,根据(2)式可知,应力幅 σ_a 越大则疲劳寿命 N_f 越短。根据(1)式中的热应力公式可确定由温度变化所引起的热应力,进而可得到应力循环中的应力幅,再由(2)式便可对疲劳寿命进行预测。

这里定义以下几个参数: T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示一

个热疲劳周期中温度的最大值和最小值;该周期的平均温度为

$$T_m = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (3)$$

平均温度表征的是结构整体温度水平;温度变化为

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (4)$$

温度在 T_{max} 持续的时间称为上限温度保持时间。

许多研究工作指出,温度循环中的平均温度、温度差、上限温度保持时间以及循环频率都会对热疲劳寿命产生影响^[6,9]。循环平均温度升高,则热疲劳寿命缩短;循环温度差增加,则热疲劳寿命缩短;在每一个温度循环中,上限温度的保持时间越长,则热疲劳寿命越短;一般来说,活塞材料为铝合金,循环频率提高会增加材料的高温强度及延性,因此提高循环频率会增长疲劳寿命。此外对于机械结构来说,热疲劳破坏往往发生在应力集中的区域。所以,结构部件的热疲劳破坏还与温度分布有关。

综上所述,活塞部件的热疲劳实验,需要考虑温度场分布、温度循环中的平均温度、温度差和循环速度等因素。

实验研究

图1为整个系统构成的示意图。

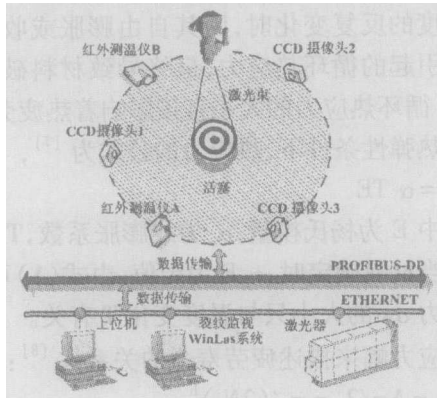


图1 实验系统示意图

实验系统的核心是一台输出功率为3000w的Nd-YAG激光器,可通过其自带的WinLas软件设定输出功率、周期和波形等参数。

活塞整体高138.8mm,直径为149mm,活塞顶部材料是铝合金LD11。根据整机实测结果,发动机活塞在实际工作过程中,其顶部的温度高达300~350°C,并且近似呈圆环状分布^[10]。为了在活塞上表面形成贴近实际情况的温度分布,采用二元光学

变换装置将呈高斯函数分布的激光光束调制成多圆环(一个中心圆和两个同心圆环)分布,并投射于活塞的上表面,如图2所示。经变换后的光强分布可表示为:

$$f(R) = \begin{cases} I_1, R \in [0, r_1] \\ I_2, R \in [r_2, r_3] \\ I_3, R \in [r_4, r_5] \\ 0, R \in [r_1, r_2] \cup [r_3, r_4] \cup [r_5, \infty] \end{cases} \quad (5)$$



图2 激光作用区域示意图

其中 I_1, I_2, I_3 分别为三个环的相对功率密度, $r_1 \sim r_5$ 为各环的内外边界半径。相对输出功率满足

$$I_0 = I_1 S_1 + I_2 S_2 + I_3 S_3 \quad (6)$$

I_0 为激光器输出功率, S_1, S_2 和 S_3 分别为中心、中环和外环的面积, 即 $S_1 = \pi r_1^2, S_2 = \pi(r_3^2 - r_2^2), S_3 = \pi(r_5^2 - r_4^2)$ 。

采用红外测温仪分别监测三个圆环内的特征点,监测波段为 $2.4\mu\text{m}$,避开了Nd-YAG激光的波段,用于监测活塞上表面特定点的温度。CCD摄像头用于监视活塞表面裂纹的萌生,一旦发现超过0.2mm长的宏观裂纹,将发出报警信号。

实验开始前首先采用连续激光对活塞整体进行预热,提高整个活塞结构的温度,使得活塞顶部表面温度达到300°C左右。

实验结果分析与讨论

1. 光场分布的影响

光场分布可变换是采用激光进行热疲劳模拟实验的优点之一。式(4)中, I_1, I_2, I_3 和 r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 均为二元光学变换装置可调整的设计参数。初期选择参数为 $I_1: I_2: I_3 = 32: 29: 37, r_1 = 5\text{mm}, r_2 = 40\text{mm}, r_3 = 50\text{mm}, r_4 = 60\text{mm}, r_5 = 67.5\text{mm}$ 的二元光学变换装置进行实验,所得的实验曲线如图3(a)所示。中心与中环的温度曲线基本上重合在一起,不符合模拟实验要求。为逼近活塞实际工况的温度场,借助数值模拟的计算结果,得到优化后的设计参

数^[5]: $I_1: I_2: I_3 = 14:10:15$, $r_1 = 4\text{mm}$, $r_2 = 42\text{mm}$, $r_3 = 47\text{mm}$, $r_4 = 67\text{mm}$, $r_5 = 74\text{mm}$ 。图 3(b)为选用优化

设计的二元光学变换装置获得的温度响应曲线,三个环上的特征温度基本符合设计要求。

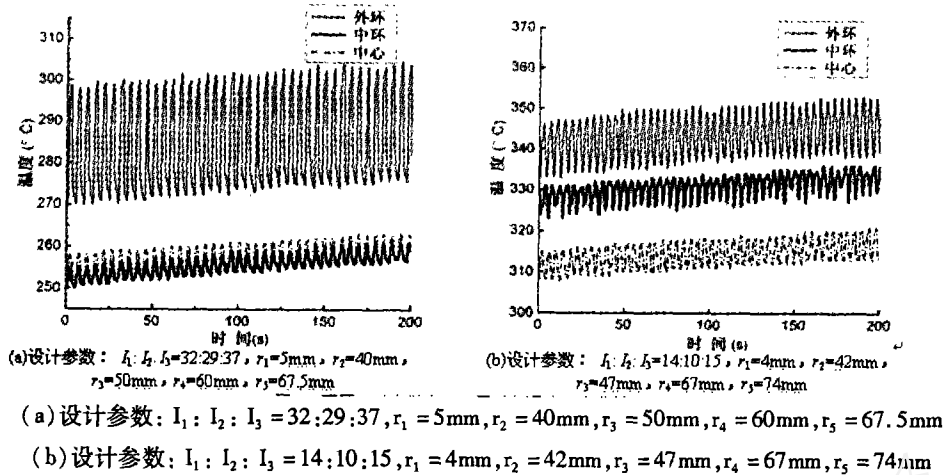


图 3 不同二元光学变换装置时的温度响应曲线

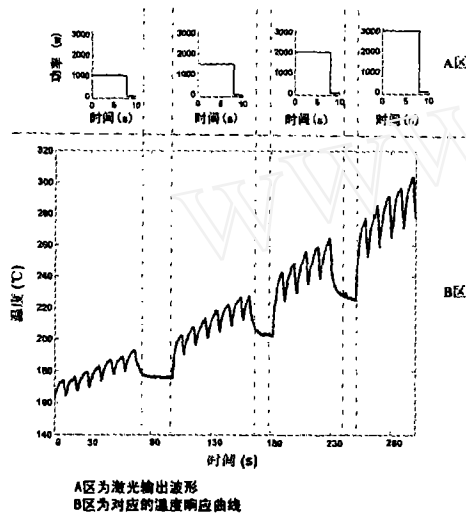


图 4 不同功率下的温度响应曲线

由图 3 中的比较可知,通过二元光学变换装置调制后的光场分布决定着温度场分布。此外,投射于活塞表面的激光功率密度越高,此处的温度循环平均温度越高,循环温差越大;由热疲劳寿命理论可知此时热疲劳寿命越短。

2. 功率的影响

激光功率直接决定活塞上的加载能量。图 4 表示活塞升温阶段,外环的温度响应曲线。采用脉宽和周期均为 8s 和 10s 的矩形波,而幅值相继增大,分别为 1000w, 1500w, 2000w 和 3000w。从图中可看出,加载过程中,随着功率的升高, T_m 随之提高, ΔT 也由 10℃ 增加到 30℃。由于所采用矩形波的脉宽和周期均相同,所以这四种情况下的温度循环频率基本上同为 0.1Hz。

活塞顶面为热传导问题的第二类和第三类边界条件。矩形波峰值功率的提高,意味着增大了单个周期内矩形波输出的总能量,但同时输出能量的波动也更大了,而周围的环境温度基本不变。因此,提高矩形波峰值功率使得温度循环的平均温度升高、温差加大。又由热疲劳寿命理论可知,提高矩形波峰值功率,则热疲劳寿命缩短。

3. 周期的影响

矩形波的周期和占空比决定了单位时间平均输出能量。在活塞的初始温度相同的条件下,分别选择三种周期不同,但幅值均为 3000w 的矩形波激光进行模拟实验。此时中环处的温度响应曲线见图 5。其中矩形波 1 的周期和脉宽分别为 8s 和 6s, 矩形波 2 的周期和脉宽分别为 6s 和 4s, 矩形波 3 的周期和脉宽分别为 4s 和 2s。从图中可看出,矩形波 3 对应的温度循环平均温度为 315℃ 左右, 矩形波 2 对应的为 335℃ 左右, 矩形波 1 对应的为 355℃ 左右, 随着矩形波占空比的提升,随之升高。矩形波的波峰与波谷,也就是活塞表面加载能量的波峰与波谷,决定着活塞表面温度的升与降。可从图中看出温度循环的周期基本与矩形波的周期相吻合。

实验表明,矩形波周期越长、占空比越大,则温度循环的平均温度越高。由热疲劳理论可知,此时热疲劳寿命则越短。

4. 波形的影响

可设置任意输出波形是采用激光进行热疲劳实验的另一优点。活塞在不同工况下的温度变化过程

各不相同,选择不同波形的激光,可以对复杂工况下的热疲劳过程进行模拟。实验中分别选择如图6所示的矩形波、正弦波和三角波三种波形对活塞进行加载,三种波形的周期均为4s,峰值功率均为3kW,每个周期的输出能量都是12kJ。从图中可看出,三条曲线的平均温度均为310℃左右,温度差均为10℃左右,而且循环波形与此时激光的输出波形相似。仅对单个温度循环而言,选用矩形波时,温度在高温处的保持时间明显大于其他两种波形。

激光的输出波形,对应着活塞表面的能量加载

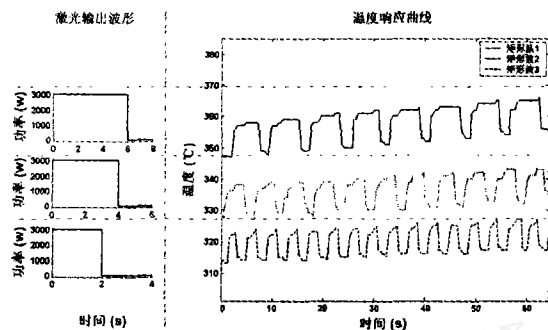


图5 不同周期下的温度响应曲线

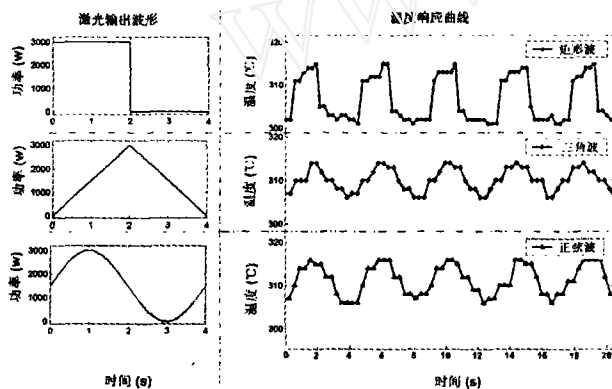


图6 不同波形下的温度响应曲线

波形,而加载能量的高低又直接影响着活塞表面温度的升降。正如实验结果中看到的,选择不同输出波形的激光进行实验,活塞表面温度曲线形状将逼近于激光波形。对于周期相同,且单周期输出能量相同的矩形波、正弦波和三角波,选用矩形波时温度在高温处的保持时间较长,根据热疲劳寿命理论可知,此时热疲劳寿命最短。

结论

本文深入研究了激光参数对活塞热疲劳实验的影响。实验表明,激光功率、周期、波形以及光场分布等参数,直接影响着活塞热疲劳模拟实验中活塞的热疲劳寿命。相对其它波形,选择矩形波时热疲劳寿命最短;激光功率越高,周期越长,占空比越大,则热疲劳寿命越短。

活塞在发动机内的实际工况很复杂,采用激光进行热疲劳模拟实验,可通过设置适当的激光功率、周期和波形(甚至不同波形的组合),来控制温度场在时间和空间的分布,实现对复杂工况的模拟。激光作为热疲劳实验的热源,对于研究各种复杂机械结构以及复杂工况下的热疲劳寿命,有着独特的优势。

参考文献

- [1]刘震涛等,内燃机工程,2001,22(2),24~26
- [2]A. Persson, et al, *International J. Fatigue* 26(2004), 1095
- [3]M. Kutsuna, et al, *SPIE*, 1999, 3888: 438~445
- [4]Schaus, M. P., et al, *Metall*, 1998, 52(7-8): 464~470
- [5]宋宏伟等,中国激光,2006,33(6),842~845
- [6]何晋瑞,金属高温疲劳,科学出版社,1988,206~242
- [7]陆明万等,弹性理论基础. 清华大学出版社,2000,329
- [8]S. Suresh,材料的疲劳. 国防工业出版社,1999,158
- [9]毛修二,热应力与热疲劳,国防工业出版社,1974,136
- [10]激光热负荷试验系统技术协议,北方发动机研究所,2003

(上接第364页)

参考文献

- [1]H. Ollendorf, et al, *Surface & Coatings Tech.* 113(1999), 86
- [2]K. L. Mittal, Adhesion measurement of films and coatings. Boston USA 1992
- [3]K. L. Mittal, Adhesion measurement of films & coatings. NJ. USA 1999
- [4]A. X. Feng, et al, *KEM*, 259-260: 615-619
- [5]A. X. Feng, et al, *Materials Science Forum*, 2004, 471
- [6]王良清,数学物理方法. 东北工学院出版社,1989
- [7]罗强等, *Structure & Environment Engineering*, 2001(3): 14

- [8]张建泉等,应用力学学报 1996(16)4:123-129
- [9]龚辉等,中国激光 1996 23(3):245-248
- [10]杨富等,激光技术(2004)28-3:254-258
- [11]南京工学院数学教研室编. 积分变换. 高教出版社
- [12]段晓峰等,光学学报,2004,24(8),
- [13]赵建君等,激光杂志,2005, No. 1
- [13]N. Angelucci, *J. heat mass transfer*, 1997, 40(18), 4487
- [14]H. S. Mavi, et al, *Thin Solid Films* 2003, 425, 90-96
- [15]Y. T. Pei, et al, *Materials Science and Engineering*, 2003, A342, 92-200