

· 研究 · 开发 ·

基于激光加热技术的活塞热负荷试验方法研究

狄建兵¹ 谭建松¹ 庞 铭¹ 虞 钢²

(1 - 中国北方发动机研究所 山西 大同 037036 2 - 中国科学院力学研究所)

摘 要:通过对发动机活塞实际工作温度场分布规律与冷却特点的分析,提出了以激光作为热源,应用能量分配与光学转换技术模拟再现活塞温度场分布及热负荷作用的试验方法。研究结果表明该方法对活塞顶部不同区域温度可控,瞬态温度模拟真实,损伤监测到位,试验效率高。为今后开展活塞热损伤,热疲劳机理研究及提高活塞热负荷评估试验的置信度奠定了基础。

关键词:活塞 热负荷 温度场 激光

中图分类号:TK40 文献标识码:A 文章编号:1671-0630(2013)02-0001-06

Research on Experimental Method of Piston Thermal Load Based on Laser Heating Technique

Di Jianbing¹, Tan Jiansong¹, Pang Ming¹, Yu Gang²

1 - China North Engine Research Institute (Datong, Shanxi, 037036, China)

2 - Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

Abstract: Temperature field distribution rules and cooling characteristic of an engine piston are analyzed, and an experimental method is proposed which uses laser as the heat source, and uses energy distribution and optical transition technology to gain temperature distribution and thermal load of the piston. The result proves that the temperature on different region of the piston top can be controlled, the simulation of transient temperature is reliable, damage can be fully monitored, and the experimental efficiency is high. It provides foundation for piston thermal damage and thermal fatigue mechanism research, improving thermal load evaluation experiment reliability later.

Keywords: Piston, Thermal load, Temperature field, Laser

引言

为了实现发动机功率密度与性能指标不断提升的目标,发动机技术开发通常采取的技术途径是提高热效率和转速,那么,必然导致发动机热负荷的增加。而发动机热负荷的加剧将使活塞等受热构件产生如:烧蚀、热裂疲劳破坏等影响其正常工作的失效故障。另外,该失效故障会出现在高低周不同阶段,并且频率会

越来越高,这将严重影响发动机整机的可靠性^[1]。因此,活塞热负荷问题是动力研发当中需要重点考虑的问题。

目前,对于构件疲劳寿命的研究方法有两种,一是从微观研究,其结果很难与实际对应起来,实用性较差。另一种是从宏观现象研究,叫“维象法”^[2]。它以工程零件在部件级试验状态下的载荷数据与试

作者简介:狄建兵(1973-),男,副研究员;研究方向为发动机机体结构与可靠性。

验结果为基础,进行原因分析,寻找规律,提出改进方向,是一种实用性较强,解决问题效果较好的方法。以宏观现象研究为基础探索发动机活塞新型的热疲劳、热冲击试验方法将有助于科学合理、经济可靠地对发动机活塞进行可靠性评估、产品开发、活塞材料性能评价等工作的开展。基于激光加热技术的活塞热负荷试验方法研究正是以此为目的,它将提高试验效率,提升温度场模拟精度,再现故障模式,提供准确的热负荷评价依据。

1 发动机活塞部件实际工作热状态分析

发动机活塞的作用是与缸盖、气缸套组成密闭的燃烧室。工作时燃烧室内气体燃烧产生气体压力并且释放热量。气体压力可以对外做功,而热量则对构件带来严重侵袭。就活塞而言,一方面,瞬时温度高达 2000°C 左右的高温气体直接与活塞顶平面接触,使其急剧受热,温度升高;另一方面,进气时的低温空气或混合燃气又对活塞顶部产生急冷作用;再加上活塞冷却喷嘴喷出的冷却机油对活塞底部的不间断液体冷却,使活塞温度有所降低;如此造成活塞温度周期性变化。活塞热疲劳损伤正是由于温度引起的热膨胀或收缩受到活塞结构和外部约束而产生稳态或瞬态热应力交变作用,以及材料力学性能随温度变化等导致的疲劳开裂、烧蚀等现象^[1]。活塞细节结构相对复杂,工作中各部位所处环境各异,造成活塞表面温度随着位置的不同,存在较大的差距。以某发动机活塞为例,活塞顶平面温度最低处 260°C 左右,最高则达 360°C 左右。活塞顶平面温度以特有的温度梯度性规律分布,一般由外向内温度变化为高—低—较高。纵向方向由上到下温度逐渐降低,最低温度也有 100°C 左右。图1为某发动机活塞实际工作温度场测试的结果。

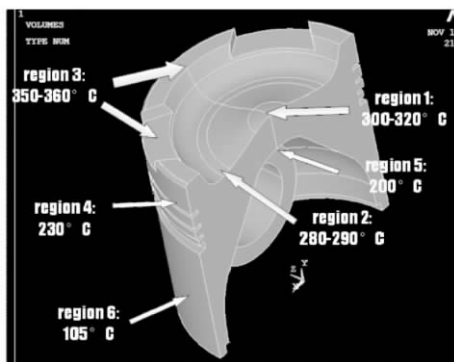


图1 某发动机活塞实际工作温度场分布

2 基于激光加热技术的活塞热负荷试验方法研究

2.1 热负荷试验方法总体思路

活塞激光热负荷试验方法针对传统试验方法存在的热效率低、温度场模拟粗略、测温干扰性大、损伤监控难度高等问题,提出以激光为热源进行活塞表面瞬态温度场模拟的技术思路。首先,根据活塞表面的实际温度场分布,进行温度场模拟与激光能量密度分配计算^[3],并将计算结果通过光学转换的方式得以工程实施,就此形成一种特定热能加载系统;其次,应用非接触温度测量技术、CCD技术等技术用于活塞表面温度非接触测量与热损伤监测;之后,构建水、气冷却卸载系统,达到快速冷却试件的目的;最后,将上述各大系统进行有效集成与程序控制,从而建立起能够对发动机活塞进行稳态和动态温度场模拟、高、低周热冲击和热疲劳等试验研究的基础平台。图2是激光热负荷试验系统总体技术方案框图。

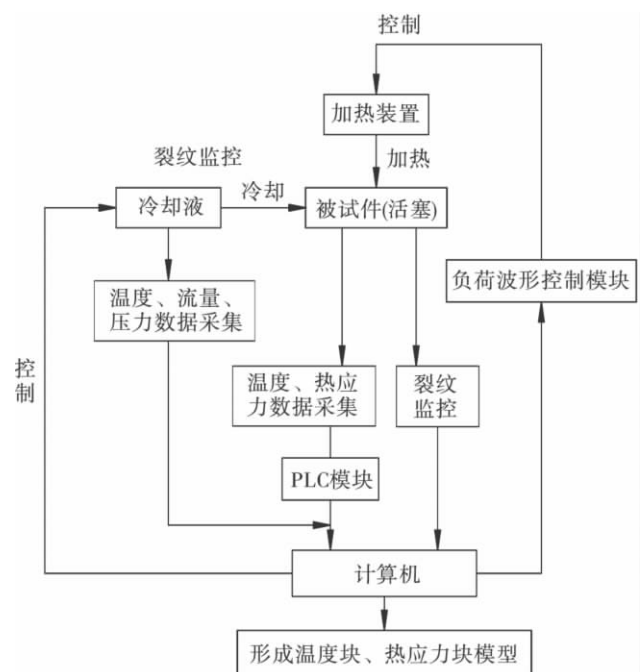


图2 激光热负荷试验系统总体技术方案框图

2.2 热源选择与激光能量分配设计

随着激光技术的发展和产业化应用,利用激光作为热源进行活塞加热成为一种可能。由于激光是一种特殊光源,与普通光源相比具有单色性、相干性和平行性3大特点^[4]。由此激光是一种能量密度很高的强热源。同样功率的光源,激光能量空间集中度比普通光源大一百万倍,属于是强光光束。激光是理想的加热

热源 其能量密度可以通过光学器件实现合理分配,且受外界干扰小,活塞对热量吸收率高,环境污染小。活塞表面可以实现无干扰实时损伤监测与温度测试,能准确捕获与评判活塞热疲劳强度极限。该试验方法采用的加热激光器为 YAG 激光器,功率 3000W,光纤传输。

根据上述可知活塞工作时各部位温度不同,并存在一定的温度梯度。为了真实模拟活塞温度场实际状况,对活塞顶部温度场进行分区处理,即将其分为 3 道环形区域(图 3 所示),分别对应相似结构部位的温度场状态^[2]。为了在激光热负荷平台重构构件的温度分布,需利用现有转光片进行激光热负荷试验和有限元仿真方法调整与校核活塞热物性参数、热边界条件参数,量化材料对激光的吸收率^[5]。采用有限元反求的方法,进行激光能量在空间的能量分布设计,也就是转换片光场设计,设置功率密度比值和光柱宽度,配合相应的加载方式,满足试验要求。图 4 为激光通过转换片光场变化情况。a 图为输入的高斯激光光束, b 图为输出的三道光环。

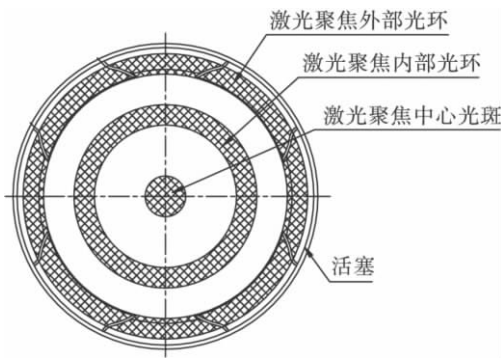


图 3 活塞温度场环形分区

转换片设计是基于特定发动机工况下活塞的受热状态而进行的,某发动机活塞部件激光热负荷试验转换片设计参数如下:

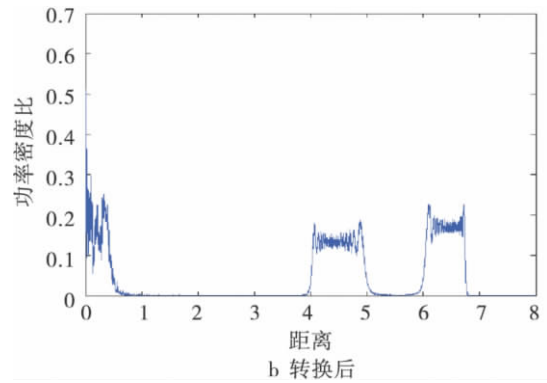
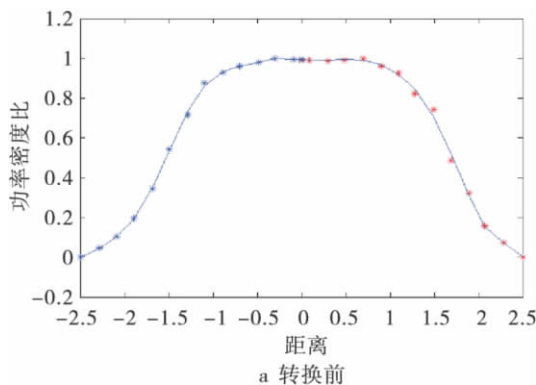


图 4 转换片光场变化示意图

三道环平均功率密度要求比值: $320 : 280 : 360 = 1 : 0.875 : 1.125$,光柱宽度比值: $1 : 2 : 1.5$ 。按功率 3000W 的激光器计算,则三道环的平均功率密度分别为:内环:中环:外环 = $0.143 : 0.125 : 0.161$ 。

图 5 为激光实际转换形态。图 6 为该转换片在某载荷条件下数值模拟结果与实验结果比较。

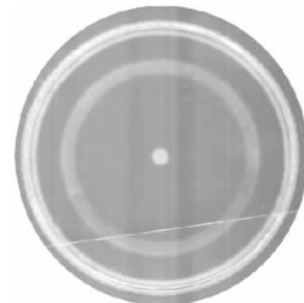


图 5 激光实际转换形态

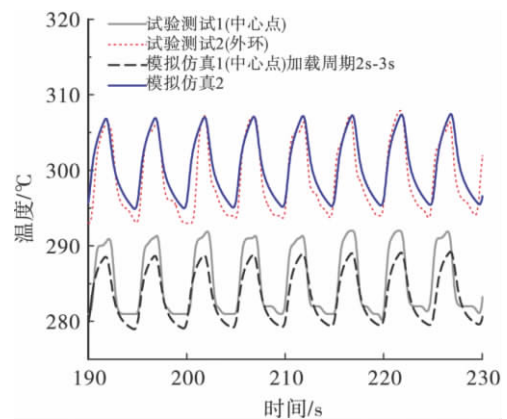


图 6 该转换片数值模拟结果与实验结果比较

2.3 瞬态温度分布控制与活塞冷却

由活塞热损伤机理可知,热负荷试验的关键是如何控制瞬态温度分布,即通过热负荷试验平台加速其高周或低周热疲劳危险区域的热损伤,但不能改变其损伤位置。采用的方法为:通过有限元仿真方法确定

实现活塞高、低周热疲劳温度波动载荷谱所需的激光的加卸载时间与冷却介质的流量、压力等,从而实现活塞的高、低周热强度评估。例如:某发动机活塞激光热冲击试验需要在实现其所需温度场分布的基础上,在高温区域(活塞外环区域)产生165~350℃温度瞬态波动,其它对应区域也会形成相应需求的温度波动,如图7所示。

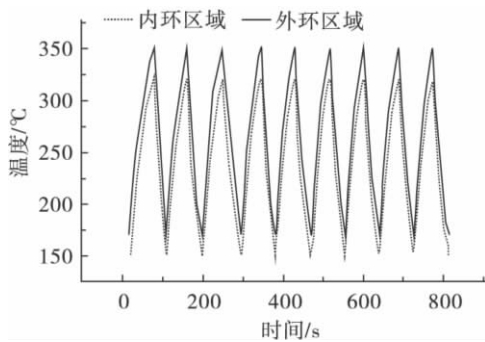


图7 活塞激光热冲击试验瞬态温度波动

对于活塞表面瞬态温度波动幅度的控制有两种方法,即温度控制和时间控制。相应的温度波动形式如图8、9所示。

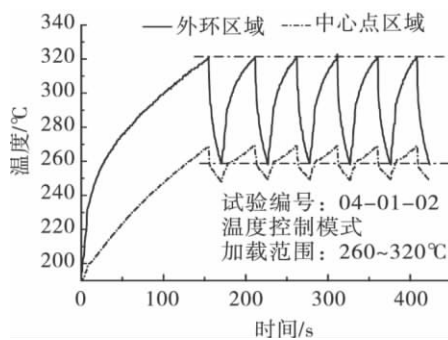


图8 温度控制模式

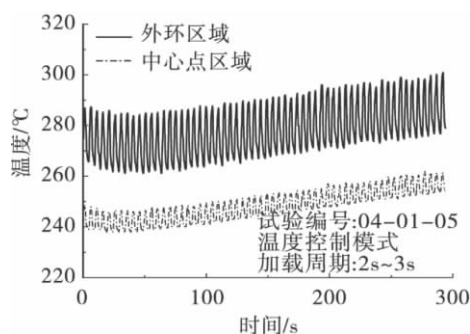


图9 时间控制模式

温度控制:通过直接控制活塞表面监测点的上限温度和下限温度,保证其温度波动幅度。具体做法是激光加载到上限温度随即停止,开启冷却系统冷却直

至达到下限温度,之后继续加载,如此反复形成交变作用。温度控制方法可以精确控制温度波动范围,准确模拟活塞温度场。

时间控制:通过适当控制活塞表面升温 and 降温的时间间隔,间接控制温度波动。具体做法是通过前期试验标定,设置激光加载时间与冷却时间并进行时间周期组合,经程序定义驱使激光系统与冷却系统在试验过程中协调工作,保证活塞表面温度产生预定交变作用。时间控制方法可以有效控制试验时间周期,实现活塞瞬态温度模拟。不足之处在于温度控制范围有一定出入,通常采取偏大化处理。

在试验当中对活塞冷却采用的介质是高压空气与冷却水,其中,采用的方式是底喷式压力水和顶平面高压空气冷却^[6]。热冲击试验强化要求的冷却水温度一般为室温温度。如果模拟活塞稳态高周热疲劳可以将冷却水加热到整机工作时机油的温度80℃左右。此外,冷却水、压缩空气的流量与压力可以程序化控制。

2.4 瞬态活塞温度场测试

活塞温度场测试主要是针对活塞表面温度场进行。目前试验当中应用的比较多的测试方法有热电偶温度测量、红外温度测量等。

测量如活塞等固体表面温度的热电偶通常采用凯装式镍铬-镍硅热电偶,热电偶测温范围-40~+800℃。将热电偶测量触点通过机械式方法封装于所测活塞相应部位表面下1~2mm处或焊接于活塞表面。对热电偶丝进行隔热保护,数据线与温度变送器、PLC模块相连,通过计算机对数据进行采集和处理^[6]。

非接触红外测温技术在过去的20年以来得到了迅速发展,它集光电成像技术、计算机技术、图像处理技术于一身。大家都知道任何物体自身分子在不停地做热运动,尤其象受到热负荷作用的活塞其内部分子热运动更加剧烈^[7]。因此,活塞表面不停地向外辐射红外热能,从而在其表面形成一定的温度场,俗称“热像”。红外测温技术正是通过吸收这种红外辐射能量,测出活塞表面的温度及温度场的分布,具有准确、实时、快速等优点。

热电偶测温和红外测温两种方法具有各自特点。红外测温是非接触式测温,反应快、精度高,且不像热电偶会改变受热构件局部热量传递和受力。在温度测量方面两种方法精度上具有显著不同,如

图 10 所示。

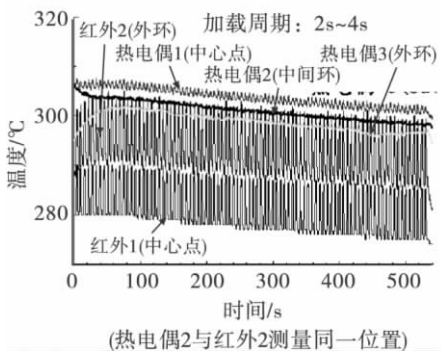


图 10 红外和热电偶温度测量结果对比

可以看出采用红外测温仪能准确地测出其温度波动,其响应时间 5ms 左右。而热电偶测温存在明显的滞后。因此,活塞激光热负荷试验采用的是红外测温方法。

红外测温采用英国 LAND 公司的 System 4 型红外测温仪,该仪器的监测波长为 2.4 μ m 的电磁波,避开了 YAG 激光的波段,使温度采集不受激光的影响。

2.5 活塞表面热应力场测量与裂纹监控

对于热应力测量可以将专用的耐高温、抗氧化的应变片粘贴于活塞考察部位的表面,通过静态或动态应变仪测量出应力值^[8]。多数具有代表性测点热应力的组合将显示出整个活塞热应力场分布情况。

在试验当中对于断裂裂纹的监控依靠 CCD 系统即图像识别系统(图 11 所示)。CCD 监控系统基本原理是对所监控表面长时间进行间歇式摄像,间隔时间可以设置为几分钟到十几分钟不等。通过图像识别软件将每次的图像进行分析比较,如若发现先后有裂纹形成直至有所扩展将做出判断,提出报警。裂纹宽度可以控制在 0.2mm 以内。

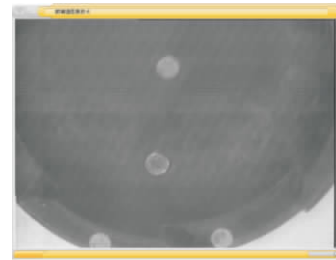


图 11 裂纹监测图像

2.6 系统集成

根据上述研究分析可以发现活塞激光热负荷试验方法包括加热模块、冷却模块、红外测温模块、热损伤监测模块等主要试验现场执行模块。各模块只有相互依存、协调工作才能形成一个有机的整体达到载荷模拟试验评价的目的。因此,基于计算机通讯技术建立试验数据采集与控制模块,将各大系统进行数字化集成,示意图如图 12 所示。

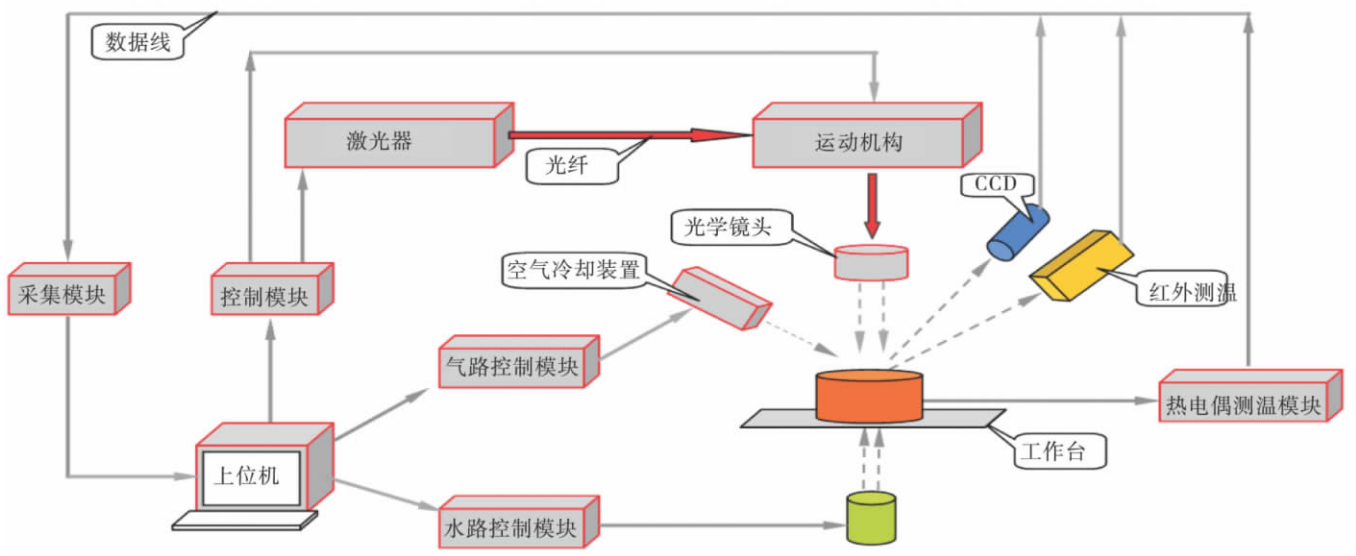


图 12 系统集成示意图

整个硬件的集成方案为采用图像采集卡、IO 卡、一块 PROFIBUS 现场总线卡、两台 PC 机结合 VC++ 程序进行集成,硬件系统集成如图 13 所示。

基于 VC++ 编制的程序对加热模块之外的其他模块进行执行控制,实现试验参数设定及试验数据采集。对于激光器的集成控制是通过专用的 WinLas 软

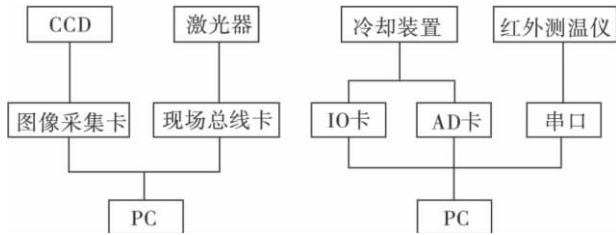


图13 硬件系统集成方案

件平台进行,完成所需技术编程和储存。所属外围设备按照程序编号对其进行调用与执行,从而实现激光器在整个系统中的控制与协调工作。

3 活塞激光热负荷试验方法应用与效果

活塞激光热负荷试验方法在我所动力研发项目中得到了普遍应用,并取得了良好的效果。其能够准确实现活塞稳态和瞬态温度分布,如图14所示,试验现场光强分布结果与设计需求分布一致。对比图15的试验结果和图1的温度需求可以看出激光热负荷试验系统能够实现活塞所需的温度分布和波动(温度模拟精度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$)。稳态温度波动(20°C)周期5s,瞬态温度波动(200°C)周期65s,试验效率明显高于同类试验方法。



图14 活塞激光热负荷试验现象

4 结语

活塞激光热负荷试验方法是基于激光加热技术而开发的满足活塞部件级热负荷试验平台。通过开发与试验应用,可以发现该方法利用激光时空分布的可控性,对激光空间能量密度分配和时间域上的能量控制,结合非接触式测温、热损伤监测、压缩空气和水强制冷却等系统,能够准确模拟发动机活塞温度分布和波动,可以有效开展稳态和瞬态的温度场模拟试验和稳态热疲劳与瞬态热冲击试验,评估活塞热强度和

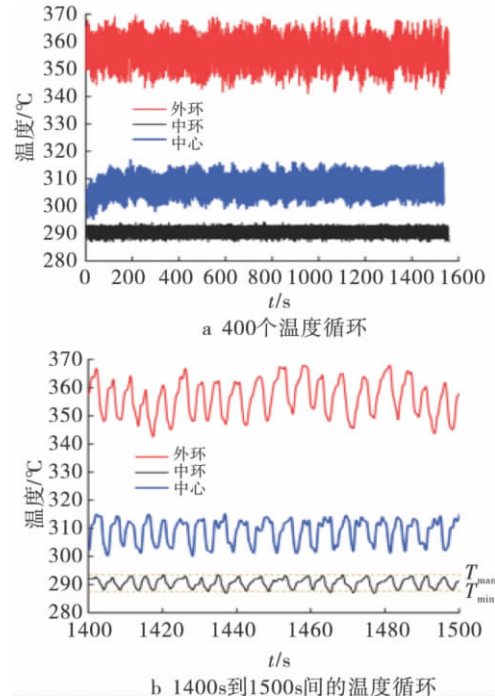


图15 温度控制模式下的高周热冲击模拟实验

热可靠性工作。这也有利于为活塞结构优化设计提供试验基础。同样为燃烧室其它组成部件的热负荷试验研究提供了可以借鉴的技术思路。

参考文献

- 1 陆瑞森,林发森,张瑞. 内燃机传热与热负荷[M]. 北京:人民交通出版社,1988
- 2 俞小莉,沈瑜. 活塞热疲劳试验技术[J]. 内燃机工程, 2000(4)
- 3 俞宽新,江铁良,赵启大. 激光原理与激光技术[M]. 北京:北京工业大学出版社,2005
- 4 宋宏伟,李少霞,虞刚. 基于数值模拟的激光热负荷光强分布设计[J]. 中国激光, 2006(6)
- 5 谭建松. 活塞激光热负荷光强分布优化设计[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 166~169
- 6 俞小莉,金瑞斌,沈瑜铭. 内燃机活塞热疲劳模拟试验台[J]. 内燃机工程, 1997(04)
- 7 顾泽同,葛永乐,翁中杰. 工程热力学[M]. 北京:国防工业出版社,1987
- 8 韦德骏. 材料力学性能与应力测试[M]. 长沙:湖南大学出版社,1997

(收稿日期:2012-04-18)