

基于红外成像技术的缸盖热裂纹探测方法

张萍¹ 童亚拉² 欧阳光耀¹ 白禄峰¹

(¹海军工程大学船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)
²湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430067)

摘要 为实现无损在线探测缸盖内部热裂纹,提出一种基于红外热成像技术,由缸盖表层温度直接判断其内部热缺陷的新方法。以某型柴油机缸盖为研究对象,分析了缸盖的传热机理,结合缸盖温度场的三维分布,确定了其内部易产生热裂纹的部位,并对裂纹结构进行了加工模拟。构建缸盖温度场检测台架,对正常结构缸盖与裂纹缸盖开展了外部特征区域温度场的检测。结果表明,在缸盖传热边界一定的情况下,缸盖表层温度场的变化能直接反映缸盖内部热裂纹缺陷,具体表现为传热受阻的左表面特征区域最高温度值降低,而其他特征表面由于传热量的增强使得表面上的温度升高,这与缸盖实际的传热规律相符。

关键词 成像系统;红外成像;热裂纹探测;温度场;缸盖

中图分类号 TN219

OCIS 110.3080 110.2970 110.6820

文献标识码 A

Detecting Thermal Flaw Inner Cylinder Head Based on Infrared Thermograph Technology

Zhang Ping¹ Tong Yala² Ouyang Guangyao¹ Bai Lufeng¹

(¹College of Naval Architecture and Marine Power, Naval University of Engineering,
Wuhan, Hubei 430033, China)
²College of Science, Hubei Technology of University, Wuhan, Hubei 430067, China)

Abstract A new method is put forward to detect thermal flaw inner cylinder head on-line based on infrared thermograph technology. Aiming at some diesel engine, heat transfer rule for cylinder head is analyzed. Combined with three-dimension temperature distribution, areas in which flaws can be produced are studied and flaw inner cylinder head is machined. Testing platform on detecting flaw is set up and temperature tests on cylinder head are developed. Results show that when there is a flaw inner cylinder head, maximum temperature value of outer surface hindered by flaw will be decreased. On other surfaces, maximum temperature value will be increased, which is accordant with actual heat transfer rule.

Key words imaging system; infrared thermograph; thermal flaw detecting; temperature field; cylinder head

1 引言

随着柴油机向高强化大功率方向发展,柴油机零部件承受的热负荷越来越高,需承受的热应力不断增大,使得零部件产生热裂而失效的问题日益增多,其中以缸盖热裂问题显得尤为突出,这成为制约高强化大功率柴油机进一步发展的关键问题之一。由于这类故障发生在机体内部,难于在线监测,通常是靠冷却水温度等参数的变化,由操纵者凭经验去判断,存在误判或漏判。或是在中修级以上定期保养中,拆卸缸盖后进行离线检测,这给使用维护带来很大不便。且一旦发生故障轻则停车维修,重则整机报废,因此必须对缸盖进行在线热状态监测及热裂纹故障诊断。

收稿日期: 2010-04-22; 收到修改稿日期: 2010-05-30

基金项目: 湖北省科技计划自然科学基金(2009CBB312)和海军工程大学青年基金(HGDJJ0809)资助课题。

作者简介: 张萍(1974—),女,博士研究生,讲师,主要从事动力机械状态监测及故障诊断等方面的研究。

E-mail: carroll1974@sohu.com

导师简介: 欧阳光耀(1964—),男,教授,主要从事动力系统控制、结构优化及设计等方面的研究。

E-mail: ouyanggy@126.com

2 缸盖内部热裂纹探测

研究表明,缸盖内部的热裂纹是由其热负荷引起的,可用温度场来表示,即缸盖在某一稳定工况下特征区域的温度分布^[1]。缸盖的热量从缸内向外传递,传热方式为热传导,受缸盖结构以及传热边界等条件的影响,具有规律性。当工况及结构一定时,则缸盖外表层温度的高低完全由缸盖内部温度场确定。当工况一定时,若缸盖内部产生裂纹,其内部的温度场会改变,对应外表层上的温度也会有所反映。

2.1 缸盖的传热特点

缸盖结构复杂,内部有冷却水道,进、排气道,分别有液体与气体的流动与传热。其上还布置有进、排气门及其传动机构和喷油器等,缸盖底部直接承受高温高压燃气的作用,其外表面与周围大气进行着热交换。由此可见,缸盖构成了一类结构复杂,具有多种流动介质,多传热形式并存的热传导问题^[2]。图1为某柴油机缸盖,图2为其内部水套及进、排气道结构。

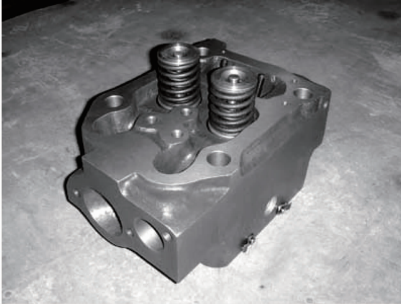


图1 缸盖外形图

Fig.1 Cylinder head structure shape

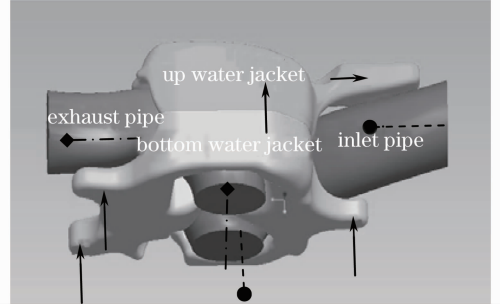


图2 缸盖内部水套及进、排气道

Fig.2 Water jacket, inlet pipe and exhaust pipe in cylinder head

2.2 缸盖温度场分布规律

缸盖温度场受传热边界的影响大。工作时,冷却水经缸套上行进入缸盖,自下而上对缸盖进行冷却,最后由缸盖上部出水口流出,冷却水的流动方向见图2实线箭头所示;新鲜空气经进气道、进气门进入燃烧室,对缸盖实施冷却,气体的流动方向见图2圆头细点箭头所示;燃烧后的高温废气由排气门、排气道排出,对缸盖实施加热,气体的流动方向见图2菱形点化线箭头所示。缸盖底平面受燃烧室内高温燃气的加热,一直处于高温状态。缸盖的外表面受周围环境影响,当发动机在高负荷下工作时,缸盖向外散热,始终与周围大气进行着热交换。由此可见,缸盖各个部分的温度分布极其不均。虽然在结构布置上已作考虑,使得高、低温区域间温差尽可能缩小,受缸内燃烧影响,局部区域温度仍过高,主要表现为缸盖底板上喷油器附近,进排气门间的鼻梁区温度高。图3为仿真计算得出的某柴油机额定转速,满负荷工作时缸盖整体及底板温度分布云图,图3(b)中进排气门中间的黑色线框所在的区域即为鼻梁区,最高温度达到 290.98°C 。

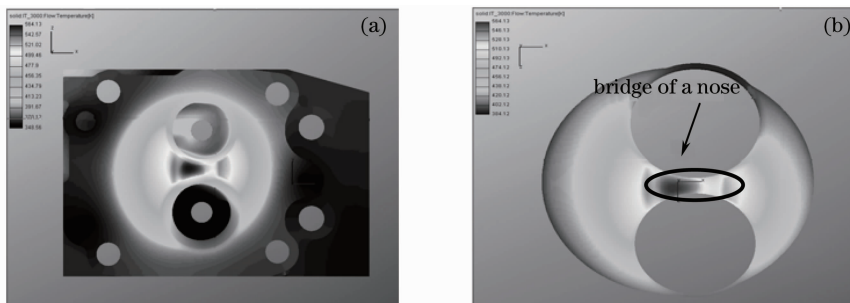


图3 缸盖温度场。(a)三维温度场,(b)底板温度场

Fig.3 Temperature field on cylinder head. (a) three-dimensional temperature field, (b) fire deck temperature field

2.3 缸盖热裂纹检测台架及实验

2.3.1 检测台架

缸盖内部一旦产生热裂纹,势必影响发动机工作,按照实际工作状态,在充分考虑缸盖各类传热边界的

基础上构建了如图 4 所示的检测台架^[3,4]。台架由缸盖、水套、水泵、冷却水箱(带加热丝)、加热器以及温度控制箱组成。缸盖通过 4 个缸头螺栓固定在水套上,水套为一环状空腔,结构与缸套水套的结构相仿。冷却水由水箱下端的出水口流入水泵,加压后进入水套下端,上行通过缸盖底部的三个水孔进入缸盖,自下而上冷却缸盖,最后由缸盖上端出水口经水管流回冷却水箱,周而复始地对缸盖进行闭式循环冷却。在缸盖与水套组成的空间内装有加热器,模拟缸内高温燃气,对缸盖底部进行辐射与对流换热,加热器的加热温度可由控制箱内的温控仪控制,同时冷却水的温度也可自行调节控制。

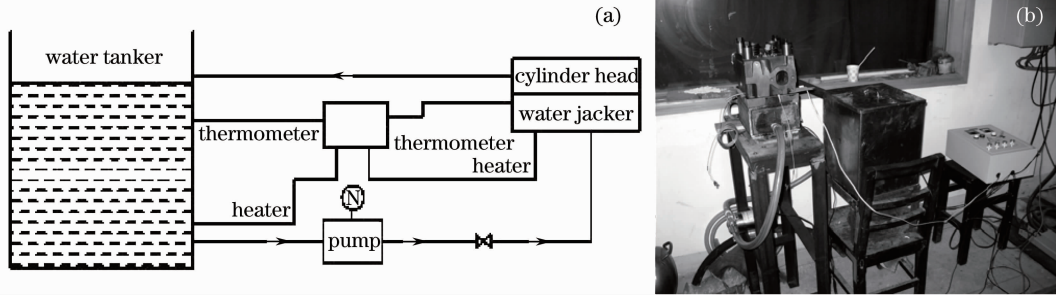


图 4 缸盖热裂纹检测台架。(a)检测台架框图,(b)检测台架系统

Fig. 4 Testing platform on detecting flaw in cylinder head. (a) frame, (b) system

2.3.2 缸盖温度实验

在该实验台架上,设定缸内加热温度为最高值 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却水温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (接近发动机实际冷却水状态),研究正常结构缸盖和裂纹缸盖表层温度分布^[5-8]。裂纹采用电化学方法在电火花机上加工而成,位于缸盖底板平面鼻梁区,喷油器座孔附近,沿缸盖高度方向扩展,宽度为 0.65 mm ,长度为 10 mm ,高度为 8 mm ,如图 5 所示。

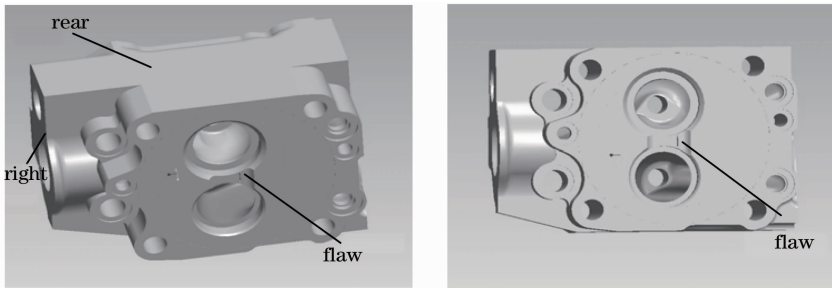


图 5 裂纹缸盖模型

Fig. 5 Three-dimensional model of flaw cylinder head

2.3.3 实验结果及分析

根据缸盖传热规律,结合缸盖鼻梁区裂纹的传热特点,确定了缸盖前、后、左、右四个外表层特征检测区域^[9,10],如图 6~9 中矩形区域所示。图中(a)对应正常结构缸盖,(b)对应裂纹缸盖。表 1 给出了各个特征表面温度最高值^[11]。

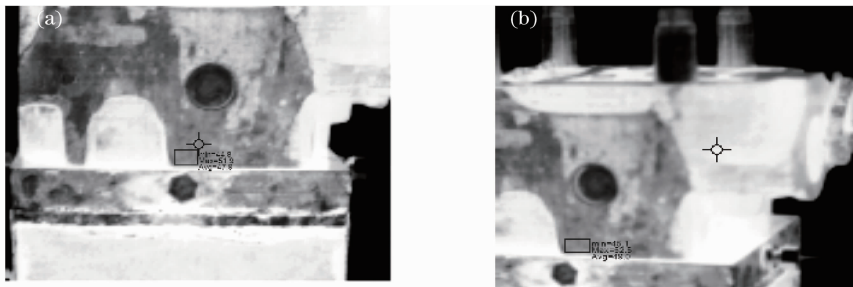


图 6 缸盖前表层温度场。(a)正常缸盖,(b)裂纹缸盖

Fig. 6 Temperature field on front surface of cylinder head. (a) normal, (b) flaw

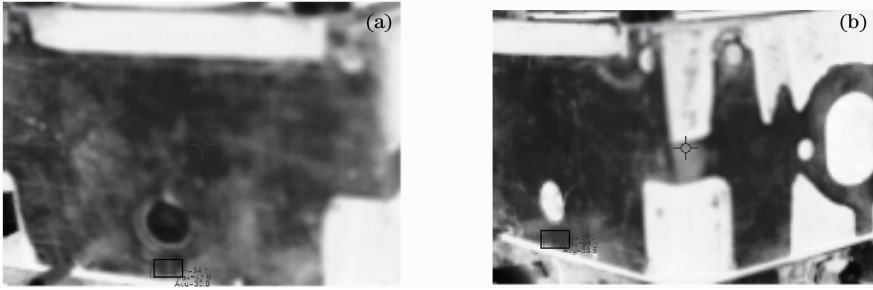


图7 缸盖后表层温度场 (a)正常缸盖;(b)裂纹缸盖

Fig.7 Temperature field on rear surface of cylinder head. (a) normal, (b) flaw

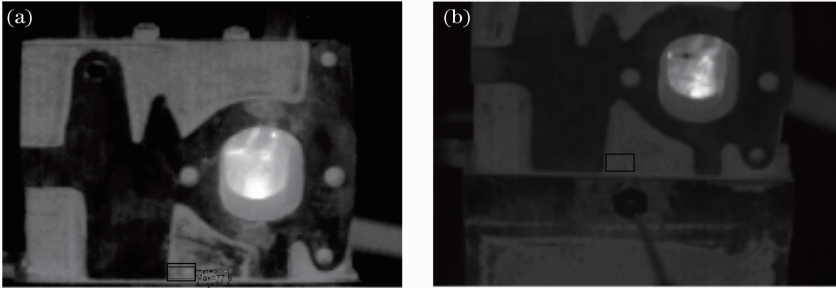


图8 缸盖左表层温度场。(a)正常缸盖,(b)裂纹缸盖

Fig.8 Temperature field on left surface of cylinder head. (a) normal, (b) flaw

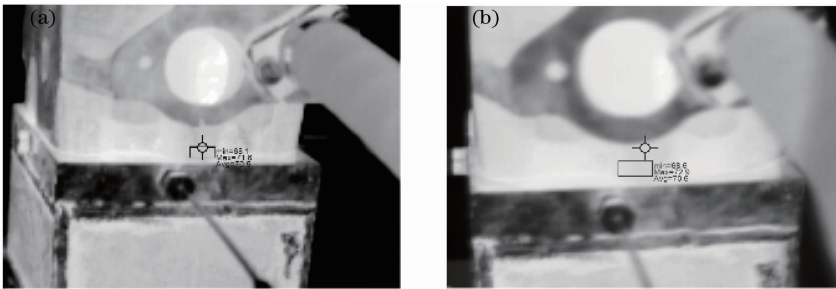


图9 缸盖右表层温度场。(a)正常缸盖,(b)裂纹缸盖

Fig.9 Temperature field on right surface of cylinder head. (a) normal, (b) flaw

表1 正常缸盖与裂纹缸盖表层特征区域最高温度值

Table 1 Maximum temperature values on four surfaces between normal and flaw cylinder head

Parameters	Maximum temperature on front surface / $^{\circ}\text{C}$	Maximum temperature on rear surface / $^{\circ}\text{C}$	Maximum temperature on left surface / $^{\circ}\text{C}$	Maximum temperature on right surface / $^{\circ}\text{C}$
normal	51.9	48.5	77.5	71.6
flaw	52.5	51.1	74.3	72.9

裂纹右侧区域为高温区,热量在此向四周扩散。该裂纹属于热阻型缺陷^[12],受其影响缸盖左侧的传热受到阻挡,而其他方向的传热增强,因此与裂纹扩展方向垂直的缸盖前后表面、与裂纹扩展方向平行的缸盖右侧表面特征区域内最高温度值升高,而左侧表面最高温度值降低,如图10所示。

3 结论

以某型柴油机缸盖为研究对象,针对实际工作中缸盖易产生热裂纹故障这一问题,提出了一种基于红外热

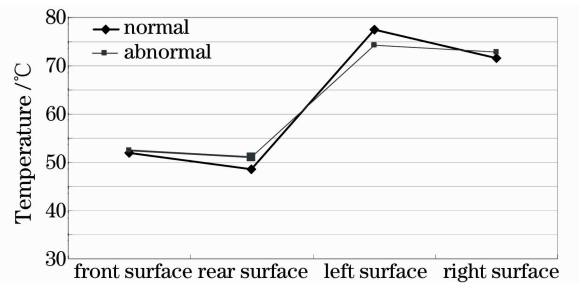


图10 正常缸盖与裂纹缸盖表层特征区域最高温度分布

Fig.10 Maximum temperature values on four surfaces between normal and flaw cylinder head

成像技术检测缸盖内部热裂纹的新方法,通过实验验证,结果表明:

1)在缸盖传热边界一定的情况下,缸盖表层温度场的变化能直接反映缸盖内部热裂纹缺陷,具体表现为传热受阻的左表面特征区域最高温度值降低,而其他特征表面由于传热量的增强使得表面上的温度升高,这与缸盖实际的传热规律是相符的。

2)工作中,通过检测缸盖外表层特征区域温度可实时监测缸盖内部热状态,该方法拓展了红外成像与探测技术的应用领域,同时也为实现缸盖热状态的在线监测提供参考。

参 考 文 献

- 1 Zhao Shibin, Zhao Jia, Zhang Cunlin *et al.*. Finite element simulation and analysis for type identification of defects under material surfaces in infrared thermal wave nondestructive detection[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(5): 559~563
赵石彬, 赵 佳, 张存林 等. 红外热波无损检测中材料表面下缺陷类型识别的有限元模拟及分析[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 559~563
- 2 Yu Zuoping, Lu Yu. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995
俞佐平, 陆 煜. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995
- 3 Ding Youfu, Shen Jingling, Zhang Cunlin. Analysis of infrared thermal wave nondestructive testing on flat bottom hole sample by the finite element method[C]. IRMMW, 2006, 324
- 4 Song Limei, Zhou Guanglin, Xu Kexin *et al.*. Three-dimensional defect detection based on single measurement image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1195~1200
宋丽梅, 周光林, 徐可欣 等. 基于单幅测量图像的三维缺陷检测技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1195~1200
- 5 Zhao Shibin, Zhang Cunlin, Wu Naiming *et al.*. Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 456~460
赵石彬, 张存林, 伍耐明 等. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 456~460
- 6 Xing Chunfei, Li Yanhong, Chen Dapeng *et al.*. Ultrasonic infrared technology for checking inner wall of metal pipeline[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(3): 465~468
邢春飞, 李艳红, 陈大鹏 等. 基于超声红外技术对金属管内壁缺陷的检测[J]. *应用光学*, 2009, **30**(3): 465~468
- 7 Li Xiaogang, Fu Dongmei. Infrared Thermographic Detecting and Diagnosis Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006
李晓刚, 付冬梅. 红外热像检测与诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006
- 8 S. Sahnoun, S. Belattar. Thermal non destructive testing study of a circular defect in plane structure[J]. *Brit. J. NDT*, 2003, **8**(8): 115~121
- 9 Yang Junwei, Hu Zhongxiang, Shi Xiaojun *et al.*. Error analysis of on-line temperature-field measurement by infrared CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1281~1284
杨军伟, 胡仲翔, 时小军 等. 红外 CCD 在线温度场测量误差分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1281~1284
- 10 Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li. A conductivity-based scheme for identification of inner pipe boundary from temperature measurement[J]. *AIAA J. Thermophys. Heat Tr.*, 2009, **23**(1): (in press)
- 11 Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li *et al.*. An algorithm study on identification of subsurface defect based on thermographic temperature measurement[J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2007, **28**(2): 304~306
范春利, 孙丰瑞, 杨 立 等. 基于红外测温的试件内部缺陷的定量识别算法研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, **28**(2): 304~306
- 12 Wang Yanwu, Yang Li, Sun Fengrui. Numerical simulation research of infrared nondestructive testing on the resistive and capacitive defects inside material[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8): 657~660
王艳武, 杨 立, 孙丰瑞. 材料内部热阻热容型缺陷的红外检测模拟研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(8): 657~660