

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201801435

柴油机活塞顶面热状态变化规律试验研究

文 均^{1,2}, 雷基林^{1*}, 于 跃¹, 王东方¹, 邓晰文¹, 李浙昆¹

(1.昆明理工大学 云南省内燃机重点实验室, 云南 昆明 650500; 2.成都银河动力有限公司, 四川 成都 610505)

摘 要:为了探究活塞顶面热状态变化规律, 以某型增压中冷柴油机为试验对象, 采用薄膜热电偶测温法和引线式传输系统对发动机过渡工况下活塞顶面测点瞬态温度场变化规律进行了试验测试研究, 并对试验数据计算得到标定功率工况点和最大转矩工况点活塞顶面不同位置测点温度值。研究表明: 在过渡工况下活塞温度场发生剧烈变化, 其中冷启动过程活塞温度变化幅度最大, 达到 180 °C; 其次是急加速过程活塞温度变化幅度达到 140 °C。急减速工况下活塞各测点温度先迅速升高, 约 20 s 时达到最大值, 4 个测点 A、B、C、D 分别为 346、341、314、343 °C, 然后温度缓慢降低, 约 60 s 后趋于稳定。在标定功率工况点, 活塞顶面最高稳定温度为 331 °C, 顶面各测点温差 31 °C; 在最大转矩工况点, 活塞顶面最高稳定温度为 336 °C, 顶面各测点温差 29 °C。

关键词:柴油机; 活塞; 热状态; 过渡工况; 瞬态温度场

中图分类号:TK422

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)04-0171-05

Experimental Research on Thermal State Change of Diesel Engine Piston Top Surface

WEN Jun^{1,2}, LEI Jilin^{1*}, YU Yue¹, WANG Dongfang¹, DENG Xiwen¹, LI Zhekun¹

(1.Yunnan Province Key Lab. of Internal Combustion Engines, Kunming Univ. of Sci. and Technol., Kunming 650500, China ;
2.Chengdu Galaxy Power Co. Ltd., Chengdu 610505, China)

Abstract: In order to explore the change rule of piston thermal state, a turbocharged intercooled diesel engine was treated as the research object. The temperature at designated point at the top surface of piston was measured by thin film thermocouple temperature measurement method and lead transmission system under transient operating process and the temperature values at different locations of the piston top surface at the calibrated power operating point and the maximum torque operating point are obtained by calculating the test data. The research results show that the temperature field of the piston changes dramatically during transient condition of the engine. The temperature of each measuring point at the top surface of piston rises sharply during the early stage of the cold start and rapid acceleration situations. The piston temperature variation is the largest up to 180 °C during the cold start process, and then its up to 140 °C during the rapid acceleration process. At the early stage of the rapid deceleration, the temperature of each measuring point of the piston rises rapidly, reaches the maximum at about 20 s. The maximum temperature of the four measuring points is 346, 341, 314, 343 °C respectively, and then slowly decreases to a stable value. At the rated power point, the maximum stable temperature of the top surface of the piston is 331 °C, and the temperature difference of the top surface is 31 °C. At the maximum torque operating point, the maximum stable temperature of the piston top is 336 °C, and the temperature difference of the top surface is 29 °C.

Key words: diesel engine; piston; thermal state; transient condition; transient temperature field

在城市道路行驶工况下, 车用发动机大部分时间处于启动、加速、减速等过渡工况, 稳定工况相对较少。在过渡工况下, 气缸内温度场处于周期性剧烈变化状态, 活塞作为发动机动力输出重要的零部件之一, 始终受到高温燃气带来的热冲击, 易造成活塞

低周疲劳失效^[1]。同时, 活塞顶面温度场分布不均导致的较大热应力和热变形使活塞顶面热状态变得十分复杂^[2], 给进一步分析与评估活塞可靠性和耐久性增加了难度。因此, 有必要对过渡工况下活塞瞬态热负荷变化规律以及稳定工况下活塞顶面温度场分布

收稿日期:2018-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51665021; 51366006)

作者简介:文 均(1969—), 男, 博士生, 高级工程师。研究方向: 内燃机活塞与缸套的开发。E-mail: 529626710@qq.com

* 通信联系人 E-mail: lejilin@sina.com

网络出版时间:2019-06-19 14:25:15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190619.1001.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

情况进行深入研究。

多年来,国内外学者多集中在对稳定工况活塞热负荷变化规律的研究^[3-6]。近年来,研究人员越来越重视过渡工况下活塞瞬态热负荷变化对活塞疲劳损伤和耐久性的影响,并针对过渡工况活塞瞬态温度场变化规律开展了广泛研究。Rakopoulos^[7]、原彦鹏^[8]、陈霄^[9]等采用有限元方法分别研究了活塞瞬态温度场的分布情况和变化规律。刘友^[10]不仅利用有限元方法分析了启动工况下活塞瞬态温度场的变化规律,还采用自行研制开发的瞬态温度场测试系统对动态温度场实时测量,为活塞温度场数值仿真优化提供了数据参考,但没有针对急加速、急减速过程活塞瞬态温度场的变化规律进行研究。

当前,活塞温度测试方法有硬度塞法和热电偶法。硬度塞测温法加工工艺简单、但只能对测点的某一工况最高温度进行测量,所以硬度塞测温法适用于稳定工况下活塞温度测试^[11-12]。热电偶测温法具有测量精度高、能在不同工况下连续测量的特点,不仅可以用于稳定工况下活塞温度场的测试,还可用于过渡工况活塞瞬态温度场的测量^[13-15]。

基于此,以一款增压中冷柴油机为试验对象,运用热电偶测温法对活塞顶面热状态变化规律进行试验测试研究,同时对冷启动、急加速、急减速工况下活塞顶面测点瞬态温度场变化规律和稳定工况下测点温度分布情况进行深入研究。所得结论可为进一步研究同类型活塞热负荷变化规律提供边界条件,也可作为柴油机活塞结构优化、改善性能提供理论依据。

1 试验机型

试验研究对象为一款立式直列四缸四冲程增压中冷柴油机,采用电控高压共轨燃油喷射系统、缩口ω型燃烧室活塞。试验机型具体参数见表1。

2 活塞瞬态温度场测试方案

活塞位于发动机内部,受到缸套和机体的包裹,工作中活塞头部受到高温燃气的冲击并处于高速往复运动状态,因此精确测量活塞头部顶面的瞬态温度一直是活塞瞬态热负荷研究的难题。试验采用热电偶测温法和引线式传输系统在冷启动工况、急加速工况、急减速工况、标定功率工况和最大转矩工况下对柴油机活塞顶面瞬态温度进行试验测量。

2.1 热电偶的选型

为测量活塞顶面瞬态温度场的变化,选用TT-K-30型薄膜热电偶传感器,其温度测量范围0~+1 250 ℃,热电偶容差为1.1 ℃或0.4%。热电偶焊点采用OMEGA无杂质焊点技术进行焊接成球形焊点,从而保证测

表 1 发动机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of engine

参数名称	参数
机体形式	立式、直列、水冷、四冲程、增压
缸径/mm×行程/mm	102×120
气缸数/个	4
气缸套类型	干式
燃烧室类型	直喷ω型
进气方式	增压中冷
总排量/L	3.92
压缩比	17.5
最低空载稳定转速/(r·min ⁻¹)	800
标定功率/kW	126
标定功率转速/(r·min ⁻¹)	2 600
最大转矩/(N·m)	600
最大转矩转速/(r·min ⁻¹)	1 300~1 900
活塞冷却方式	内冷油腔振荡冷却

量精度,并且裸露式可提高反应速度,响应时间低于5 ms。活塞温度场试验前,在可控恒温炉里对热电偶传感器进行了0~+400 ℃标定。表2为热电偶传感器具体技术参数。

表 2 热电偶传感器具体技术参数

Tab. 2 Technical parameters of thermocouple sensor

技术参数	数值	
标定范围/℃	0~+400	
变动物输出电压/V	0~4	
灵敏度/(mV·℃ ⁻¹)	10	
热电偶响应时间/ms	≤5	
输出电压误差/%	≤±0.4	
漂移	零漂/℃	≤±0.2
	满漂/%	≤±0.2
工作环境温度/℃	0~35	
工作环境湿度/%RH	30~90	
环境温度附加误差/℃	≤±0.3	
预热时间/min	≤15	
仪器连续工作时间/h	4	
电源/V(DC)	±(12±0.05)	
冷端补充电路/℃	0~50	

2.2 热电偶测点布置、安装与试验方案

选用发动机第1缸和第3缸活塞进行温度测试试验,每只活塞布置4个测点,分别位于活塞顶面(测点A)、燃烧室中心(测点B)、燃烧室底部(测点C)和活塞顶面(测点D),各测点均位于距活塞顶表面2 mm位置处,各测点布置简图如图1所示。考虑试验测试

过程较短,引线过程中并未引入辅助机构,仅在连杆两侧开槽,并将热电偶导线埋入连杆槽中,灌入CPS氧化铜,用高温无机胶进行固定。导线经油底壳和油尺孔导出到发动机外部。试验数据采用日本日置(HIOKI)公司LR8401-21温湿度数据记录仪,其采样频率10 ms。

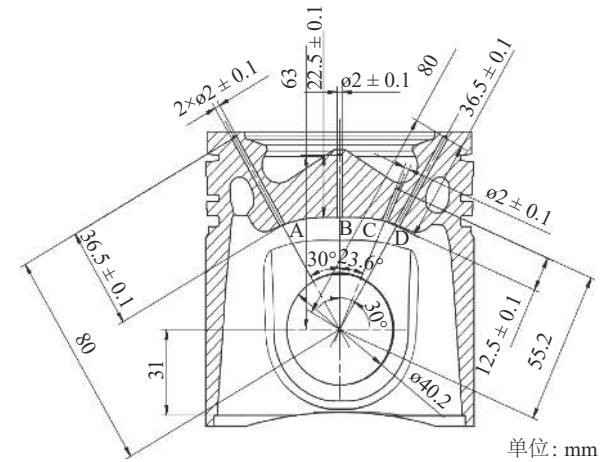


图1 活塞测点示意图

Fig. 1 Sketch map of piston measuring point

发动机过度工况试验测试按照国标《汽车发动机可靠性试验方法:GB/T 19055—2003》中规定的冷启动工况、急加速工况和急减速工况测试方法进行,如表3所示,每个过渡工况进行3次重复性试验。

表3 试验测试工况

Tab. 3 Test and test conditions

工况	工况定义
冷启动工况	0 r/min~怠速(800 r/min)
急加速工况	怠速(800 r/min)~标定功率工况(2 400 r/min)
急减速工况	标定功率工况(2 600 r/min)~最大扭矩工况(1 600 r/min)

3 活塞温度试验测试结果及分析

3.1 冷启动工况下活塞温度场试验分析

图2为冷启动工况下活塞各测点温度值变化曲线。从图2可以看出,由于活塞材料的热惯性使得活塞温度变化相对于冷启动时间(约3 s)出现一定程度的滞后现象。发动机冷启动后,活塞各测点温度急剧升高呈现指数增长关系,83 s后逐步趋于稳定,其中测点A和D稳定后平均温度基本一致为200℃,温度变化幅度为180℃,测点B和C稳定后平均温度基本一致为188℃,温度变化幅度为168℃。这是因为在冷启动开始之前活塞温度与环境温度相同,冷启动后受到活塞顶面突加的高温热源影响,活塞表面形成较大的温度梯度,对流换热系数迅速升高,活塞顶面热流密度迅速增大,导致活塞顶面测点在冷启动

过程初期温度迅速上升。随着冷启动过程的继续进行,在活塞材料热传导作用下,热量逐渐由活塞头部向活塞裙部传递,活塞测点温度梯度逐渐下降,传热速度变得缓慢,热流密度随之降低并趋于稳定,使活塞各测点温度也趋于稳定。

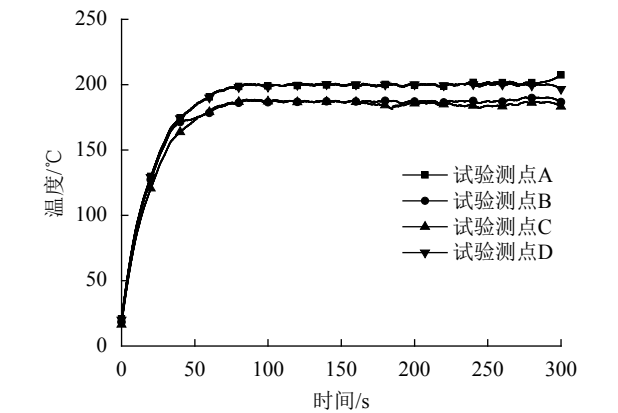


图2 冷启动工况下活塞各测点温度值变化

Fig. 2 Temperature variation of piston measuring points under cold start conditions

3.2 急加速工况下活塞温度场试验分析

图3为急加速工况下活塞各测点温度值变化曲线。

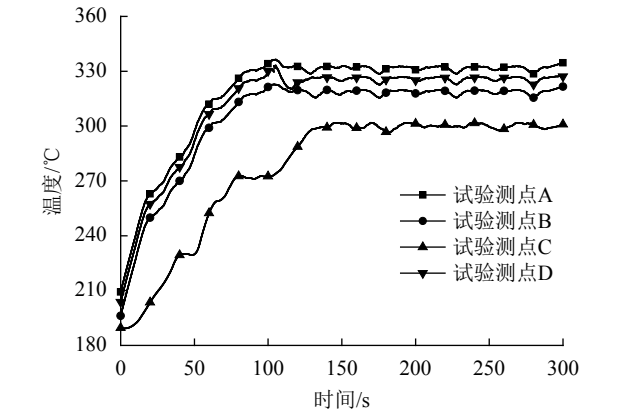


图3 急加速工况下活塞各测点温度值变化

Fig. 3 Temperature variation of piston measuring points under acceleration

从图3可以看出,急加速工况下活塞各测点温度值变化规律基本相同。各测点温度先迅速升高,101 s后测点A、B、D达到最大温度,分别为335、328、331℃,随后略有降低,到130 s以后基本趋于稳定分别为331、325、327℃;但测点C则一直处于升高状态,直到143 s达到最大值300℃并趋于稳定。急加速工况4个测点A、B、C、D温度变化幅度分别为135、140、112、131℃。这主要是因为,发动机由怠速工况迅速将转速和负荷提升到标定功率工况的过程中要增加喷油量,燃烧室内热负荷增大,燃气温度迅速上升,对流换热系数迅速升高,活塞热流密度增大,导致靠近活塞表面测点温度迅速升高。随后,由于热传导的

作用, 活塞表面测点温度梯度逐渐减小并趋于稳定, 传热速度变缓, 热流密度减小至趋于稳定, 使活塞各测点温度也趋于稳定。测点A、D为活塞顶面, 测点B为燃烧室中心凸起点, 3个测点均处于燃烧火焰高温区域, 因此温度较高。

3.3 急减速工况下活塞温度场试验分析

图4为急减速工况下活塞各个测点温度值变化曲线。从图4中看出, 急减速工况下活塞各测点温度值变化规律基本相同。活塞测点温度先迅速升高, 约20 s时, 各测点达到最大温度值, 测点A、B、C、D分别为346、341、314、343 ℃, 然后温度缓慢降低, 60 s以后, 各测点温度场虽然有小幅波动, 但从整体来看温度趋于稳定分别为336、331、307、332 ℃。急减速工况4个测点A、B、C、D温度变化幅度分别为10、10、7、11 ℃。这主要是因为, 发动机由标定功率工况迅速降低至最大转矩工况过程中, 发动机负荷迅速增加, 喷油量增大, 由于涡轮增压器的迟滞效应, 使发动机进气量短时间内无法迅速增加, 导致过量空气系数下降, 燃烧恶化, 缸内热负荷增加, 燃气温度升高, 进而使活塞表面对流换热系数增大, 活塞顶面热流密度增大, 导致活塞测点温度升高。之后, 由于排温升高, 涡轮增压器效率得到提升, 进气量增大, 由于发动机要维持在最大扭矩工况, 因此喷油量会减少, 此时, 缸内热负荷有所下降, 燃气温度逐渐降低至趋于稳定。

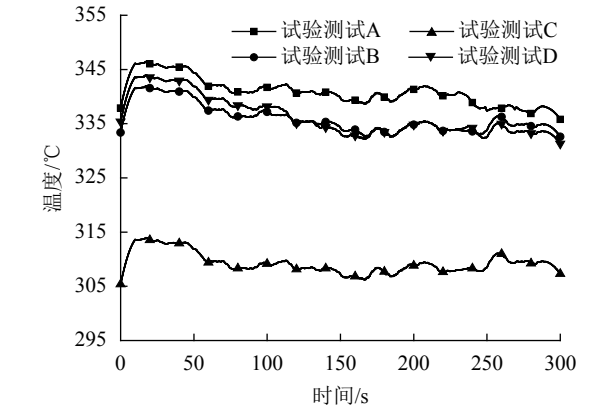


图 4 急减速工况下活塞各个测点温度值变化
Fig. 4 Temperature variation of piston measuring points at sudden deceleration condition

3.4 稳态工况下测点温度分布结果分析

发动机在冷启动、急加速和急减速试验过程中, 采用的水力测功机虽然因无法精确控制发动机转速而造成活塞温度值有明显波动, 但依然可以观察3种工况下活塞温度值的变化趋势, 并对试验数据计算得到标定功率工况和最大扭矩工况下活塞4个测点的温度值, 如表4所示。

表 4 标定功率和最大扭矩工况活塞测点稳定温度
Tab. 4 Piston measuring point temperature at calibrated power and sudden deceleration conditions

测点	位置	标定功率工况测点温度/℃	最大扭矩工况测点温度/℃
A	活塞顶面(主推力侧)	331	336
B	燃烧室中心	325	331
C	燃烧室底部	300	307
D	活塞顶面(副推力侧)	327	332

由表4分析可得: 当急加速至标定功率工况和急减速至最大扭矩工况时, 活塞的温度场具有相同的变化规律。在两种稳定工况点下, 测点A温度值最高, 测点C温度值最低, 最大温差分别达到31和29 ℃。这主要是因为活塞顶面直接受到高温燃气的冲刷, 且测点A靠近顶面喉口位置, 此处存在明显的棱角, 热阻大, 所以温度偏高。测点C位于燃烧室底部, 距离活塞内腔顶面较近, 并且靠近内冷油腔, 此处活塞表面过渡光滑, 没有棱角, 散热效果更好, 所以C点温度更低。

虽然测点A、D同样位于活塞顶面, 但在两种稳定工况点下, 这两处测点温度值依然存在差异(均相差4 ℃), 活塞顶面(主推力侧)A测点温度高于活塞顶面(副推力侧)D测点温度。其主要原因是活塞顶面(主推力侧)靠近排气出口, 在排气冲程时受到高温燃气的冲刷, 而活塞顶面(副推力侧)靠近进气口, 在进气冲程时顶面会受到低温空气的冷却, 所以测点A温度值高于测点D温度值。

4 试验误差分析

试验误差主要来源于测点安装孔距离活塞顶表面2 mm的加工误差、热电偶节点安装误差、热电偶微电压信号传输及采集误差等环节。为了提高试验测试精度, 减少试验误差, 主要采取了以下措施:

- 1) 试验测试过程中, 移除了工作环境内可能对热电偶信号产生干扰的大中型设备和用电器, 以减小热电偶微电压信号传输中的干扰。
- 2) 热电偶热节点一次性加工成便于装配的形状, 避免多次弯折, 减小因变形产生的误差。热电偶热节点安装时尽可能紧密贴紧测点孔壁面, 以减少热阻带来的测试误差。
- 3) 测点孔采用高精度数控机床进行加工, 以保证测点距活塞顶表面2 mm距离。

5 结 论

通过对柴油机活塞顶面热状态变化规律试验研

究,得到以下结论:

1)在柴油机过渡工况下活塞各测点瞬态温度变化幅度较大。其中冷启动过程活塞温度变化幅度最大,达到180℃;其次是急加速过程活塞温度变化幅度达到140℃。高的温度变化幅度会造成高的温度梯度和热应力,易造成活塞顶面热疲劳失效。因此,在活塞的设计开发中,需重点考虑发动机冷启动和急加速等变工况造成的活塞低周疲劳失效因素。

2)采用薄膜热电偶测温法和引线式传输系统能够有效测量活塞顶面热状态变化规律。通过试验测试获得了发动机冷启动、急加速和急减速过渡工况下活塞顶面温度的变化规律,可为活塞瞬态热负荷、热疲劳的仿真分析提供准确的边界条件和验证数据,同时也为活塞顶面热疲劳模拟试验的热冲击载荷提供参考。

参考文献:

- [1] Cerit M. Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(11): 3499–3505.
- [2] Xu Guangju, Li Mingdi, Zhao Yang, et al. Thermo-mechanical analysis of piston thermal stress and fatigue life for diesel engine[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2017, 38(2): 96–100. [许广举, 李铭迪, 赵洋, 等. 基于热机耦合的柴油机活塞热应力及疲劳寿命分析[J]. *内燃机工程*, 2017, 38(2): 96–100.]
- [3] 邹利亚. 利用硬度塞对发动机活塞工作温度的测试[A]. 2013中国汽车工程学会年会论文集[C]. 北京: 北京理工大学出版社, 中国汽车工程学会, 2013: 4: 1173–1176.
- [4] Lei Jilin, Shen Lizhong, Bi Yuhua, et al. Experimental research on piston temperature field of a turbocharged inter-cooled diesel engine[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2007(5): 41–44. [雷基林, 申立中, 毕玉华, 等. 增压中冷柴油机活塞温度场试验研究[J]. *内燃机工程*, 2007(5): 41–44.]
- [5] Deng Xiwen, Lei Jilin, Wen Jun, et al. Influences of piston structural parameters on heat transfer and temperature field of diesel engine piston[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017(10): 110–116. [邓晰文, 雷基林, 文均, 等. 活塞结构参数对柴油机活塞传热与温度场的影响分析[J]. *农业工程学报*, 2017(10): 110–116.]
- [6] Lei Jilin, Shen Lizhong, Yang Yongzhong, et al. Finite element analysis and temperature field measurement of 4100QBZ turbocharged diesel engine piston[J]. *Transactions of CSICE*, 2007, 25(5): 445–450. [雷基林, 申立中, 杨永忠, 等. 4100QBZ型增压柴油机活塞温度场试验研究及有

限元分析[J]. *内燃机学报*, 2007, 25(5): 445–450.]

- [7] Rakopoulos C D, Mavropoulos G C. Study of the steady and transient temperature field and heat flow in the combustion chamber components of a medium speed diesel engine using finite element analyses[J]. *International Journal of Energy Research*, 2015, 20(5): 437–464.
- [8] Yuan Yanpeng, Zhang Weizheng, Cheng Xiaoguo, et al. Study of piston's transient temperature-field distributing orderliness for heavy duty engines[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2005, 26(4): 35–38. [原彦鹏, 张卫正, 程晓果, 等. 高强度内燃机活塞瞬态温度场分布规律研究[J]. *内燃机工程*, 2005, 26(4): 35–38.]
- [9] Chen Xiao. The three-dimensional finite element analysis of transient temperature field & stress field on marine diesel engine piston[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. [陈霄. 船用柴油机活塞瞬态温度场与应力场三维有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.]
- [10] Liu You. Measurement & analysis of transient temperature field of piston of marine diesel engine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. [刘友. 船用柴油机活塞瞬态温度场测试与分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.]
- [11] Luo Qijiang, Tian Ye. Research of the temperature measurement method using the hardness plug[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2003(2): 19–21. [罗齐江, 田野. 硬度塞测温法研究[J]. *船海工程*, 2003(2): 19–21.]
- [12] Zhang Zhiyong, Huang Ronghua. Overview of engine piston temperature measuring methods[J]. *Design & Manufacture of Diesel Engine*, 2005, 14(1): 19–23. [张志勇, 黄荣华. 发动机活塞温度测量方法综述[J]. *柴油机设计与制造*, 2005, 14(1): 19–23.]
- [13] Li Yanfang. Design of thermocouple system for temperature measurement[J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(16): 97–99. [李彦芳. 热电偶测温系统设计[J]. *电子设计工程*, 2013, 21(16): 97–99.]
- [14] Dai Qiang, Zhu Tiezhu, Zhang Zhiqian. Study on transient temperature measurement of piston top surface of internal combustion engine[J]. *Acta Armamentarii*, 1986(4): 40–47. [戴强, 朱铁柱, 张志千. 内燃机活塞顶表面瞬态温度测试研究[J]. *兵工学报*, 1986(4): 40–47.]
- [15] Liu Jianmin, He Panpan, Wang Pukai, et al. FEA on transient temperature field of diesel engine piston[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2017, 31(2): 44–47. [刘建敏, 何盼攀, 王普凯, 等. 柴油机活塞瞬态温度场有限元分析[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2017, 31(2): 44–47.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Wen Jun, Lei Jilin, Yu Yue, et al. Experimental research on thermal state change of diesel engine piston top surface[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4): 171–175. [文均, 雷基林, 于跃, 等. 柴油机活塞顶面热状态变化规律试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(4): 171–175.]