

# 水平对置活塞发动机高空热平衡特性研究

周广猛<sup>1</sup>, 杨春浩<sup>1,2</sup>, 陈陆阳<sup>1</sup>, 刘瑞林<sup>1</sup>

(1.军事交通学院, 天津 300161; 2.海军工程大学, 武汉 430033)

**摘要:** **目的** 研究不同海拔大气压力特别是高空条件对水平对置活塞汽油机热平衡性能的影响。**方法** 利用内燃机高空模拟试验台进行不同海拔高度(0~7000 m)下水平对置活塞汽油机的热平衡试验, 测得不同海拔下排温、缸体表面温度等特征参数, 计算热流量分配特性, 并对比分析热流量分配特性随海拔高度的变化规律。**结果** 随海拔升高, 汽油机排温和缸体表面温度逐渐下降, 且海拔愈高, 缸体表面温度下降幅度愈大。汽油机有效功率随海拔升高逐渐下降, 余项损失百分比逐渐上升, 且在低转速下, 变化幅度增大。在6000 m模拟海拔、3000 r/min转速下, 汽油机有效热效率不到5%, 而余项损失达到了30%以上, 此时部分汽油甚至并未燃烧。**结论** 高空环境对水平对置汽油机热平衡性能造成严重影响, 成为制约其高海拔性能恢复的关键因素。

**关键词:** 汽油机; 水平对置发动机; 热平衡; 大气压力

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.011

**中图分类号:** TJ07; TK417

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)10-0058-05

## High-altitude Thermal Balance Characteristics of the Boxer Piston Engine

ZHOU Guang-meng<sup>1</sup>, YANG Chun-hao<sup>1,2</sup>, CHEN Lu-yang<sup>1</sup>, LIU Rui-lin<sup>1</sup>

(1.University of Military Transportation, Tianjin 300161, China; 2.Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**ABSTRACT: Objective** To study on effects of atmospheric pressure at different altitude, especially effects of high-altitude conditions on thermal balance performance of boxer engine. **Methods** The thermal balance test of the boxer engine at different altitude (0-7000m) was carried out on a high altitude simulation test platform for the internal combustion engine. The characteristic parameters such as exhaust temperature and cylinder surface temperature were measured. The heat flux distribution characteristics were calculated. And the variation law of heat flux distribution with altitude was compared and analyzed. **Results** With the increase of altitude, both the exhaust temperature and the cylinder surface temperature of the gasoline engine gradually decreased. The higher the altitude was; the greater the drop in the cylinder surface temperature was. The effective power of the gasoline engine gradually decreased with the increasing altitude. The percentage of the residual loss gradually increased. The variation range increased at low speed. At the simulated altitude of 6000m and at 3000r/min, the effective thermal efficiency of the gasoline engine was less than 5%, while the percentage of residual loss reached more than 30%. Part of the gasoline didn't even burn at this time. **Conclusion** The high altitude environment has a serious influence on the thermal balance performance of the boxer engine, which is one of the key factors to restrict the recovery of its high altitude performance.

**KEY WORDS:** gasoline engine; boxer engine; thermal balance; atmosphere pressure

收稿日期: 2017-06-02; 修订日期: 2017-07-03

作者简介: 周广猛(1984—), 男, 山东邹城人, 主要从事动力机械环境适应性研究。

通讯作者: 刘瑞林(1963—), 男, 山东胶南人, 教授, 主要从事动力机械环境适应性研究。

无人机已广泛应用于军事、农业、科学研究等领域,具有重要的军事和国民经济意义。当前我国研制了大量的无人机产品,但高性能无人机发动机研发滞后,亟待开展相关研究工作。无人机发动机一般为对置活塞式汽油机,由于随海拔的升高,大气压力降低,造成可使用的新鲜空气充量减少,活塞式汽油机在高空工作时,汽油机的动力性、经济性下降明显,热负荷增大<sup>[1-5]</sup>,内燃机性能的变化进而会影响到无人机的高空飞行性能。在受高原环境影响的诸多性能中,热平衡性能反映发动机高海拔热负荷情况,能够分析不同海拔环境条件对内燃机热流量分配的影响,从而为有针对性地改进发动机的性能提供指导,受到了广泛的关注<sup>[6-7]</sup>。缸体、缸盖温度、排温等热状态在高空环境下的变化均会对发动机的可靠性和使用寿命造成影响<sup>[8-10]</sup>。笔者以某型水平对置活塞汽油机为研究对象,开展了采用模拟试验的方法进行不同海拔高度(0~7000 m)下水平对置活塞汽油机的热平衡试验,探究不同海拔下排温、冷却水温度和缸体表面温度等发动机热负荷特征参数,以及热流量参数随海拔的变化规律。

## 1 试验

### 1.1 试验系统

试验系统是基于文献[4]内燃机高原环境模拟试验台改造而成,改造后的试验台由进排气模拟系统、高空冷却环境模拟系统、发动机状态监测系统以及控制系统等组成。进排气模拟系统采用进气节流,排气抽真空的方式能够实现0~7000 m海拔航空发动机大气压力的模拟<sup>[11-12]</sup>。高空冷却环境模拟系统主要采用风机强制空气对流和冷却液强制对流的方式模拟发动机高空下的冷却环境。发动机的状态监测系统,共包含了6个温度参数监测点、3个压力参数监测点、3个流量参数监测点。在保证测取汽油机高空性能参数的同时,能够对进排气、冷却水、滑油以及缸体的各参数进行实时监控,有助于水平对置活塞式汽油机热平衡性能的监控<sup>[13]</sup>。发动机控制系统采用洛阳凯迈公司的FST2控制系统。试验对象为某四缸、四冲程、增压、水冷和空冷双冷却系统、水平对置化油器式汽油机,排量为1.2 L,压缩比为9。

### 1.2 试验方案

无人机在高空飞行时主要按照全负荷工况进行,分别进行对置活塞汽油机在0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 km等8个模拟海拔下的外特性试验。研究发动机在0~7000 m模拟全负荷工况(100%节气门开度)下,热负荷和热流量分配随海拔的变化情况。

表1 不同模拟海拔大气压力

海拔高度/m	大气压力/kPa	海拔高度/m	大气压力/kPa
0	98.1	4000	58.1
1000	86.4	5000	50.6
2000	76.0	6000	43.9
3000	66.6	7000	37.9

## 2 试验结果及分析

### 2.1 对置活塞汽油机高空热负荷特性

#### 2.1.1 高空排温特性

不同海拔高度下发动机转速对排温的影响如图1所示。从图1可见,不同转速下发动机排温随海拔的升高而降低,且下降幅度随海拔升高而增大。海拔每升高1000 m,汽油机各缸平均排温下降23.4 °C。其中,海拔每上升1000 m,在0~3000 m海拔下,各缸平均排温下降18.7 °C;在3000~7000 m海拔下,各缸平均排温下降31.9 °C。不同海拔下,发动机排温随转速的升高而接近线性增大。发动机随海拔上升而下降,同普通涡轮增压柴油机排温随海拔的增高后燃增大而导致的排温随海拔的升高而增大不同<sup>[5]</sup>,排温随海拔的升高而减小主要有两方面原因:一方面随海拔的升高,大气密度降低,导致环境压力与喉管处压力差降低,真空度减小,化油器供油量下降,海拔每升高1000 m,发动机的供油量减少2.7%。进一步造成燃烧燃料释放的热量减少,造成排温随海拔的升高而下降;另一方面,缸内进气量随海拔升高的减小,造成空燃比大幅降低,缸内燃烧不充分,部分燃料甚至没有燃烧直接排入大气中,导致高海拔排温降幅大于低海拔,这也是发动机余项损失增大的主要原因。

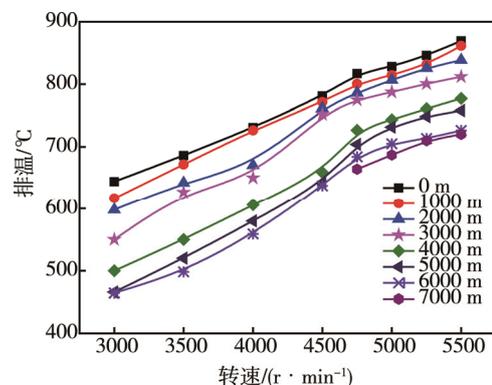


图1 不同海拔下发动机转速对排温的影响

#### 2.1.2 对置活塞汽油机高空冷却水温度特性

不同海拔下冷却水出口温度随转速的变化如图2所示。由图2可知,随着海拔的升高,冷却水出口温

度呈现先增大后降低的趋势。在 0~4000 m 海拔下,汽油机冷却水出口温度随海拔上升而增大,海拔上升 1000 m,冷却水出水温度平均上升 3.7 °C;在 4000~6000 m 海拔下,冷却水出口温度随海拔上升而下降,海拔上升 1000 m,冷却水出口温度平均下降 8 °C。这主要是由于 0~4000 m 海拔下,随海拔的上升,发动机缸内空燃比下降,燃烧恶化,结合缸内充量物质减少造成缸内燃烧温度升高,缸盖和水套的温度上升,导致冷却水温度升高。在 4000~6000 m 海拔下,汽油机缸内虽然存在后燃现象,但由于海拔较高,化油器供油量下降的同时,缸内空燃比进一步下降,燃油放热量大大降低,其对缸盖温度的影响大于后燃对缸盖温度的影响,导致冷却水温度下降。进一步可见,在高转速工况下冷却水出口温度变化的幅度要小于低转速工况。这是因为在高转速工况下,增压器的压比增大,缸内燃烧质量要好于低转速工况下的燃烧质量,汽油机缸盖温度随海拔升高而变化幅度较小。

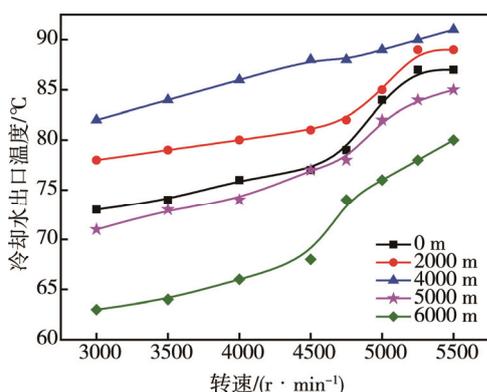


图 2 不同海拔下发动机冷却水出口温度随转速的变化

### 2.1.3 对置活塞汽油机高空缸体表面温度特性

汽油机缸体表面温度表征着汽油机的缸体热负荷和缸内燃烧状况,其表面温度采用点温器直接测量。不同海拔下缸体表面温度随转速的变化如图 3 所示。可以看出,随着海拔的升高,缸体表面温度逐渐下降,且海拔越高,缸体表面温度下降幅度越大。与 0 m 海拔相比较,2000,4000,6000 m 海拔下缸体的表面温度分别平均下降 4.2, 12.7, 33.3 °C,海拔每升高 1000 m,缸体表面温度平均下降 5.5 °C。这是因为在高海拔下,汽油机缸内燃烧不充分,后燃严重,导致缸内燃油燃烧放热量大幅度降低,缸体表面温度下降明显。同时可以发现,6000 m 海拔时,缸体表面温度随转速的变化有一定的奇异性,主要表现为在 6000 m 海拔、3000 r/min 低转速下缸体表面温度急剧下降(达 25.5 °C),在 3500~4750 r/min 转速下缸体表面温度随转速升高而升高的速率明显增大。其主要原因是该增压器是普通机械增压器,无法与不同工况和海拔实现良好匹配,6000 m 海拔低转速下增压器

效率急剧下降。随发动机转速的升高,涡轮增压器的膨胀比增大,增压器转速增加幅度增大,致使燃烧放热增多,造成缸体表面温度升高速率增大。对置活塞汽油机实际应用于无人机飞行时,若缸体表面温度过低,说明缸内燃烧不佳,燃油放热量降低。此时汽油机的运行工况应尽量避免低转速区域,使得汽油机的缸体表面温度处于合理的范围内。

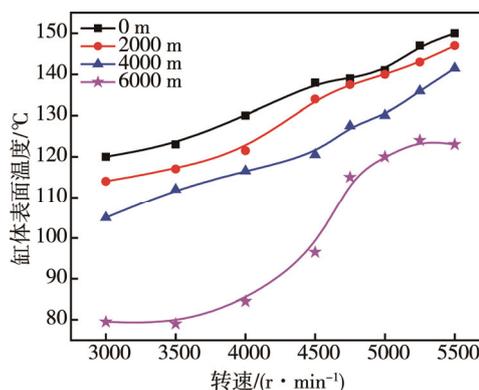


图 3 不同海拔下缸体表面温度随转速的变化

海拔越高,缸体表面温度下降幅度越大。海拔上升 1000 m,在 0~3000 m 海拔下,排温、缸体表面温度分别平均下降 18.7 °C 和 7.9 °C;在 3000~7000 m 海拔下,排温、缸体表面温度分别平均下降 31.9 °C 和 21.2 °C。

## 2.2 对置活塞汽油机高空热流量分配特性

通过不同海拔下水平对置发动机热流量分配情况,能够有助于摸清大气压力特别是高空环境条件对水平对置汽油机高空工作过程的影响特点,为其性能的改善提供条件和基础。图 4 为 3000,4000,5500 r/min 下热流量分配随海拔的变化规律。由图 4 可见,同一转速下,随着海拔的升高,汽油机的有效功率逐渐下降,余项损失逐渐上升,且在低转速下,变化幅度增大。海拔上升 1000 m,在低转速工况下,有效功率下降了 4%,余项损失上升了 3.5%;高转速工况下有效功率平均下降了 1.3%,余项损失上升了 1.2%。冷却水和冷却空气散热量随海拔的变化呈现先上升后下降的趋势,这与其散热量的变化规律一致。

在同一海拔下,随转速的上升,有效功率、冷却系统散热量与废气带走热量逐渐增加,余项损失逐渐减小。在低海拔范围内,有效功率和余项损失所占百分比随转速增加变化不大,但在高海拔范围内,转速为 3000 r/min 时,有效功率所占百分比很小,甚至不到 5%,而余项损失百分比达到了 30% 以上。这说明此时汽油机缸内一部分汽油燃烧极为不充分,甚至没有燃烧,造成燃油热量损失急剧增大。这主要是因为高海拔范围内,汽油机转速较低时,废气涡轮增压器进气补偿效果不佳,缸内进气量太少,一部分燃油

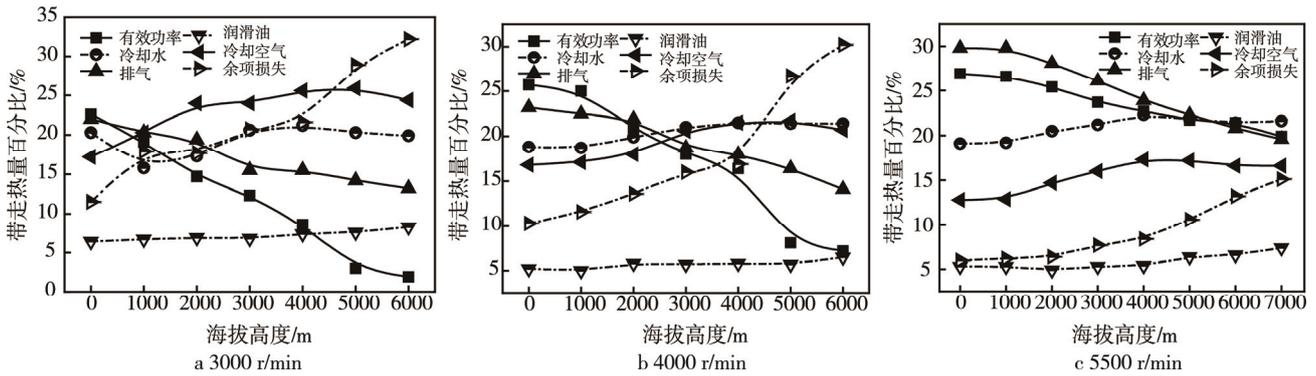


图 4 不同转速下热流量分配随海拔高度的变化规律

未燃烧仍以碳烟甚至汽油蒸汽的形式排出。

从图 4 进一步可以看出，冷却水和排气带走的热量随海拔高度的变化而变化，冷却水带走的热量主要由进出水处温差和冷却水流量所决定，反映了汽油机工作时缸盖处的热负荷情况以及冷却系统的散热能力。图 5 给出了不同转速下冷却水带走的热量随海拔高度的变化规律。由图 5 可见，冷却水带走的热量随海拔的增加先上升后下降，最大散热量集中于 4000 m 海拔、高转速工况区域内。这是由于冷却水出口温度随海拔高度的升高先升高后下降，造成冷却水进出口温差随海拔的增加先下降后上升，且在 4000 m 海拔下，冷却水进出口温差最大。同时由图 4 可见，冷却水的散热量随转速的增加而增大。这是因为转速增加，汽油机供油量增大，缸内放热量增大，导致缸盖热负荷增大。同时转速增加，冷却水泵转速随之上升，冷却水流量增大。

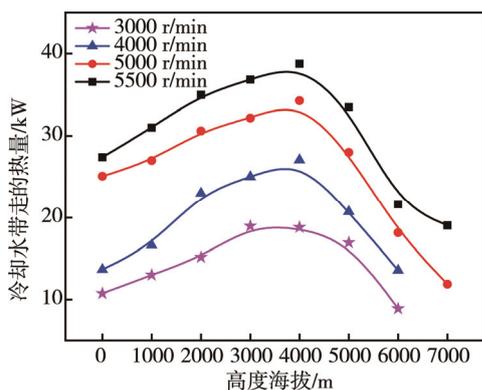


图 5 不同转速下冷却水带走热量随海拔高度的变化规律

排气带走热量的大小主要与排气的温度以及排气流量有关，它反映了汽油机缸内燃烧质量以及发动机的热负荷。图 6 为不同转速下排气带走热量随海拔高度的变化规律。从图 6 可见，排气带走的热量随海拔高度的增高而降低，随转速的升高而增大，在标定转速下，海拔平均每升高 1000 m，发动机排气带走的热量降低 6.4%。排气带走热量随海拔的升高而下

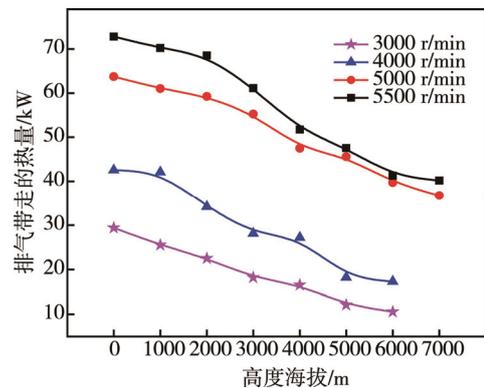


图 6 不同转速下排气带走热量随海拔高度的变化规律

降，一方面由于排气温度随海拔的升高而降低，另一方面由于进气量和燃油消耗量随海拔的升高同时降低造成排气流量随海拔高度的升高而下降，两方面原因共同造成了排气带走的热量随海拔高度的升高而降低。

### 3 结论

1) 随海拔升高，汽油机排温和缸体表面温度逐渐下降，且海拔越高，缸体表面温度下降幅度越大。海拔每上升 1000 m，排温平均下降 23.4 °C，缸体表面温度平均下降 5.5 °C。

2) 同一转速下，随着海拔的升高，汽油机有效功率百分比逐渐下降，余项损失百分比逐渐上升，且在低转速下，变化幅度增大。海拔上升 1000 m，在低转速工况下，有效功率百分比下降了 4%，余项损失百分比上升了 3.5%；高转速工况下有效功率百分比平均下降了 1.3%，余项损失百分比上升了 1.2%。

3) 冷却水带走的热量随海拔增加先上升后下降，最大散热量集中于 4000 m 海拔、高转速工况区域内，排气带走的热量随海拔高度的增高而降低，随转速的升高而增大。在标定转速下，海拔平均每升高 1000 m，发动机排气带走的热量降低 6.4%。

## 参考文献:

- [1] 张志强, 何勇灵, 韩志强, 等. 高原环境对车用柴油机的影响分析及对策[J]. 装备环境工程, 2009, 6(2): 27-31.
- [2] 周广猛, 刘瑞林, 许翔, 等. 高原环境对车辆动力性的影响及动力提升措施[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 45-51.
- [3] 许翔, 周广猛, 郑智, 等. 高原环境对保障装备的影响及适应性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 100-103.
- [4] 周广猛, 刘瑞林, 董素荣, 等. 高压共轨柴油机高海拔(低气压)燃烧特性[J]. 内燃机学报, 2012, 30(3): 220-226.
- [5] 刘瑞林, 周广猛, 许翔, 等. SOFIM 电控共轨柴油机高海拔性能模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(4): 303-308.
- [6] 王飞. 航空活塞发动机典型零件的热固耦合-强度有限元分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [7] 董素荣, 许翔, 任晓江, 等. 自然吸气柴油机高海拔(低气压)热平衡试验研究[J]. 热科学与技术, 2011, 10(4): 365-370.
- [8] GOCMEZ T, PISCHINGER S. A Contribution to the Understanding of Thermo Mechanical Fatigue Sensitivities in Combustion Engine Cylinder Heads [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(4): 461-477.
- [9] SALAH M H, FRICK P M, WAGNER J R, et al. Nonlinear-control Strategy for Advanced Vehicle Thermal Management Systems[J]. Control Engineering Practice, 2009(17): 609-621.
- [10] JIAN Ye, JIM C, DANIEL D A. Coolant Flow Optimization in a Racing Cylinder Block and Head Using CFD Analysis and Testing[C]. SAE013542, 2004.
- [11] 刘瑞林. 柴油机高原环境适应性研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
- [12] LIU Rui-lin, ZHANG Zhong-jie, DONG Su-rong, et al. High-altitude Matching Characteristic of Regulated Two-stage Turbocharger With Diesel Engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2017, 139(9): 094501-094501-9.
- [13] 刘瑞林, 林春城, 董素荣, 等. 柴油机二级可调增压系统高海拔标定试验[J]. 内燃机学报, 2016, 34(6): 543-548.