

文章编号:1000-8055(2009)10-2255-05

风冷航空发动机的活塞形状恢复研究

赵立峰, 李云清, 王海鹰, 成传松, 何 鹏
(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对高空环境下的风冷发动机活塞的散热及变形进行了研究, 针对高空环境下的活塞温度难以测量的问题, 采用接触对、接触热阻的方法对有限元耦合模型进行温度场分析, 对温度载荷和燃气压力载荷共同作用下的活塞变形进行研究. 对于设计良好的活塞, 机械载荷下的变形能够有效补偿热变形对活塞形状的影响, 实现活塞的形状恢复, 分析了环境、结构因素对活塞散热及多场变形的影响规律, 为设计和优化高空环境下的活塞提供依据.

关 键 词: 风冷; 高空; 活塞; 接触热阻; 热固耦合

中图分类号: V233. 1

文献标识码: A

Piston reshapes study for the air-cooled engine of aerial vehicle

ZHAO Li-feng, LI Yun-qing, WANG Hai-ying, CHENG Chuan-song, HE Peng

(School of Transportation Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The piston's thermal field and deformation of air-cooled engine were studied to solve the problem that piston temperature is difficult to measure in high-altitude environment. The temperature field and thermal deformation of piston were calculated by thermal-solid coupling FEM (finite element method); the contact pair and thermal resistance were applied to couple the multipart. The loads of temperature and gas pressure were applied to the piston. The deformation under gas pressure can be helpful to reshape the piston when the piston structure is designed specially; so the conclusion provides the practical reference for further improving the structure and optimizing the design of piston at high altitude.

Key words: air-cooled; high altitude; piston; contact resistance; thermal-solid coupling

航空活塞发动机工作在高空环境下, 特别是中高空、长航时的发展对动力系统的要求更为苛刻. 高空下的温度、大气压力、密度等与地面环境相比有不同程度下降, 大气环境的变化对活塞汽油机的工作过程有较大影响^[1]. 活塞的热变形与应力是导致磨损、拉缸等的重要因素, 分析活塞热应力和热变形^[2], 为设计与加工活塞外形轮廓提供依据, 减少活塞漏气量, 避免拉缸等现象发生. 目前已有的研究主要是对活塞进行温度场与热应力分析, 对活塞在温度和机械载荷作用下的应力进行分析^[3-4], 对活塞环-气缸套润滑和导热进行

了研究^[5]. 现有的活塞分析一般为水冷发动机活塞, 多采用单活塞简化模型, 而对风冷发动机活塞的热分析很少见到. 高空工作状态下的活塞热负荷及变形情况对于提高活塞可靠性、延长发动机寿命有重要意义.

文中采用耦合模型, 能够全面反映活塞组的传热规律, 而且边界条件的确定相对简单. 对小型风冷活塞发动机在地面和高空环境下的活塞温度场、热变形进行计算, 热负荷耦合机械载荷的方式进行多场研究, 同时与地面温度实验测试数据进行对比, 进一步验证边界条件. 对温度和燃气压力

收稿日期: 2009-01-04; 修订日期: 2009-07-07

作者简介: 赵立峰(1978-), 男, 吉林辽源人, 博士生, 主要从事内燃机工作过程及集成优化方面研究.

载荷变化的情况下的活塞变形规律进行研究。

1 建立模型

研究对象为航空活塞发动机,基本参数如表 1 所示;活塞整体 CAD (computer aided design) 模型如图 1 所示,由活塞、缸体、活塞环组成。在活塞几何模型基础上,进行几何模型的有限元离散,在活塞顶面、环区等部位采用局部加密方法处理,以便提高精度。同时需要对热密度大的区间进行了网格加密处理,以便捕捉到较大的热梯度。细化活塞模型的油孔、导油槽等形状突变的部位,关注特殊部位的应力集中。

表 1 发动机基本参数
Table 1 Engine parameters

参数	参数说明
形式	水平对置、四冲程
缸数×缸径×冲程	4×79 mm×61 mm
压缩比	10.5
冷却方式	缸盖水冷、缸体空冷
标定转速/(r/min)	4500

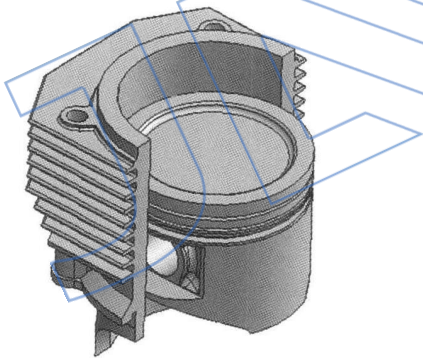


图 1 活塞和缸体 CAD 模型
Fig. 1 CAD model of piston and body

2 多区域边界条件

活塞的热交换参数主要有:活塞顶的导热率及燃气温度;活塞环岸、环槽及裙部表面的传热率;活塞顶的底面、活塞销内侧的传热率与气体介质温度^[6]。

2.1 活塞顶燃气侧换热边界条件的确定

活塞顶始终暴露在燃气中,边界条件由缸内燃气温度以及燃气同顶面之间的对流传热系数决定,其中氧化膜热阻对活塞整体温度场的影响很小。地面环境下活塞的热负荷由实测示功图计算

而来,采用循环热力学方法计算出气缸内的瞬时燃气温度 T ;高空环境下的示功图是通过BOOST计算得到。

温度曲线如图 2 所示,图 3 为采用 WOS-CHNI1978 模型计算得到传热系数曲线。瞬态分析可以直接使用图 2 和图 3 中的数据作为边界条件,稳态分析则要计算平均传热系数和平均温度。

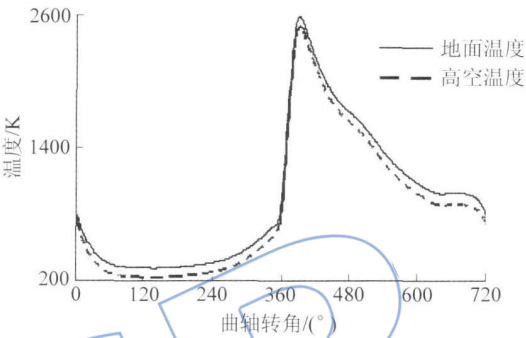


图 2 燃气温度
Fig. 2 Gas temperature in chamber

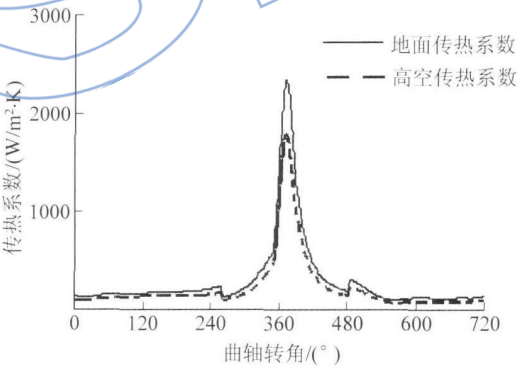


图 3 缸内传热系数
Fig. 3 Heat exchange coefficient

2.2 活塞侧面与冷却空气换热关系的确定

活塞通过活塞环和活塞裙部把热量传给气缸壁,经过气缸壁传递给冷却介质空气,活塞裙部与气缸间的油膜作为热阻加载。

2.2.1 缸套与冷却空气的传热系数 h_w

冷却空气与缸体表面之间的换热是对流换热。换热量除和缸套本身的结构形式和冷却空气的物性参数有关外,受周围流场分布影响。帕伊传热系数 h_w 经验公式如下:

$$h_w = 1.372(1 + 0.0075 T_m) \eta_f v_f^{0.73} \tag{1}$$

式中 T_m 为散热片和空气绝对温度的平均值; v_f 为空气的平均流速; η_f 为散热片的散热效率。

2.2.2 接触热阻的确定

接触热阻与表面加工精度、接触压力、材料物性等因素相关,热流密度较高时,热阻必须考虑,否则计算温度偏低.热阻公式如下:

$$\frac{1}{R_e} = 8 \times 10^{-3} \bar{\lambda} \left[k \frac{p_e}{3\sigma} \right]^{0.86} \quad (2)$$

式中 p_e 为接触压力; σ 为两接触物体中强度较低材料的强度极限; k 为与加工光洁度有关的系数,计算中油膜的影响归于此系数; $\bar{\lambda}$ 为当量导热系数,它与两接触物体材料的导热系数 λ_k, λ_c 的关系如下:

$$\bar{\lambda} = \frac{2\lambda_k \lambda_c}{\lambda_k + \lambda_c} \quad (3)$$

2.3 活塞裙内腔与油雾的传热系数

活塞裙内腔和油雾的换热比较复杂,还没有精确的换热关系式,根据热平衡原理,在稳态流入的热量等于流出的热量,结合傅里叶公式和牛顿公式计算出内腔的传热系数

$$h = \frac{\lambda_b (T_{w1} - T_{w2})}{\delta_p (T_{w1} - T_{oil})} \quad (4)$$

式中 h 为活塞腔与油雾的传热系数; λ_b 为活塞裙部材料的导热系数; δ_p 为活塞顶中央的壁厚; T_{w1} 为活塞顶的温度; T_{w2} 为活塞裙部内腔的温度; T_{oil} 为活塞内腔油雾温度.

3 活塞的三维温度场分析

在有限元软件 FIRE 中进行瞬态热分析,得到活塞的温度场.如图 4 所示,在额定功率下,活塞顶部表面最高温度为 497.6 K,位于活塞顶部沉坑中心处;活塞侧面的温度,沿轴向从上升到下降,第 1 环槽处温度约为 413 K 左右,活塞销座处最高温度约为 393 K,内腔表面最高温度约为 433 K.由于销座和销座切削平面的存在,活塞整体温

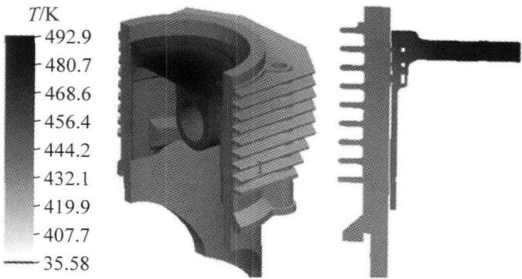


图 4 活塞温度场(地面)

Fig. 4 Temperature field of piston and body (ground)

度呈非轴对称分布,裙部温度呈非均匀分布.如图 5 所示,活塞环及环岸处的温度梯度较大,其中温度梯度最大达到 15×10^4 K/m,经第 1 环导出的热量多、温度高,所以设计中应该重点保证该处热梯度不能过大,温度不能过高,避免焦结等现象出现.

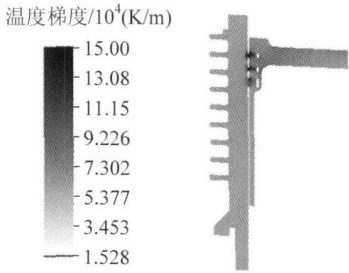


图 5 温度梯度(地面)

Fig. 5 Temperature gradient of piston and body (ground)

高空环境下的大气密度、温度降低,尽管采用了增压措施,但是缸内进气的压力、湿度、混合浓度等都发生了明显变化,导致燃烧的温度、缸内压力等下降;而且高空下风冷发动机的缸体散热能力降低.如图 6 所示,高空环境下燃气燃烧温度及传热系数会降低,活塞的温度明显降低,活塞顶面温度为 465 K.高空环境下要防止冷却过度,需要保证燃烧的顺利进行;活塞温度整体降低,活塞各个区域的热流量比例发生改变,如图 7 所示,进而对活塞的热变形产生影响.

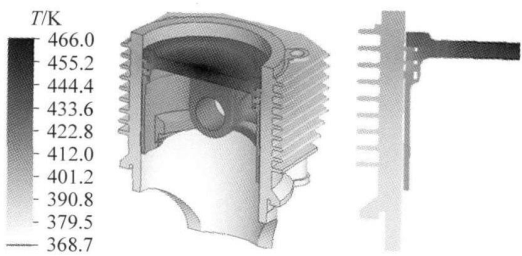


图 6 活塞温度场(高空)

Fig. 6 Temperature field of piston and body (high altitude)

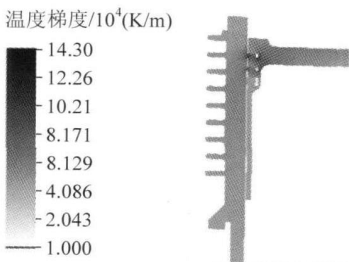


图 7 多组件温度梯度(高空)

Fig. 7 Temperature gradient of multipart (high altitude)

采用易熔合金法测量活塞温度,利用特定成分的合金具有特定熔点,当合金熔化后,表明此零件在嵌入合金位置的温度至少已达到该合金的熔点.实验测量的活塞温度如图 8 所示,计算得到的温度场与测试吻合,证明了选用的边界条件合适.

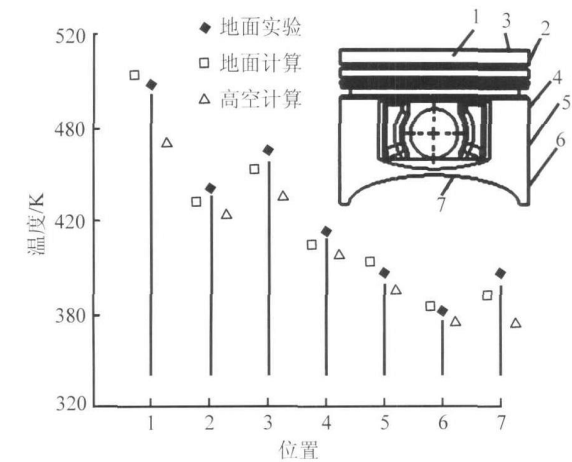


图 8 测试温度(地面)
Fig. 8 Tested temperature (ground)

4 高空多载荷下的活塞形状

把活塞温度场作为边界条件,进行热固耦合分析.图 9 为活塞径向热变形,通过热变形分析,发现活塞整体发生膨胀变形,热变形呈非轴对称性,活塞顶部热变形较大,位置 A 径向变形为 0. 205 mm,裙部下端热变形不均,最小变形量位置 D 为 0. 045 mm,位置 B 达 0. 2795 mm.如图 9 中的右半图所示,沿 CD 方向,从活塞顶部到裙部下端,变形量由上向下逐渐减少,而与轴承座垂直方

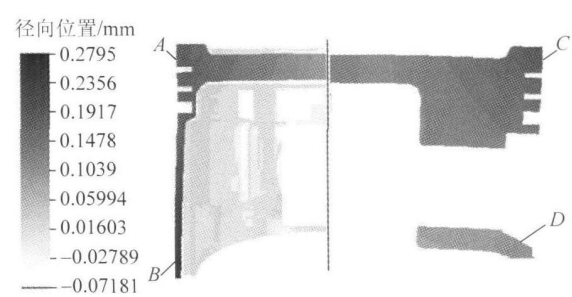


图 9 热变形(径向)
Fig. 9 Thermal deformation of piston (radial direction)
向 AB 的变形量增大.图 10 为活塞裙部的热变形,如图所示活塞裙部在轴承座方向缩小,轴承座垂直方向膨胀增加,裙部呈现椭圆形;活塞顶部的径向变形均匀,如图 9 中的 A, C 位置所示.图 11 中为加载了燃气压力与热负荷的活塞径向变形.

由图 11 的左半图可以看出,活塞顶部的变形有所增加,达到 0. 3012 mm,活塞裙部变形有所减小,活塞整体变形趋向均匀,如图 12 所示,活塞裙部呈现圆形.说明高空环境下的工作状态活塞的上下变形较为均匀,活塞的形状得到一定得恢复,保

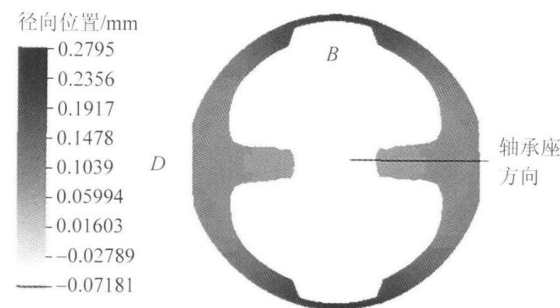


图 10 活塞裙部热变形(径向)
Fig. 10 Skirt deformation of piston (radial direction)

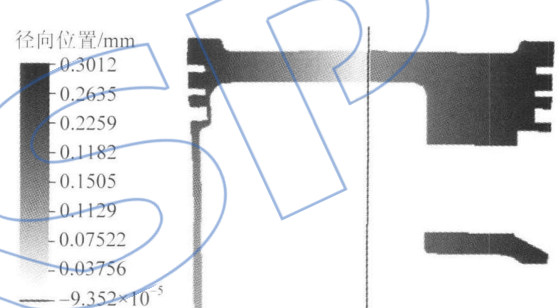


图 11 耦合载荷下的变形(高空)
Fig. 11 Deformation under thermal and gas pressure load (high altitude)

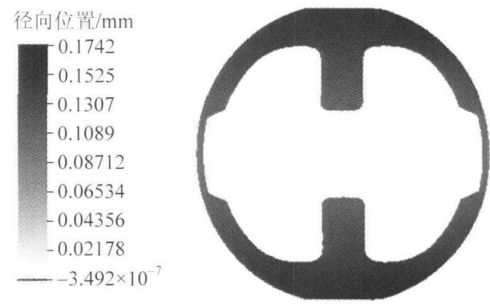


图 12 活塞裙部复合变形(高空)
Fig. 12 Deformation of piston' skirt (high altitude)

障了配合间隙、油膜厚度以及承载能力.活塞实际工作中受到热负荷、燃气压力、惯性负荷等多种负荷的共同作用,活塞的设计要保证活塞散热,还要防止局部过度散热,同时要考虑机械负荷对活塞的变形影响.为了解热负荷及机械载荷变化对活塞变形的影响规律,对活塞进行了不同热负荷及机械载荷下的计算,燃气等效温度从 1 323 K 到 1 623 K 分为 4 个点,AB-1, CD-4 为 1 323 K(传热

系数 $180 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 条件下的变形曲线; $AB-3$, $CD-3$ 为 1423 K (传热系数 $190 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) 条件下的变形曲线; $AB-2$, $CD-2$ 为 1523 K (传热系数 $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) 条件下的变形曲线; $AB-1$ 为 1623 K (传热系数 $210 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) 条件下的变形曲线.

AB 与 CD 位置的定义如图 9. 图 13 中是不同热负荷下的活塞变形,随着热负荷的增加, AB 位置上的变形量增加,沿活塞轴线方向上的增加比较均匀. CD 位置上的变形量随热负荷也增加,但是增加速度沿活塞轴线方向加速.

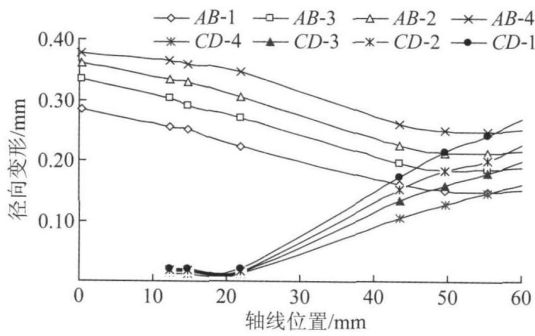


图 13 不同热负荷下的活塞热变形

Fig. 13 Deformation of piston under different thermal loads

图 14 是活塞在不同燃气压力载荷作用下的变形曲线, $AB-3$, $CD-3$ 为活塞顶等效压力 5 MPa 下的变形曲线; $AB-4$, $CD-4$ 为活塞顶等效压力 5.5 MPa 下的变形曲线; $AB-5$, $CD-5$ 为活塞顶等效压力为 6 MPa 下的变形曲线; $AB-6$, $CD-6$ 为活塞顶等效压力为 6.5 MPa 下的变形曲线;随压力的增加活塞变形有所增加,在同一压力下,沿活塞轴线方向的活塞径向变形增加,当载荷增加时,活塞的变形量增加,随着活塞轴线方向变化不均.

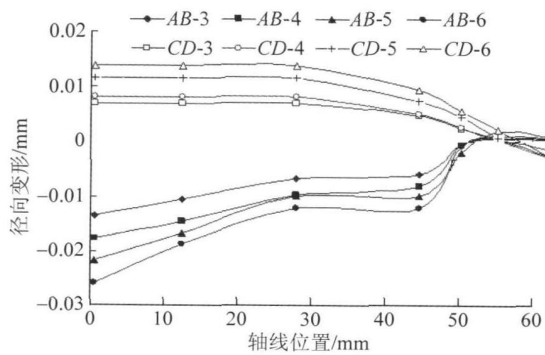


图 14 不同燃气压力下的活塞变形

Fig. 14 Deformation of piston under different gas pressures

5 结 论

高空环境下的活塞温度场中,活塞环槽上下面和内侧面的温度梯度较大,环槽切断了活塞顶部向裙部的热传导,使活塞顶部形成热积累,活塞环区温度对于发动机的可靠性非常重要,温度过高会使润滑油变质、焦结,导致活塞环磨损严重.

高空下的活塞温度场与地面环境下的温度场有明显不同,活塞的热变形发生变化,加载在活塞顶面的燃气载荷对活塞的变形影响很大,多种载荷的共同作用下,可以使活塞裙部形状恢复为近似圆形,活塞头部和裙摆的椭圆度减小,改善配合状况.通过控制温度场可以控制活塞的热变形,同时结合活塞在燃气压力下的变形,可以达到活塞整体变形均匀,保证合理的配合状态,活塞应力在合理范围内的目标.有利于保证工作状态的活塞有良好的形状、性能和寿命.

参考文献:

[1] 沈颖刚. 高空环境下内燃机工作过程应用基础研究[D]. 天津:天津大学,2004.
SHEN Yinggang. A fundamental investigation on working processes of I. C. engine on highland[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)

[2] Ekrem B, Muhammet C. Thermal analysis of a ceramic coating diesel engine piston using 3-D finite element method[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202 (2): 398-402.

[3] 田永祥,张锡朝,张济勇,等. 发动机活塞温度场三维有限元分析[J]. 内燃机工程, 2004, 25(1): 62-64.
TIAN Yongxiang, ZHANG Xichao, ZHANG Jiyong. Three dimensional FEA for the thermal field of pistons [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(1): 62-64. (in Chinese)

[4] 楼狄明,周平,王礼丽,高强度化机车柴油机组活塞热弹性接触分析[J]. 内燃机工程, 2005, 26(1): 40-43.
LOU Diming, ZHOU Ping, WANG Lili. Thermo-elastic contact analysis of the composite piston in highly-uprated locomotive diesel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 26(1): 40-43. (in Chinese)

[5] 周龙,白敏丽,吕继组,等. 用耦合分析法研究内燃机活塞环-气缸套传热润滑摩擦问题[J]. 内燃机学报, 2008, 26 (1): 69-72.
ZHOU Long, BAI Mingli, LÜ Jizu. Study of heat transfer, lubrication and friction of piston ring-liner in internal combustion engines using the coupled methods [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(1): 69-72. (in Chinese)

[6] 长谷部,高久,原创一. 车用发动机活塞的评价技术[J]. 车用发动机(日), 1999, 28(4): 14-21.