

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.011

内冷油道位置对柴油机活塞温度场的影响研究^{*}

宗明景,董 非^{*},朱楠林

(江苏大学 汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:针对柴油机活塞温度过高的问题,以某增压型柴油机活塞为研究对象,结合活塞温度场试验结果,在对活塞温度场计算模型进行验证的基础之上,在活塞上加开了内冷油道,得到了活塞降温冷却效果。通过轴向和径向移动活塞内冷油道,研究了不同位置内冷油道对活塞温度场的影响。采用CFD软件模拟计算得到了活塞内冷油道的温度和换热系数。研究表明:在活塞上加开内冷油道,可有效降低其顶部温度近40℃;当活塞内冷油道位置轴向移动4mm时,可使其顶部温度变化幅度达10℃左右。研究结果为活塞内冷油道结构的设计提供了参考依据。

关键词:活塞;内冷油道;温度场;冷却效果

中图分类号:TH134;TK413.3⁺3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1422-05

Effect of position of inner cooling gallery on piston temperature field of diesel engine

ZONG Ming-jing, DONG Fei, ZHU Nan-lin

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problem of high temperature of piston, a turbocharged diesel engine piston was taken as the research object. Combined with the results of piston temperature field test and on the basis of piston temperature field calculation model was verified, the structure of inner cooling gallery was designed in piston. Then the cooling effect of piston was obtained. By the axial and radial movement of piston inner cooling gallery, the effect of different position of inner cooling gallery on piston temperature field was studied. The temperature and heat transfer coefficient of the inner cooling gallery were simulated by CFD software. The results indicate that with the added structure of inner cooling gallery, the supreme temperature can be reduced nearly 40℃. When the inner cooling gallery of piston moves axially 4 mm, the temperature of piston top can be reduced about 10℃. The results provide a reference for the structure design of the inner cooling gallery.

Key words: piston; inner cooling gallery; temperature field; cooling effect

0 引 言

随着柴油机高强化、紧凑化、轻量化的发展趋势,柴油机热负荷问题日趋严峻、尖锐。活塞作为柴油机的主要零部件之一^[1],承受着很高的热负荷^[2]。因此,降低活塞热负荷尤为迫切,开展温度场的试验研究和数值模拟分析对活塞热负荷的研究具有重大

意义^[3]。

对于高强化柴油机活塞,目前的降温方法主要有阳极氧化处理、自由喷油冷却、振荡冷却、内冷油道强制振荡冷却^[4]。而前述3种方法已经不能满足活塞降温要求。内冷油道强制振荡冷却法是通过冷却喷嘴将机油喷入内冷油道内,在油道内振荡吸收活塞热量后流出,从而大幅度降低活塞温度^[5-6]。2003年,HIDE-

收稿日期:2017-03-21

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20140548);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:宗明景(1990-),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事内燃机传热数值模拟分析方面的研究。E-mail:zongmingjing@163.com

通信联系人:董 非,男,博士,副教授。E-mail:jsdxdf@163.com

HIKO 等人^[7] 计算了带有内冷油道的活塞的温度场;2005 年,NIGRO R 等人^[8] 模拟了柴油机活塞内冷油道的传热过程,得到不同时刻机油在内冷油道内部的分布结果;2008 年,北京理工大学原彦鹏等人^[9-10] 研究了冷却油腔位置改变对活塞温度场影响的研究;2015 年,王新等人^[11] 研究了不同喷油角度下和转速下的内冷油道机油的换热特性。目前国内外学者关于活塞内冷油道的研究做了大量工作,主要研究了带有内冷油道活塞的温度场、活塞喷油冷却过程以及活塞内冷油道的换热特性。但是目前的研究主要集中于带有内冷油道的活塞,关于无内冷油道活塞加开内冷油道的研究还是少有涉猎。

本研究将针对某增压型柴油机活塞热负荷过高的问题,研究内冷油道不同位置对活塞温度场的影响。

1 活塞温度场试验

在柴油机活塞温度场研究中,要通过数值模拟分析得到可靠的热边界条件。而增压柴油机活塞的换热过程较为复杂,热边界条件受到众多因素的影响。因此,活塞表面温度的试验测试对于获得准确的热边界条件有重大意义。本研究通过对活塞顶面和侧面的若干关键点进行实际测温,为接下来的数值模拟计算分析提供基础。

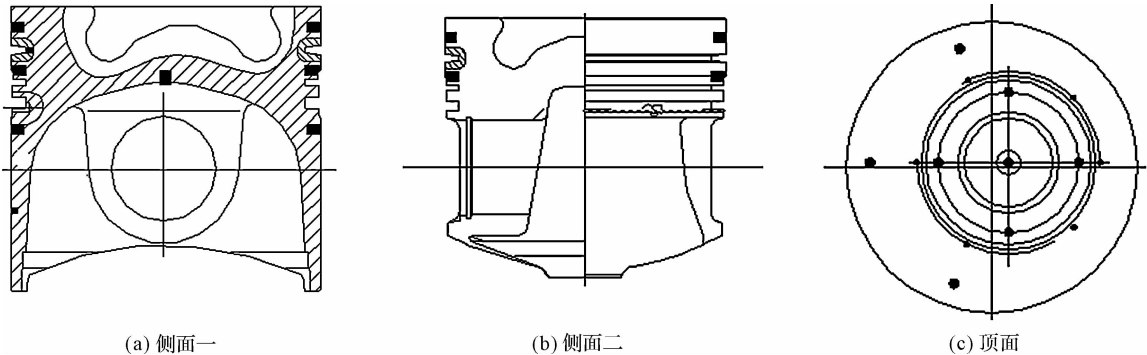


图 1 活塞测点布置图

1.2 温度场试验结果

本研究将硬度塞按照设计方案进行安装,结束后将活塞装回原机,然后运行试验台架。试验时应注意从低负荷、低转速向上增加,在达到标定工况后稳定运行 2 h,然后停机冷却,再取出硬度塞。为了使得测得的温度值较为准确,在试验过程中,对运行工况进行严格控制,以保证柴油机的稳定运行。

试验现场如图 2 所示。

本研究的对象为某增压中冷四缸柴油机,主要参数如表 1 所示。

表 1 柴油机主要参数

项目	参数
型式	直列水冷、四冲程、直喷、干式缸套
缸数×缸径×行程/mm	4×95×115
排量/L	3.26
标定功率/kW	72
转速/(r·min ⁻¹)	2 600
压缩比	18
进气方式	增压

1.1 测点布置

本研究采用硬度塞测温法。硬度塞测温法无需引线和设备,简便易行,对活塞温度分布和强度影响不大。热电偶测温法信号引出十分困难,测点不能布置太多,且时间和经费成本太高^[12]。该次试验采用的硬度塞型号为 M3×0.5 和 M1.6×0.35。硬度塞被装入测点钻孔时,要确保硬度塞的顶部平面与钻孔底部具有良好的接触,保持硬度塞顶部平面与孔底面之间相平齐,保证硬度塞底部不得突出活塞平面。

活塞温度场试验测点主要集中于活塞顶面、燃烧室、环槽和环岸等部位。活塞测点布置图如图 1 所示。

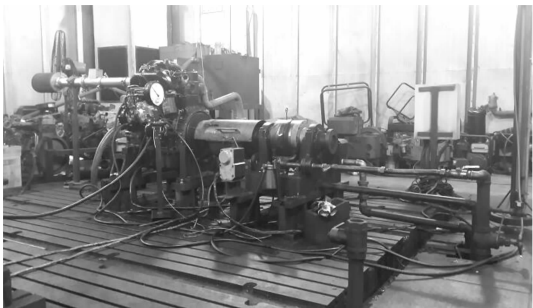


图 2 试验现场图

在标定工况(72 kW/2 600 r · min⁻¹)稳定运行2 h 后取出硬度塞。活塞各测点温度如表 2 所示。

表 2 活塞温度场试验结果

测点编号	温度/℃	测点编号	温度/℃
1	275	14	314
2	263	15	307
3	255	16	319
4	248	17	309
5	234	18	307
6	349	19	234
7	332	20	227
8	335	21	229
9	339	22	217
10	358	23	165
11	335	24	152
12	321	25	231
13	308		

由试验结果可知,最高温度为 358 ℃,位于活塞顶面接近燃烧室边缘处,最高温度值偏高。活塞顶面最高温度与最低温度相差 50 ℃,其中布置于顶面内圈的温度要明显高于布置于外圈的测点温度,在同一半径上布置的测点温度相差也较大,如布置于燃烧室喉口边缘的这些测点的最高温度为 358 ℃,而最低测点温度为 332 ℃,两者相差 26 ℃。在燃烧室底部一圈布置的 4 个测点温度较低,而燃烧室中心的温度又相对较高。活塞侧面测点的温度沿着火力岸指向裙部方向逐渐降低,但是同一区域的同一周面上的测点温度又有一定的差异性,其主要原因是燃烧室偏置导致了温度分布的不均匀。

2 活塞温度场数值模拟分析

2.1 热边界条件的确定

该柴油机活塞的材料是铝合金,密度 2 770 kg/m³,比热容 750 J/(kg · K),导热系数 130 W/(m · K),泊松比 0.3,杨氏弹性模量 75 000 MPa。

(1)活塞顶部的边界条件是利用发动机零维燃烧模型计算得到缸内瞬时温度和对流换热系数,再经循环平均处理后获得;

(2)活塞侧面的边界条件是采用经验或半经验的

计算公式得到初值,然后通过计算结果和关键点温度实测值的对比进行修正^[13]。

通过以上步骤和参考相关文献[14]得到柴油机活塞换热边界条件,如表 3 所示。

表 3 活塞热边界条件

位置		换热系数/ (W · m ⁻² · K ⁻²)	环境温度/℃
燃烧室	中心顶	325	1 050
	中心上	352	950
	中心下	367	850
	底圈	410	850
	喉口	530	1 000
	内圈	530	1 000
顶面	中圈	432	1 000
	外圈	400	1 050
	进气口	430	1 060
环槽	排气口	630	1 070
	环槽 1	2 150	140
	环槽 2	1 900	130
	环槽 3	2 050	120
	裙部	700	80
	内腔	700	100
环岸	火力岸	348	160
	环岸 1	500	130
	环岸 2	500	130
	环岸 3	500	130

经过有限元分析,得到活塞温度场分布云图(其中活塞最高温度出现在顶面靠近燃烧室喉口处),如图 3 所示。

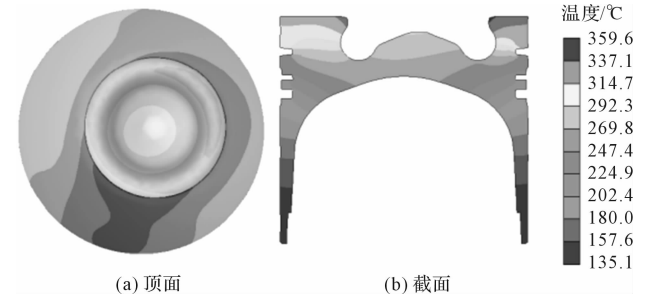


图 3 活塞温度场分布云图

2.2 模型验证

活塞试验值与模拟值对比结果如图 4 所示。

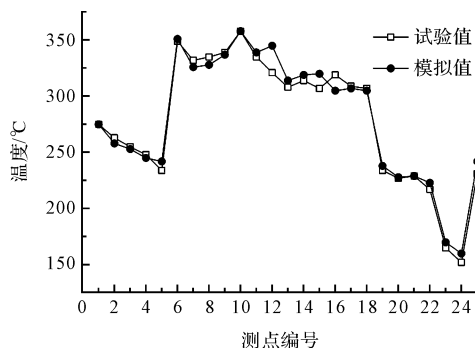


图4 试验值与模拟值对比

从图4中可以看出,试验所测得温度与数值模拟温度能较好吻合,且最大误差仅为5%,因而可认为所建有限元模型合理。

3 不同位置内冷油道对温度场影响的研究

3.1 内冷油道方案设计

模型B为基础模型,模型A和模型C均参照模型B做改动,其中模型A相对于模型B径向向外移动4 mm,模型C相对于模型B轴向向上移动4 mm,其他结构均未做改变。模型Y为原机无内冷油道活塞。

活塞模型如图5所示。

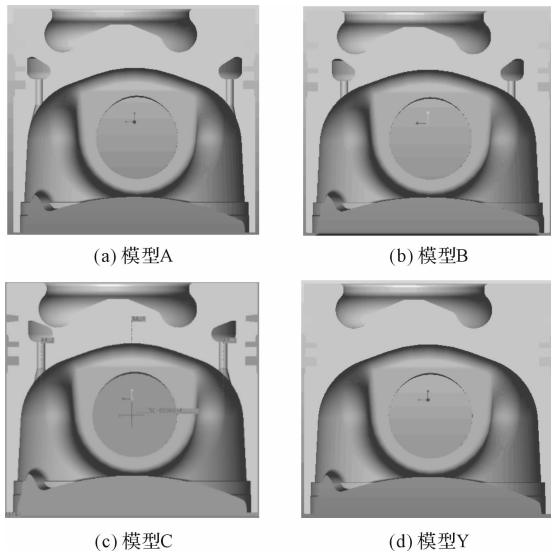


图5 活塞模型

3.2 内冷油道活塞有限元模拟结果分析

内冷油道的温度和对流换热系数采用 FIRE 软件进行 CFD 模拟计算得到^[15]。内冷油道的冷却机油由喷嘴向上喷入充满空气的空腔中,流经入口通道、活塞内冷油道,然后由出口通道流出^[16]。通常情况下,冷

却机油不充满油道,机油在惯性作用下在油道内振荡,由此形成的湍流可以增加换热。内冷油道热边界条件环境温度 100 °C、换热系数 1 800 W/(m² · K⁻²)。

模型关键区域平均温度对比图如图6所示。

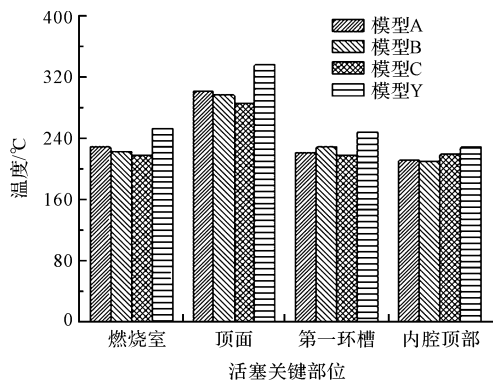


图6 模型关键区域平均温度对比图

(1)对比分析模型A、B、C和Y可知:不论活塞有无内冷油道,活塞顶面的温度相对其他区域均较高,且最高温度均出现在活塞顶面接近燃烧室边缘喉口处,而燃烧室底部温度相对活塞顶面温度均较低。

(2)对比分析模型B和Y可知:活塞加开内冷油道后活塞的整体温度均有所下降,特别是活塞顶部和第一环槽区域的温度下降较明显,其中活塞B的顶面温度比无内冷油道时降低40 °C,第一环槽的温度比无内冷油道时降低约20 °C,而且加开内冷油道后改变了活塞的温度梯度,温度梯度有所减小,由此可知在活塞上加开内冷油道是降低活塞温度的有效方法。

(3)对比分析模型A和B可知:活塞内冷油道径向外移时会使活塞,第一环槽温度降低5 °C左右,活塞顶部、燃烧室、火力岸温度均有所提高,但变化幅度较小。内冷油道的径向外移,活塞顶部与内冷油道的距离增加,削弱了换热效果,造成温度有所增加,第一环槽与内冷油道的距离减小,加强了环槽与外界的热量交换,增强了换热效果,故环槽温度降低相对较为明显,但是内冷油道的径向移动对活塞温度场的影响很小。

(4)对比分析模型B与C可知:活塞内冷油道轴向上移时对活塞顶面和第一环槽处温度影响较大,温度降低10 °C,内腔顶部温度增加了10 °C,燃烧室、火力岸温度也有所降低,而裙部的温度几乎保持不变。这主要是因为内冷油道位置的轴向上移,使得内冷油道与活塞顶部的位置更近,加强了顶部的换热,从而使其附近区域温度降低较多;同时轴向上移内冷油道,增加了内冷油道与内腔的距离,减弱了换热效果,而其他部位受到内冷油道的影响相对较小,温度变化不明显。

4 结束语

(1) 本文采用硬度塞测温法实测柴油机活塞关键部位关键点的温度值,与数值模拟计算所得到的温度分布云图较为吻合,表明所建有限元模型具有一定的准确性,为活塞优化设计提供参考依据;

(2) 活塞加开内冷油道后活塞的整体温度都有很大幅度的下降,其中特别是活塞顶部温度降低最为明显,高达 40℃左右,表明加开内冷油道是能够有效大幅度降低活塞温度的方法。对于冷却油道位置,就温度场而言,本文所述的 3 种加开内冷油道方案中,模型 C 由于位置离活塞顶面及燃烧室位置较近,最高温度降低幅度最大,冷却效果最为明显;

(3) 内冷油道位置变化主要影响各区域温度值的大小,对活塞温度场分布规律影响不大。活塞最高温度均出现在活塞顶面靠近燃烧室边缘处;

(4) 内冷却道位置的改变对活塞顶部温度影响最大,特别是轴向移动位置,可导致其温度变化 10℃左右;内冷油道轴向位置的改变比径向位置的改变对活塞温度场的影响更为显著。

参考文献 (References):

- [1] 李小弟,崔红娟,杜金榜,等. 新型活塞异型销孔数控镗削技术的研究[J]. 机电工程,2001,18(2):3-6.
- [2] ROBINSON D, PALANINATHAN R. Thermal analysis of piston casting using 3-D finite element method[J]. **Finite Elements in Analysis and Design**,2001,37(2):85-95
- [3] BUYUKKAYA E, CERIT M. 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.
- [4] 杨世寿,雷基林,毕玉华,等. 柴油机活塞热负荷研究[J].

内燃机车,2011(7):28-30.

- [5] 仲杰,傅松,闫伟,等. 活塞喷油冷却的稳态数值模拟[J]. 内燃机与动力装置,2011(5):32-35.
- [6] 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,2007,28(5):41-44.
- [7] KAJIWARA H, FUJIOKA Y, NEGISHI H. Prediction of temperatures on pistons with cooling gallery in diesel engines using CFD tool[C]. 2003 SAE World Congress, Warrendale: SAE,2003.
- [8] PAN J F, NIGRO R, MATSUO E. 3-D modeling of heat transfer in diesel engine piston cooling galleries[C]. 2005 SAE World Congress, Warrendale: SAE,2005.
- [9] 原彦鹏,王月,张卫正,等. 冷却油腔位置改变对活塞温度场的影响[J]. 北京理工大学学报,2008,28(7):585-588.
- [10] 楼建铭,孟祥铠,李纪云. 波度端面机械密封温度场的有限元分析[J]. 流体机械,2015,43(10):27-30.
- [11] 王新,刘世英. 活塞喷油冷却流动和换热特性的研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2015(1):54-58.
- [12] 宁海强,孙平,梅德清,等. 高速柴油机活塞温度试验与热力耦合仿真[J]. 内燃机工程,2014,35(1):105-109.
- [13] SROKA Z J. Thermal load of tuned piston[J]. **Archives of Civil & Mechanical Engineering**,2012,12(3):342-347.
- [14] 张力,申正均,张勇. 增压柴油机内冷油腔活塞结构分析及评价[J]. 车用发动机,2004(6):34-36.
- [15] 祖炳锋,方强,刘捷,等. 基于热机耦合的国-V 柴油机活塞强度及变形数值分析[J]. 内燃机工程,2014,35(1):99-104.
- [16] NAJAFABADI M I, MIRSALIM M, HOSSEINI V, et al. Experimental and numerical study of piston thermal management using piston cooling jet[J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**,2014,28(3):1079-1087.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

宗明景,董非,朱楠林. 内冷油道位置对柴油机活塞温度场的影响研究[J]. 机电工程,2017,34(12):1422-1426.

ZONG Ming-jing, DONG Fei, ZHU Nan-lin. Effect of position of inner cooling gallery on piston temperature field of diesel engine[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(12):1422-1426.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>