



船用柴油机活塞温度场边界条件分析研究与验证

李 全, 冯明志, 陈志忠, 冯须明

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 活塞温度场边界条件由于其复杂性, 一直没有一个很准确的预估方法。通过数据库形式收集整理多种活塞温度场历史预测与实测数据, 采用均值预计、离散分布等方法, 预估了某船用柴油机活塞温度场的温度边界条件, 并采用有限元法进行预测; 与此同时, 采用硬度塞法对该活塞进行温度场测试。试验结果表明: 采用该方法预测得到的温度场结果与实测结果吻合良好; 得到的预测结果可为设计提供指导。

关键词: 活塞; 船用柴油机; 热边界条件; 预估

中图分类号: TK423.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 4357(2015)05 - 0024 - 04

The Research and Validation of Thermal Boundary Condition of Marine Diesel Engine Piston

Li Quan, Feng Mingzhi, Chen Zhizhong, Feng Xuming

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: There had been no accurate method to predict the thermal boundary condition of pistons due to its complexity before. The historical results of prediction and testing were collected by using database, and the average vale prediction together with scattering methods were employed to predict the thermal boundary conditions of a marine diesel piston, meanwhile the prediction was given by using FEM analysis. The temperature test of the piston using Templug was also carried out. Finally, the comparative results showed that there was little difference between these two results, and the prediction could be used to guide the design.

Key words: piston; marine diesel engine; thermal boundary condition; prediction

0 引言

柴油机作为内燃式动力机械的一大分支, 在国民经济和国防上得到最为广泛的应用^[1]。为了提高功率密度柴油机具有良好的可靠性, 国外柴油机研发人员在基于大量成熟经验和数据库的基础上, 积极采用以 CAE 技术为代表的现代预测设计技术进行高性能、高可靠性柴油机的研发, 国外先进大功率中高速柴油机的强化指标由 20 世纪 70 年代的 20 (MPa · (m · s⁻¹)) 提高到 20 世纪 90 年代的 32 (MPa · (m · s⁻¹)) 以上。而我国在高指标柴油

机主要零部件可靠性研究方面, 由于测试条件不足, 缺乏有效的测试手段, 没有进行充分的试验验证, 无法对关键零部件的可靠性做出精确的评估。因此, 掌握新技术并加以应用, 实现从“经验设计”到“预测设计”的转变是柴油机设计能力发展的一大趋势。

柴油机活塞与缸盖、缸套共同形成燃烧室, 起着密封和导向作用, 将燃气压力传递至连杆进而推动整个传动机构向外输出功率。活塞在工作中承受周期变化的机械负荷、热负荷作用, 是柴油机工作环境最恶劣的零件, 长时间高温状态下工作, 活塞

材料的强度将大大降低，因此为保证活塞可靠性，在设计活塞之初，预测并控制活塞工作状态下的温度场显得尤为重要。

1 活塞温度场分析边界条件简述

在进行活塞温度场分析时，采用第三类换热边界条件，即已知对流换热关系的边界条件，给出活塞与周围介质边界的对流换热系数和介质温度。由此缸内燃气换热过程研究，不论是理论方法还是试验方法，归根结底以求取燃气换热系数为目标：

-λ ∂t(p,τ) / ∂n = α [t_f(p,τ) - t(p,τ)]

1.1 瞬时换热系数

从 21 世纪初，人们就开始了柴油机瞬时换热系数 α_g 的研究工作，但至今尚未得到一个完整通用的规律性结论公式。之前得出的一些基本公式可归纳为两类：一类是以努塞尔特（Nusselt）公式为基础的基本公式；另一类是以相似准则数为基础的基本公式（以沃希尼公式为代表）^[2]。

努塞尔特（Nusselt）公式：

α_g = 1.166 √[p^2 T (1 + 1.24 C_m)] + 0.421 / (T - T_w) [(T/100)^4 - (T_w/100)^4]

沃希尼（Woschni）公式：

α_g = 820 D^(-0.2) p^0.8 T^(-0.53) [c_1 C_m + c_2 (V_h T_1 / (p_1 V_1) (p - p_0))]^0.8

以努塞尔特（Nusselt）公式为基础的基本公式年代相对更为久远。由于当时试验条件、测试手段的制约，再加上当时内燃机的性能指标、燃烧组织方式等跟如今的内燃机有很大差异，所以该公式已不能完全适合现代柴油机。

以相似准则数为基础的基本公式相对第一类公式发展得较晚，当时试验条件、测试手段都有了较大改善，这使得公式的适用性有了提高。该类公式按相似准则将管道中的对流换热应用到内燃机气缸中，它们都反映了几何尺寸的影响因素。经对比分析，沃希尼（Woschni）公式的试验研究机型与中速柴油机类似，因此，可选择该公式用于典型中速柴油机活塞换热系数的试算^[3]。

1.2 平均换热系数

在柴油机的工作循环过程中，气缸内的换热是对流放热和辐射放热综合作用并周期性变化的过程，对于某一稳定工况，其换热量也是周期性变化的。在对缸内传热的研究中，示功图算法是常用

的计算方法。柴油机在一个稳定工况下一个循环内燃气向壁面换热的平均热流量为：

q_m = Q_m / F = ∫_0^τ α_g (t_g - t_w) dτ

式中：t_g 为燃气温度；t_w 为壁面温度；Q_m 为热流量；q_m 为热流密度；F 为活塞顶面积。

在稳定工况下，燃烧室壁面温度 t_w 随时间的变化很小，可近似为恒定的壁温，因此，上式可变为：

q_m = α_gm (t_g* - t_w)
α_gm = 1 / τ_0 ∫_0^τ α_g dτ

式中：t_g* = (∫_0^τ α_g t_g dτ) / (∫_0^τ α_g dτ)，为等效燃气温度。

1.3 半径等效换热系数

平均对流换热系数 α_{gm} 是表征一个循环中燃气换热系数的平均值。事实上缸盖、活塞、缸套等零件的受热状态不同，结构形状不同，各零件表面的瞬时换热系数也不同。由于燃气的复杂运动，同一零件不同位置的换热系数也有很大的差异，半径等效换热系数反映了活塞顶燃气侧不同位置换热系数的分布情况，其数值对活塞温度场分析结果有很大的影响。

许多试验结果已经证明，换热系数随燃烧室的不同位置而异。现有的研究结果有 Seal-Taylor 公式（如图 1、图 2 所示）、Block 公式；以及三菱公司、KS 公司的相关研究结果^[2]。

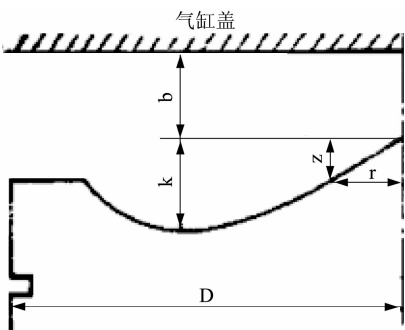


图 1 Seal 公式计算标尺图

由以上可知，活塞顶温度场换热边界条件极其复杂，同时由于受到活塞结构形式、尺寸等的影响，活塞顶面换热系数的分布规律也各异，目前没有准确的统一的解析公式可以直接求取平均对流换热系数和等效半径分布，使得活塞顶温度场预测始终难以达到满意的精度。

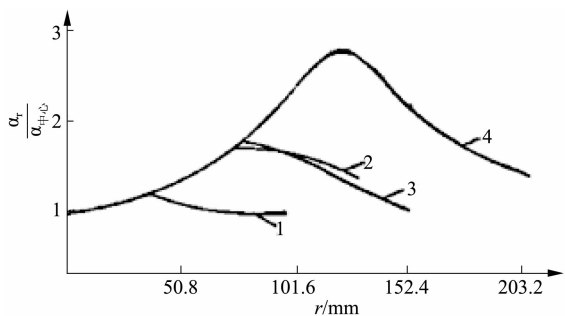


图2 Seal 放热系数沿半径变化曲线

2 活塞温度场边界数据库及施加工具

由上节的分析可知,目前所掌握的解析活塞顶换热系数公式,由于受到柴油机性能指标、燃烧组织方式、活塞结构尺寸等多因素的影响,若不考虑沿半径等效分布而直接作为温度场预测的输入,则精度较差;而采用流固耦合技术,将三维燃烧流场计算结果映射到结构场上,计算过程复杂,周期长,在设计之初,缺乏足够准确的边界条件的情况下,开展此类分析经济性不高。为此,找寻一种借助于经验数据,可以在设计之初快速评估活塞温度场且精度可控的方法显得极为迫切。

在活塞温度场分析中,最直接的边界条件为等效半径换热系数,本文将通过整理活塞温度场历史数据,将活塞顶换热边界条件数值化离散成等效半径换热系数,通过开发专用工具将此离散化的边界条件在活塞顶面进行连续施加,以取代传统的公式法求取活塞顶换热边界条件。

2.1 活塞温度场数据库

在长期的活塞温度场分析及试验工作的基础上,开发了活塞参数管理系统数据库。该数据库基本功能包括:

(1) 活塞图档和特征参数:包括柴油机型号、活塞燃烧室特征尺寸、重量、材料参数等信息,活塞测点信息,测点布置方法。

(2) 活塞测点数据:记录测点位置信息(坐标)、测试温度信息、分析结果信息。

(3) 边界条件数据研究:两类换热边界条件,包括给定的活塞顶换热经验函数,活塞顶换热离散点;活塞各部位冷却边界条件。

(4) 历史分析文件:记录历史分析文件和实测结果及对比结果。根据历史计算文件与实测结果的匹配,灵活调用 ABAQUS 命令文件,完成调整后的分析。

数据库形成后,整理了 11 种工况的活塞温度

场测点位置、测点结果信息,与之对应的计算边界条件、结果信息、误差分析及边界修正信息,便于后续活塞计算时调取参考。

2.2 活塞顶换热边界施加工具

按 1.3 节所述,须将工作过程计算得到的缸内平均对流换热系数在半径方向进行离散并施加到计算模型上。由于在实际有限元操作中,平均对流换热系数的离散化无法用解析的公式进行表达,目前通常采用的方法是将活塞顶面按半径进行分区,在每个半径区域施加恒定的对流换热系数,该方法的局限性在于其精度和可行性受操作便利性的制约。为此,采用 Python 语言针对 ABAQUS 软件开发了专用施加工具,在边界条件离散化时,可适当设置离散的等级(通常可将半径方向离散为 8~12 个离散点)。在离散点指定换热系数,在有限元模型施加过程中,通过读取活塞顶表面单元的半径值,采用插值的方法赋予对流换热系数,输出固定格式的载荷文件。这样可使得活塞顶面对流换热系数分布保持连续,既保证了换热系数的精度,也极大地减少了工作量,同时在进行边界条件调整时也更加便利。

采用上述方法,可以较快地得到较合理的活塞顶换热边界条件及其分布规律,同时由于采用插值方式将离散的边界条件施加到活塞顶上,如图 3 所示,保留了活塞顶局部换热边界条件调整的便利性和合理性。

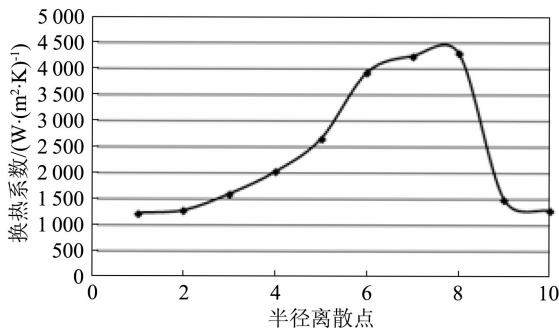


图3 活塞顶换热系数分布曲线

3 活塞温度场分析模型及边界施加

在某新型柴油机开发过程中,按照上述方法和工具开展了活塞温度场预测工作。

3.1 活塞计算模型

采用 Hypermesh 软件对活塞模型进行有限元前处理,得到的有限元模型如图 4 所示。同时考虑到边界施加的需要,单独建立活塞顶顶面一层网格组以便后续操作。

3.2 活塞顶换热边界

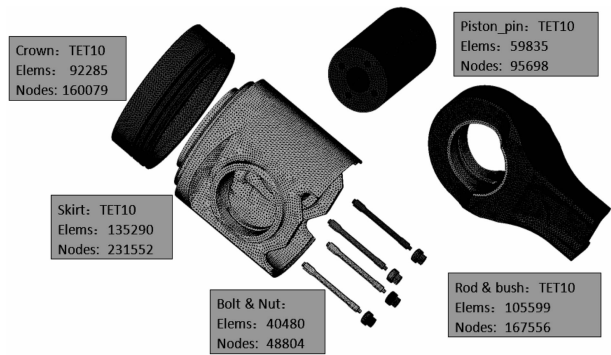


图 4 活塞有限元模型

采用 AVL 软件进行缸内过程计算，得到缸内平均温度和平均对流换热系数，如表 1 所示。

表 1 工作过程计算结果

计算内容	计算结果
平均对流换热系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	1 330.37
缸内平均温度/K	874.39

调用数据库中与该机型运行工况、活塞顶结构参数相似的半径分布规律，将活塞顶面按半径值划分为 10 个区域，将平均对流换热系数进行离散化。采用 2.2 节中开发的离散工具将该边界条件连续地施加到活塞顶各单元表面，获得活塞顶面温度场边界条件的命令流文件，以此作为活塞温度场分析的计算输入。

4 试验验证

4.1 活塞温度场测试方法

采用硬度塞法进行活塞温度场测试。硬度塞法实质上是运用了淬火后金属材料硬度随回火温度的升高而下降的特性。采用特定的金属材料制成 M3×0.5×4 的紧固螺钉，安装在被试件的表面，该零件在实际工况下至少稳定受热 2 h，然后经抛光，用显微维氏硬度计测出准确的硬度值，再在事先作出的 HV-t/℃ 标准曲线上查出对应的温度，即得到被测点的温度。

4.2 活塞顶温度场测试结果

本次测试在活塞顶沿半径方向选取若干测点，其测点布置如图 5 所示，在给定工况下实机运行 2 h，读取各硬度塞的硬度结果并转换为温度值，测试结果如表 2 所示。

4.3 结果对比

活塞顶温度场计算结果与实测结果对比如图 6 所示。由图可知，活塞顶最高温度预测结果与实测

结果有较高的一致性，整个活塞顶面温度分布趋势基本一致，在燃烧室内和活塞顶边缘，计算结果与实测结果存在一定的偏差。

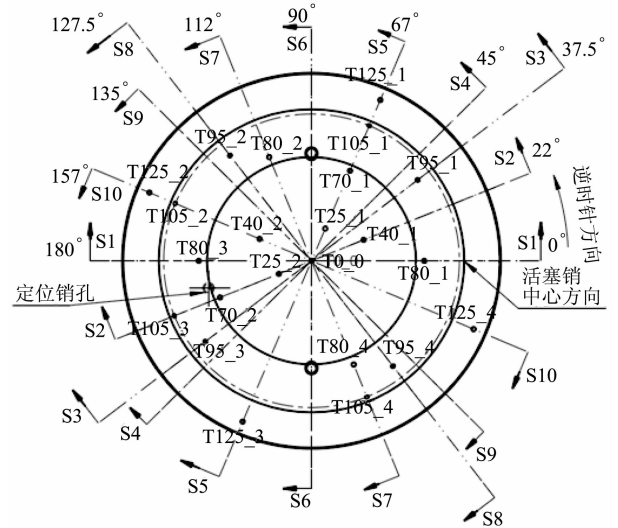


图 5 活塞顶测点布置

表 2 活塞顶温度场测试结果

半径/mm	均值/℃
0	248
25	258.5
40	256
70	290.5
80	298
95	328.75
105	383.75
125	342

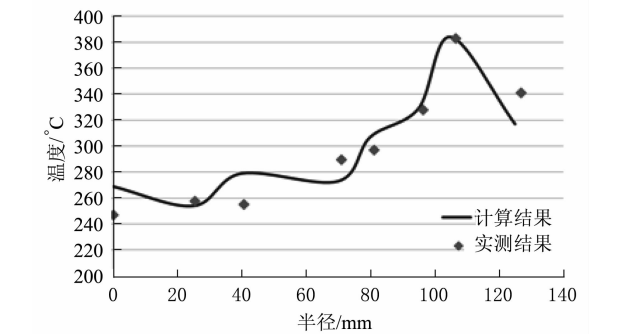


图 6 温度场测试、计算结果对比图

由该对比结果可知，预测结果误差不超过 10%，且误差最大点不在温度最高位置，满足工程精度要求。对于误差较大的点，可通过离散点数值的微调，使计算结果更趋近于实测结果。

(下接第 45 页)