

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209343

# 气缸盖火力面热场域多尺度划分方法研究\*

王凯<sup>1,2</sup> 王肖霞<sup>3</sup> 陈翠翠<sup>1,2</sup>

(1. 内燃机可靠性国家重点实验室 潍坊 261000; 2. 潍柴动力股份有限公司 潍坊 261000;  
3. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

**摘要:** 针对目前内燃机缸盖火力面热场探测时温度场误差大的问题,结合不同位置处火力面热场的差异性,提出了一种基于梯度变化规律的多尺度气缸盖火力面区域划分方法,为火力面热场分布的精准性探测奠定了基础。首先,依据缸盖燃气侧传热规律和热场温度的高低,以喷油孔为中心位置将火力面划分为进-排、进-进、排-排气门间鼻梁区以及外周区域;其次,剖析各区域内温度梯度的变化特性,基于不同的梯度变化量对各区域进行不同尺度的划分;最后,确定不同尺度区域中测温点数量和具体位置,并结合热电偶测温技术对各点温度进行测量。实验结果表明,与单一尺度下测温数值相比,基于多尺度划分思想的测温方法更能凸显出鼻梁区等易出现热疲劳损伤的区域内温度变化,为缸盖内壁热疲劳损伤检测与评估提供了更可靠的数据来源。

**关键词:** 气缸盖火力面;热场;梯度变化;多尺度划分

**中图分类号:** TK428 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Multi-scale division method of thermal field of cylinder head fire surface

Wang Kai<sup>1,2</sup> Wang Xiaoxia<sup>3</sup> Chen Cuicui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261000, China;  
2. Weichai Power Company Limited, Weifang 261000, China;  
3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large error of temperature field in thermal field detection of internal combustion engine cylinder head, combined with the difference of thermal field of fire surface at different positions, a multi-scale division method of the fire surface based on gradient variation law was proposed, which laid a foundation for the accurate detection of the thermal field distribution of the flame face. Firstly, according to the heat transfer law of the cylinder head gas side and the temperature of the thermal field, the fire surface was divided into inward-exhaust, inward-intake, exhaust-valve nose bridge area and peripheral area with the fuel injection hole as the center. Secondly, the variation characteristics of temperature gradient in each region are analyzed, and each region is divided into different scales based on different gradient variations. Finally, the number and location of temperature measurement points in different scales were determined, and the temperature of each point was measured by combining thermocouple temperature measurement technology. The experimental results show that compared with the temperature measurement values under a single scale, the temperature measurement method based on multi-scale division idea can highlight the temperature variation in the nose bridge area, which is prone to thermal fatigue damage, and provides a more reliable data source for the detection and evaluation of thermal fatigue damage in the inner wall of cylinder head.

**Keywords:** cylinder head fire surface; thermal field; change of gradient; multi-scale division

## 0 引言

随着发动机工作过程中功率的提升,气缸盖内燃烧温度逐渐升高,使得缸盖所承受的热负荷作用力逐渐增强,容

易出现开裂、磨损等热疲劳损伤现象,存在极大的安全隐患。因此,对气缸盖内壁进行热疲劳损伤检测与评估至关重要。目前,常用的气缸盖热疲劳损伤检测方法主要是结合计算机仿真软件(如有限元等)对缸盖承受的热应力场及

收稿日期:2022-03-21

\* 基金项目:内燃机可靠性国家重点实验室开放课题基金(skler-202011)、山西省回国留学人员科研项目(2021110)资助

热边界条件等作疲劳损伤分析<sup>[1-5]</sup>。该方法可实现对损伤区域以及可能造成的损伤类型的预测,但易存在损伤类型与位置预测误差大,甚至失效的问题。为了提升损伤检测的精准性,课题组人员将关联成像技术引入到气缸盖的热疲劳损伤检测中,目的是通过影像重构的手段将缸盖内壁的疲劳损伤情况进行直观的呈现。该方法<sup>[6]</sup>不仅解决了损伤类型与位置难确定、易出错的问题,而且更便于工程人员对整个缸盖内壁进行实时监控。

在对缸盖内壁进行关联重构时,需要对不同时刻下缸盖火力面的热场进行探测,并利用探测的序列热场强度数据间差异以及缸盖外壁总热能间关联运算来实现对内壁影像的重构。而热场强度数据的获取可依据斯特藩-玻尔兹曼定律由热场温度转化而来,即:

$$E = \epsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  为黑体的辐射系数,  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数,热能  $E$  与温度  $T$  的四次幂成正比。

目前,常用的热场温度探测方法大都是利用热电偶、光纤等测温技术按照不同的区域划分法对缸盖特定位置进行温度测量。例如:文献[7-8]将缸盖看作均匀传热面,沿喷油嘴、进气门以及排气门的中心位置沿径向将缸盖划分为不同的块区域,如图 1(a)所示,进而对各区域温度进行探测。文献[9-10]以喷油嘴为中心,按照同心圆半径的 1/3 将缸盖划分为等宽的圆环区域进行探测,如图 1(b)所示。上述探测方法可一定程度上满足探测需求,但由于两者均是以单尺度标准对缸盖区域进行的均匀划分,并未考虑热场变化的非均匀性,使得仅利用这些散点数据很难精确地反映出火力面各位置处热场变化的非均匀性。因此,有必要依据这些测量数值对非测点区域的温度进行构造与填充,只有这样才能获得高分辨率的热场分布。实际上,受高温区位置、换热系数等影响,缸盖火力面热场变化梯度是不同的。因此,如何对缸盖火力面热场区域进行非均匀划分,使其更利于反映热场的变化对于非测点区域数值的填充至关重要。

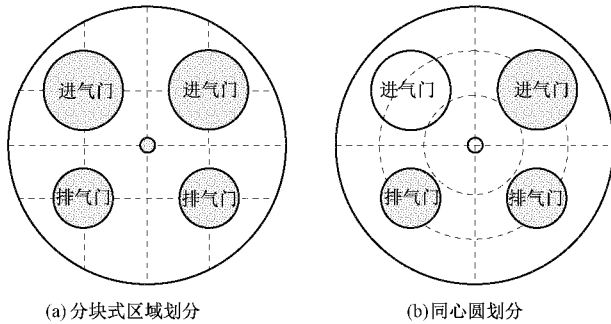


图 1 常用的缸盖火力面区域划分

针对上述问题,本文在同心圆均匀划分法的基础上,结合气缸的工作原理与热传导规律,并充分考虑了进气门、排气门以及高温区域位置等影响,提出了一种基于多尺度思想的缸盖火力面热场域划分方法,即按照不同的尺度对于

热场区域进行划分,并以单缸四气门缸盖为例验证了方法的有效性。

### 1 火力面热场分析

由内燃机的工作原理<sup>[11-13]</sup>可知,气缸盖火力面热场的强度分布是以喷油嘴为中心,沿径向路径呈递减的变化趋势。同时,受进气门与排气门位置、冷却水腔等的影响,缸盖火力面各区域的温度变化范围与梯度存在较大差异,使得缸盖的热疲劳损伤部位大都位于鼻梁区附近。

以某单缸四气门缸盖为例来说明,由于缸盖左右对称,在此以缸盖右半部分为例:

首先,将其按照温度由高到低的顺序依次划分为①、②、③和④四个区域,具体如图 2 所示。其中,①、②和③区域为鼻梁区,④区域为边缘区。

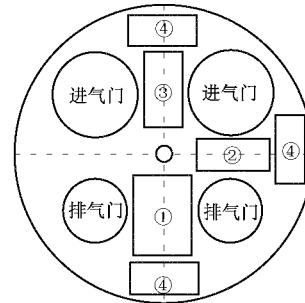


图 2 区域划分

然后,从 4 个区域中选定 6 个随机测点(如图 3 所示),并利用 K 型热电偶<sup>[14-16]</sup>对加速运行工况下各测点温度进行探测。最后将不同功率下的探测结果进行分析,绘制出各测点的功率-温度及其归一化曲线,如图 4 所示。

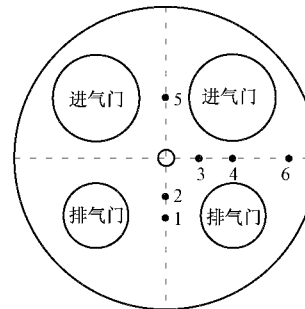


图 3 随机测点位置选取

由图 4(a)可知,当气缸工作功率由 20 kW 上升到 100 kW 时,排气门-排气门间鼻梁区的温度范围大致分布在 200 °C ~ 350 °C 范围内;进气门-进气门间区域温度在 100 °C ~ 200 °C 范围内变化;进气门-排气门间鼻梁区的温度则位于 150 °C ~ 250 °C 范围内。同时,由 4(b)可知,当各测点所选区域不同时,在整个探测阶段各测点处温度的变化梯度也是不同的。原因主要是由于测点 1 和 2 处在排气门与排气门鼻梁区,且测点 1 位于两个排气门的中心位置,使其温度高于测点 2,且梯度变化相对较大;而测点 3 和 4

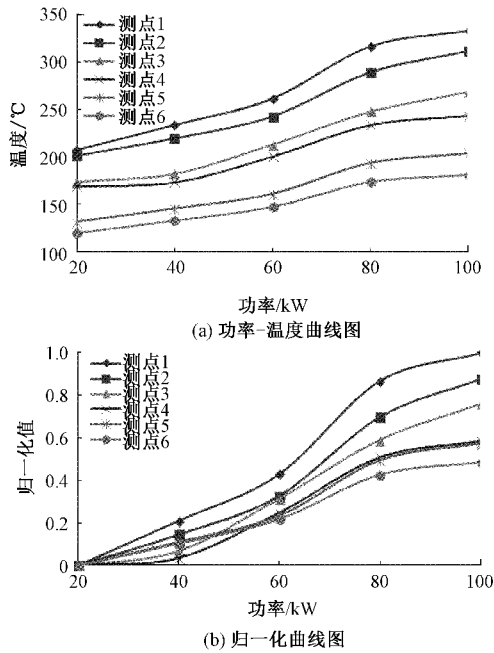


图 4 各测点温度随功率变化曲线图

虽然都位于进气门与排气门鼻梁区,但由于测点 3 距离喷油嘴更近,使得测点 3 随着功率的提升其温度变化梯度明显高于测点 4;测点 5 和 6 由于分别处于进-进气门鼻梁区和边缘区域,受空气温度以及离高温区距离远等因素影响使得两者在低功率条件下温度及其梯度变化不明显,但随着功率提升,测点 5 变化梯度明显高于测点 6。

由上可知,当用不同划分方案来确定测点数量和位置时,得到的热场分布的误差是不同的。因此,有必要根据寻找一种更利于反映热场不同变化梯度的区域划分方法来提升光场分布的精准性。

## 2 基于多尺度的火力面热场域划分

根据火力面热场分析及图 4 分析结果,在考虑热场温度变化范围、径向衰减特点的前提下,将缸盖细分为 I、II 和 III 三个区域,如图 5 所示, I、II 和 III 细分区域分别以右排气门中心与喷油嘴中心、右进气门中心与喷油嘴中心连接线为分界线。

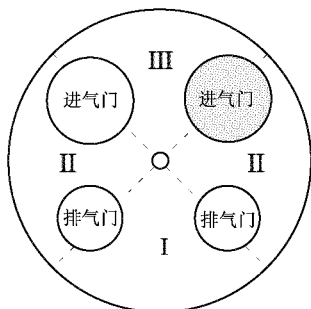


图 5 缸盖火力面区域的细分

由于各细分区域中热场温度范围及梯度变化程度不同,使得 3 个细分区域特性也不同,主要表现在两个方面:一是 II 区域整体温度虽然低于 I 区域,但由于进气门与排气门温度变化梯度大,使得 II 区域较 I 区域更易出现裂纹等疲劳损伤现象;二是由于进气门温度影响, III 区域温度明显低于 I 区域温度,使得 I 区域出现疲劳损伤的概率明显高于 III 区域。这使得仅利用同心圆环状划分法进行测点确定,而不区分 3 个细分区域具体特性,势必会加大测量误差。

为此,依据 3 个细分区域基本特性,提出了基于不同尺度的区域划分方法,即在不同细分区域依据不同的变化梯度进行尺度的划分。下面以缸盖右半部分为例,来说明具体实现过程:

首先,按照温度的变化梯度对 3 个细分区域进行多尺度划分,将其分为 9 个细分子区域,具体细分原理如图 6 所示。其中, I 区域由于位于两个排气门之间,且火力面的最高温度出现在该区域的中心位置,且向两侧逐渐降低,于是以 1/3 及 1/2 半径做圆环将其划分为 1~3 三个子细分区域; II 区域由于位于进气门和排气门之间,且受到低温进气、高温排气和喷油嘴的联合作用,区域最容易出现疲劳损伤,因此以分别以 1/3, 1/2 及 2/3 半径做圆环将其划分为 4~7 四个子细分区域; III 区域由于位于两个进气门之间,进气门空气与气壁间热交换使得该区域温度及其梯度变化都较小,在此以 1/2 半径做圆环将该区域划分为 8 和 9 两个子细分区域。注意,该细分过程可根据工程需要进行细化和粗化处理,以满足不同的探测需求。

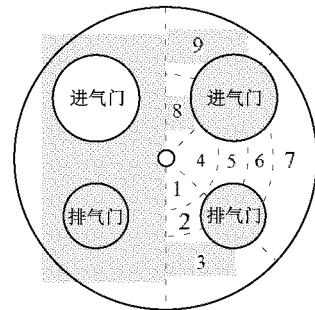


图 6 缸盖火力面区域的多尺度细分原理图

然后,结合缸盖的具体结构、材质以及热传导系数等,选取探头直径合适的 K 型热电偶传感器,对细分后的子区域进行测点数量与位置的设置。该过程依据重点监测区域重点监控的原则来进行,即 I、II 区域中 2、5、6 子细分区域可适当加大测点密度,而 I、II、III 区域中 1、4 和 8 子细分区域次之,具体测点设置如图 7 所示。

一般情况下,可依据区域面积大小来设置,如在图 6 中 2、5、6 鼻梁区设置 2~5 个测量点;1、4 和 8 区域内设置 1~3 个测量点;另外,3、7 和 9 子细分区域虽然温度梯度变化小,但涉及区域面积大,可在每个区域中设置 2~3 个测量点。

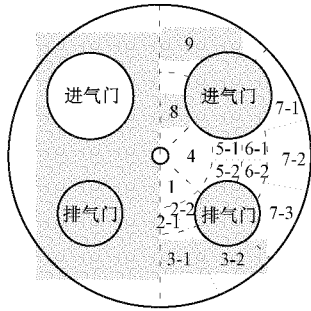


图 7 多尺度细分区域测点设置

### 3 实例分析

#### 3.1 测试条件与手段

为了验证本文所提出的多尺度热场区域划分方法的有效性和合理性,本节以某单缸四气门缸盖为例来进行数值分析。其中,缸盖的材料特性、结构与性能参数分别如表 1 和 2 所示,且测试工况为标定工况,环境温度为 20 ℃。

表 1 缸盖材料特性

材料	弹性模量/GPa	泊松比
灰铸铁	117	0.26
厚度/mm	线膨胀系数/ $K^{-1}$	热传导系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
8	$10.00 \times 10^{-5}$	49

表 2 某型号单缸四气门结构和性能参数

参数	数值
缸直径/mm	120
进-进气门鼻梁区尺寸/mm×mm	6×40
进-排气门鼻梁区尺寸/mm×mm	8×40
排-排气门鼻梁区尺寸/mm×mm	10×40
行程/mm	150
总排量/L	10.45
标定功率/kW	162
标定功率转速/ $(r \cdot \min^{-1})$	2 200
最大扭矩/ $(N \cdot m)$	844
最大扭矩转速/ $(r \cdot \min^{-1})$	1 400

由于铠装 K 型热电偶具有热惯性小、引线方便,且其热势与温度近似呈线性关系等,故文中采用其对缸盖内壁温度进行测量。具体实验中采用文献[14]中提出的测量方案来实施缸盖温度进行测量,并利用其配套的 XMTA-J2001WC 显示仪表记录下各测点的温度值。工程实践证明,该方案中温度系统的测量精度可达 0.1 ℃,可满足文中探测需求。

结合气缸的实际参数与缸盖厚度,采用热电偶直径为 2 mm 的热电偶探头进行测量。为了降低测量误差,应确保将整个探头埋入缸盖内,因此其埋入深度应略大于 2 mm。此外,为了提高测量效率,选取探头响应时间约为 0.5 s、探

头误差为±0.5%的铠装 K 型热电偶探头 WRNK-131。

#### 3.2 测试结果与分析

为了说明多尺度热场区域划分方法优势,下面分别以多尺度划分、分块划分和同心圆划分法对缸盖火力面测点进行设置,并以 ANSYS 来模拟不同方案下的温度场分布,具体过程如下:

首先,根据表 2 中的结构参数建立气缸盖的几何模型,并将其导入 ANSYS 中对缸盖火力面进行网格划分,如图 8 所示。

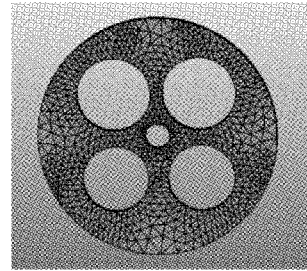


图 8 缸盖几何模型及其火力面网格划分

然后,依据多尺度划分、分块式划分和同心圆划分原理,设置测量点数和具体位置,如图 9 所示,对不同方案下各测点温度进行测量,如表 3 所示。

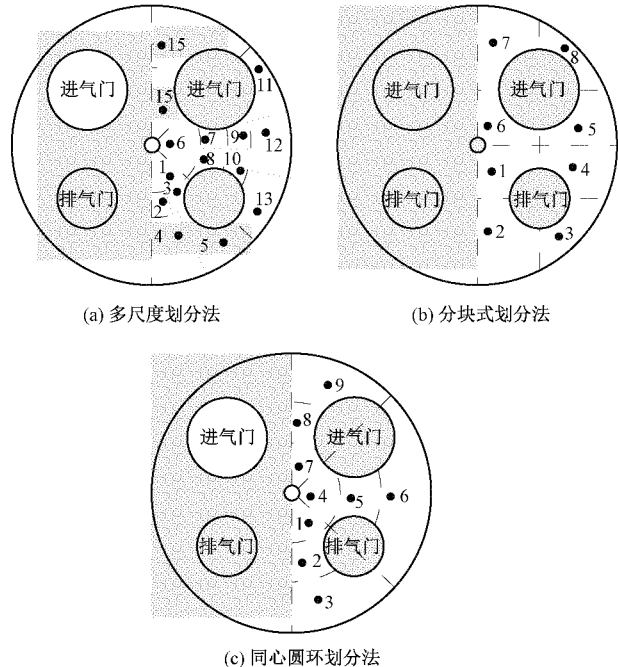


图 9 不同划分方案下测点分布情况

其次,依据材料参数和表 3 数据,对划分区域内缸盖边界条件进行设置,主要有温度和换热系数设置。具体为:冷却水侧温度 90 ℃,换热系数  $1.5 \times 10^4 W/(mm^2 \cdot k)$ ;进气道温度 30 ℃,换热系数  $5.5 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^4 W/(mm^2 \cdot k)$ ;排气道温度 860 ℃,换热系数  $8.0 \times 10^4 \sim 8.5 \times 10^4 W/(mm^2 \cdot k)$ 。由此获得火力面温度场分布,具体如图 10 所示。



表 3 测得的各区域测点温度值

℃

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
多尺度划分法	183	220	206	158	140	166	160	175	151	165	132	135	136	150	121
测点	1	2	3	4	5	6	7	8							
分块式划分法	208	150	130	128	128	183	130	125							
测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
同心圆划分法	195	210	135	165	154	157	148	133	129						

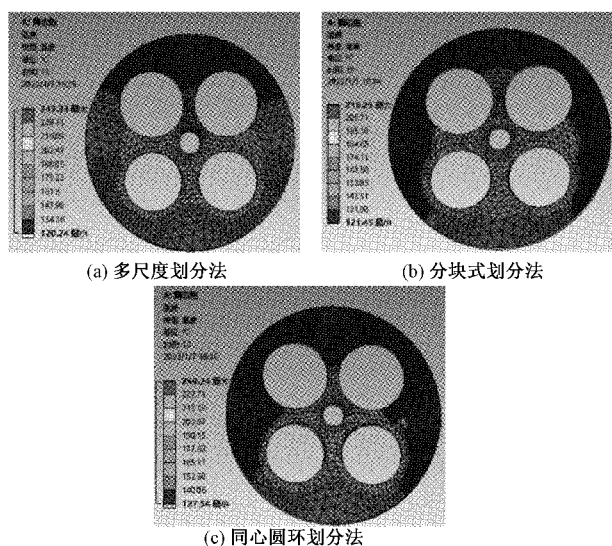


图 10 不同方案下火力面温度场分布

由图 10 中的温度场分布可知,不同方案下获得的温度场差异主要体现在以下几个方面:

1)温度的分布范围不同,多尺度方案下,温度范围最大,即 120.74 ℃~243.33 ℃;同心圆方案下,温度范围次之,为 127.54 ℃~240.24 ℃;而分块方案下,温度范围最小,为 121.45 ℃~216.25 ℃。

2)缸盖边缘区温度分布差异较大,多尺度方案下,低温区范围较小,主要分布在进气门上部;而分块和同心圆方案下,低温区范围较大,扩展到了排气门两侧。

3)排气门高温区范围不同,多尺度和分块方案下,虽然高温区都分布在排-排气门鼻梁区,但前者情况下高温区的范围相对较小,且集中在鼻梁区中心位置,而后者高温区则沿鼻梁区有外沿现象;而同心圆方案下,高温区则向进-排气门扩展,且高温区范围最大。

众所周知,气缸工作时排气门温度明显高于进气门,且由于热传导作用,不难推出进气门两侧边缘温度应该高于进气门边缘温度。因此,多尺度方案下得到的低温区分布较分块和同心圆方案更符合实际情况。同时,由于进气门空气温度影响,会使得进-排气门鼻梁区位于排气门边缘的温度较排-排气门中心区域温度小,所以多尺度方案较同心圆方案更符合实际,这与表 3 中测点 8 数值明显低于测点 3 数值相吻合。同时,温度的分布范围越大,在将其转

化为热场分布时,各点热场强度的差异才能更明显,也才能更利于影像的重构。

为了进一步说明基于多尺度方案下得到的温度场分布的优势,下面对不同方案下温度差异较大区域的部分测点进行实际测量,并将其与不同划分方案下得到的温度场分布进行比较。各测点位置如图 11 所示,对应的测量结果如表 4 所示。

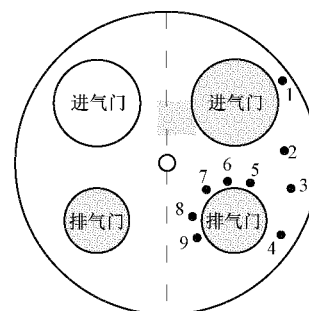


图 11 不同方案下各测点位置分布

表 4 测得的各区域测点温度值

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
多尺度划分法	131	134	135	136	183	193	207	215	221
分块式划分法	132	135	135	136	184	191	207	214	221
同心圆划分法	127	128	128	129	175	180	184	196	201

将各点实际测量值与不同方案下火力面对应测点的温度值进行比较,结果如图 12 所示。

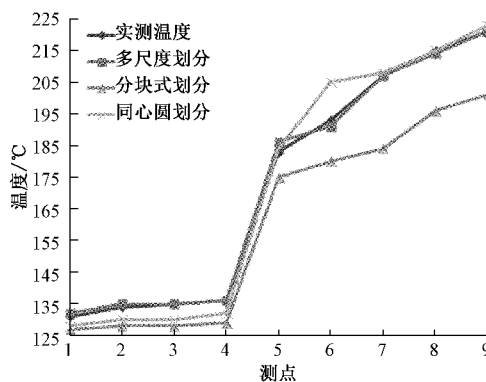


图 12 各方案下各测点温度模拟值与实测值比较

由图 12 可知,多尺度划分法得到的各测点温度与实

际测量值最接近。为了进行定量对比,文中利用变化量来对各测点温度进行误差分析,即:

$$Error = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{|\text{测点温度} - \text{实际测量值}|}{\text{实际测量值}} \quad (2)$$

将表4数据代入式(2),可得多尺度、分块式和同心圆3种划分方案下的温度平均误差分别为0.52%、6.44%和2.23%。

综上所述,多尺度划分方案下获得的温度场分布与实际最接近。

## 4 结 论

剖析了气缸盖热传导规律、高温区范围与位置分布等,依据热场变化梯度的不同,提出了一种基于多尺度思想的缸盖火力面热场域划分方法,解决了现有分块式、同心圆划分时各区域划分尺度单一所导致的重点区域热场分布误差大的问题。

通过对比实验分析了分块式、同心圆以及多尺度划分3种方案优劣。结果表明,多尺度划分方案下各点热场温度具有更高的精准性。

多尺度划分方案可以对火力面热场域进行更细的划分,且热场的分布范围较其它两种划分方法都大,使得各点热场强度具有更明显的差异性,更易满足关联影像重构中对大差异热场分布的要求,可为气缸盖内壁影像重构提供数据支撑。

## 参考文献

- [1] YUAN L A, JI A, GU Z B, et al. Analysis of a diesel engine cylinder head failure caused by casting porosity defects[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127: 105498, DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105498.
- [2] HUANG W, REN P, ZUO Z, et al. High-cycle fatigue failure analysis of cast Al-Si alloy engine cylinder head[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127, DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105546.
- [3] 许友林, 陈丹丹, 熊玲. 舰船柴油机缸内工作过程监测系统设计与实现[J]. *国外电子测量技术*, 2015, 34(4):54-59.
- [4] 刘小峰, 叶榕婷, 柏林, 等. 基于灰色理论的航空发动机剩余寿命预测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1):74-81.
- [5] 刘显宏. 柴油发动机气缸盖喷油器孔开裂故障分析及应对[J]. *装备制造技术*, 2020, (11):132-134, 152.
- [6] 张皓宇, 杨风暴, 王肖霞. 基于关联成像的气缸盖内壁影像检测方法研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(6): 30-36.
- [7] 赵高岩, 张威望, 董非, 等. 两气门柴油机缸盖火力面热边界条件的确定方法[J]. *机械设计与制造*, 2019(2):62-65, 69.
- [8] 郑永强, 薛良君, 张强. 基于提高冷却温度的机车柴油机部件可靠性研究[J]. *铁道机车车辆*, 2020, 40(4):80-84.
- [9] 杨松林, 向建华, 程颖, 等. 气缸盖温度场正交试验仿真方法研究[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(3):73-77, 82.
- [10] 杨方平. ZAlSi7Mg合金发动机气缸盖疲劳分析[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2020.
- [11] 李维, 陈佩, 赵勇琪, 等. 天然气发动机燃烧性能模拟分析[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(2):34-38.
- [12] 孟凡栋, 黄国龙, 魏涛, 等. 柴油机灰铸铁气缸盖热负荷变化规律[J]. *内燃机与动力装置*, 2019, 36(3): 56-59.
- [13] GUO C, ZUO Z, FENG H, et al. Advances in free-piston internal combustion engines: A Comprehensive Review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116679.
- [14] 薛松, 黄瑞, 徐钢, 等. 发动机气缸盖温度场测试试验系统研究[J]. *现代机械*, 2019(5):1-5.
- [15] WANG T, JIA X H, LI X Y, et al. Thermal-structural coupled analysis and improvement of the diaphragm compressor cylinder head for a hydrogen refueling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(1):809-821.
- [16] BI Y, WANG P, LUO L, et al. Analysis of out-of-round deformation of a dry cylinder liner of a non-road high-pressure common-rail diesel engine based on multi-field coupling [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43(1), DOI:10.1007/s40430-020-02737-0.

## 作者简介

王凯, 博士, 工程师, 主要研究方向为热负荷件可靠性研究等。

E-mail: wangkai14@weichai.com

王肖霞(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为关联成像技术、不确定性信息处理等。

E-mail: wangxiaoxia@nuc.edu.cn