

# 船用中速柴油机冷启动工况下缸壁燃油附壁研究

谢堃, 田华\*, 王永健, 隆武强

(大连理工大学 能源与动力学院, 大连市 116024)

## Study on cylinder wall fuel attachment of Marine medium speed diesel engine under cold start condition

Xie Kun, Tian Hua\*, Wang yongjian, Long wuqiang

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, China)

**Abstract:** At present, there is a lack of diesel engine cold start conditions of fuel droplets attached to the cylinder wall process research and mechanism analysis, the study for a type of marine medium-speed diesel engine piston top land ablation phenomenon, multi-dimensional computational fluid dynamics (CFD) software is used to explain the mechanism of fuel adhesion to the cylinder wall corresponding to the ablation area of the piston top land. The results show that, in the low-speed cold start conditions, due to a large number of diesel droplets hitting the wall of the cylinder combustion area is concentrated in the vicinity of the wall of the combustion chamber and near the position of the injection hole, the middle area of the injection path forms a low-temperature region, the diesel fuel injected at the later stage of the injection phase is located mainly in the low-temperature region resulting in a poorer atomisation effect, this part of the incomplete evaporation of floating liquid oil droplets is driven by eddy current in the cylinder at the late stage of combustion attached to the cylinder wall. Diesel engine in the cold start conditions after many cycles of operation, the cylinder wall attached to the wall oil film mass and the top area of the gas ring increased the cumulative fuel mass, oil film distribution area and eddy current direction, eddy current strength related.

**摘要:** 目前缺少对柴油机冷启动工况下燃油液滴附着在缸壁过程研究及机理分析, 研究针对某型船用中速柴油机活塞火力岸存在的烧蚀现象, 采用多维计算流体力学 (CFD) 软件解释了活塞火力岸烧蚀区域对应的缸壁位置附着燃油的机理。结果表明, 在低转速冷启动工况下, 由于大量柴油液滴撞壁导致缸内燃烧区域集中在燃烧室壁面附近及喷孔位置附近, 喷油路径中间区域形成了低温区域, 喷油阶段后期喷射的柴油主要位于低温区域导致雾化效果较差, 这部分未蒸发完全的漂浮液态油滴在缸内涡流带动下在燃烧阶段后期附着在缸壁。柴油机在冷启动工况下经过多循环运转后, 缸壁附壁油膜质量及气环顶面积累燃油质量增多, 油膜分布区域与涡流方向、涡流强度有关。

**关键词:** 柴油机冷启动工况; 燃油液滴附壁; 缸壁油膜; 燃烧过程; 数值模拟

**Key words:** Diesel engine cold start condition; Fuel drop wall attachment; Cylinder wall oil film; Combustion process; Numerical simulation

中图分类号: TK421

文献标识码: A

## 0 概述

目前对柴油机燃油附壁燃烧研究主要集中于燃烧室凹坑内燃油积存燃烧, 凹坑油膜附壁燃烧常见于柴油机冷启动工况及高海拔条件下柴油机运转。强永平等<sup>[1]</sup>利用 CONVERGE 模拟分析软件模拟低温环境复现活塞烧蚀现象, 低温环境下最大压升率、累计湿壁量和瞬态放热最大值均有所增加, 并且在

活塞侧隙和避阀坑附近出现了明显爆燃现象。Li Haiying 等<sup>[2]</sup>通过 CONVERGE 软件模拟了高原环境下重型柴油机燃烧过程并对比了低海拔和高原环境下柴油机燃烧过程和放热参数的差异, 当海拔高度由 1km 变化到 4km 时从 CA10 到 CA90 的主要燃烧持续时间缩短 70% 以上且预混燃烧的比例大幅下降, 在高海拔环境下的柴油机出现了爆震燃烧和明

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 谢堃 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为船用柴油机燃烧过程分析, E-mail: xiekun@mail.dlut.edu.cn;  
田华 (教授), E-mail: tianhua@dlut.edu.cn.

显压力波传播，燃烧效率相较于正常燃烧下降了43%，由于大量喷油油束撞壁，靠近壁面的可燃混合气发生了爆燃现象出现平均传播速度达到1364m/s的压力波使得缸内出现压力振荡<sup>[3]</sup>。

上述对柴油机凹坑油膜附壁燃烧研究重点在于低温或者低温低压环境下燃烧过程中油气分布及放热参数的特点，而没有将燃油的蒸发效果及燃烧室内未蒸发燃油液滴发展过程相联系，此外更没有提及未蒸发燃油液滴的移动过程。

有研究提到了缸壁积油的影响，鞠洪玲等<sup>[4]</sup>采用活塞头部侧隙区域容积补偿的方法对某型单缸直喷柴油机进行模拟计算结果显示柴油机头部侧隙区域气缸内壁会形成一层薄薄的油膜，并且在侧隙底部边缘处会积聚大量未燃燃料，由于侧隙内含氧量少，积存的未燃燃料稀薄燃烧产生大量碳烟造成侧隙区域积碳。此研究对燃油积存位置进行描述，并且对活塞侧隙积油的影响有更深入的研究，但没有详细研究缸壁油膜形成过程。此外，早期喷射策略有利于燃油与空气预混合得到更利于充分燃烧的当量比，但早喷也会导致提前喷射的燃油处于缸内压力较低的环境，更多的燃油喷射在燃烧室凹坑并且可能导致燃油进入活塞缸壁缝隙内，在此状况下余隙区域和活塞缝隙内积存大量燃油导致UHC增多、燃烧效率降低<sup>[5]</sup>。此研究提到燃油进入活塞侧隙内可能与燃油大量喷射在凹坑有关，但没有描述燃油进入活塞余隙内过程，并且大量燃油进入活塞侧隙内是较大的喷油夹角导致与本研究燃油附壁机理有根本区别。

还有部分研究提到了活塞侧隙内积碳的机理及碳烟进入活塞侧隙内过程。研究发现HCCI发动机活塞侧隙区存在催化剂涂层会对HCCI发动机着火时刻和排放产生影响，当活塞顶和侧隙区同时存在催化剂时HC、CO排放降低，但NO<sub>x</sub>排放略微升高<sup>[6-7]</sup>。柴油机活塞侧隙内积碳现象比较常见，Shin Mei

Tan等<sup>[8-9]</sup>通过CFD软件模拟了柴油机在不同喷油策略下产生的碳烟随气流运动带入活塞侧隙的过程，并发现延迟燃油喷射及在两次喷油策略下延长两次喷油间隔持续期有利于减少带入活塞侧隙区域内碳烟量。上述研究提到了活塞侧隙内催化剂涂层对碳烟生成的影响及描述了气流携带碳烟的流动过程，没有直接提及燃油进入活塞侧隙内过程且没有将活塞侧隙内积碳与活塞侧隙内积油相联系。

综上所述，将柴油机冷启动工况下燃烧特点与未蒸发燃油液滴发展过程联系研究较少，并且对多循环燃油液滴附着缸壁的特点研究更是甚少，而燃油进入活塞侧隙及附着缸壁可能导致积碳或烧蚀现象影响发动机工作寿命。因此本研究将通过数值模拟手段对蒸发燃油液滴的形成及空间位置变化进行研究，此外对多个循环下燃油附着缸壁的特点进行分析。

## 1 活塞火力岸烧蚀分析

某型柴油机活塞火力岸出现了明显的点蚀现象如图1所示，部分活塞材料从活塞火力岸脱落。针对此柴油机活塞火力岸存在的烧蚀故障，通过转速为400r/min的冷启动工况试验发现该型柴油机存在燃油液滴附着缸壁现象。烧蚀位置主要分为8个区域分别对应8个喷孔喷射油束在缸壁上落点，因此这个柴油机活塞烧蚀可能与燃烧过程有密切关系，通过试验得到燃烧过程柴油机活塞附近详细油气分布及压力温度等燃烧参数变化规律存在一定局限性，因此这里选择采用多维计算流体力学(CFD)软件复现此不正常燃烧现象及分析缸壁附着燃油液滴原因。

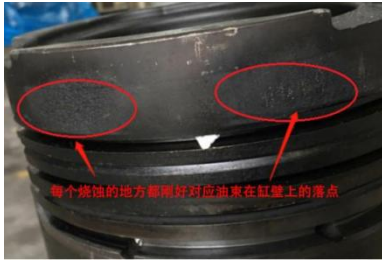


图1 活塞火力岸烧蚀现象

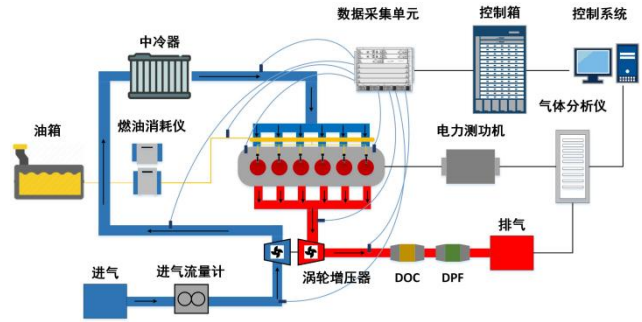


图2 试验设备示意图

## 2 试验方案与仿真模型

### 2.1 发动机模型

本研究采用一台六缸四冲程船用柴油机，发动机主要技术参数如表1所示

表1 发动机主要技术参数

| 项目               | 参数                   |
|------------------|----------------------|
| 缸径/mm×行程/mm      | 200×320              |
| 连杆长度/mm          | 520                  |
| 压缩比              | 13: 1                |
| 转速/r · min-1     | 400                  |
| 燃烧室形状            | ω                    |
| 喷油提前角/(°CA ATDC) | -22                  |
| 喷油持续期/(°CA ATDC) | 8                    |
| 喷孔方案             | 8孔, 孔径0.44mm, 锥角145° |
| 进气方式             | 增压水冷                 |
| 进气门关闭/(°CA ATDC) | -144                 |
| 排气门开启/(°CA ATDC) | 128                  |

### 2.2 试验方案

实验中采用电力测功机及相关仪器测量发动机转速和扭矩;采用发动机状态参数测试仪测量发动机机油温度和压力、冷却液温度、温度和压力、排气压力、大气湿度、温度和压力。柴油机台架试验环境海拔2000米。试验环境温度为25°C,大气压为80kPa,大气湿度约为50%,燃油温度保持在27°C,冷却水温度约为90°C,试验设备示意图如图2所示。测量主要参数的设备准确度如表2所示。

表2 试验设备的准确度

| 试验参数   | 试验设备                | 准确度      |
|--------|---------------------|----------|
| 缸压     | AVL GU21D—压力传感器     | ±0.4bar  |
| 曲轴转角   | AVL 365C—曲轴转角译码器    | ±0.05°CA |
| 缸内气体温度 | K-type—热电偶          | ±2°C     |
| 电功率    | SAGA 4500—数字功率计     | ±1W      |
| 燃油消耗量  | DIGIMED DG-15W—电子天平 | ±0.2g    |
| 空气流量   | AKROM KR835—数字风速仪   | ±0.9 g/s |

### 2.3 仿真计算方案

本研究基于CONVERGE软件对此发动机的燃烧过程进行数值模拟。综合考虑计算精度和计算时间后选择仿真计算的基础网格尺寸为5mm。在CONVERGE中为了得到喷雾和缸壁区域更精确的计算结果,对喷雾发展过程及油膜将要附着的缸壁区域进行了三级网格固定加密,此外对速度、温度及油膜参数均设置自适应加密以得到精确的计算结果。仿真计算区间为进气门关闭时刻(144°CA BTDC)到排气门开启时刻(128°CA ATDC),采用变时间步长计算模式,初始计算步长为 $1 \times 10^{-7}$ s,最小时间步长为 $1 \times 10^{-9}$ s,最大时间步长为 $1 \times 10^{-5}$ s。由于本发动机喷油器采用8孔喷油因此考虑到喷油对称性及计算效率仅对1/8燃烧室模型进行计算,本研究计算采用的燃烧室模型如图3所示。燃烧所

用燃油为 CONVERGE 提供柴油替代燃料 DIESEL2, 其与真实柴油的黏度、密度等物理性质十分接近。计算方案的初始条件和边界条件如表 3 所示。

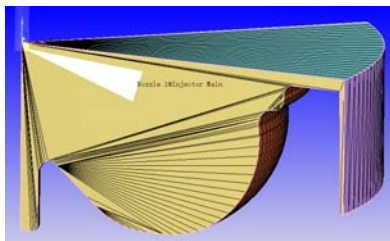


图 3 仿真计算 1/8 燃烧室模型

表 3 计算方案的初始条件和边界条件

| 项目         | 参数    |
|------------|-------|
| 初始缸内温度/K   | 324   |
| 初始缸内压力/MPa | 0.144 |
| 活塞温度/K     | 450   |
| 缸盖温度/K     | 400   |
| 缸壁温度/K     | 350   |

当液滴与壁面发生作用后将在壁面形成油膜或发生反弹、飞溅等行为, 本研究中喷雾撞壁后油膜形成过程极为重要, 为了准确描述液滴与壁面作用后的液滴运动, 喷雾撞壁模型采用了 Wall film 喷雾撞壁模型, 主要计算子模型选取如表 4 所示。

表 4 仿真子模型的选取

| 模型名称    | 子模型                                  |
|---------|--------------------------------------|
| 湍流模型    | RNG k- $\epsilon$ <sup>[10]</sup>    |
| 燃烧模型    | SAGE <sup>[11]</sup>                 |
| 喷雾模型    | KH-RT <sup>[12-13]</sup>             |
| 喷雾撞壁模型  | Wall film <sup>[14]</sup>            |
| 液滴碰撞模型  | NTC <sup>[15]</sup>                  |
| 壁面传热模型  | O' Rourke and Amsden <sup>[16]</sup> |
| 燃油蒸发模型  | Frossling <sup>[17]</sup>            |
| NOx 模型  | Extended Zeldovich <sup>[18]</sup>   |
| Soot 模型 | Hiroyasu <sup>[19]</sup>             |

## 2. 4 仿真模型验证

图 4 为计算结果中仿真值及试验值的压力、放热率对比结果, 图中可看出试验值与仿真值在缸压上升区间及膨胀区间的变化趋势基本吻合, 两者缸压突变时刻也基本吻合, 说明三维仿真参数设置及

模型选取比较合理能基本反映实际燃烧过程, 因此后续的结果讨论以此仿真结果展开。

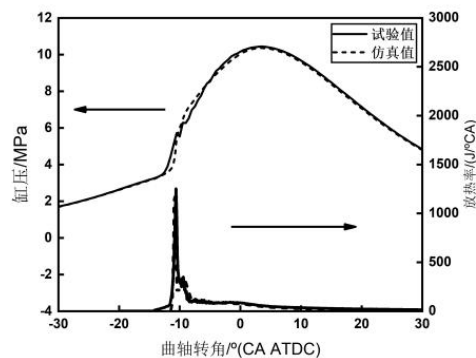


图 4 压力及放热率对比

## 3 燃烧过程分析

### 3. 1 温度空间分布对油束蒸发的影响

本研究的目的是探究燃烧过程中柴油液滴附壁过程及原因, 而影响柴油液滴附壁附壁最重要的因素是缸内温度大小及空间分布, 因为缸内温度大小对柴油液滴蒸发起决定性的作用。图 5 给出了燃烧过程中不同时刻的缸内温度空间分布及油束发展情况, 图中黑色粒子代表油束中液相燃油颗粒, 其附着在壁面将形成油膜。

在 15° CA BTDC, 由于缸内温度压力较低燃油蒸发效果不佳, 缸内空气密度低燃油受到的阻力较小且燃烧室壁距较小所以大量喷射的燃油已经接触燃烧室壁面, 油束由诸多单液滴组成, 液滴撞壁后发生黏附、反弹、摊布、热分解、反弹破碎、直接破碎或者飞溅<sup>[20-23]</sup>, 在冷启动工况下由于壁面温度较低燃油液滴撞壁后不发生热分解, 可以看到撞壁后反弹、反弹破碎及飞溅的燃油液滴动能大大减小因此缸内涡流对这些燃油液滴影响较大, 反弹及飞溅的燃油液滴被缸内涡流带入到另一侧然后继续蒸发、再次撞击壁面, 附着在燃烧室壁面的油膜凹坑方向和余隙方向扩展会在壁面附近形成高当量比区域。

在 11.4° CA BTDC, 沿燃烧室壁面向上扩展的油膜已经进入余隙内, 由于重力作用及燃烧室碗状

结构更多油膜向燃烧室底部扩展，位于燃烧室底部附近的油膜低温化学反应充分开始出现高温着火。

在  $9.7^\circ\text{CA BTDC}$ ，燃烧室壁面附近已出现大范围火焰区，由于余隙内存在大量可燃混合气导致火焰已接近充满整个余隙，并且在靠近喷孔位置出现了高温着火。在 TDC 时刻附近，喷油路径均存在火焰包围的高温区域，所有喷射燃油均处于快速蒸发阶段，燃油蒸发效果最好。

从  $20^\circ\text{CA ATDC}$  开始，喷油路径上出现了高温燃烧区之间的低温区域，而此时部分未蒸发的柴油液滴正处于低温区域内。随着活塞下行，余隙内火焰区向上下两侧拉伸导致而横向火焰区面积减少，喷孔附近火焰区可燃混合气浓度降低导致高温区域不断缩减，虽然缸内残存的漂浮燃油液滴仍在蒸发其粒径不断减小但仍然存在部分液相燃油液滴未完全蒸发。

在  $116^\circ\text{CA ATDC}$ ，大部分未蒸发漂浮油液已被缸内气流带动附着在缸壁形成油膜。因此，柴油机冷启动工况下缸壁附着燃油油膜质量与缸内高温燃烧区域分布有重要的关系。

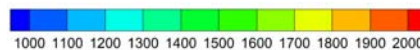
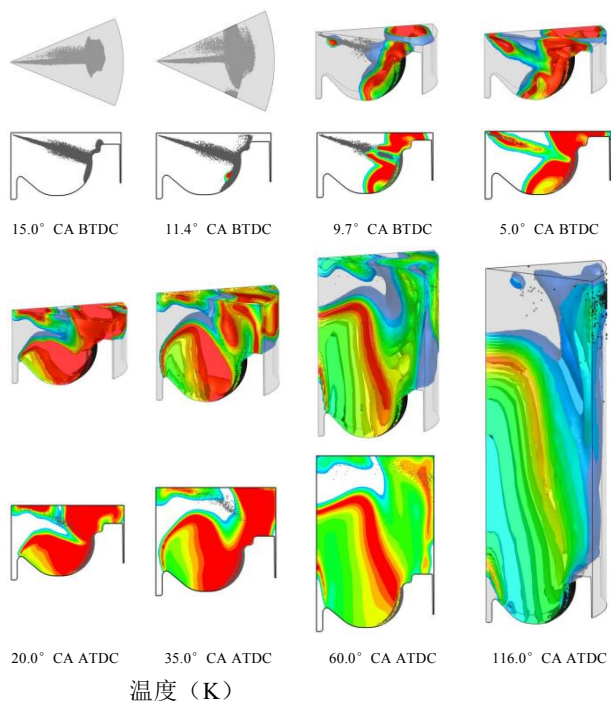


图 5 不同时刻对应温度空间分布及油束发展情况

### 3. 2 当量比空间分布对油束蒸发的影响

当量比分布能很大程度反映燃料蒸发情况和可燃混合气分布，图 6 展示了燃烧室内不同时刻对应的当量比分布情况。在  $11.4^\circ\text{CA BTDC}$ ，由于缸内环境压力较低空气密度较小，油束受到的阻力较小所以喷雾液相贯穿距较大，大量燃油液滴撞壁并由撞壁中心向壁面四周扩展并在燃烧室右侧壁面附近产生大当量比混合气。在  $9.7^\circ\text{CA BTDC}$ ，可燃混合气扩展到缸盖，这将导致火焰传播到燃烧室余隙内。由于燃烧室壁面高温着火，气流受到火焰膨胀的影响，气流由高温燃烧区域向燃烧室左侧传播，这导致高当量比混合气向缸盖和凹坑扩展。由于燃烧室结构对气流导流的影响，涡流在喷孔位置附近汇集形成高速气流，喷射油束受到高速气流的阻力，喷雾颗粒破碎效果增强，喷孔附近当量比增大，因此喷孔附近也随之出现高温着火现象。剧烈燃烧位置集中在凹坑右侧壁面及缸盖附近，但由于燃烧阶段后期活塞下行产生与活塞运动方向同向气流，并且燃烧室凹坑对气流导流作用，因此燃烧室左侧部分氧气流入燃烧室右侧。而燃烧阶段后期浓混合气大量集中在凹坑左侧燃烧且氧气稀缺，因此可以预测到大量 Soot 在凹坑左侧产生且氧化效果不佳。

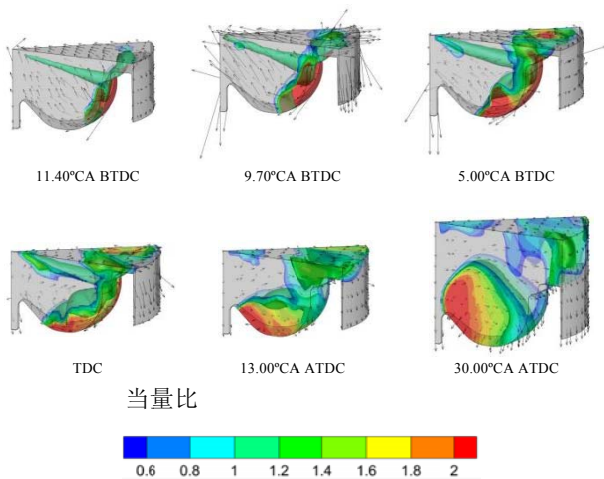


图6 不同时刻对应当量比空间分布

#### 4 燃油液滴附着缸壁过程分析

图7为冷启动工况下一个循环内附壁油膜形成过程图,其中黑色镂空的矩形环为喷油器喷出的喷雾液滴。在 $47.30^\circ\text{CA ATDC}$ 时刻,缸壁上尚无附壁油膜形成,在缸内有较多喷雾液滴漂浮。在 $47.40^\circ\text{CA ATDC}$ 时刻,红色圆圈内已出现零星附壁油膜,此油膜由上一时刻( $47.30^\circ\text{CA ATDC}$ )的红色圆圈内漂浮油液碰壁附着得到。在排气门开启时刻( $128^\circ\text{CA ATDC}$ ),缸壁上存在更多油液附壁,在此期间附壁油膜附近气体温度较低,油膜蒸发量较少,所以从 $47.40^\circ\text{CA ATDC}$ 时刻至 $128.00^\circ\text{CA ATDC}$ 时刻期间气缸附壁油膜量总体呈上升趋势。并且由于缸内涡流运动,部分漂浮的柴油液滴向缸壁右侧运动,因此缸壁右侧附壁油膜质量稍多,并且油膜厚度呈现出由油膜附壁区域中心向边缘逐渐减小的趋势。

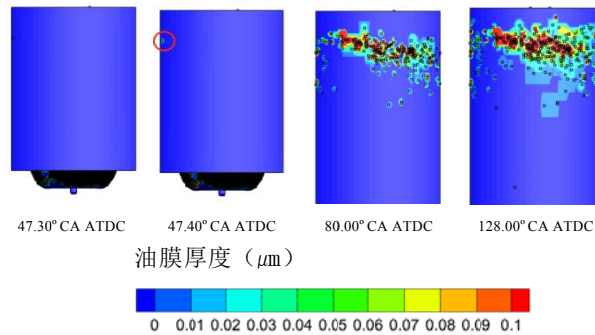
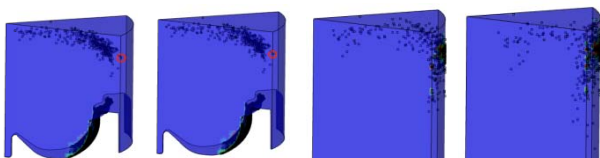


图7 气缸壁面附壁油膜形成过程

上述讨论针对燃烧过程中单个循环燃油液滴蒸发情况和燃油液滴附壁情况,而实际上缸壁油膜的积累是柴油机多个循环运转的结果。图8给出了全模型计算6个循环后得到的油膜附壁结果,计算多个全缸循环可以得到进排气作用下油膜附壁规律,但计算过多循环将会大大增加计算量,而6个循环后的结果足以得到液滴附壁规律,因此后续讨论计算6个循环的结果。当排气门开启后排气涡流加速漂浮油滴附壁过程,大部分缸内残留漂浮燃油液滴随排气涡流附着在TDC时刻气环以上的缸壁区域,而少量附壁油膜会在排气涡流作用下被带向缸盖及排气气门底座附近。由于冷启动工况下转速较低、活塞下行速度有限,只有少量燃油液滴在气流作用下被带到TDC时刻气环以下的缸壁区域。附着在TDC时刻气环以下的缸壁区域的油滴会由于气环的刮油作用积累在气环上。大部分漂浮燃油液滴附着在油膜铺展更均匀、近壁温度更高的TDC时刻气环以上缸壁区域。在多循环计算结束时刻,缸壁上油膜主要以8个区域分布,这与8个喷孔对应的各个子燃烧空间一一对应,大部分附壁燃油液滴撞击TDC时刻气环以上的缸壁区域中间部分。

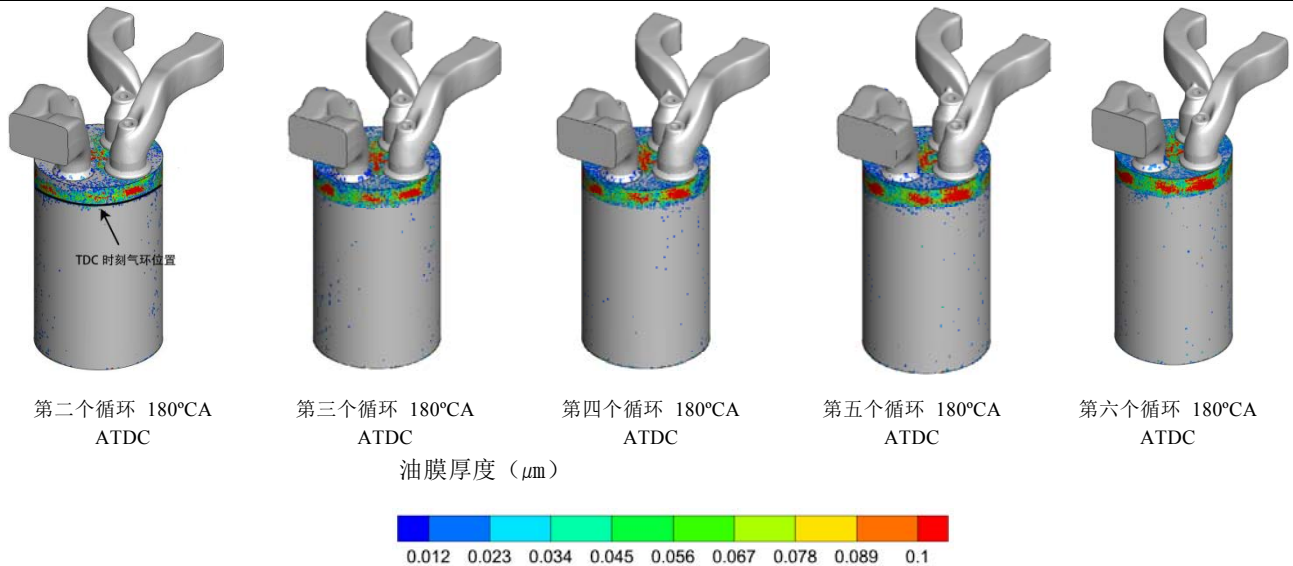


图8 全模型缸壁附壁油膜变化

## 5 结论

(1) 柴油机冷启动工况下大量燃油撞壁导致近燃烧室凹坑壁面出现高温燃烧区域, 凹坑高温着火加速缸内气流向喷孔出口汇集, 高速气流汇集导致油束在喷孔出口承受较大阻力, 进而导致燃油喷雾破碎加剧, 随之出现高温着火, 最终导致两个高温燃烧区域之间的喷雾相互作用区温度较低。

(2) 在温度较低的喷雾相互作用区的油束蒸发效果不佳, 是做功行程末期燃烧室内液相燃油液滴漂浮的重要原因。燃烧室内更均匀的当量比分布有利于减小未蒸发液相燃油液滴。少量漂浮未蒸发液滴随涡流运动后附着于缸壁, 柴油机长时间冷启动工况运转将会导致缸壁附着油膜质量增加。

(3) 柴油机在冷启动工况下多循环运转后, 附着于缸壁的油膜总体分布有一定规律, 与喷孔一一对应, 并且油膜呈现上下两侧更薄、随涡流运动方向增多的特点。油膜分布细微差别与涡流强度、涡流方向、活塞运动速度均有一定关系。

### 参考文献:

- [1] 强永平, 李海鹰, 张炜等. 低温环境柴油机活塞烧蚀燃烧过程分析研究[J]. 车用发动机, 2021(03):64-70.
- [2] Li Haiying, Zhang Xiaoqin, Li Chaofan, Cao Rulou, Zhu Weiqing, Li Yaozong, Liu Fengchun, Li Yufeng. Numerical Study of Knocking Combustion in a Heavy-Duty Engine under Plateau Conditions[J]. Energies, 2022, 15(9).
- [3] Wang Xiangting. Fundamental research on diesel combustion roughness under high altitude simulation environment[D]. Tianjin University, 2020. DOI:10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.003387.
- [4] 鞠洪玲, 罗马吉, 李辉. 柴油机侧隙区域对未燃燃料和SOOT的排放影响[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(03):135-139.
- [5] Tang Qinglong, Liu Xinlei, Raman Vallinayagam, Shi Hao, Chang Junseok, Im Hong G., Johansson Bengt. Effects of fuel trapping in piston crevice on unburned hydrocarbon emissions in early-injection compression ignition engines[J]. Combustion and Flame, 2021, 231.
- [6] ZENG Wen, AI Yan-Ting, XIE Mao-Zhao. A new method to reduce hydrocarbon emissions from homogeneous compression-ignition engines[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008(05):881-884.
- [7] ZENG Wen, XIE Maozhao, AI Yanting. Multi-dimensional numerical simulation of combustion and emission characteristics of HCCI engine affected by catalytic combustion in gap zone[J]. Combustion Science and Technology, 2009, 15(03):219-225.
- [8] Shin Mei Tan, Hoon Kiat Ng, Suyin Gan. Computational study of crevice soot entrainment in a diesel engine[J]. Applied Energy, 2013, 102.
- [9] Shin Mei Tan, Hoon Kiat Ng, Suyin Gan. CFD modelling of soot entrainment via thermophoretic deposition and crevice flow in a diesel engine[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 66.

- [10] Han Z, Reitz RD. Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG  $\kappa - \epsilon$  models. *Combust Sci Technol* 1995;106(4 - 6):267 - 95.
- [11] Senecal P K, Pomraning E, Richards K J, et al. Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using CFD and parallel detailed chemistry[J]. *SAE transactions*(2003): 1331-1351.
- [12] Reitz R D, Bracco F V. Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets[J]. *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, 1986.
- [13] Ricart L M, Xin J, Bower G R, et al. In-Cylinder Measurement and Modeling of Liquid Fuel Spray Penetration in a Heavy-Duty Diesel Engine[J]. *Sae Technical Papers*, 1997(3).
- [14] O'Rourke P, Amsden A. A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model[C/OL]. *SAE Technical Paper* 2000-01-0271, 2000.
- [15] Schmidt D P, Rutland C J. A new droplet collision algorithm [J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 164(1):62-80.
- [16] O'ROURKE P J, AMSDEN A A. Three dimensional numerical simulations of the UPS-292 stratified charge engine [C/OL]//SAE Technical Paper, 1987: 870597 (1987-02-23) [2022-10-11]. DOI: 10.4271/870597.
- [17] Amsden A A, O'Rourke P J, Butler T D. KIVA-2: A computer program for chemically reactive flows with sprays [J]. *Nasa Stirecon Technical Report N*, 1989, 89.
- [18] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, Inc., 1988.
- [19] Hiroyasu, H. and Kadota, T., "Models for Combustion and Formation of Nitric Oxide and Soot in DI Diesel Engines," *SAE Paper* 760129, 1976. DOI: 10.4271/760129.
- [20] Zheng Zhang, Fushui Liu, Yifeng An, Haobo Gao, Wei Du, Yongli Gao, Juejue Lou, Effect of wall surface temperature on ignition and combustion characteristics of diesel fuel spray impingement, *Applied Thermal Engineering*, Volume 137, 2018, Pages 47-53.
- [21] Fushui Liu, Ziming Yang, Yikai Li, Han Wu, Experimental study on the combustion characteristics of impinging diesel spray at low temperature environment, *Applied Thermal Engineering*, Volume 148, 2019, Pages 1233-1245.
- [22] Han Wu, Xinyi Dong, Zhicheng Shi, Haiying Li, Sheng Miao, Weiren Cao, Yaqing Bo, Lu Zhang, Xiangrong Li, Evolution mechanism of diesel ignition with injection pressure under different spray wet-wall conditions at low temperatures, *Fuel*, Volume 330, 2022, 125629.
- [23] Han Wu, Lu Zhang, Zhicheng Shi, Haiying Li, Peng Xiao, Xiangrong Li, Experimental and numerical studies on fuel-film combustion and wall thermal effect of diesel spray, *Applied Thermal Engineering*, Volume 219, Part B, 2023, 119545.