

气缸漏气对柴油机缸内燃烧的影响

赵彭江, 宁智, 吕明, 李宇辉

(北京交通大学机电工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对气缸漏气对柴油机缸内气体流动及缸内燃烧影响研究缺乏的现状, 基于 CONVERGE 软件, 以重型柴油机为例, 建立了数学模型和漏气模型, 在重型柴油机工作应满足的边界条件与初始条件下, 进行了网格划分, 对网格独立性及漏气模型进行了验证. 在此基础上, 开展了不同气缸漏气状况对缸内气体流动速度、湍动能、燃烧温度、压力及放热率的影响规律研究, 并在同一漏气面积下, 研究了不同转速下缸内气体流动速度和缸内燃烧规律. 结果表明: 在整个燃烧过程中, 随着气缸漏气面积逐渐增大, 柴油机缸内气体流动速度和湍动能均快速升高, 而缸压不断减小、放热率及其峰值呈减小趋势, 且由于滞燃期增加放热率峰值滞后, 缸温由于后燃呈复杂变化趋势; 在同一漏气面积下, 随着转速逐渐升高, 缸压、放热率及其峰值不断增大, 而气体流动速度、湍动能、缸温及由于低转速下漏气量更大, 在不同燃烧阶段有着不同的变化趋势. 通过本文研究, 深入分析气缸漏气对柴油发动机运行造成的影响, 为进一步改善发动机性能和提高发动机使用寿命奠定一定的理论基础.

关键词: 柴油机; 转速; 漏气; 气体流动; 燃烧

中图分类号: TK421.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)06-0634-10

Effect of Cylinder Leakage on the Combustion in the Cylinder of a Diesel Engine

Zhao Pengjiang, Ning Zhi, Lü Ming, Li Yuhui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In view of the lack of research on the influence of cylinder leakage on the gas flow and combustion in the cylinder of diesel engine, based on CONVERGE software, this paper takes the heavy-duty diesel engine as an example, establishes a mathematical model and an air leakage model, carries out the meshing under the boundary conditions and initial conditions that the heavy-duty diesel engine should meet, and verifies the grid independence and the leakage model. On this basis, the influence of different cylinder leakage conditions on the gas flow velocity, turbulent kinetic energy, combustion temperature, pressure and exothermic rate in the cylinder was studied, and the gas flow velocity and combustion law in the cylinder at different speeds were studied under the same leakage area. The results show that: During the whole combustion process, with the gradual increase of the cylinder leakage area, the gas flow velocity and turbulent kinetic energy in the cylinder of the diesel engine increase rapidly, while the cylinder pressure decreases, the heat release rate and its peak value decrease, the peak value of the heat release rate lags behind due to the increase of the lag period, and the cylinder temperature shows a complex change trend due to the post-combustion. Under the same leakage area, with the gradual increase of speed, cylinder pressure, heat release rate peak value continuously increase, while gas flow speed, turbulent

收稿日期: 2025-02-20.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助(2025JBZY007).

作者简介: 赵彭江(2000—), 男, 硕士, 23126173@bjtu.edu.cn.

通信作者: 吕明, 男, 博士, 副教授, minglv@bjtu.edu.cn.

kinetic energy, and cylinder temperature exhibit different trends in different combustion stages due to the greater air leakage at low speed. Through this study, the influence of cylinder leakage on the operation of diesel engine is analyzed in depth, which lays a theoretical foundation for further improving engine performance and extending engine service life.

Keywords: diesel engine; rotate speed; crevice; gas flow; combustion

重型柴油机广泛应用于船舶工业、军事工业等,相对于汽油机而言,重型柴油机具有动力性能强、耗油量低且功率大等特点,但由于柴油机长时间工作,同时在高负荷运转下,气缸套和活塞环易产生磨损,会造成缸内气体泄漏.发动机实际工作过程中,高温高压气体从密闭气缸经由活塞环的侧隙、开口间隙流向曲轴箱,其量约占漏气量总值的95%以上.气缸漏气会带来一系列不良后果,气缸压缩压力减小,导致^[1-3]:柴油机起动困难;缸内压力降低,输出功率下降;缸内高温气体泄漏,加剧润滑油消耗和油品劣化;燃油有效比油耗增加,严重时甚至导致活塞膨胀卡死,直接影响着发动机运行性能和使用寿命.因此,对气缸漏气研究意义重大.

目前不少国内外学者对气缸漏气的原因、气缸漏气对柴油机性能上造成的影响、不同工况下气缸漏气量、对气缸漏气面积进行定量分析以及如何减少气缸漏气量等进行了深入研究,以延长柴油机使用寿命.

Huang 等^[4]研究发现天然气发动机碳氢化合物排放的主要来源是活塞缝隙中未燃烧的甲烷,活塞缝隙的体积影响甲烷排放和不完全燃烧损失. Ali 等^[5]通过改变发动机活塞形状和间隙容积比来提高发动机在过稀薄空气燃料混合条件下的燃烧效率和热效率. Shen 等^[6]采用4个活塞径向裂缝,以评估活塞径向间隙对不同活塞碗形的LNG柴油双燃料发动机甲烷排放和燃烧的影响. Stocchi 等^[7]针对有或无缝隙的发动机进行了数值模拟. 结果表明,加入裂缝体积会影响压扁区域内未燃烧混合物的质量,影响燃烧后期的火焰和热量释放. 杨绍卿等^[8]研究了不同漏气面积开度对单缸柴油机缸内最大爆发压力、功率以及有效比油耗的影响. 王世年等^[9]研究了气缸套-活塞环磨损对内燃机性能的影响. 朱卫华^[10]开展了不同发动机转速、转矩、机油温度和最高燃烧压力工况下的漏气量试验研究. Hu 等^[11]针对柴油机气门泄漏故障诊断中特征分布的非线性变化和发散性,提出了一种故障诊断方法. Doppalapudi 等^[12]分析了燃烧室对改善柴油机缸内燃烧特性的影响,研究发现燃烧室内部的湍流运动避免了缝隙区域的燃烧. Ma 等^[13]针对DMDF发动机的甲醇和甲醛排放和不同进气阀开度

和排气阀关度对甲醇排放的影响进行了研究. 结果表明,扫气阀重叠时针阀升程会明显增大,对甲醇泄漏有较大影响. Guo 等^[14]提出了一种可变工况下的数值模拟模型,揭示了发动机转速、环境温度和环槽压力对缸套磨损的影响规律. 雷基林等^[15]重点研究了不同活塞环岸间隙、环槽间隙、活塞环开口间隙、活塞顶环径向弹力对缸内的机油消耗和漏气量的影响规律. 曹志义等^[16]分析了不同转速下的活塞漏气和缸压变化. 马玉坡等^[17]分析了背景温度和背景密度的变化过程中喷雾射流滞燃期和着火位置的变化规律. Tan 等^[18]研究了影响轻型柴油机燃烧烟灰空间演化及其向缝隙区输运过程的运行参数.

但缺少针对漏气给缸内气体流动及燃烧造成的具体影响规律以及在漏气条件下的气缸燃烧模型和计算模型等.

基于上述问题,本论文将基于 CONVERGE 软件,以重型柴油机为例,建立数学模型、漏气模型,进行网格划分,对网格独立性及漏气模型进行验证. 在此基础上,分析活塞环的侧隙漏气面积大小对柴油机缸内气体流动以及燃烧特性,并在同一漏气面积下,研究不同转速下缸内气体流动速度和缸内燃烧规律,深入分析气缸漏气对发动机造成的影响. 通过本文研究,为进一步改善发动机性能和提高发动机使用寿命奠定一定的理论基础.

1 仿真模型的建立

本文内容基于 CFD 软件 CONVERGE 进行仿真建模,包括发动机仿真模型、漏气模型,通过不断仿真计算,对漏气模型里各个参数进行标定,找出影响仿真结果最大的漏气参数,最后进行网格独立性验证和漏气模型验证,以保证模型的准确性.

1.1 发动机仿真模型

本文的所有仿真都是对某台涡轮增压重型柴油机上的第一缸进行燃烧模拟,研究的发动机技术参数如表1所示. 燃烧室的计算模型及网格划分如图1所示. 本文对气缸内速度场和温度场的仿真分析,从进气管中心做垂直切面延伸到气缸底部,将此切面作

为研究对象(下文所有速度场与温度场的分布均基于此切面),如图 2 所示。

表 1 发动机基本参数

Tab.1 Basic engine parameters

结构参数				喷雾系统参数					
缸径/ mm	行程/ mm	连杆长度/ mm	压缩比	喷孔数	喷雾起始 角度/(°CA)	喷雾持续 期/(°CA)	喷雾锥角/ (°)	喷孔直径/ mm	喷雾总质量/g
137.16	165.10	263.00	15.95	6	-9	21	9	0.259	0.162

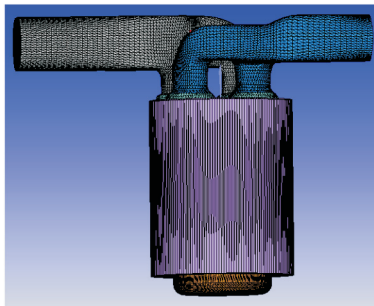


图 1 气缸示意

Fig.1 Schematic diagram of the cylinder

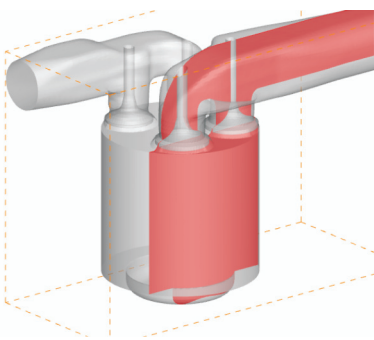


图 2 气缸切面示意

Fig.2 Schematic diagram of the cross-sectional surface of the cylinder

1.2 漏气模型

CONVERGE 漏气模型如图 3 所示. 该模型展示了气缸壁的一侧, 主要由燃烧室、活塞及活塞环和气缸壁组成. 模型总共有 19 个可调参数, 为了更贴近发动机实际工作过程, 本文的发动机仿真过程均包括活塞环运动. 在其他参数属于合理范围的同时, 通过控制变量法, 改变其中一个参数, 进行仿真, 根据结果的变化大小, 最后判断出影响气缸漏气变化最大的参数为 A_{area13} 与 A_{area35} , $V_{volume2/3/4}$ 对结果也有一定影响, 将 A_{area13} 与 A_{area35} 作为最终漏气变量, 其他变化较小的参数则根据软件与相关发动机资料进行计算和仿真后, 如表 2 所示分别设置为固定值.

漏气模型中的 A_{area13} 与 A_{area35} 分别表示发动机实际工作时每个活塞环外侧与气缸壁之间的流通面积, 通过计算, A_{area13} 与 A_{area35} 参数与实际发动机活塞环外侧和气缸壁之间的距离对应关系如表 3 所示.

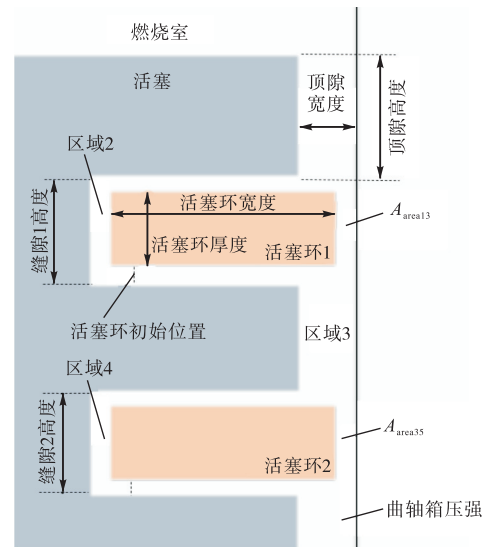


图 3 漏气模型示意

Fig.3 Schematic diagram of the crevice model

表 2 漏气模型的相关参数

Tab.2 Parameters of the air leakage model

参数	数值
顶隙宽度/mm	0.1
顶隙高度/mm	30
曲轴箱压强/MPa	0.2
活塞环 1/2 宽度/mm	5
活塞环 1/2 厚度/mm	2
活塞环 1/2 质量/g	100
活塞环 1/2 初始位置/mm	0
缝隙 1/2 高度/mm	2.05
区域 2/3/4 的体积/mm ³	40
区域 2/3/4 的压强/MPa	0.09

表 3 漏气参数对应关系

Tab.3 Area mapping of air leakage parameters

$(A_{area13}/A_{area35})/mm^2$	活塞环外侧与气缸壁距离/mm
0	0
10.8	0.025
21.5	0.05

1.3 仿真模型的验证

1.3.1 网格独立性验证

柴油机燃烧模拟计算过程对网格精度要求比较高, 划分网格如果精度太低, 仿真结果容易发散或者不准确, 而精细的网格有利于提高计算精度, 但仿真时间较长. 因此, 为了获得最佳的计算结果, 对气缸

壁 1 级加密、喷油嘴和油束路径进行 3 级加密后,对进气和排气缸盖分别使用 3 级加密,然后不断调试进行仿真,最后得出 3 组网格大小:0.004 mm、0.006 mm 以及 0.008 mm,分别进行仿真计算,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,缸压最大相差值为 1.6%,缸温最大相差值为 2.5%,网格精度较高时,仿真结果对网格大小不再有依赖性,考虑到计算的时间与计算结果的准确性,采用 0.006 mm 划分网格进行下一步仿真计算。

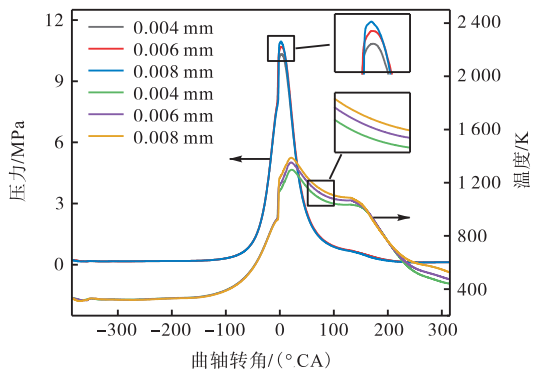


图 4 不同网格缸内压力和温度比较

Fig.4 Comparison of pressure and temperature in different grids

1.3.2 仿真结果的验证

针对所设置的漏气模型,笔者用 $A_{\text{area}13}$ 、 $A_{\text{area}35}$ 参数的变化来表征漏气面积的变化.因此需要保证在 A_{area} 参数为 0 mm^2 时,其他参数对漏气量影响较小,且 A_{area} 参数为 21.5 mm^2 时,漏气量较大,缸内受漏气影响较大。

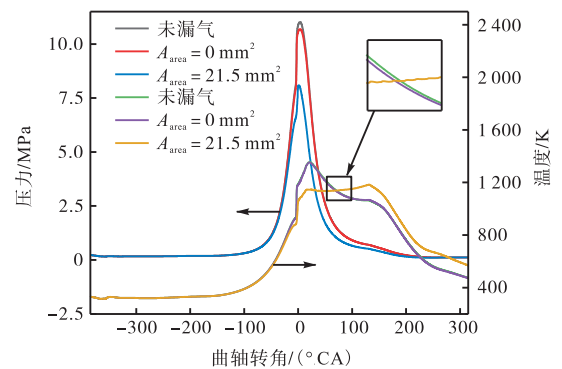
将其他漏气参数设置为固定值(如表 2 所示),初始条件及边界条件等仿真参数保持不变,将 A_{area} 参数分别设置为 0 mm^2 、 21.5 mm^2 和未开启漏气模型(no crevice)进行仿真比较,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,未开启漏气模型与开启后 A_{area} 参数为 0 mm^2 时,两者缸压变化较小,前者缸压峰值为 11 MPa,后者为 10.7 MPa;缸温变化几乎一致,差别较小;缸内总质量相较于前者,压缩终了时漏掉了一部分,喷油后质量逐渐增大,最后两者质量相差 0.07%。

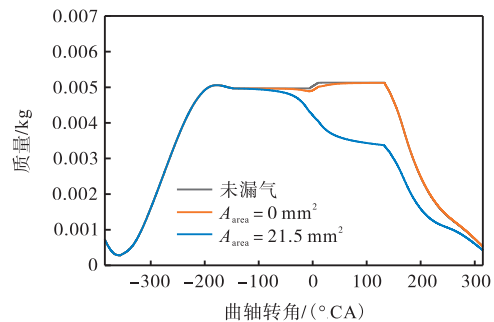
而未开启漏气模型与 A_{area} 参数为 21.5 mm^2 进行比较,缸压峰值从 10.7 MPa 下降为 7.7 MPa,下降幅度为 28%;缸温在 21°CA 处降低了 15.4%,在 131°CA 处上升了 11.3%;质量在 131°CA 处相差最大,相差 34%。

综上所述,其他漏气参数设置处于合理范围,

A_{area} 参数为 0 mm^2 与未漏气的理想情况整体燃烧结果相差较小;而 A_{area} 参数为 21.5 mm^2 与未漏气的理想情况比较相差较大,前者缸内漏气质量多,受漏气影响,缸内缸温缸压下降明显,说明漏气对缸内燃烧影响较大.为了仿真结果更贴近实际情况,笔者采用 0 mm(活塞环外侧与气缸壁距离 d 为 0 mm, A_{area} 参数为 0 mm^2)表征柴油机未漏气状态;0.025 mm(活塞环外侧与气缸壁距离 d 为 0.025 mm, A_{area} 参数为 10.8 mm^2)表征柴油机少量漏气;0.05 mm(活塞环外侧与气缸壁距离 d 为 0.05 mm, A_{area} 参数为 21.5 mm^2)表征柴油机大量漏气。



(a) 缸内压力和温度



(b) 缸内质量变化

图 5 未漏气与 $A_{\text{area}} = 0 \text{ mm}^2$ 、 $A_{\text{area}} = 21.5 \text{ mm}^2$ 的仿真结果比较

Fig.5 Comparison of simulation result under different conditions: without crevice $A_{\text{area}} = 0 \text{ mm}^2$ and $A_{\text{area}} = 21.5 \text{ mm}^2$

2 气缸漏气对缸内气体流动的影响

缸内气体流动属于非定常的湍流运动,其研究对柴油机着火与燃烧、提高发动机的性能非常重要,而其可以分为预混燃烧和扩散燃烧两个阶段,通过仿真结果分析,气缸漏气对缸内气体流动的影响主要体现在扩散燃烧阶段,对缸内压缩阶段时的气体流动也有部分影响.本章主要通过分析缸内速度场、湍动能的变化来研究气缸漏气对柴油机缸内扩散燃烧以及压缩阶段气体流动的影响。

2.1 发动机工况对缸内气体流动影响的规律

柴油机工作过程中,缸内气体始终保持复杂又瞬息变的湍流运动,在同一漏气面积下,不同转速工况对缸内气体流速变化影响有一定差异,以 0.05 mm 漏气情况为例,研究切面下的缸内速度场,如图 6 所示。

图 6 是在活塞环外侧与气缸壁距离 d 为 0.05 mm、漏气情况下,不同转速工况在 -50°CA 、 13°CA 和 50°CA (分别对应缸内压缩阶段、燃烧初期和燃烧中期) 曲轴转角下的缸内速度场,由图可以看出:①压缩阶段气体流动速度随转速降低而减小,活

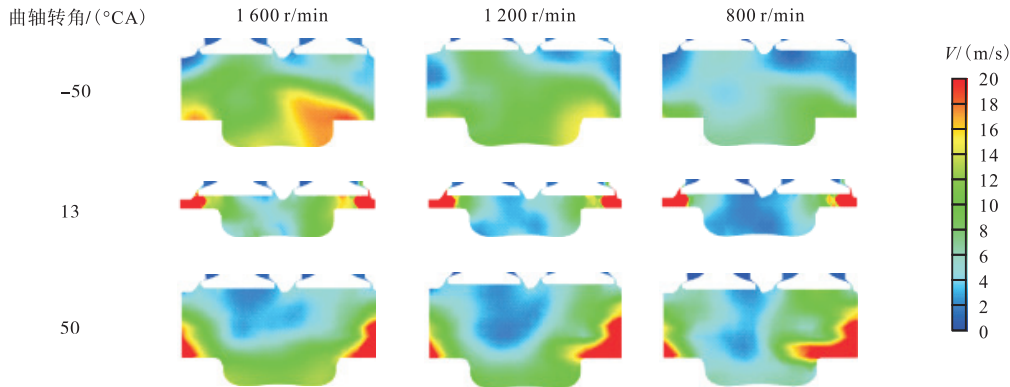


图 6 漏气、 $d = 0.05 \text{ mm}$ 情况下不同转速缸内速度场变化

Fig.6 The velocity field changes in the cylinder at different speeds under the condition of crevice of $d = 0.05 \text{ mm}$

塞底部区域流动速度最大. 这是由于进气阶段高转速下的气体湍动能较大,压缩阶段动能虽然耗散速度快,但仍然大于低转速工况. ②燃烧初期,气体流动速度仍然随转速降低而减小,但差距不断减小,而且靠近气缸壁部分的气体流动速度最大. ③燃烧中期,缸内气体平均流速随转速降低反而增大,且气体流速最大的地方仍然是靠近气缸壁部分. 出现这一反常现象可能是由于气缸漏气导致,因为流速最大区域与漏气区域均在气缸壁,且转速越低漏气越严重。

塞底部区域流动速度最大. 这是由于进气阶段高转速下的气体湍动能较大,压缩阶段动能虽然耗散速度快,但仍然大于低转速工况. ②燃烧初期,气体流动速度仍然随转速降低而减小,但差距不断减小,而且靠近气缸壁部分的气体流动速度最大. ③燃烧中期,缸内气体平均流速随转速降低反而增大,且气体流速最大的地方仍然是靠近气缸壁部分. 出现这一反常现象可能是由于气缸漏气导致,因为流速最大区域与漏气区域均在气缸壁,且转速越低漏气越严重。

塞底部区域流动速度最大. 这是由于进气阶段高转速下的气体湍动能较大,压缩阶段动能虽然耗散速度快,但仍然大于低转速工况. ②燃烧初期,气体流动速度仍然随转速降低而减小,但差距不断减小,而且靠近气缸壁部分的气体流动速度最大. ③燃烧中期,缸内气体平均流速随转速降低反而增大,且气体流速最大的地方仍然是靠近气缸壁部分. 出现这一反常现象可能是由于气缸漏气导致,因为流速最大区域与漏气区域均在气缸壁,且转速越低漏气越严重。

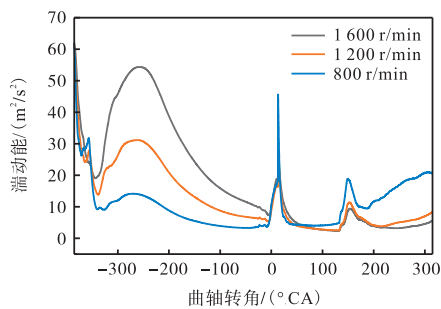


图 7 漏气、 $d = 0.05 \text{ mm}$ 情况下不同转速缸内湍动能变化

Fig.7 Changes in turbulent kinetic energy in the cylinder at different speeds under the condition of crevice of $d = 0.05 \text{ mm}$

塞底部区域流动速度最大. 这是由于进气阶段高转速下的气体湍动能较大,压缩阶段动能虽然耗散速度快,但仍然大于低转速工况. ②燃烧初期,气体流动速度仍然随转速降低而减小,但差距不断减小,而且靠近气缸壁部分的气体流动速度最大. ③燃烧中期,缸内气体平均流速随转速降低反而增大,且气体流速最大的地方仍然是靠近气缸壁部分. 出现这一反常现象可能是由于气缸漏气导致,因为流速最大区域与漏气区域均在气缸壁,且转速越低漏气越严重。

塞底部区域流动速度最大. 这是由于进气阶段高转速下的气体湍动能较大,压缩阶段动能虽然耗散速度快,但仍然大于低转速工况. ②燃烧初期,气体流动速度仍然随转速降低而减小,但差距不断减小,而且靠近气缸壁部分的气体流动速度最大. ③燃烧中期,缸内气体平均流速随转速降低反而增大,且气体流速最大的地方仍然是靠近气缸壁部分. 出现这一反常现象可能是由于气缸漏气导致,因为流速最大区域与漏气区域均在气缸壁,且转速越低漏气越严重。

塞底部区域流动速度最大. 这是由于进气阶段高转速下的气体湍动能较大,压缩阶段动能虽然耗散速度快,但仍然大于低转速工况. ②燃烧初期,气体流动速度仍然随转速降低而减小,但差距不断减小,而且靠近气缸壁部分的气体流动速度最大. ③燃烧中期,缸内气体平均流速随转速降低反而增大,且气体流速最大的地方仍然是靠近气缸壁部分. 出现这一反常现象可能是由于气缸漏气导致,因为流速最大区域与漏气区域均在气缸壁,且转速越低漏气越严重。

2.2 漏气对缸内气体流动影响的规律

由于低转速下,漏气对仿真结果的影响更明显,为了进一步了解漏气对缸内气体流动的影响,笔者进行了 800 r/min 工况下不同漏气情况(活塞环外侧与气缸壁距离 d 为 0 mm、0.025 mm、0.05 mm)在 -50°CA 、 13°CA 、 50°CA 曲轴转角下的缸内速度场的变化仿真. 如图 8 所示. 由图可得:①压缩阶段,活塞右侧和靠近气缸壁部分气体流动速度随漏气面积的增大而增大. ②燃烧初期,缸内气体流动速度随漏气面积的增大而增大,靠近气缸壁部分气体流速最大. ③燃烧中期,缸内气体流动速度仍然随漏气面积的增大而增大,且此现象相较于燃烧初期更为明显,流速增大区域均分布在靠近气缸壁部分。

综上所述,气缸漏气对缸内气体流速的影响主要

体现在燃烧阶段. 且气缸漏气面积越大, 缸内气体流速越大, 漏气区域对应的气体流速最大.

而对于缸内湍动能的变化, 进行了如图 9 所示的

800 r/min、1 200 r/min、1 600 r/min 转速工况下, 不同漏气面积对缸内的湍动能变化仿真, 由图可以看出: 进气和压缩阶段, 不同漏气面积下缸内湍动能变化几

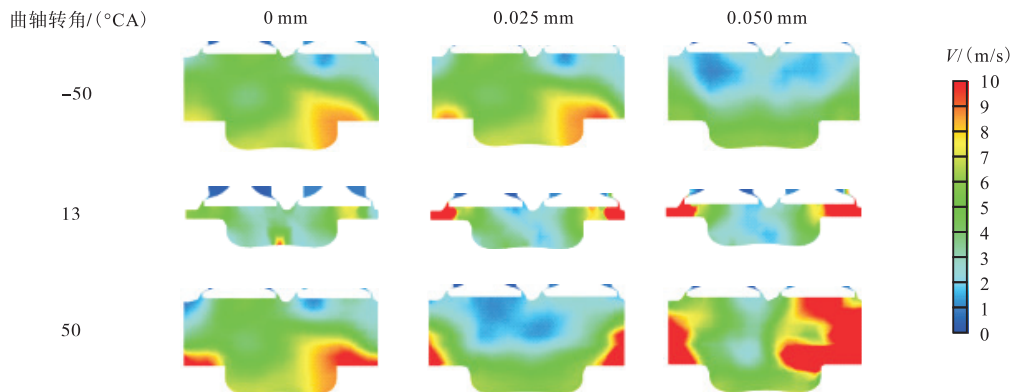
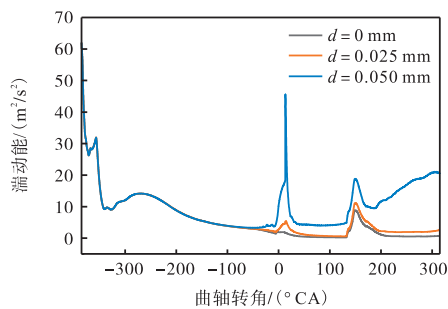
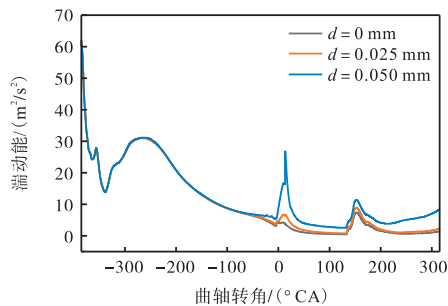


图 8 转速 800 m/s 工况下不同漏气情况缸内速度场变化

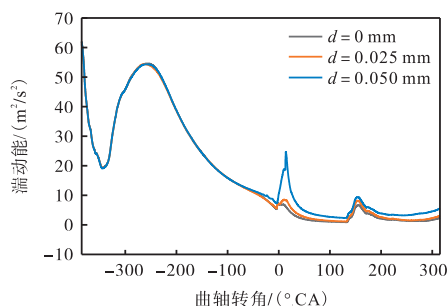
Fig.8 Changes in the velocity field of the cylinder in different crevice conditions at speed 800 m/s



(a) 800 r/min



(b) 1 200 r/min



(c) 1 600 r/min

图 9 不同转速工况下不同漏气情况缸内湍动能变化
Fig.9 Turbulent kinetic energy variation with rotational speed and crevice conditions

乎一致, 说明漏气面积的大小对进气和压缩阶段缸内湍动能变化几乎没有影响; 不同转速工况也是如此. 燃烧初期和后燃期, 湍动能快速增大, 且同一转速工况下, 缸内湍动能及其峰值均随漏气面积的增大而急剧增大; 并且从燃烧一直到排气阶段, 漏气面积大的工况湍动能始终高于漏气面积小的工况. 横向对比可以看出, 这些现象在转速越低时, 表现得越明显.

综合本章内容, 可以得出以下结论: 气缸漏气对缸内气体流动的影响主要体现在燃烧阶段; 在燃烧阶段, 在同一转速工况下气缸漏气面积越大, 缸内气体流动速度、湍动能及其峰值均越大; 随转速的降低, 该现象表现得越明显; 燃烧后期也存在此现象, 说明在漏气的影响下, 缸内后燃现象也更严重; 在漏气面积较大工况下, 发动机转速越低, 缸内气体流动速度、湍动能及其峰值反而更大.

3 气缸漏气对缸内燃烧的影响

燃烧是发动机工作过程最重要的一个环节, 本节研究漏气对缸内燃烧的影响, 将通过研究缸内温度场、压力曲线、放热率曲线及其峰值, 分析燃烧结果.

3.1 发动机工况对缸内燃烧影响的规律

在不同发动机转速下, 进行漏气工况的气缸燃烧仿真, 研究缸内温度、压力、放热率及其峰值变化, 缸内温度场变化如图 10 所示. 图 10 是在不同转速下, 活塞外侧与气缸壁距离 d 为 0 mm 和 0.05 mm、漏气情况下, 在 22°CA 、 50°CA 和 131°CA 曲轴转角下的缸内温度场, 3 个曲轴转角分别对应燃烧初期、燃烧中期和燃烧后期 3 个阶段.

由图可以看出, 在同一转速下, 燃烧初期和燃烧

中期, $d = 0 \text{ mm}$ 、漏气工况相较于 $d = 0.05 \text{ mm}$ 燃烧更加充分, 平均温度更高; 高温覆盖区域更广, 这是由于缸内漏气后, 缸内压力下降, 导致燃烧并不充分, 温度较低; 而燃烧后期, $d = 0 \text{ mm}$ 、漏气工况相较于 $d = 0.05 \text{ mm}$ 燃烧温度和高温覆盖区域均较小, 这是由于漏气后的缸内前期燃烧并不充分, 后期才开始大面积燃烧, 后燃比较严重。

在漏气的影响下, 燃烧初期, 1600 r/min 工况燃烧比较充分, 转速越低, 燃烧温度越低, 800 r/min 工

况甚至还没有完全开始燃烧, 滞燃期更长. 燃烧中期, 低转速工况开始大面积燃烧, 接近高转速燃烧温度. 燃烧后期, 低转速工况缸内仍在大面积燃烧, 且高温区域广. 而随转速升高, 燃烧高温区域越少. 说明在漏气的影响下, 相较于高转速工况, 低转速缸内开始燃烧时燃烧并不充分, 滞燃期较长. 而燃烧后期, 随转速的降低, 燃烧平均温度越高, 后燃现象越严重.

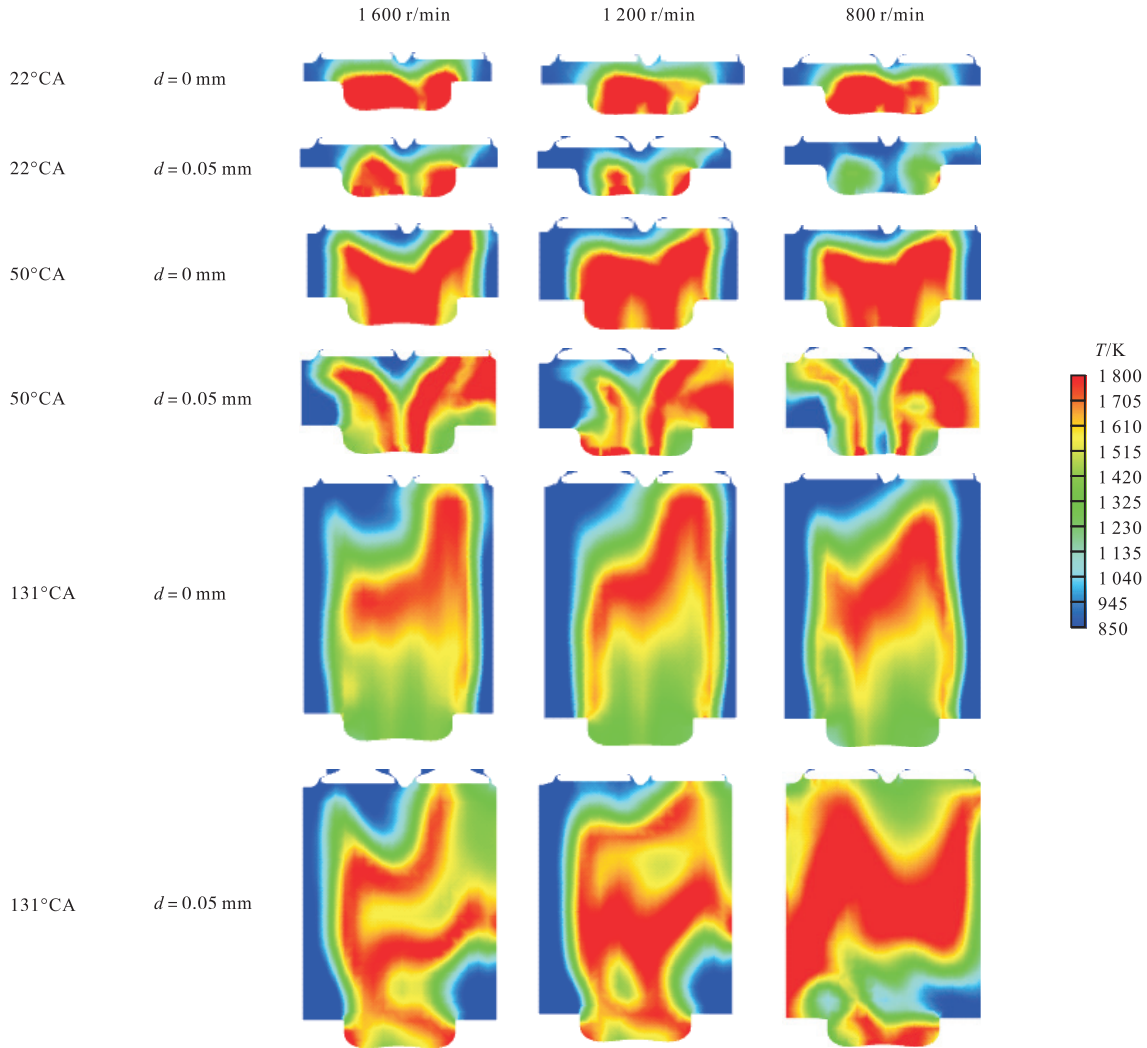


图 10 不同转速下漏气、 d 为 0 mm 与 0.05 mm 时缸内温度场对比

Fig.10 Comparison of in-cylinder temperature field for $d = 0 \text{ mm}$ versus $d = 0.05 \text{ mm}$ under different rotational speeds

图 11 是在 $d = 0.05 \text{ mm}$ 、漏气条件下, 1600 r/min 、 1200 r/min 、 800 r/min 3 种发动机工况下燃料的缸压及放热率的比较。

3 种发动机工况下的缸压变化趋势基本相同, 而缸压及其峰值随转速的降低而降低, 最大缸内压力分别为 9.15 MPa 、 8.30 MPa 和 7.39 MPa 。喷油前, 燃油无化学变化, 无热量释放, 放热率为 $0 \text{ J/}^\circ\text{C}$ 。当活塞移动到曲轴角 -9°CA 时, 燃油喷射开始. 经过一系列的

化学反应, 气缸内的燃烧速度加快, 热量释放. 快速的增加使放热率急剧增加, 并且在活塞运动到上止点后接近压力变化率最大的曲轴转角处放热率达到最大值. 3 种发动机工况下的最大放热率分别为 $880 \text{ J/}^\circ\text{C}$ 、 $760 \text{ J/}^\circ\text{C}$ 和 $697 \text{ J/}^\circ\text{C}$, 说明在 $d = 0.05 \text{ mm}$ 、漏气情况下, 缸内放热率及其峰值随转速降低而减小, 且从图中可以看出漏气情况下的燃烧并不稳定, 放热率忽高忽低, 不同转速均存在此现象。

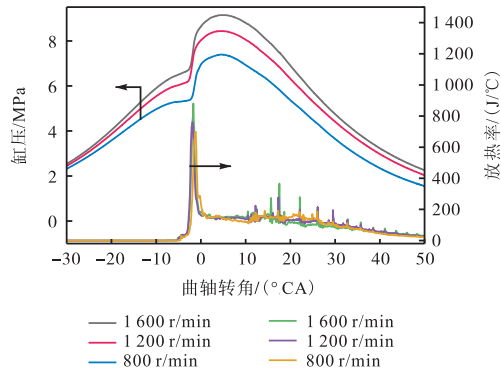


图 11 漏气 $d = 0.05$ mm 情况下不同转速缸压及放热率曲线
Fig.11 Cylinder pressure and heat release rate curves at different speeds under the condition of crevice of $d = 0.05$ mm

3.2 漏气对缸内燃烧影响的规律

低转速下,漏气对缸内燃烧温度变化的影响更明显.笔者仿真了 800 r/min 工况下不同漏气情况(活塞环外侧与气缸壁距离 d 为 0 mm、0.025 mm、0.05 mm)在 22°CA、50°CA、131°CA 曲轴转角下的缸内温度场的变化结果,如图 12 所示.

由图 12 可知,燃烧初期, $d = 0$ mm 工况燃烧范围广,温度较高,随漏气面积的增大,温度和范围逐渐降低,滞燃期延长;燃烧中期,3 种漏气情况下缸内均已开始大量燃烧,但 $d = 0$ mm 的燃烧仍然最充分,燃烧面积和温度较大.随漏气面积的增大,高温燃烧覆盖的区域不断减小;燃烧后期,0 mm 工况燃烧已经接近尾声,缸内燃烧区域减少,然而, $d = 0.025$ mm 和 $d = 0.05$ mm 工况仍然在大面积燃烧,且随漏气面积的增大,高温燃烧区域覆盖越广,后燃现象严重.

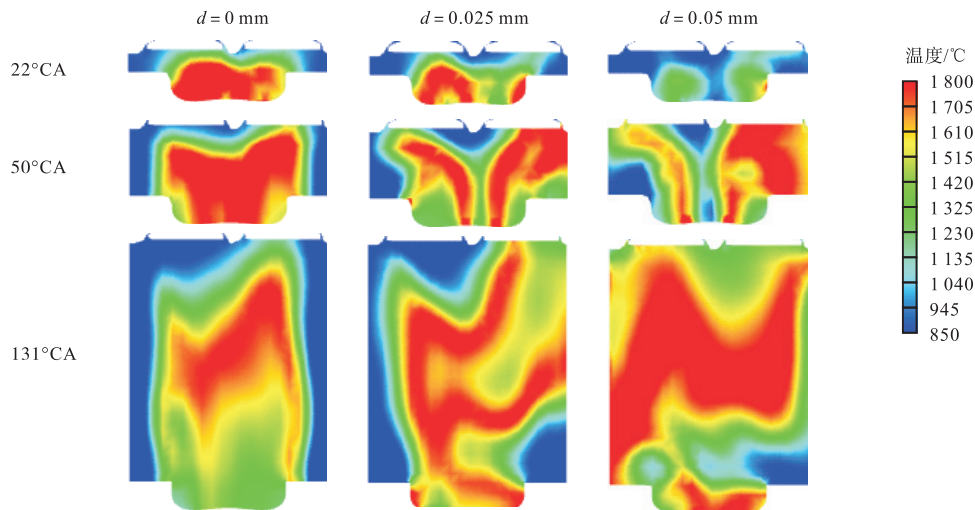


图 12 转速 800 r/min 工况下不同漏气情况的缸内温度场变化

Fig.12 The temperature field change in the cylinder under different crevice conditions at speed 800 r/min

图 13 是在 1600 r/min 和 800 r/min 工况下, d 为 0 mm、0.025 mm 和 0.05 mm 3 种漏气情况对应的缸压及燃料放热率的比较,缸压变化趋势均基本相同,1600 r/min 工况下,3 种漏气情况对应的最大缸内压力分别为 11.00 MPa、10.00 MPa 和 9.15 MPa. 而 800 r/min 工况下,3 种漏气情况对应的最大缸内压力分别为 10.57 MPa、8.67 MPa 和 7.39 MPa. 说明随漏气面积增大,燃烧的缸压及其峰值越低,且横向对比可以发现,在低转速下,漏气面积越大,最大缸内压力下降更为明显. 而 1600 r/min 工况下,3 种漏气情况对应的最大放热率分别为 9560 J/°C、8290 J/°C 和 880 J/°C. 800 r/min 工况下,三种漏气情况对应的最大放热率分别为 900 J/°C、670 J/°C 和 697 J/°C. 1600 r/min 和 800 r/min 工况下,随着漏气面积的增

大,放热率及其峰值呈减小趋势. 然而 $d = 0.05$ mm、漏气情况的最大放热率略大于 $d = 0.025$ mm 工况,这是由于 $d = 0.05$ mm 漏气面积较大导致漏气量过多,缸内达到燃烧缸压的时间滞后,燃料堆积量大导致了瞬时放热率反而增大了一点,但总放热量仍然随漏气面积的增大而减小.

不同转速下,燃烧放热率峰值均随漏气面积增大而滞后,漏气为 $d = 0.05$ mm 时滞后得更明显,说明滞燃期也随漏气面积的增大而增加.

对于 1600 r/min 和 800 r/min 两种工况,在 $d = 0$ mm 未漏气情况下的放热率更加稳定,从最大放热率下降之后曲线较为平缓,说明燃烧比较稳定,而 $d = 0.025$ mm 和 $d = 0.05$ mm 漏气情况下,最大放热率下降之后,仍然有较多小的峰值,放热率忽高忽

低,变化较大.

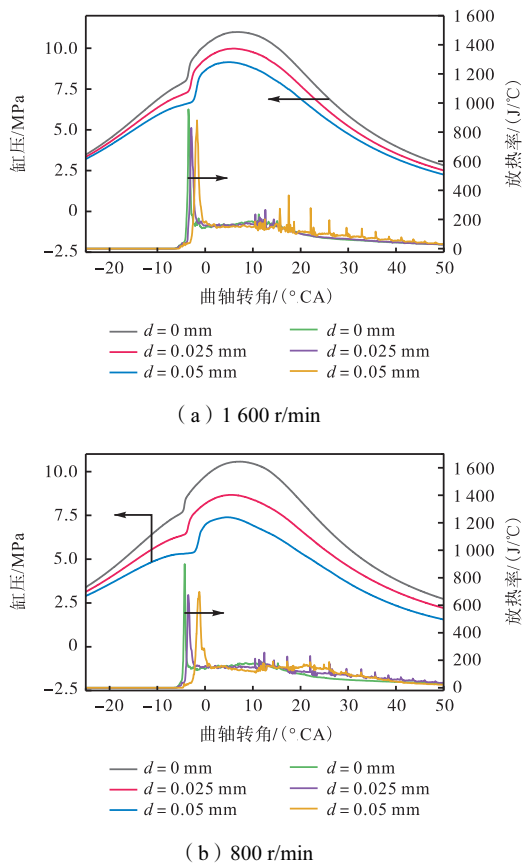


图 13 转速 1 600 r/min、800 r/min 下不同漏气情况缸压和放热率变化
 Fig.13 Under the speed of 1 600 r/min and 800 r/min, the cylinder pressure and heat release rate change under different crevice conditions

4 结 论

(1) 气缸漏气对缸内气体流动影响: 基于合理漏气范围, 漏气面积的大小对进气和压缩阶段缸内气体流动速度及湍动能变化影响较小. 在燃烧阶段, 在同一转速工况下气缸漏气面积越大, 缸内气体流动速度、湍动能及其峰值越大, 且转速越低, 该现象表现得越明显; 漏气区域对应的气体流速最大. 在漏气面积较大工况下, 发动机转速越低, 缸内气体流动速度、湍动能及其峰值反而更大.

(2) 气缸漏气对缸内燃烧的影响: 在同一漏气面积下, 缸压及其峰值随转速的降低而降低, 放热率及其峰值也随转速的增大而降低; 而同一转速工况下, 随漏气面积的增大, 燃烧的缸压及其峰值越低. 燃烧放热率也随漏气面积的增大而呈降低趋势; 峰值均随漏气面积增大而滞后, 漏气、 $d = 0.05$ mm 时滞后得更明显, 说明滞燃期也随漏气面积的增大而增加. 且漏气情况下的燃烧相对于未漏气更不稳定, 放热率变化

较大. 燃烧初期, 随漏气面积增大, 燃烧温度和范围越小, 滞燃期增加; 燃烧中期, 漏气面积对缸内燃烧的影响较小; 燃烧后期, 随漏气面积增大, 高温燃烧区域覆盖越广, 后燃现象越严重.

参考文献:

[1] 刘卫平, 王明泉. 差压法检测压力气体泄漏的研究[J]. 机械工程与自动化, 2010(1): 133-135.
 Liu Weiping, Wang Mingquan. Gas leak detection by differential pressure method[J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2010(1): 133-135 (in Chinese).

[2] 邱宗敏, 金洪卫. 气缸压缩压力的测量在发动机故障诊断中的运用[J]. 装备制造技术, 2012(4): 73-74, 91.
 Qiu Zongmin, Jin Hongwei. Apply of measuring compress pressure in cylinder on engine trouble-shooting [J]. *Equipment Manufaturing Technology*, 2012(4): 73-74, 91 (in Chinese).

[3] 樊新海, 王战军, 安 钢, 等. 基于倒拖过程参数测试的汽缸密封性评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(4): 29-32.
 Fan Xinhai, Wang Zhanjun, An Gang, et al. Evaluation for cylinder sealing based on parameters measurement in reverse dragging process[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2010, 24(4): 29-32 (in Chinese).

[4] Huang H, Xing K, Lin T, et al. Evaluating potential of increasing flow intensity and reducing crevice volume to improve thermal efficiency and hydrocarbon emission in spark-ignition natural gas engines[J]. *Fuel*, 2024, 373: 132286.

[5] Ali K, Amna R, Ali M I H. Numerical study to improve the combustion and thermal efficiencies of off-gas/synthesis gas-fueled HCCI-engine at different loads: Piston-shape and crevice design[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 45: 102956.

[6] Shen Z, Wang X, Zhao H, et al. Numerical investigation of natural gas-diesel dual-fuel engine with different piston geometries and radial clearances[J]. *Energy*, 2021, 220: 119706.

[7] Stocchi I, Liu J L, Dumitrescu C E, et al. Effect of piston crevices on the numerical simulation of a heavy-duty diesel engine retrofitted to natural-gas spark-ignition operation[J]. *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the ASME*, 2019, 141(11): 112204.

[8] 杨绍卿, 张永峰. 缸内漏气对柴油机性能影响研究

- [J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 124-129.
- Yang Shaoqing, Zhang Yongfeng. Influences of cylinder leakage on diesel engine performance[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(12): 124-129(in Chinese).
- [9] 王世年, 崔毅, 徐兆辉, 等. 基于气缸套-活塞环磨损的内燃机性能衰退研究[J]. 车用发动机, 2023(5): 1-8, 16.
- Wang Shinian, Cui Yi, Xu Zhaohui, et al. Performance degradation of internal combustion engine based on cylinder liner-piston ring wear[J]. *Vehicle Engine*, 2023(5): 1-8, 16(in Chinese).
- [10] 朱卫华. 柴油机漏气量试验研究[J]. 车用发动机, 2021(3): 88-92.
- Zhu Weihua. Experimental study on blow-by of diesel engine[J]. *Vehicle Engine*, 2021(3): 88-92(in Chinese).
- [11] Hu J, Yu Y, Yang J, et al. Research on the generalisation method of diesel engine exhaust valve leakage fault diagnosis based on acoustic emission[J]. *Measurement*, 2023, 210: 112560.
- [12] Doppalapudi A T, Azad A K, Khan M M K. Analysis of improved in-cylinder combustion characteristics with chamber modifications of the diesel engine[J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2586-2586.
- [13] Ma B, Yao A, Yao C, et al. Numerical investigation and experimental validation on the leakage of methanol and formaldehyde in diesel methanol dual fuel engine with different valve overlap[J]. *Applied Energy*, 2021, 300: 117355.
- [14] Guo S Y, Ning Z, Lü M, et al. A numerical model for predicting the wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead center[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2025, 239: 325-338.
- [15] 雷基林, 张大帅, 邓晰文, 等. 活塞环组结构参数对柴油机漏气量和机油消耗的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 54-62.
- Lei Jilin, Zhang Dashuai, Deng Xiwen, et al. Influence of piston ring component structural parameters on diesel engine blow-by and oil consumption[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(5): 54-62(in Chinese).
- [16] 曹志义, 刘建芬, 尹玉婷. 发动机起动过程中活塞漏气模拟分析[J]. 内燃机, 2014(4): 1-3, 6.
- Cao Zhiyi, Liu Jianfen, Yin Yuting. Analysis and simulation of blow-by from piston in engine starting procedure[J]. *Internal Combustion Engines*, 2014(4): 1-3, 6(in Chinese).
- [17] 马玉坡, 冯宇, 廖桐舟, 等. 低温起动热力学条件下柴油机喷雾着火特性[J]. 内燃机学报, 2024, 42(1): 11-17.
- Ma Yupo, Feng Yu, Liao Tongzhou, et al. Ignition characteristics of diesel engine under low-temperature start condition[J]. *Transactions of CSICE*, 2024, 42(1): 11-17(in Chinese).
- [18] Tan S M, Ng H K, Gan S. Computational study of crevice soot entrainment in a diesel engine[J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 898-907.