

结构与可靠性

某船用柴油机喷油冷却活塞内流动特性仿真

彭 军, 李雯文, 孙炉钢, 袁 飞

(上海船用柴油机研究所, 上海 200090)

摘 要: 基于 Ansys Fluent 软件的多相流模型和动网格技术, 对某船用柴油机活塞冷却油腔内的流动过程开展三维数值仿真分析, 探究不同柴油机转速和喷油速度下冷却油腔内的流场分布规律。研究表明: 润滑油进入活塞冷却油腔后其形态发生显著变化, 伴随活塞上下往复运动, 活塞冷却油腔内将填充足够的润滑油; 随着柴油机转速的提高, 润滑油填充率和捕捉率不断下降; 而随着喷油速度的提高, 二者不断上升, 进一步强化了活塞换热能力。

关键词: 船用柴油机; 活塞; 冷却油腔; 流动特性

中图分类号: TK423.3⁺³ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)06-0050-07

Numerical Simulation of Flow Characteristics of the Oil Spray Cooled Piston on a Marine Diesel Engine

Peng Jun, Li Wenwen, Sun Lugang, Yuan Fei

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: The three-dimensional numerical calculation of the flow process of the cooling gallery in a marine diesel engine piston was conducted by the multi-flow model and dynamic meshing technique of the Ansys Fluent software. The flow distribution rule of the cooling gallery under different engine speeds and oil spray speeds was studied. The results showed that the shape of the oil changed significantly after entering the cooling gallery and the oil filled the cooling gallery sufficiently with the up and down reciprocating motion of the piston. The filling ratio and capture ratio declined with the increase of the engine speed and rose with the increase of the oil spray speed, which would further strengthen the heat transfer of the piston.

Key words: marine diesel engine; piston; cooling gallery; flow characteristic

0 引言

随着船用柴油机不断向大功率、高功率密度方向发展, 活塞、气缸盖和气缸套等关键受热零部件的热负荷和机械负荷不断提高, 降低零件热负荷、提升零件可靠性和耐久性成为新型柴油机研制的难点。活塞作为燃烧室的重要组成部分, 其顶部承受巨大的机械负荷, 并受到高温燃气周期性加热。零件温度升高将降低本体材料强度, 致使零件发生蠕变, 严重时甚至导致零件烧毁。因此, 采取合理的冷却方式及时有效地带走热量对于活塞可靠运行至

关重要。但活塞在气缸内做上下往复运动, 在一定程度上造成润滑不良和冷却困难, 影响热量有效带离^[1-3]。目前, 降低活塞温度有效且应用广泛的方式是对活塞进行喷油冷却, 通过润滑油在活塞内部发生振荡和高速碰撞, 强化传热过程, 从而及时带走热量, 保证活塞可靠工作^[4-5]。

本文基于 Fluent 软件平台对某船用柴油机喷油冷却式活塞内的流动过程进行数值仿真研究, 获取不同曲轴转角下润滑油在活塞冷却油腔等区域的流动与分布特征, 并在此基础上探究不同转速和不同喷油速度对流场特性的影响规律, 为活塞的优化设

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-02-25

基金项目: 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室资助项目。

计提供理论指导。

1 仿真模型建立

以某船用柴油机（四冲程）喷油冷却活塞为研究对象，该型机基本参数见表 1，其活塞与润滑油喷嘴的安装形式及活塞结构如图 1 和图 2 所示。该型活塞头部区域铸有环形冷却油腔，油腔上设置两孔分别连接两处油道，作为润滑油的入口和出口。在活塞上下往复运动过程中，润滑油通过安装于机体上的喷嘴喷出，经底部油道进入环形冷却油腔；润滑油在冷却腔内发生强烈振荡，有效带走活塞热量，随后由另一油道流出。通常该类冷却方式称为强制振荡冷却法。

表 1 该型柴油机基本参数

冲程	转速/($r \cdot \min^{-1}$)	缸径/mm	行程/mm	连杆长度/mm
4	1 800	170	195	350

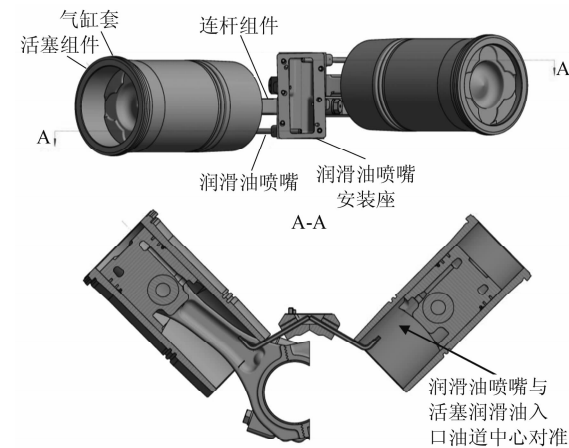


图 1 活塞与润滑油喷嘴安装形式

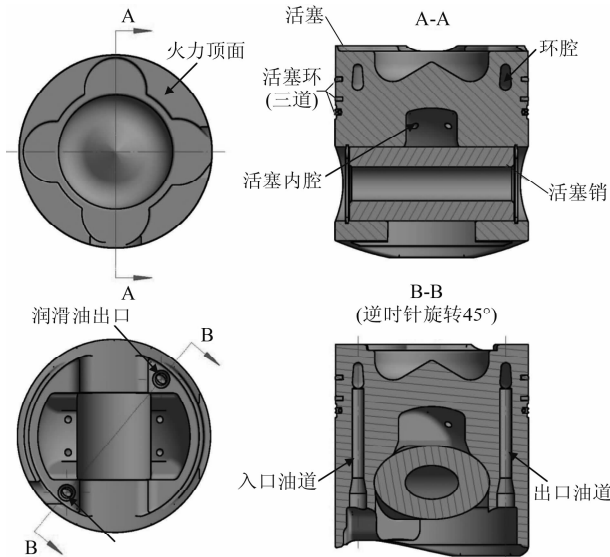


图 2 活塞结构示意图

活塞喷油冷却过程涉及活塞的上下往复运动和连杆、曲轴的运动，由于后两者的运动复杂，且对活塞的冷却效果无实质性的影响，因此在几何模型确立过程中不予考虑。

1.1 几何建模

在柴油机运行过程中，活塞于气缸内上下往复运动，润滑油在活塞冷却油腔和内腔的流动特性及流动区域随行程发生变化。图 3 为活塞位于下止点时润滑油流动区域示意图，其中：冷却内腔由入口油道、环腔和出口油道组成，并通过两个油道与活塞内腔相连；润滑油入口和出口位于流动区域底部，采用圆孔代替润滑油喷嘴。随着活塞上下运动，气缸套内壁发生拉伸和压缩，为合理表征这一结构变化特性，引入动网格模型，定义几何模型中的运动区域和非运动区域，并对运动区域指定运动方式。

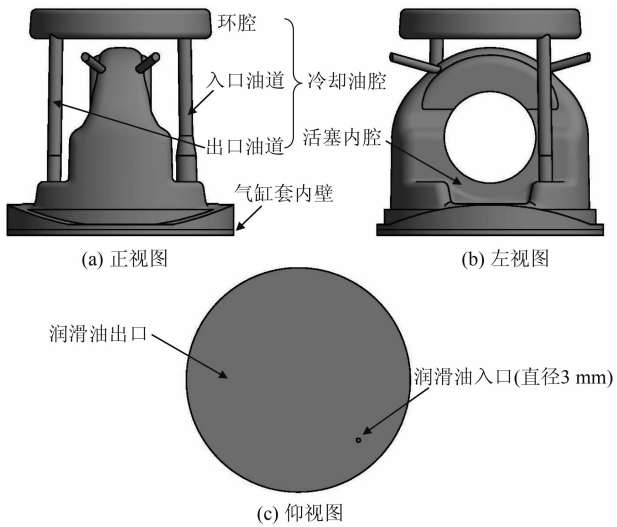


图 3 活塞位于下止点时润滑油流动区域示意图

借助 Fluent 软件平台的动态分层（dynamic layering）模型^[6-8]指定活塞的运动形式，并对活塞不同表面进行区域划分：活塞冷却油腔和内腔在往复运动过程中形状不发生改变，在动态分层模型中不做处理；在活塞运动过程中气缸套内壁发生拉伸和压缩，导致该部分流动区域体积发生变化，在动态分层模型中将其设置为运动区域；润滑油进、出口随着气缸套内壁上下运动，但其形状不发生变化，在动态分层模型中将其设置为刚性区域。

采用混合网格对几何区域（计算区域）进行网格划分，制定如下网格划分策略：冷却油腔和内腔采用四面体网格划分，并对倒角、圆角和曲率较小的部位进行局部网络加密；气缸套所在区域采用六面体网格划分，并对润滑油入口处网格加密。图 4（a）和 4（b）分别为活塞位于下止点和上止点

时计算区域的网格模型, 网格数量分别为 200 万和 415 万。

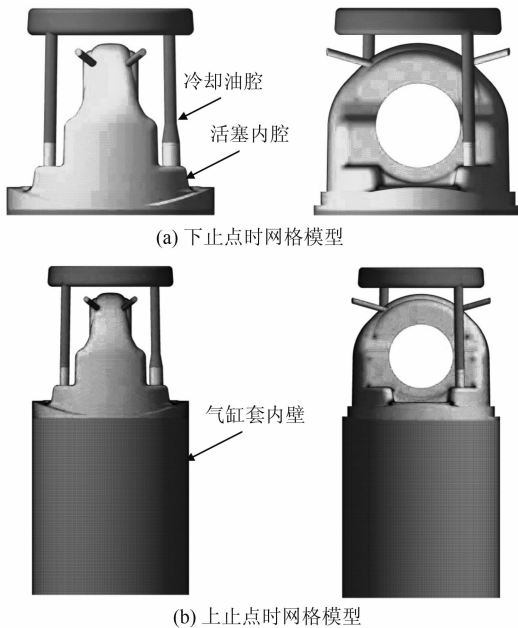


图 4 活塞冷却油腔和内腔流动区域网格示意图

1.2 数学建模

1.2.1 数学模型及求解策略

采用双欧拉法对活塞内部气-液 (空气-润滑油) 两相流动过程进行描述; 后续研究基于 Fluent 软件平台中的 VOF 模型展开^[6-10]。

依据活塞内气-液两相流动过程的特点, 可采用质量守恒方程和动量方程对其进行描述, 结合 VOF 模型特点, 各方程表征形式^[8-10]如下:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: τ 为时间, s; ρ_i 、 α_i 和 $\vec{v}$ 分别代表第 i 相的密度、体积分数和混合相速度矢量。本文中, 物相分别为润滑油 (l) 和空气 (g), 两者满足 $\sum \alpha_i = 1$ ($i = g, l$), 以空气相为例, $\alpha_g = 1$, 控制体内均为空气; $\alpha_g = 0$ 时, 控制体内不存在空气; $0 < \alpha_g < 1$ 时, 控制体内存在气、液两相, 空气体积分数为 α_g 。

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \{\mu [\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T]\} + \vec{F} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 , 且满足式 (3); p 为压力, Pa; $\vec{g}$ 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 其表达形式如式 (4) 所示。式 (4) 中: μ_i 为第 i 相黏度; $\vec{F}$ 为附加力, 在本文的研究中表征空气与润滑油间的表面张力。

$$\rho = \sum \rho_i \alpha_i \quad (3)$$

$$\mu = \sum \mu_i \alpha_i \quad (4)$$

求解策略如下: 考虑时间的影响, 即采用非稳态迭代计算; 选用 PISO 算法进行压力-速度耦合求解; 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型补充求解动量守恒方程; 在动态分层模型中设置网格重划分, 时间步长为 0.1° 曲轴转角, 由于计算为非稳态过程, 每个时间步长迭代计算 40 次。

1.2.2 边界条件

(1) 流体区域入口

流体计算区域入口如图 3 所示, 流动介质为润滑油, 其物性参数如表 2 所示; 采用速度入口作为边界。

表 2 入口流动介质与物性参数

流动介质	流量基准值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
润滑油	3.13×10^{-4}	826	0.016 7

(2) 流体区域出口

流体计算区域出口如图 3 所示, 流动介质为空气, 其物性参数如表 3 所示; 采用压力出口作为边界, 压力值为标准大气压。

表 3 出口流动介质与物性参数

流动介质	压力/Pa	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
空气	101 325	0.946	2.19×10^{-5}

(3) 固体区域壁面

将润滑油入口和出口均设置为刚性区域, 气缸套内壁随刚性区域上下往复运动发生变形, 除上述表面外, 其余的固体壁面 (活塞冷却油腔和内腔壁面) 均设置为无滑移静止壁面。

2 冷却油腔流场分析

2.1 基准工况下冷却油腔流场分析

为保证仿真分析的准确性, 在计算过程中监测活塞冷却油腔入口润滑油流量, 确保参数在每个时间步长内保持稳定 (波动幅度不超过 1%)。图 5 为冷却油腔入口润滑油质量流量随曲轴转角变化示意图。

基准工况为: 柴油机转速 1 800 r/min, 润滑油流量 $3.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。在此工况下对活塞冷却油腔内流体的物理分布特征进行分析。

2.1.1 润滑油体积分数和流体速度分布特征

图 6 和图 7 分别为不同曲轴转角下润滑油体积分分布云图和流体速度分布云图, 可知: 润滑油自底部油嘴高速射出, 随着活塞运动, 依次经过气缸套区域 and 冷却油腔入口油道到达冷却环腔, 冲击环腔顶部后运动受阻, 部分润滑油停留在环腔顶部

壁面, 部分则分散落入环腔底部, 随着活塞运动逐步填充环腔并整体向出口油道发展^[10-12]。

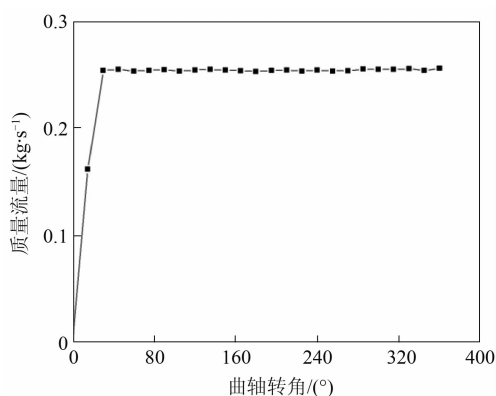


图5 冷却油腔入口润滑油质量流量随曲轴转角变化

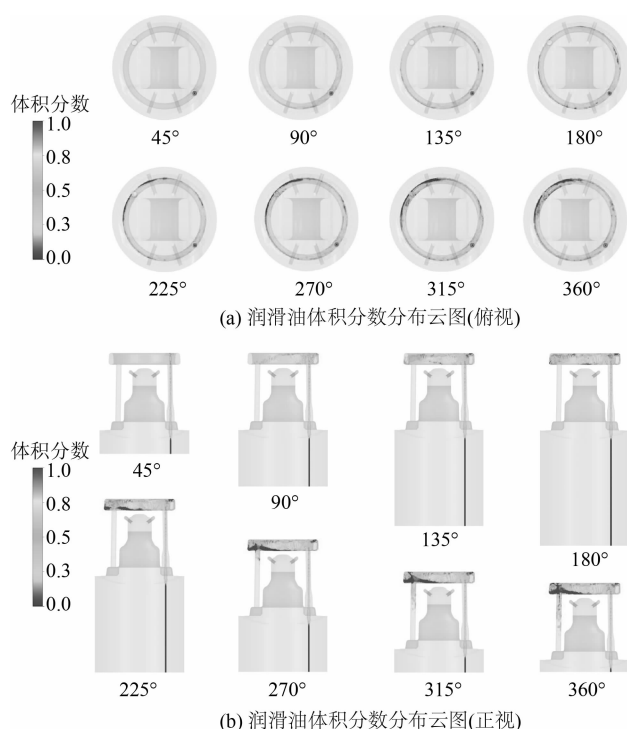


图6 活塞冷却油腔内润滑油体积分数分布随曲轴转角变化云图

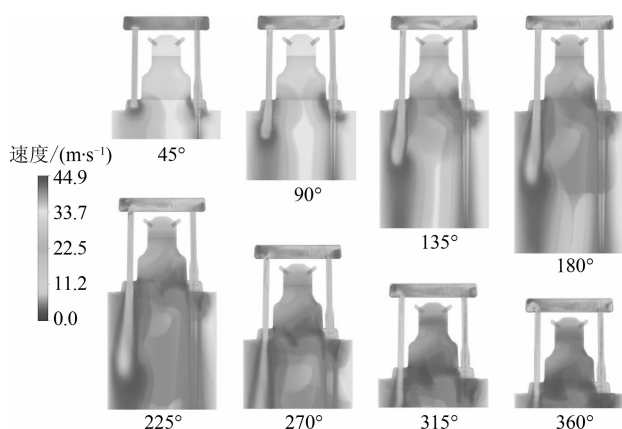


图7 活塞冷却油腔内流体速度分布随曲轴转角变化云图

润滑油自油嘴高速射出, 在气缸套区域形成稳定的液柱, 并对周围气体产生一定扰动, 引起气体低速运动, 但由于射流空间较大, 此时气液两相间的运动并未影响润滑油的分布特征。随着润滑油进入入口油道, 运动区域急剧缩小, 气液两相间的相对运动增强, 气体运动速度迅速提高, 在气体扰动下液柱外围的液体逐步破碎、分散, 并与气体掺混, 液柱体积增大, 此时润滑油体积分数形成自内向外逐渐减小的分布特征。与此同时, 随着润滑油的进入, 气体以较高的速度不断从出口油道流出, 并与气缸套区域的低速气体掺混, 致使活塞内腔的气体产生运动。润滑油进入环腔后, 高速冲击环腔顶部, 运动方向发生改变, 液柱也在碰撞中破碎成羽状, 部分停留在环腔顶部, 部分落入环腔底部。由于活塞做上下运动, 羽状润滑油主要沿着环腔外侧向出口油道运动, 在环腔外侧和顶部周围形成较密集的分布, 而在环腔内侧甚少存在, 但随着活塞运动, 其分布逐步增多; 在活塞下行中, 润滑油逐渐流入出口油道, 并在运动中由羽状进一步破碎成块状, 而油道内的流体速度逐步减小^[5-6, 9, 12]。

上述分析表明: 柴油机运行初期, 活塞冷却油腔内的润滑油呈现极不均匀的分布特征, 但随着活塞循环往复运动, 环腔内将填充足够的润滑油; 在润滑油的振荡运动下, 活塞火力顶面热量被及时、有效带走, 从而保证了活塞运行的可靠性。

2.1.2 润滑油填充率和捕捉率分布特征

上节定性分析了活塞冷却油腔内润滑油的分布特征, 此节参照文献[6]引入润滑油填充率和捕捉率, 对不同运行时刻下润滑油在活塞冷却油腔内的运动和分布做定量分析。润滑油填充率及捕捉率定义如式(5)、式(6):

$$\varphi_1 = V_{\text{oil}} / V_{\text{coldl}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\eta = Q_{\text{oil-out}} / Q_{\text{oil-in}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: φ_1 为填充率; η 为捕捉率; V_{oil} 为冷却油腔内润滑油体积, m^3 ; V_{coldl} 为环腔体积, m^3 ; $Q_{\text{oil-in}}$ 为润滑油喷嘴出口质量流量, kg/s ; $Q_{\text{oil-out}}$ 为离开环腔润滑油质量流量, kg/s 。

依据公式, 获取了不同曲轴转角下二者分布曲线, 如图8和图9所示, 可知:

(1) 活塞自下止点起上行 $30^\circ \sim 45^\circ$ 曲轴转角后润滑油开始进入冷却环腔, 填充率整体呈现上升趋势, 结合活塞速度及喷油与活塞速度差(喷油速度减去活塞速度, 见图10)发现在上行或下行过程中, 速度差均基本呈现先减小后增大的趋势。在抵达上止点前, 活塞与润滑油运行方向一致, 速

度差减小不利于润滑油进入环腔,填充率在初始阶段处于较低水平,但此时环腔空旷,润滑油甚少回流至入口油道,大多积聚在环腔顶部,致使二者相对运动的影响效应有限;随后速度差不断增大,润滑油更易进入环腔,填充率后续基本呈线性增长。在下行过程中,活塞与润滑油运行方向相反,速度差减小有利于润滑油在环腔内的流通,填充率保持增长;但随着速度差的增大,加之环腔内已积累了相当数量的润滑油,不利于环腔内的流动,而润滑油在惯性作用下回落至环腔底部并破碎流出,影响填充率的增长,故出现图中增长比例下滑的现象,造成填充率增长速率变缓^[6-7,9]。

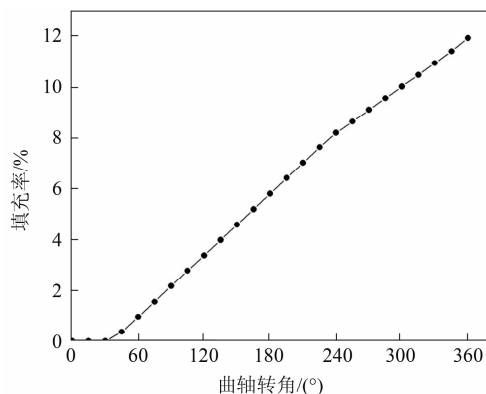


图8 活塞冷却油腔润滑油填充率随曲轴转角变化示意图

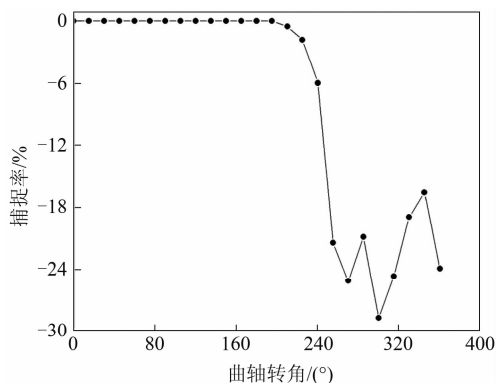


图9 活塞冷却油腔润滑油捕捉率随曲轴转角变化示意图

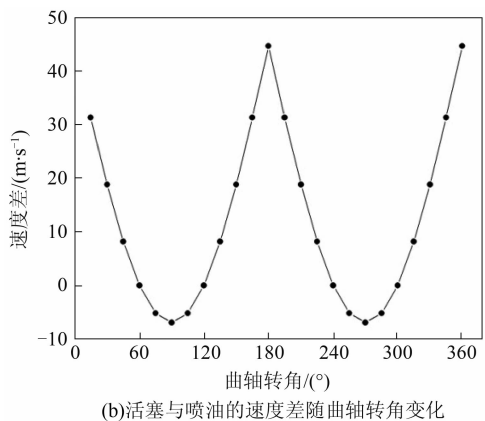
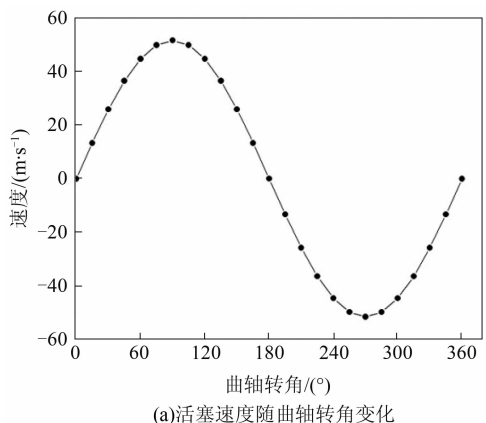


图10 活塞速度及活塞与喷油的速度差随曲轴转角变化示意图

(2) 活塞下行 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 曲轴转角后润滑油开始离开环腔进入出口油道,由于活塞下行速度加快,捕捉率随曲轴转角迅速增大,后期由于活塞下行速度放缓,相对运动减弱,同时,气缸内流体区域逐渐减小,气体回流至冷却油腔内,影响润滑油流入出口油道,造成捕捉率随曲轴转角波动变化,但整体仍保持较高水平。

由于本文主要探究活塞运动过程中润滑油在活塞冷却油腔内的流动特性,因此在后续研究中以式(7)替代式(5)表征填充率。

$$\varphi = V_{\text{oil}}/V_{\text{cold}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: V_{cold} 为冷却油腔体积, m^3 。

2.2 不同转速和喷油速度下冷却油腔流场分析

本节以填充率和捕捉率作为分析指标,探究不同转速和喷油速度下活塞冷却油腔内流体的物理分布特征。

在研究过程中采用单因素分析法,即在保证某一参数(转速或喷油速度)和其余边界条件不变的前提下,设定另一参数的取值范围,仿真计算不同取值下填充率和捕捉率的变化规律。柴油机转速和喷油速度的取值如表4所示。

表4 柴油机转速和喷油速度取值

参数	取值1	取值2	取值3 (基准)	取值4	取值5
转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200
喷油速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	34.5	39.5	44.5	49.5	54.5

2.2.1 不同转速下的流场分布规律

图11~图13分别为柴油机在不同转速下润滑油填充率、捕捉率,以及活塞速度及喷油与活塞的速度差随曲轴转角的变化曲线^[6],可见:在不同转速下填充率均随曲轴转角的增大呈线性增长趋

势；而随着转速的提高，填充率整体下降。这是因为随着柴油机转速加快，活塞整体运动速度加快，而喷油速度不变，致使两者间的相对速度增大，在同等运行时间内，润滑油回流量大，进入冷却油腔的量相应减少，从而造成填充率下降。

不同转速下捕捉率的变化趋势基本保持一致，即在活塞下行一段时间后，随着曲轴转角的增大捕捉率迅速增大，随后做无规律波动。随着柴油机转速的提升，润滑油开始进入出口油道的时刻延后，且出口处的质量流量峰值也下降，这同样是由相对速度决定的，即相对速度增大使进入冷却油腔的润滑油量减少，出口处的润滑油量相应降低。

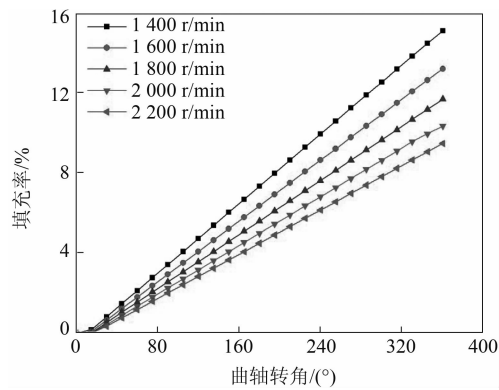


图 11 不同转速下润滑油填充率随曲轴转角变化示意图

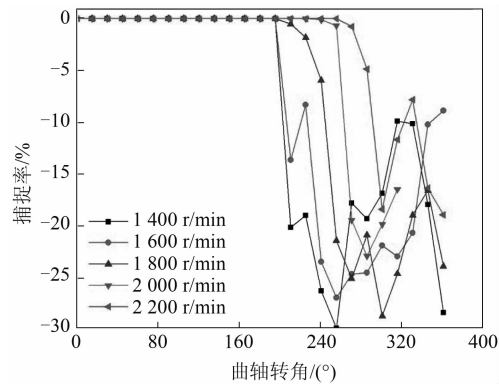


图 12 不同转速下润滑油捕捉率随曲轴转角变化示意图

2.2.2 不同喷油速度下的流场分布规律

图 14、图 15 分别为柴油机在不同喷油速度下润滑油填充率和捕捉率随曲轴转角的变化曲线^[6,9]，可见：在不同喷油速度下填充率均随曲轴转角增大呈线性增长趋势；而随着喷油速度的提升，填充率整体上升。这是因为在相同转速下，随着喷油速度的提升，单位时间内进入冷却油腔的润滑油量大幅增加；同时，由于动量增大，气-液-固三相间的作用增强，使润滑油在环腔内更易破碎，流动性更好，从而使填充率上升。

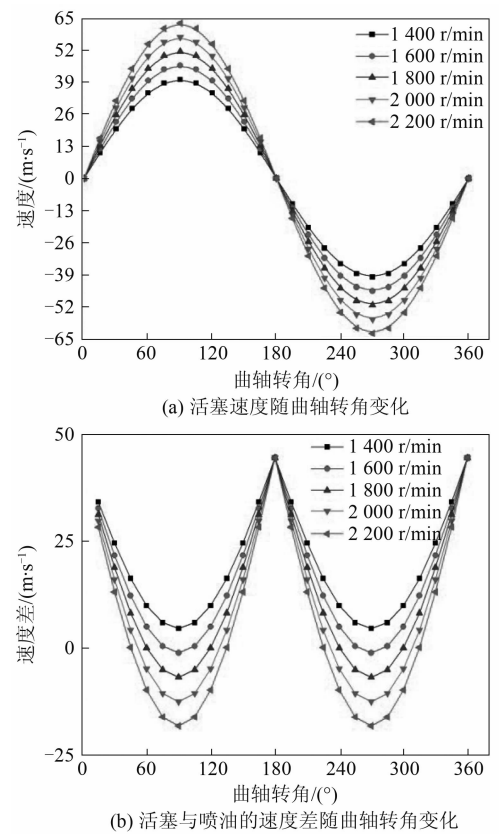


图 13 不同转速下活塞速度及活塞与喷油的速度差随曲轴转角变化示意图

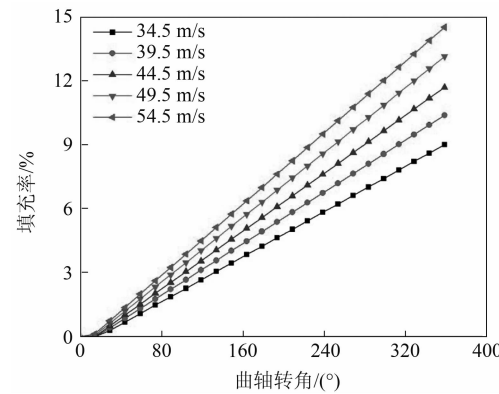


图 14 不同喷油速度下润滑油填充率随曲轴转角变化示意图

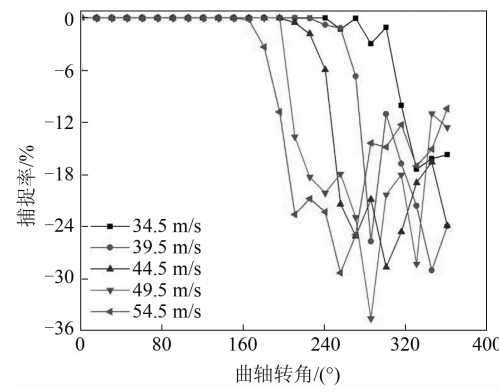


图 15 不同喷油速度下润滑油捕捉率随曲轴转角变化示意图

不同喷油速度下捕捉率的变化趋势基本保持一致,随着喷油速度的提升,润滑油开始进入出口油道的时刻提前,且出口处的质量流量峰值也有所增大。一方面是因为进入冷却油腔的润滑油量不断增加;另一方面是因为润滑油破碎更为彻底,流动性更佳。此时,冷却油腔内的润滑油发生更高频的振荡,有利于带走活塞火力顶面热量。

3 结论

(1) 润滑油自油嘴高速射出,在气缸套区域和入口油道处形成稳定液柱,进入环腔后高速冲击环腔顶部,液柱破碎成羽状,在环腔外侧和顶部周围形成较密集的分布,随着活塞运动将趋向均匀化。伴随活塞下行,润滑油逐渐流入出口油道,并在运动中由羽状进一步破碎成块状。

(2) 随着活塞上下往复运动,润滑油填充率和捕捉率逐步增大,环腔内将填充足够的润滑油;润滑油振荡运动,及时有效带走活塞火力顶面热量,保证了活塞运行的可靠性。

(3) 保持喷油速度不变,提高柴油机转速,活塞整体运动速度加快,润滑油不易进入冷却油腔,其填充率和捕捉率均有所下降,不利于活塞冷却。

(4) 在相同转速下,喷油速度增大不仅增加了进入冷却油腔的润滑油量,且有利于气-液-固三相间的相互作用,填充率和捕捉率均提升,环腔内润滑油高速振荡,强化活塞换热,有利于活塞可靠运行。

参考文献

- [1] 高翔,薛冬新,孟浩,等. 某8缸中速柴油机冷却系统三相流固耦合传热分析[J]. 柴油机, 2016, 38(4): 24-30.
- [2] ALI M, HASSAN M, KALAM M, et al. Determination of time variant 1D-3D temperature and heat transfer distribution inside the cooling jacket of a SI engine cooling system after key off [C/OL] //SAE Paper, 2012-01-0642, 2012 [2019-11-25]. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2012-01-0642>.
- [3] KAJIWARA H, FUJIOKA Y, NEGISHI H. Predication of temperature on pistons with cooling gallery in diesel engines using CFD tool [C]. SAE Paper, 2003-01-0986.
- [4] 王仁信,胡玉平,李国祥. 活塞喷油冷却流场数值模拟[J]. 现代制造技术与装备, 2010(5): 1-3.
- [5] 陈晓飞,仲蕾,庞铭,等. 喷油冷却活塞传热过程的流固耦合分析[J]. 内燃机工程, 2016, 7(5): 176-183.
- [6] 王新,刘世英. 活塞喷油冷却流动和传热特性的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(1): 54-58.
- [7] 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.
- [8] 胡蕾. 活塞喷油强制振荡冷却的仿真分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [9] 曹元福,张卫正,杨振宇,等. 封闭空腔中多相流振荡传热特性的数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(3): 891-896.
- [10] 冯耀南,张翼. 振荡油腔位置对柴油机活塞温度场的影响[J]. 装备制造技术, 2009(6): 11-13.
- [11] YI Y, REDDY M, JARRETT M, et al. CFD Modeling of the multiphase flow and heat transfer for piston gallery cooling system. [C/OL] //SAE Paper, 2007-01-4128, 2007 [2019-11-25]. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2007-01-4128>.
- [12] 张卫正,曹元福,原彦鹏,等. 基于CFD的活塞振荡冷却的流动与传热仿真研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(1): 74-78.