

密封气流流量对轴承腔外壁滑油运动的影响

曹逸韬^{1,2}, 钟易成³, 吴悠¹, 周琳¹, 苏志敏¹

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南株洲 412002; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;
3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 为了研究密封气流质量流量对轴承腔外壁上滑油分布及温度分布的影响, 基于拉格朗日离散相模型(DPM)和液膜模型, 利用 STAR CCM+ 商业软件对轴承腔内油滴运动、油滴向油膜的转化以及油膜在轴承腔内的运动开展非稳态数值模拟计算, 并与德国 Karlsruhe 大学轴承腔油膜厚度试验结果进行对比。结果表明: 计算值与试验值在高转速下一致性较好, 平均相对误差 13.6%; 低转速下由于空气分布均匀性较差, 个别工况点计算值与试验值存在一定误差, 但最小相对误差在 4%, 总体上具有较好一致性; 随着轴承腔密封气流的质量流量的增加, 轴承腔内空气的平均流动速度提高, 对轴承腔外壁上油膜的剪切作用和扰动能力增强, 导致轴承腔的外壁面油膜厚度和稳定性降低; 轴承腔外壁面上的温度分布与油膜的厚度分布一致, 最小温度分布在壁面上被油滴冲击位置; 随着轴承腔密封气流的质量流量的增加, 轴承腔外壁上低温分布范围增大, 但温度分布均匀性变差。

关键词: 轴承腔; 密封气流; 油滴运动; 油膜厚度; 滑油分布; 温度分布; 航空发动机

中图分类号: V 228.2

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.01.018

Influence of Sealing Air Mass Flow Rate on Bearing Chamber Outer Wall Oil Movement

CAO Yi-tao^{1,2}, ZHONG Yi-cheng³, WU You¹, ZHOU Lin¹, SU Zhi-min¹

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou Hunan 412002, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the influence of seal gas mass flow rate on the oil distribution and temperature distribution on the outer wall of bearing chamber, based on the Lagrangian Discrete Phase Model (DPM) and the liquid film model, the unsteady numerical simulation of the movement of oil droplets in bearing chamber, the transformation of oil droplets to oil film and the movement of the oil film in bearing chamber were carried out using STAR CCM+ commercial software, and the results were compared with the test results of the thickness of oil film in bearing chamber at Karlsruhe University in Germany. The results show that the calculated values are in good agreement with the test values at high rotational speed, and the average relative error is 13.6%. At low rotational speed, due to poor air distribution uniformity, there is a certain error between calculated values and test values at individual operating points, but the minimum relative error is 4%, which is generally consistent. With the increase of the mass flow rate of the seal gas in the bearing chamber, the average flow velocity of the air in the bearing chamber increases, and the ability to shear and disturb the oil film on the outer wall of the bearing chamber increases, resulting in the decrease of the thickness and stability of the oil film on the outer wall of the bearing chamber. The temperature distribution on the outer wall of the bearing chamber is consistent with the thickness distribution of the oil film, and the minimum temperature is located at the position where the oil drops impact the wall. With the increase of the mass flow rate of the seal gas in the bearing chamber, the low temperature region on the outer wall of the bearing chamber increases, but the uniformity of temperature distribution becomes worse.

Key words: bearing chamber; sealed airflow; movement of oil droplets; oil film thickness; oil distribution; temperature distribution; aeroengine

0 引言

随着航空发动机转速的提高, 轴承等转动部件的

发热量增大, 其散热主要通过进入轴承腔密封气流的对流换热以及滑油在轴承腔内壁面形成的油膜吸热实现。根据努塞尔数 Nu 的物理意义可知^[1], 改变密封

收稿日期: 2021-07-09 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 曹逸韬 (1990), 男, 在读博士研究生, 工程师, 从事航空发动机总体结构和滑油系统设计工作; E-mail: yt_tsao@163.com。

引用格式: 曹逸韬, 钟易成, 吴悠, 等. 密封气流流量对轴承腔内壁滑油运动的影响[J]. 航空发动机, 2023, 49(1): 127-133. CAO Yitao, ZHONG Yicheng, WU You, et al. Influence of sealing air mass flow rate on bearing chamber outer wall oil movement[J]. Aeroengine, 2023, 49(1): 127-133.

气流的质量流量对气流对流换热效果影响较大;同时,在流动空气与油膜间的剪切应力作用下,轴承腔内气流运动会进一步影响轴承腔壁面上的油膜分布。因此,开展密封气流对轴承腔内油滴粒子以及壁面油膜运动的影响研究对轴承腔内换热分析具有十分重要的意义。

Lee等^[2]、杨培杰等^[3]的研究表明,轴承腔的几何结构会对轴承腔内部气体流动影响较大;徐让书等^[4]、敖文伟等^[5]通过改变转速等运行参数对轴承腔的回油出口油气比、压力变化进行了研究。由于轴承腔内换热效果与轴承腔内油膜分布有关,在轴承腔内油膜厚度分布及影响因素方面,任国哲等^[6-7]采用商业软件对轴承腔内油气两相流动进行非稳态数值模拟,获得了不同转速下内壁上油膜厚度和体积分数的变化情况;Shimo等^[8]、Weinstock等^[9]对轴承腔内油滴运动以及油滴/壁面碰撞并形成油膜的过程展开计算,研究了工况条件对油滴/壁面油膜动量转移量、壁面油膜厚度和速度分布特性的影响;Gorse等^[10]重点针对3种结构的轴承腔,测量了其在不同转速和滑油流量下油膜在腔内周向位置的厚度分布。在轴承腔内空气运动对润滑系统热分析影响的研究方面,苏状^[12]利用商业软件,建立典型轴承腔有限元模型,获得不同供油量和滑油供油温度下的轴承腔换热特性曲线,并通过试验进行验证。

上述研究中详细论述了滑油在轴承腔壁面上分布的主要影响因素,如转子转速、润滑油的进口速度、喷射角度、空气的喷射角度等,但有关密封空气流量对轴承腔外壁上滑油分布的影响研究较少。本文在上述研究的基础上,通过建立简化的轴承腔模型,运用STAR-CCM+进行数值模拟计算,并将计算结果与现有试验数据进行了对比验证。

1 计算模型和方法

1.1 计算模型

轴承腔内滑油流动如图1所示。轴承腔内滑油-空气流动是一种复杂的多相流运动。滑油通过喷嘴进入轴承腔内并在旋转壁面的旋转、搅拌作用下破碎形成油滴颗粒相。

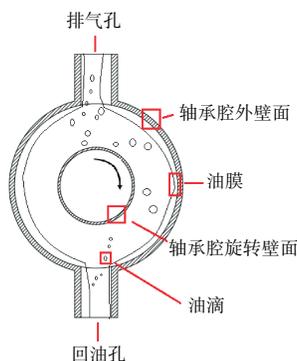


图1 轴承腔内滑油流动

在轴承腔内,形成的油滴颗粒相与轴承腔的外壁上发生碰撞并形成油膜。在自身重力和空气剪切应力作用下,外壁面上的油膜自排气孔和回油孔流出。

根据上述分析,轴承腔内滑油与空气的运动大致分为3个过程:滑油由连续相破碎成为颗粒相、颗粒相冲击轴承腔外壁面形成液膜相、液膜相流动通过回油管道排出轴承腔。本文结合其他学者对轴承腔内滑油运动的研究成果^[12],对轴承腔内滑油运动进行简化处理,包括:

- (1)假设在入口位置滑油已完全破碎,滑油以油滴的形式进入轴承腔;
- (2)油滴为刚性球形液滴,在运动过程中不发生变形;
- (3)空气粘性阻力为影响颗粒运动的主要作用力;
- (4)不考虑轴承腔内离散油滴的相互融合和二次破碎。

根据上述假设建立数值计算中的数学模型。

1.1.1 空气运动模型

轴承腔内空气运动的控制方程如下:

- (1)连续方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; \vec{v} 为空气流动速度; S_m 为附加源项,通常由人为输入或者计算过程中不同相之间转化产生。

- (2)动量方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + S_u \quad (2)$$

式中: p 为静态压力; $\rho \vec{g}$ 为流体的重力项; \vec{F} 为作用在流体上的附加力; $\bar{\tau}$ 为应力张量; S_u 为液滴对空气流动的影响,包含油滴蒸发所携带的动量和由油滴运动引起的动量交换

$$S_u = \sum \left(\frac{18\mu C_d Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (3)$$

- (3)能量方程。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho E \vec{v}) = \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \bar{\tau}) + S_E + \vec{F}_v \cdot \vec{v} - \nabla \cdot q \quad (4)$$

式中: E 为连续流体的总能量; q 为热通量; S_E 为单位体积的能量源,通常由人为输入或者计算过程中不同相之间转化产生。

1.1.2 油滴运动模型

根据上述轴承腔内油滴运动假设和牛顿第二运动定理对轴承腔内油滴的受力进行分析可知,油滴在轴承腔内运动时主要受到自身重力和周围空气曳力的作用,此时油滴在运动过程中满足

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (5)$$

式中: m_p 为油滴质量; \vec{u}_p 为油滴运动速度; \vec{u} 为空气运动速度; $m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 为空气对油滴的浮力; $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ 为空气对油滴的曳力,其中 τ_r 为油滴的动量松弛时间尺度

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_d Re} \quad (6)$$

式中: d_p 为油滴直径; Re 为颗粒雷诺数; μ 为空气动力粘度; C_d 为曳力系数,对于球形颗粒, C_d 的取值范围与颗粒 Re 数有关,根据Schiller-Naumann理论可知

$$C_d = 0.44, Re > 1000 \quad (7)$$

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}), Re \leq 1000 \quad (8)$$

油滴触碰轴承腔外壁面后的运动状态如图2所示。根据轴承腔的外壁面上是否由滑油黏附可以将壁面分为干壁面和湿壁面。2种情况时油滴触碰壁面后均会形成黏附、反弹、飞溅、铺展等现象。上述现象的形成过程与油滴的尺寸、速度、油滴性质以及壁面温度有关,根据Bai Chengxin等^[13-14]的研究,计算过程中可以通过油滴的入射韦伯数 We 和拉普拉斯数 La 和壁面温度判断油滴碰撞壁面后的运动状态及壁面状态。

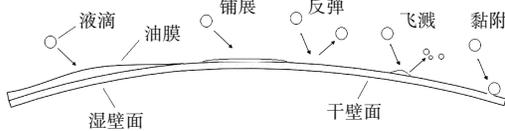


图2 油滴触碰轴承腔外壁面后的运动状态

入射韦伯数

$$We_1 = \frac{\rho_p \vec{u}_{r,n}^2 d_p}{\sigma} \quad (9)$$

拉普拉斯(Laplace)数

$$La = \frac{\rho_p \sigma d_p}{\mu_p^2} \quad (10)$$

式中: ρ_p 为油滴粒子的密度; σ 为油滴表面张力; $\vec{u}_{r,n}$ 为油滴的运动速度; μ_p 为油滴颗粒黏度。

其中,油滴的 $We_1 < 2$ 时,碰撞在壁面上的液滴会扩散; $We_1 > 10$ 时,碰撞在壁面上的液滴在壁面上铺展。在2种状态下均可以认为液滴被壁面完全收集;当 $We_1 = 2 \sim 10$ 时,液滴碰撞壁面后反弹,表示液滴未被壁面吸收。

1.1.3 油膜运动模型

在轴承腔壁面上所形成的油膜运动受到周围空气、滑油、油滴以及壁面运动的影响。运用STAR-CCM+商业软件计算油膜运动时,为简化求解过程,油膜流动被简化为靠近壁面1层网格厚度的2维模型进行计算,同时假设油膜流动过程为层流流动,且流动过程中油膜的速度沿油膜厚度呈抛物线分布。求解壁面上液膜厚度的液膜流动连续性方程

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_f dV + \int_A \rho_f v_r \cdot da = \int_V \frac{s_u}{h_f} dV \quad (11)$$

式中: ρ_f 为液膜密度; v_r 为液膜速度;体积 V 和表面 A 分别为液膜厚度及空间分布的函数; s_u 为单位面积液膜的质量源项,主要来自于液滴碰撞、液膜剥离等产生液膜质量变化的附加项。

2 几何模型及边界条件

2.1 几何模型及网格划分

根据文献^[7]中数值计算的轴承腔模型,给出轴承腔的计算模型尺寸如下:轴承腔的内壁半径为62 mm,外壁半径为90 mm,高度为28 mm,宽度为47 mm,通风孔和回油孔直径为17 mm,回油管和排气管的高度均为40 mm;将滑油孔和进气孔简化为沿周向均匀分布的24个圆形小孔。具体的几何模型如图3所示。

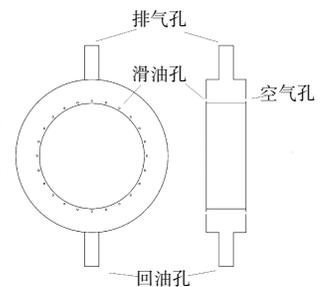


图3 轴承腔几何模型

计算结构化网格采用ICEM CFD软件进行划分,由于滑油黏附壁面上后的运动特性为主要研究内容,因此对轴承腔内靠近壁面区域进行网格加密,对远离壁面区域采用较为稀疏的网格进行离散。根据上述理论划分出的网格节点数量为18万,轴承腔网格划分如图4所示。

2.2 物性参数及边界条件

参考文献[3], 轴承腔内滑油和空气的物性参数见表1, 其中滑油在空气中的表面张力为0.036 N/m。模拟中温度对滑油和空气物性参数的影响忽略不计。

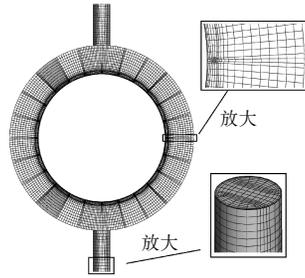


图4 轴承腔网格划分

表1 轴承腔内滑油和空气的物性参数

参数	空气	滑油
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.23	899.5
黏度/($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.84	950
比热容/($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	1005	1880
热导率/($10^{-2}\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	2.60	11.22

模拟中滑油的质量流量为0.1 kg/s, 滑油的轴向速度为2 m/s, 周向速度为轴承内壁旋转速度的一半。轴承腔内油滴的直径分布为14~500 μm , 且油滴的平均直径随转速提高而减小^[6]。为研究空气的质量流量对油膜在轴承腔壁面上的分布的影响, 在数值模拟中空气的质量流量分别取0.005、0.010、0.015、0.020 kg/s, 且空气的入流方向与主轴呈 15° , 周向速度与滑油运动速度保持一致。进气与进油的初始温度相同, $T_{\text{air}}=T_{\text{oil}}=333\text{ K}$ 。轴承腔的排气口和回油口均采用压力出口边界条件。轴承腔的内壁面设置为转动壁面, 其他壁面均为固定壁面。其中转动壁面的转速 $n=4000、8000\text{ r/min}$ 。所有壁面不考虑粗糙度对油膜分布的影响, 均设置为光滑壁面。回油管 and 排气管为绝热壁面, 其他壁面为热通量壁面, 壁面上的热流密度 $q=8\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

轴承腔中的滑油进入轴承腔时以油滴的离散形式存在, 采用拉格朗日方法对轴承腔内油滴运动进行求解。为准确获取轴承腔中的流动特性, 在求解过程中同时考虑空气与油滴颗粒之间的相互作用。在数值模拟中湍流模型选择 $k-\omega$, 采用隐式非稳态算法进行求解。

3 计算结果分析与讨论

3.1 轴承腔内空气运动分析

轴承腔内空气与油滴间相互作用对油膜在轴承腔壁面上的形成和分布有十分重要的影响。当轴承腔外壁上油膜厚度基本不发生变化后, 不同空气质

量流量时轴承腔内的空气场速度分布如图5所示。由于转动壁面的转速均为8000 r/min, 轴承腔内空气的最大运动速度出现在转动壁面附近区域, 因此轴承腔内空气的速度分布范围基本一致。随进入轴承腔内的空气质量流量的增加, 在轴承腔动壁面和外壁面之间以及回油孔和排气孔位置空气的运动速度也逐渐提高。

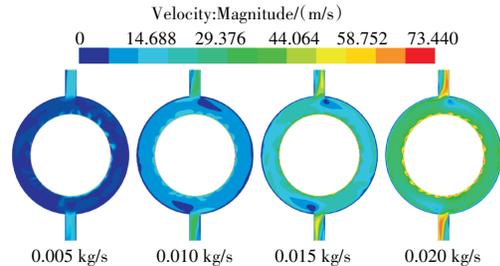


图5 不同空气质量流量时轴承腔内的空气场速度分布

回油孔与排气孔流出空气质量流量随入口质量流量的变化如图6所示。由于在计算过程中同时考虑了重力的影响, 随入口空气质量流量增加, 自回油孔流出的空气质量流量略大于自排气孔流出空气的质量流量, 二者之间相差较小。

3.2 轴承腔内油滴运动的分析

在主轴转速为8000 r/min、空气的质量流量为0.01 kg/s时油滴在轴承腔中的运动迹线如图7所示。在轴承腔中, 油滴呈现旋转运动, 且大部分油滴在碰撞壁面后黏附在壁面上形成油膜, 少量液滴随气流运动自出口排出。采用Rosin-Rammler公式的设置进入轴承腔内油滴颗粒直径分布, 设置其平均直径为129.9 μm 。当外壁上油膜分布稳定后, 通过回油孔和排气孔的混合物质量流量分别为5.6、5.4 kg/s, 自回油孔流出的滑油质量流量略大于自排气孔流出的质量流量。因此油滴在轴承腔中的运动除了受空气流动影响外, 同时也受到自身重力的影响。

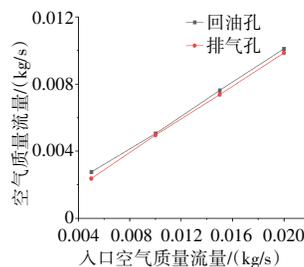


图6 回油孔与排气孔流出空气质量流量随入口质量流量的变化



图7 油滴在轴承腔内的运行迹线

3.3 轴承腔内油膜厚度数值模拟与试验对比分析

为验证数值模拟结果的准确性,将数值模拟结果与文献中试验测量出的轴承腔内油膜厚度进行对比,其结果如图 8 所示。由于在数值模拟中相位角为 0° 、 180° 分别对应于回油孔和排气孔的位置,在数据处理中将 2 处位置的油膜厚度设置为 0。根据对比结果,在 8000 r/min 时数值模拟结果与试验结果较为吻合,但在最大厚度位置,数值模拟结果相对较大;在 4000 r/min 时的 $0\sim 180^\circ$ 内数值模拟结果与试验数据相差较小,但在 $180\sim 360^\circ$ 内数值模拟中油膜厚度波动较大,因此数值模拟结果中的油膜厚度大于试验值,除去试验测量所造成的误差外,由于数值计算中空气入口以周向均布通气孔替代周向分布的状态,导致在计算过程中轴承腔内空气运动的均匀性相对较低,空气对轴承腔内油膜的剪切能力降低,从而引起油膜厚度增加。在轴向造成滑油的主要集中区域向空气入口侧偏移。根据轴承腔内空气运动速度分布,在周向角度为 $10\sim 40^\circ$ 和 $330\sim 350^\circ$ 内空气运动速度明显降低并形成局部涡旋,此时空气对油膜的剪切应力较低。在角度较小时油膜沿周向运动的方向与重力的方向相同,导致油膜厚度最大位置相对较低。

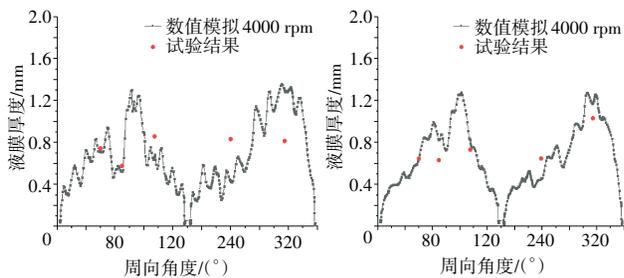


图 8 轴承腔内油膜厚度数值模拟结果与试验结果对比

因此虽然数值计算结果与试验结果存在一定的误差,但总体而言,数值模拟的计算结果与试验结果基本一致,验证了数值模拟结果的准确性和可靠性。

3.4 轴承腔内油膜运动分析

转速为 8000 r/min、空气质量流量为 0.01 kg/s 时轴承腔壁上油膜厚度随时间的变化如图 9 所示。根据设置,计算初始时刻轴承腔壁面均为干燥壁面。因此在计算初始阶段,自甩油孔流出的液滴冲击到轴承腔外壁上后形成独立的油膜聚集点。随计算时间的推移,油膜沿周向转动方向铺展,而且油滴进入轴承腔时存在轴向的运动速度,因此油膜沿周向运动的同时也沿轴向运动。当 $t \approx 1$ s 时,油膜在轴承腔外壁

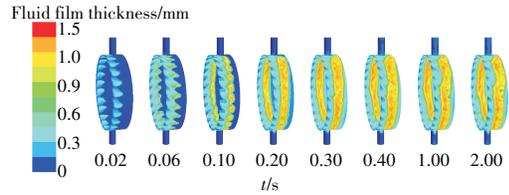


图 9 空气质量流量为 0.01 kg/s 时不同时刻轴承外壁上油膜分布

面上的分布基本稳定,由于采用非稳态求解方法,因此随计算时间推移,液膜厚度存在轻微波动。根据数值模拟,周向角度为 30° 时液膜厚度随轴向位置的变化如图 10 所示。从图中可见,当油膜分布稳定后,油膜在外壁面上的分布表现为中间高两侧低的特性,且最大油膜厚度在偏向空气入口侧约 5 mm 位置处。

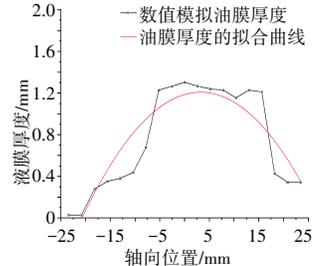


图 10 周向角度为 30° 时液膜厚度随轴向位置的变化

不同空气质量流量时轴承腔外壁上油膜厚度的变化如图 11 所示。从图中可见,随进入轴承腔内空气质量流量增加,轴承腔的外壁面边缘位置油膜厚度逐渐减小,其分布在中心位置逐渐集中。结合不同

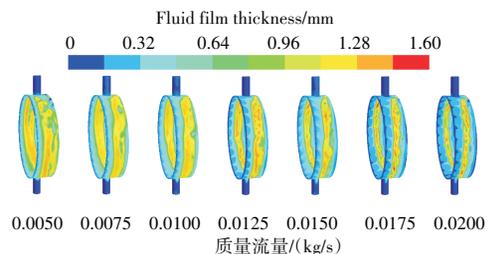


图 11 不同空气质量流量时轴承腔外壁上油膜厚度的变化

空气质量流量时轴承腔内空气运动速度分布可知,随进入轴承腔的空气流量增加,空气对油膜的剪切应力和扰动能力增强,外壁上油膜厚度分布的均匀性和厚度逐渐减小。此时不同空气质量流量时轴承腔的外壁上剪切应力的变化图 12 所示。从图中可见,随空气质量流量增加,空气对轴承腔的外壁上油膜的剪切应力提高。

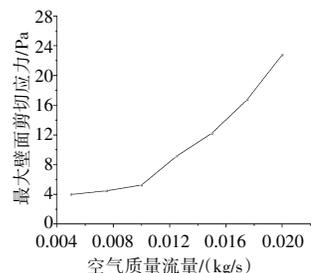


图 12 不同空气质量流量时轴承腔外壁上剪切应力的变化

3.5 轴承腔内温度分布的分析

根据轴承腔壁面上的参数设置可知,随时间的推移轴承腔内温度逐渐升高。而轴承腔内润滑油的主要作用就是及时带走轴承腔内产生的热量,维持轴承腔内机械构件够稳定运行。

当轴承转速为 8000 r/min、不同空气质量流量时轴承腔的外壁面上温度分布如图 13 所示。从图中可见,轴承腔的外壁面上温度分布与油膜厚度分布基本一致。且随空气质量流量增加,外壁面上温度分布均匀性和稳定性逐渐降低。而在油膜的导热作用下,整个外壁面上的温度较低区域主要集中在壁面上被油滴冲击位置。

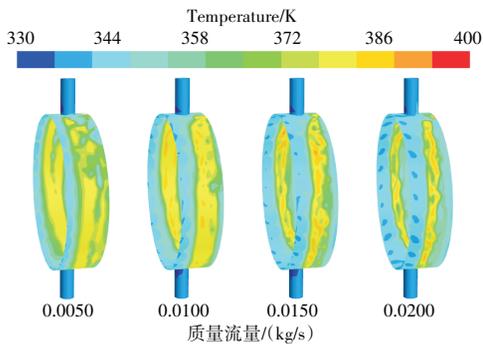


图 13 不同质量流量时外壁面上的温度分布

当轴承腔的外壁面上油膜分布稳定后,不同进气质量流量时轴承腔外壁面上换热系数的分布如图 14 所示。从图中可见,轴承腔外壁面上换热系数的最大值出现在液滴冲击壁面位置区域并沿轴向逐渐减小。且随空气质量流量增加,轴承腔外壁面上的换热系数逐渐增大。

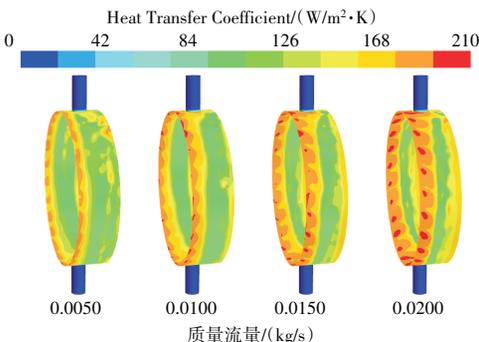


图 14 不同空气质量流量时轴承腔的外壁面上换热系数分布

4 结论

(1)随通入轴承腔的密封气流的质量流量增加,轴承腔内空气的平均流动速度逐渐提高;且改变进入空气的质量流量时,自排气孔和回油孔流出的空气质

量流量基本相同,表明轴承腔内空气运动受重力影响较小。

(2)随通入轴承腔的密封气流的质量流量增加,轴承腔内空气流动速度提高,空气对轴承腔外壁面上油膜的剪切应力提高,导致轴承腔的外壁面油膜分布的均匀性和平均厚度随空气质量流量增加而降低。

(3)轴承腔外壁面上的温度分布与油膜的厚度分布一致。最小温度分布在壁面上被油滴冲击位置。随通入轴承腔的密封气流质量流量增加,轴承腔的外壁面上低温分布范围增大,但温度分布稳定性变差。而轴承腔外壁面上导热系数与温度分布正好相反。

参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006:231.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer[M]. Bei jing: Higher Education Press, 2006:231.(in Chinese)
- [2] Lee C, Palma P, Simmons K, et al. Comparison of computational fluid dynamics and particle image velocimetry data for the airflow in an aero-engine bearing chamber[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(4): 697-703.
- [3] 杨培杰,鹿鹏,方露露,等.回油槽结构参数对轴承腔油气两相流的影响[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(6):643-648,661.
YANG Peijie, LU Peng, FANG Lulu, et al. Effects of structure parameters of scavenge sump on oil/air two-phase flow in bearing chamber [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 643-648, 661. (in Chinese)
- [4] 徐让书,王娟娟,刘立博,等.航空发动机轴承腔内两相流动数值模拟[J].润滑与密封,2011,36(3):73-77.
XU Rangshu, WANG Juanjuan, LIU Libo, et al. Numerical simulation of two-phase air/oil flow in aero-engine bearing chamber [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(3): 73-77.(in Chinese)
- [5] 敖文伟,苏华,陈国定.轴承腔两相流动数值模拟[J].机械科学与技术,2009,28(8):1064-1067,1071.
AO Wenwei, SU Hua, CHEN Guoding. Numerical Simulation of Gas and Liquid Flow in a Bearing Chamber[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(8): 1064-1067, 1071.(in Chinese)
- [6] 任国哲,刘振侠,赵静宇,等.基于DPM与VOF方法轴承腔内润滑油瞬态特性对比[J].航空计算技术,2016,46(1):11-15.
REN Guozhe, LIU Zhenxia, ZHAO Jingyu, et al. Motion of wall oil film with consideration of oil-gas coupled heat and mass transfer in bearing chamber[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(1): 11-15.(in Chinese)
- [7] 任国哲.基于油气两相流的航空发动机轴承腔流动换热研究及回油结构改进设计[D].西安:西北工业大学,2016.
REN Guozhe. Study on flow and heat transfer and optimization of scavenge structure in bearing chamber based on oil/air two-phase flow[D].

- Xi'an: Northwest Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [8] Shimo M, Canino J V, Heister S D. Modeling oil flows on seal runners and engine sump walls[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, 127(4): 827-834.
- [9] Weinstock V, Heister S. Modeling oil flows in engine sumps: drop dynamics and wall impact simulation[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(1): 163-172.
- [10] Gorse P, Busam S, Dullenkopf K. Influence of operating condition and geometry on the oil film thickness in aeroengine bearing chamber [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2004, 128(1): 103-110.
- [11] Peduto D, Herve M, Klaus D, et al. Modelling of an aeroengine bearing chamber using enhanced CFD technique[R]. ASME 2011-GT-45635.
- [12] 苏壮, 毛宏图, 郁丽, 等. 航空发动机轴承腔换热特性研究[J]. *航空发动机*, 2015, 41(6): 28-32.
SU Zhuang, MAO Hongtu, YU Li, et al. Re-research of heat transfer characteristics for aeroengine bearing cavity[J]. *Aeroengine*, 2015, 41(6): 28-32. (in Chinese)
- [13] 赵静宇, 刘振侠, 胡剑平, 等. 轴承腔内壁油膜运动特性的数值研究[J]. *推进技术*, 2014, 35(1): 25-32.
ZHAO Jinyu, LIU Zhenxia, HU Jianping, et al. Numerical study on motion characteristics of lubricating oil film of bearing chamber wall [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(1): 25-32. (in Chinese)
- [14] Bai C X. Modeling of spray impingement processes[D]. London: University of London, 1995.
- [15] Bai C X, Rusche H, Gosman A D. Modeling of gasoline spray impingement[J]. *Atomization and Sprays*, 2002, 12(1-3): 1-27.
- [16] 胡剑平, 任国哲, 易军, 等. 轴承腔内壁与油膜换热的数值模拟与试验[J]. *航空学报*, 2017, 38(9): 138-148.
HU Jianping, REN Guozhe, YI Jun, et al. Numerical simulation and experiment for heat transfer between oil film and inner wall of bearing chamber [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(9): 138-148. (in Chinese)

(编辑:程海)