

# 航空发动机轴承腔油气两相流动特性及改进研究\*

任国哲, 燕阳, 郑莞霏, 赵欢, 孙丹, 张成烽

(沈阳航空航天大学 航空发动机学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 为了研究航空发动机轴承腔油气两相流动特性, 改善滑油回油效果, 建立了基于欧拉-欧拉方法轴承腔两相流求解模型, 针对轴承腔的通风结构和回油结构提出了三种改进方案, 对不同工况下常规轴承腔和三种改进方案流动特性和回油特性进行深入分析。研究表明, 将常规轴承腔通风结构进行嵌入 (Embed) 改进后, 滑油被嵌入的通风口壁面阻挡, 从通风口流出的滑油量减小, 回油效率明显提升; 将常规轴承腔回油结构进行斜坡 (Slope) 改进后, 回油口右侧滑油堆积区消失, 腔内滑油体积分数减小, 回油效率明显提升; 组合改进方案 (ES) 能够兼顾嵌入和斜坡改进方案的优势, 回油效率进一步提升。相比常规轴承腔, 当滑油流量为 200L/h, 转速为 15000r/min 时, 嵌入、斜坡和组合改进方案回油效率分别提高了 16.47%, 13.02% 和 32.81%。

**关键词:** 航空发动机; 油气两相流; 轴承腔; 通风结构; 回油结构; 回油效率

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 11-2302011-10

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2302011

## Oil-Gas Two-Phase Flow Characteristics and Improvement of Bearing Chamber for an Aeroengine

REN Guo-zhe, YAN Yang, ZHENG Guan-fei, ZHAO Huan, SUN Dan, ZHANG Cheng-feng

(School of Aero-Engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** In order to study characteristics of oil-gas two-phase flow in bearing chamber of an aero-engine and improve return effect of oil, an unsteady two-phase flow solution model of the bearing chamber was established based on Euler-Euler method, and three improvement schemes were proposed for vent structure and scavenge structure of the bearing chamber. The oil-gas two-phase flow field characteristics and return-oil characteristics of a conventional bearing chamber and three improvement schemes under different working conditions were further analyzed. The results show that for the improved bearing chamber with embedded vent, oil was blocked by wall surface of the embedded vent, the oil flow from the vent decreased, and return-oil efficiency increased obviously. For the improved bearing chamber with slope on the return-oil structure, accumulation area of the oil on right side of return-oil port disappeared, volume fraction of the oil in the chamber decreased significantly, resulting in the increasing return-oil efficiency significantly. The combined improvement scheme (ES) can take into account the advantages of embedded and slope improvement schemes, and the return-oil efficiency is further improved. Compared with the conventional bearing chamber, when the oil flow rate is 200L/h and the rotating speed

\* 收稿日期: 2023-02-09; 修订日期: 2023-03-08。

基金项目: 国家自然科学基金 (52075346); 辽宁省教育厅面上项目 (LJKZ0179); 先进航空动力创新工作站 (依托航空发动机研究院设立) 项目 (HKC2020-02-030)。

作者简介: 任国哲, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机轴承腔密封特性。

通讯作者: 赵欢, 博士, 教授, 研究领域为航空发动机轴承腔密封特性。E-mail: phd\_zhaohuan@163.com

引用格式: 任国哲, 燕阳, 郑莞霏, 等. 航空发动机轴承腔油气两相流动特性及改进研究[J]. 推进技术, 2023, 44(11): 2302011. (REN Guo-zhe, YAN Yang, ZHENG Guan-fei, et al. Oil-Gas Two-Phase Flow Characteristics and Improvement of Bearing Chamber for an Aeroengine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(11): 2302011.)

is 15000r/min, the return-oil efficiency of the embedded, slope and combined improvement schemes increases by 16.47%, 13.02% and 32.81%, respectively.

**Key words:** Aeroengine; Oil-gas two-phase flow; Bearing chamber; Vent structure; Scavenge structure; Return-oil efficiency

## 1 引言

航空发动机滑油系统工作时,滑油经滑油喷嘴进入轴承腔,在离心力的作用下,具有冷却润滑作用的滑油被雾化成微小的滑油颗粒。滑油与空气相互作用,在轴承腔内形成复杂的油气两相流,大量的研究表明,开展关于航空发动机轴承腔油气两相流动特性及改进研究具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

国内外对轴承腔内部滑油流动特性进行了深入研究。Wieth等<sup>[4]</sup>和Aidarinis等<sup>[5]</sup>曾指出轴承腔内的滑油与高速气流相互作用后会破裂成液滴,滑油液滴在重力的作用下流向回油口,并在回油口处堆积。回油口处滑油的堆积会导致轴承腔的回油效率下降,影响滑油的有效利用率。陈国定等<sup>[6-9]</sup>提出一种关于轴承腔油滴沉积特性、油膜流动特征和油滴相与空气能量传递的分析方法,为轴承腔的润滑和换热设计提供了参考。李坤等<sup>[10]</sup>对轴承腔结构内部流动和换热机理进行了参数化分析,建立了适用于轴承腔常见工况范围内的对流换热准则式。鹿鹏、杨培杰等<sup>[11-12]</sup>利用Hilbert-Huang变换方法,分析轴承腔内压力信号的频谱特征,建立能量指标和流态之间的相关性,得到了滑油在壁面的分布规律。然而以上研究均缺少对轴承腔内滑油堆积位置的详细研究,任国哲等<sup>[13-14]</sup>对某型常见轴承腔内部油气两相流进行了研究,得到了滑油堆积与转速的变化规律,研究结果表明,流量较大时,低转速情况下,滑油容易堆积在回油口旋转方向一侧,而高转速时,剪切力克服重力影响效果明显,滑油在轴承腔内壁面上的分布更加均匀。

为了减小滑油在轴承腔内的滞留,提高轴承腔的回油特性,Zhao等<sup>[15]</sup>和Simmons等<sup>[16]</sup>将回油口位置调整到滑油堆积处,大量的试验数据表明,回油口位置调整之后,腔内滑油滞留量明显减小,回油效率明显提高。Chandra等<sup>[17-19]</sup>、杨培杰等<sup>[20]</sup>在回油口处增加回油槽结构,并分析了不同回油槽深度对轴承腔回油特性的影响,研究结果表明,回油槽在一定程度上能够削弱腔内气流对滑油的拖拽,进而有效地引导滑油从回油口流出,降低了腔内滑油体积分数,提高回油比,且回油槽深度增加后,轴承腔回油效率提升更加明显。为减少腔内气流对槽内滑油的携带

量,Kurz等<sup>[21-22]</sup>和Chandra等<sup>[23-25]</sup>在回油槽进口处分别添加盖板或多孔栅板等辅助材料,试验结果表明,辅助材料增加了滑油从回油口流出的比例,腔内滑油体积分数明显降低,滑油滞留量减小18%,回油效率明显提高。李炎军等<sup>[26]</sup>指出滑油在轴承腔中分布不均匀,轴承腔内的滑油主要分布在回油槽及轴承腔外壁面上。受到空气剪切力及重力的双重作用,回油槽附近剪切力分量及重力方向一致的区域油膜较薄。因此针对滑油分布位置,对轴承腔外壁面结构进行一定程度改进能够有效地减小腔内滑油的滞留量,进而改善轴承腔回油特性。另外从通风口飞出滑油量也不容忽视,Farrall等<sup>[27]</sup>指出当转速较高时,从通风口流出的滑油量高达12%,严重影响了滑油的有效利用率。

目前,国内外公开发表的文献中,针对轴承腔结构改进的研究大多集中在试验研究方面,且绝大多数改进仅仅局限于回油结构,对通风结构的研究很少,同时鲜有对轴承腔内部油气两相流动特性的分析。因此本文首先对轴承腔通风结构和回油结构进行单独改进,最后再进行组合改进,提出了三种改进方案,利用非定常数值模拟的方法,研究改进方案对轴承腔流动特性和回油特性的影响,为轴承腔结构改进提供思路。

## 2 数值方法

### 2.1 轴承腔两相流控制方程

本文研究对象为轴承腔油气两相流场结构,空气相为主相,滑油相为次相。大量研究表明,欧拉-欧拉多相流模型在粒子相拥有完整的全局信息,适用于大范围体积分数流动,模型计算过程中能够自动将湍流因素包含进去。相比其他湍流模型,计算成本相对较低<sup>[28-30]</sup>。因此本文采用欧拉-欧拉非均质多相流模型对轴承腔内部复杂的油气两相流场结构进行求解计算。

#### (1) 两相流混合模型

混合模型是针对相 $\alpha$ 和相 $\beta$ 的两相流模型。单位体积的表面积为

$$A_{\alpha\beta} = \frac{r_{\alpha}r_{\beta}}{d_{\alpha\beta}} \quad (1)$$

式中 $r$ 是相体积分数, $d_{\alpha\beta}$ 是界面长度尺度。

(2)连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha u_\alpha) = S_{M\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (2)$$

式中  $\rho$  为密度,  $u$  为流体速度,  $S_{M\alpha}$  描述了由外力引起的动量源;  $\Gamma_{\alpha\beta}$  为从气相到液相的单位体积质量流率, 该项仅在发生相间传质时出现。

(3)动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha u_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha u_\alpha \otimes u_\alpha)) = \\ \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ u_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ u_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla u_\alpha + (\nabla u_\alpha)^T)) + \\ S_{M\alpha} + M_\alpha - r_\alpha \nabla p_\alpha \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $M_\alpha$  描述了由于其他相的存在作用于相  $\alpha$  上的界面力。

(4)能量方程

多相流的总能量方程在单相总能量方程的基础上加以推广, 得到如下总能量方程, 即

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_{tot}) = \\ \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) + u \cdot S_M + S_E \end{aligned} \quad (4)$$

$$h_{tot} = h_{stat} + \frac{1}{2}(u \cdot u) \quad (5)$$

式中  $\lambda$  是热导率;  $\tau$  是剪切力;  $h_{tot}$  表示总焓;  $h_{stat}$  代表静焓;  $S_M$  是动量源;  $S_E$  是能量源。

(5)湍流模型

SST  $k-\omega$  的流动方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (7)$$

式中  $G_k$  和  $G_\omega$  分别表示  $k$  与  $\omega$  的产生项,  $\Gamma_k, \Gamma_\omega$  分别代表湍动能  $k$  与比耗散率  $\omega$  的有效扩散系数,  $Y_k, Y_\omega$  分别代表  $k$  与  $\omega$  耗散项。  $D_\omega$  为交叉扩散项, 详细内容见文献[31-32]。

2.2 轴承腔几何结构

典型航空发动机轴承腔如图1(a)所示。其中, 沿轴向一端为滑油进口, 另一端为封严气进口; 在竖直方向上, 轴承腔上方为通风结构, 下方为回油结构。在原有轴承腔结构(Normal)的基础上, 对轴承腔进行改进, 得到三种轴承腔改进方案, 即嵌入改进方案(Embed)、斜坡改进方案(Slope)和组合改进方案(ES), 三种改进方案详细参数见表1。课题先前的研究发现, 通风口嵌入深度为8mm, 斜坡倾斜角为45°时, 对轴承腔回油特性的改善效果相对较好。因此嵌入改进方案将通风口嵌入轴承腔内, 嵌入深度为8mm, 如图1(b)所示。斜坡改进方案将轴承腔回油口右侧壁面进行斜坡过渡, 斜坡倾斜角为45°, 如图1

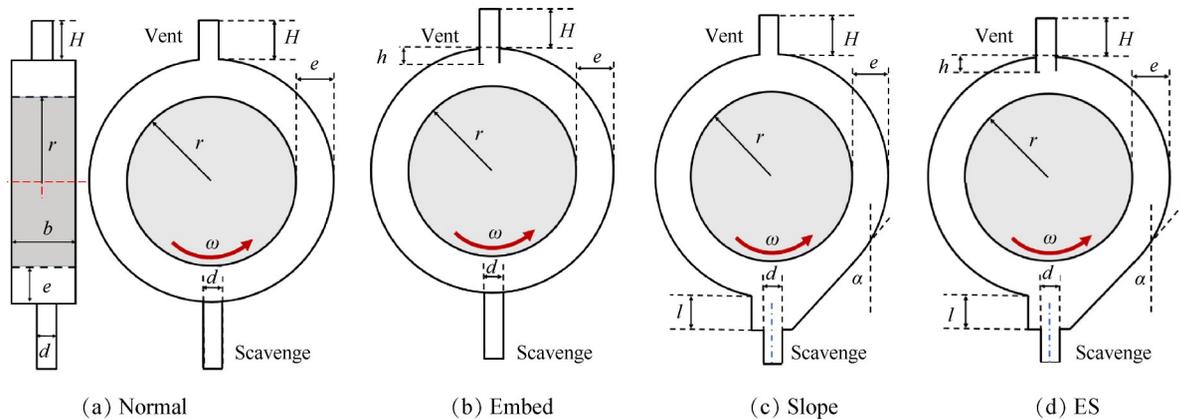


Fig. 1 Geometric models of bearing chamber

Table 1 Geometric parameters of bearing chamber

Parameter	Normal	Embed	Slope	ES
Rotation radius $r$ /mm	72	72	72	72
Height $e$ /mm	32	32	32	32
Width $b$ /mm	48	48	48	48
Port diameter $d$ /mm	36	36	36	36
Vent port height $H$ /mm	16	16	16	16
Tangential angle $\alpha$ (°)	0	0	45	45
Insert depth $h$ /mm	0	8	0	8

(c)所示。组合改进方案是分别在通风结构和回油结构进行嵌入改进和斜坡改进,如图1(d)所示。

### 2.3 网格及边界条件

本文采用非结构网格进行计算域网格划分,分别在滑油和空气进口处进行网格加密处理,如图2所示。设置空气和滑油进口边界为质量流量边界,通风口和回油口为压力边界,压力边界设置压力值为0.12MPa。空气进口质量流量为10g/s,滑油进口质量流量分别为200,600和1000L/h;滑油进口温度和空气进口温度为373.15K。滑油入射切向速度为旋转轴速度一半。给定滑油密度为912kg/m<sup>3</sup>,动力黏度0.0045kg/(m·s)。

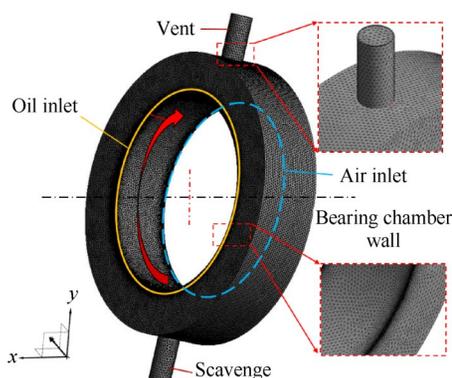


Fig. 2 Mesh structure of bearing chamber

### 2.4 数值方法准确性验证

为了验证本文所采用数值方法的可靠性,选取如图3所示的德国 Karlsruhe 大学轴承腔试验件<sup>[33]</sup>为研究对象,利用该试验件的试验结果对本文的数值方法进行准确性验证。

同时为了定量评估轴承腔的回油特性,根据文献[13]所述,定义回油效率公式如下

$$\eta_{sc} = \frac{q_{v,oil,sc}}{q_{v,oil,out}} = \frac{q_{v,oil,sc}}{q_{v,oil,sc} + q_{v,oil,vt}} \quad (8)$$

$$q = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} m dt \quad (9)$$

式中  $q_{v,oil,sc}$  表示从回油口流出的滑油流量,单位:g/s;  $q_{v,oil,out}$  表示从通风口和回油口流出的滑油总流量,单位:g/s;  $q_{v,oil,vt}$  表示从通风口流出的滑油流量,单位:g/s;  $m$  表示单位质量流量,单位:g/s;  $t$  表示时间,单位:s。

图4为数值模拟结果与文献[28]试验值对比。从图中可以看出,随着转速的增加,回油效率下降,这是因为转速增加后,腔内空气对滑油的剪切力增加,滑油克服重力的能力增强,因受到腔内空气的拖拽,从通风口流出的滑油量增加,进而导致回油效率的下降。通过对比发现,总体上数值模拟结果与试验值基本一致。其中低转速工况误差相对较大,高转速工况误差

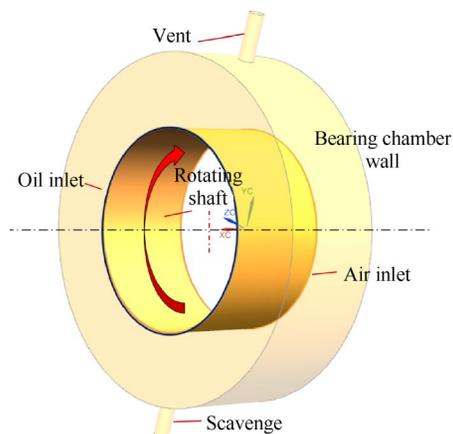


Fig. 3 Geometry model of bearing chamber from Karlsruhe university

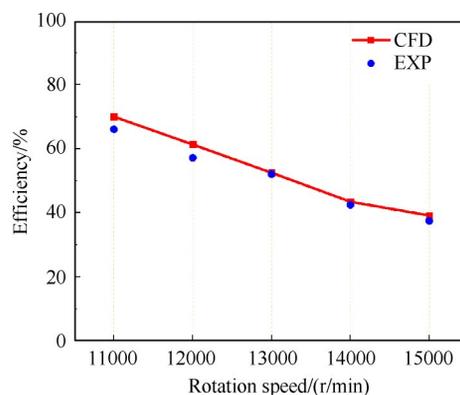


Fig. 4 Change of return-oil efficiency under rotation speeds

相对较小,各转速误差均在5%以下,最大转速差为12000r/min,误差为4.91%,最小转速差为13000r/min,误差为0.88%,进一步证明本文数值方法可靠。

## 3 两相流流场特性分析

### 3.1 常规轴承腔计算结果分析

图5给出了常规轴承腔不同滑油流量的腔内滑油体积分数随时间的变化关系,由图可知,腔内滑油体积分数随时间的增加而逐渐增大,最终趋于平稳。根据整体的变化趋势可大体分为过渡阶段和稳定阶段。定义当腔内滑油体积分数达到稳定值的95%时可认定为达到稳定阶段,图中用实心圆点将过渡阶段和稳定阶段分隔。

在过渡阶段:腔内滑油体积分数随转速的增加而降低。这是因为在该时间段内,腔内滑油量较少,受重力影响不明显,腔内滑油受到空气剪切力和离心力随转速的增加而增加,转速越高,腔内的滑油越容易被甩出轴承腔。同时,在过渡阶段内腔内滑油体积分数随时间变化的曲线斜率随滑油量的增加而增加,即滑油流量越大,腔内达到稳定的时间越短。

在稳定阶段:不同滑油流量的腔内滑油体积分数与转速的关系产生较大的差异。当滑油流量较大时(1000L/h),腔内滑油体积分数随转速的增加而降低;当滑油流量较小时(200L/h),腔内滑油体积分数随转速的增加先提高再降低。

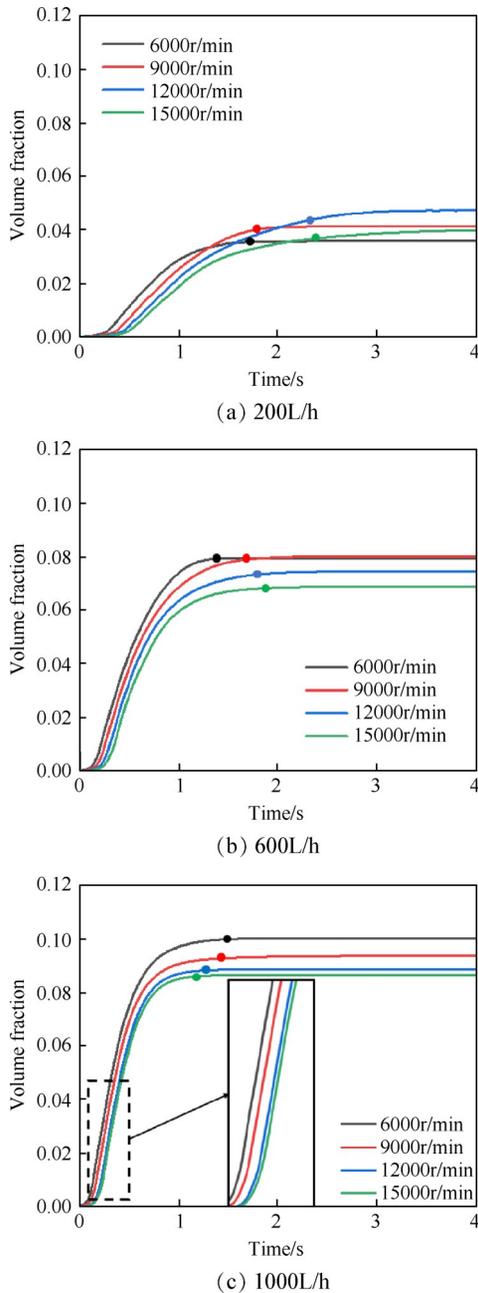


Fig. 5 Volume fraction of lubricating oil in conventional bearing chamber

图6给出了常规轴承腔在不同转速条件下从通风口和回油口流出的滑油量。图中,蓝色区域为从通风口流出的滑油量,黄色区域为从回油口流出的滑油量。由图可知,当流量为200L/h时,转速从6000r/min增加至15000r/min后,从通风口流出的滑

油量增加24.78%,从回油口流出的滑油量减小25.62%,此时从通风口和回油口流出滑油量受转速影响相对较大。当流量为1000L/h时,从通风口流出的滑油量增加了1.14%,从回油口流出的滑油量减小了1.43%,此时从通风口和回油口流出滑油量受转速影响相对较小。

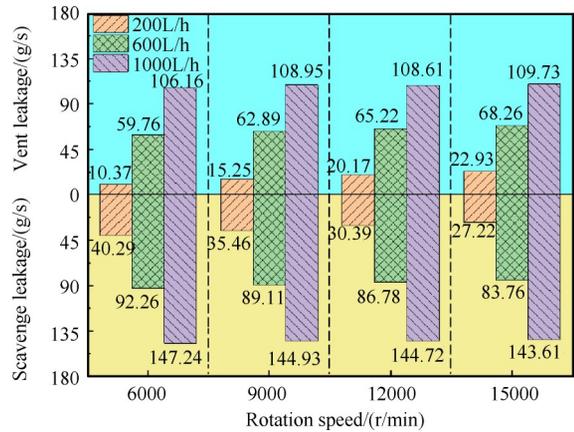


Fig. 6 Leakage of vent and scavenge in convention bearing chamber

图7为200L/h,9000r/min工况下,常规轴承腔50%腔内滑油体积分数等值面分布图,图中红色虚线所指方向为重力方向。由图可知,随着时间的推移,轴承腔内的滑油逐渐增多。同时由于轴承腔旋转方向为逆时针,右侧腔室滑油受到的重力和腔内空气剪切力方向相反,不利于回油口右侧腔内的滑油流入回油口,在回油口右侧出现大面积的滑油堆积现象,如黑色框所示。

为了进一步得到腔内滑油体积分数随转速变化关系的原因,图8为滑油流量为200L/h,不同转速腔内滑油体积分数分布图。当转速为6000~12000r/min时,随着转速增加,腔内空气对滑油的剪切力进一步增加,空气对滑油的拖拽趋势清晰可见,此时滑油克服重力的能力增强,不利于滑油流入回油口,滑油堆积范围明显增大。在该转速范围内,空气对滑油的拖拽不足以将滑油堆积区的大部分滑油携带出轴承腔,阻碍了滑油流入回油口,所以在该转速范围内腔内滑油体积分数随转速的增加而增加,如图5(a)。当转速增加至15000r/min时,腔内空气对滑油的剪切力增加,克服滑油堆积区重力能力增强,一部分滑油被空气携带从通风口流出,回油口右侧滑油堆积现象有一定程度的减弱。

图9为滑油流量为1000L/h,不同转速腔内滑油体积分数分布图。回油口右侧依然出现滑油堆积

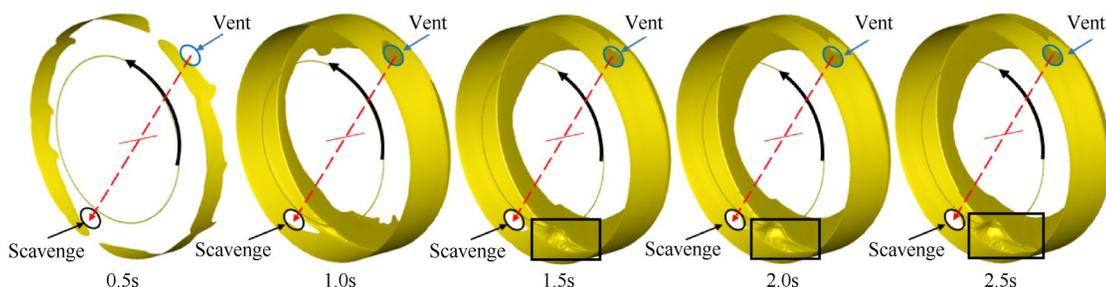


Fig. 7 Equivalent surface of 50% of the volume fraction of lubricating oil in the bearing chamber

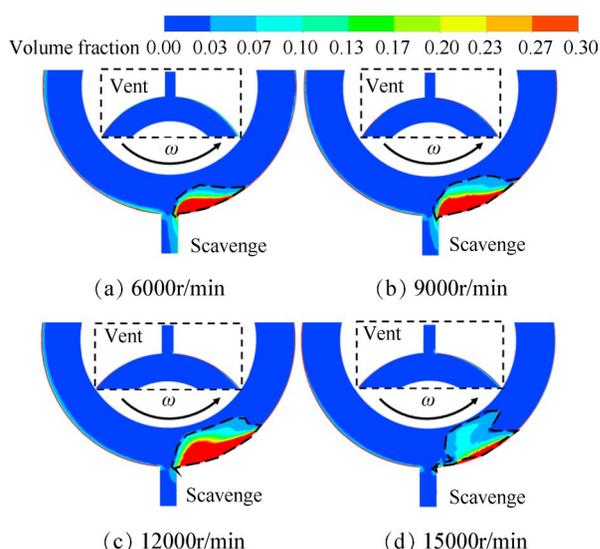


Fig. 8 Volume fraction in the chamber under lubricating oil of 200L/h

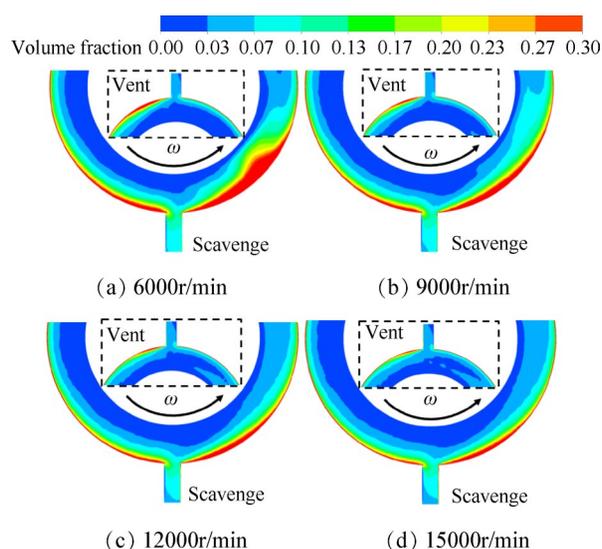


Fig. 9 Volume fraction in the chamber under lubricating oil of 1000L/h

区,腔内滑油量明显增加,滑油堆积区受到的重力作用效果进一步增大,此时远大于腔内空气对滑油的剪切力,这是图5滑油流量200L/h和1000L/h腔内体积分数随转速的变化规律明显不同的主要原因。随着转速的增加,回油口右侧滑油堆积区厚度明显变薄,滑油贴壁效果更加明显,此时腔内滑油体积分数随转速的增加而降低,最后趋于不变。

### 3.2 改进方案计算结果分析

选取9000r/min和15000r/min两个转速进行对比分析。图10给出了小流量(200L/h)和大流量(1000L/h)工况下常规轴承腔和三种改进方案的腔内滑油体积分数随时间的变化规律。当转速一定时,小流量条件下斜坡改进方案腔内滑油体积分数先达到稳定区,大流量条件下嵌入改进方案腔内滑油体积分数先达到稳定区。同时随着转速的增加,三种改进方案腔内滑油体积分数达到稳定区的时间进一步缩短。综合比较发现,在滑油流量和转速不变的条件下,稳定区斜坡改进方案腔内滑油体积分数低于其他轴承腔,嵌入改进方案腔内滑油体积分数高于其

他轴承腔。而组合改进方案在大流量工况下腔内滑油体积分数在常规轴承腔和嵌入改进方案之间,在小流量工况下腔内滑油体积分数在常规轴承腔和斜坡改进方案之间。

图11为从通风口和回油口流出的滑油量随转速的变化关系。通过对比发现,在各滑油流量和转速不变的条件下,三种改进方案从通风口流出的滑油量均低于常规轴承腔,从回油口流出的滑油量均高于常规轴承腔。嵌入改进方案嵌入的通风口壁面将滑油阻挡在腔内,从而使一部分滑油从回油口流出。相比常规轴承腔,当转速为9000r/min,滑油流量分别为200L/h和1000L/h的条件下,嵌入改进方案从通风口流出的滑油量分别减少了4.96g/s和26.07g/s,从回油口流出的滑油量分别增加了4.89g/s和25.61g/s。当转速为15000r/min,滑油流量分别为200L/h和1000L/h条件下,嵌入改进方案从通风口流出的滑油量分别减少了8.29g/s和28.29g/s,从回油口流出的滑油量增加了8.16g/s和27.92g/s。由此可见,嵌入改进方案通风口滑油减小量大于回油口滑油增加量,这是导致

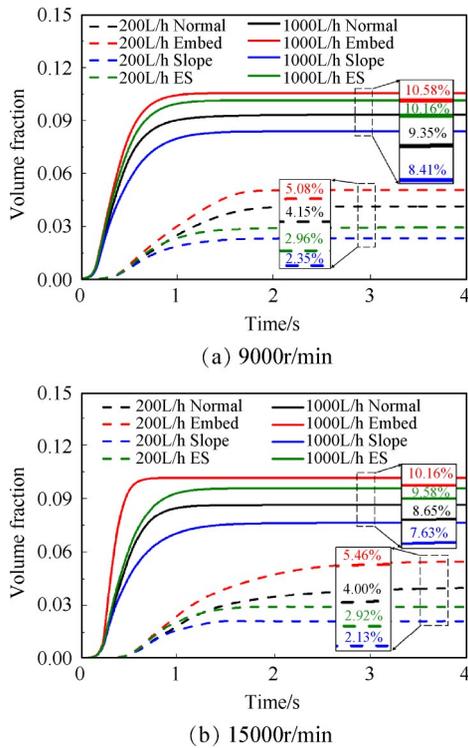


Fig. 10 Volume fraction of chamber with different structure

嵌入改进方案腔内滑油体积分数增加的主要原因。斜坡改进方案回油口右侧是倾斜的斜坡,有利于滑油流入回油口,腔内滑油体积分数降低,虽然滑油会受到腔内空气的拖拽作用,但是腔内滑油体积分数相对较小,所以从通风口流出的滑油量较少。组合改进方案会兼顾嵌入改进和斜坡改进方案的优势,从通风口流出的滑油量低于其他轴承腔,从回油口流出的滑油量高于其他轴承腔。

图 12 为滑油流量为 200L/h,转速为 9000r/min,腔内滑油体积分数分布图。由图可知,回油口右侧滑油堆积区清晰可见。通过对比发现,相比常规轴承腔,嵌入改进方案回油口右侧滑油堆积区增加,腔内滑油体积分数增加。而斜坡和组合改进方案回油口右侧滑油堆积区消失不见,腔内滑油体积分数减小。

图 13 为滑油流量为 200L/h,转速为 15000r/min,腔内滑油体积分数分布图。由图可知,相比转速为 9000r/min,转速增加至 15000r/min后,腔内空气对滑油的拖拽作用进一步增强,拖拽趋势清晰可见,空气携带大量的滑油从通风口流出,常规轴承腔回油口右侧滑油堆积区有一定程度的减小,腔内滑油体积分数降低。嵌入改进方案将一部分滑油阻挡在腔内,从通风口流出的滑油量减小,回油口右侧滑油堆积区增加,腔内滑油体积分数增加。斜坡和组合改

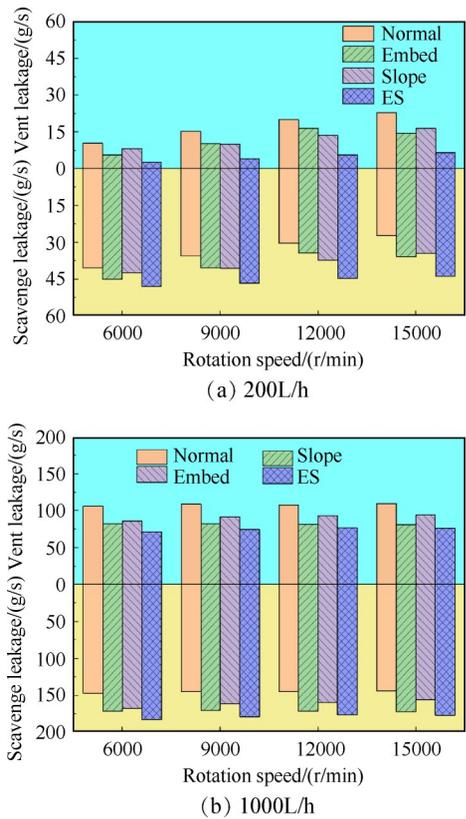


Fig. 11 Leakage of vent and scavenge in different structures

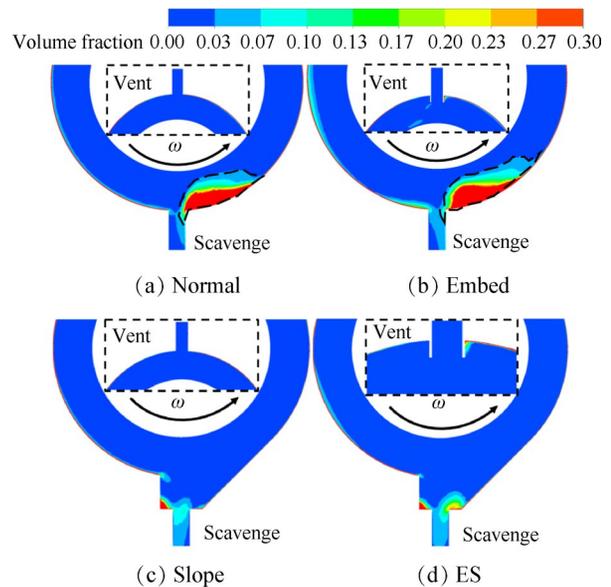


Fig. 12 Volume fraction of chamber under lubricating oil of 200L/h (9000r/min)

进方案回油口处的滑油有一定程度的减小,腔内滑油体积分数减小。因此在小流量条件下,相比常规轴承腔,此时嵌入改进方案回油口右侧滑油堆积区面积相对较大,腔内滑油体积分数高于常规轴承腔。而斜坡和组合改进方案腔内滑油体积分数低于常规轴承腔。

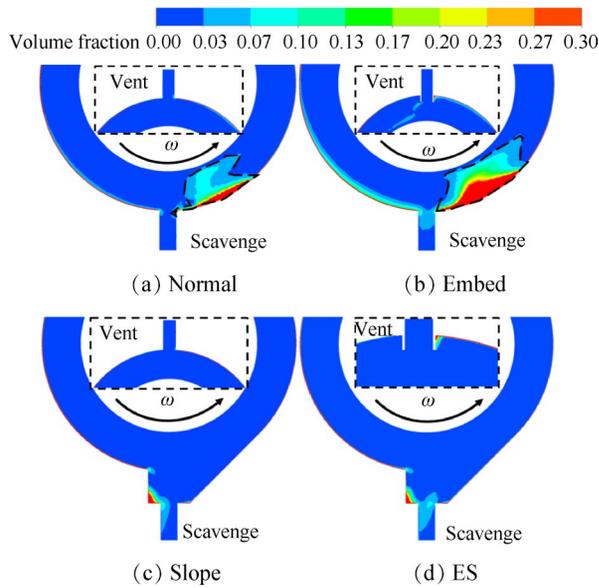


Fig. 13 Volume fraction of chamber under lubricating oil of 200L/h (15000r/min)

图14为滑油流量为1000L/h,转速为9000r/min,腔内滑油体积分数分布图。由图可知,相比图12,当转速一定时,滑油量增加后,三种轴承腔改进方案腔内滑油体积分数增加,回油口和通风口附近滑油增多。综合比较发现,在大流量条件下相比常规轴承腔,嵌入和组合改进方案通风口右侧壁面阻挡的滑油量相对较大,腔内滑油体积分数进一步增加。而斜坡改进方案回油口右侧和通风口处滑油量相对较小,腔内滑油体积分数小于常规轴承腔。

图15为滑油流量为1000L/h,转速为15000r/min,

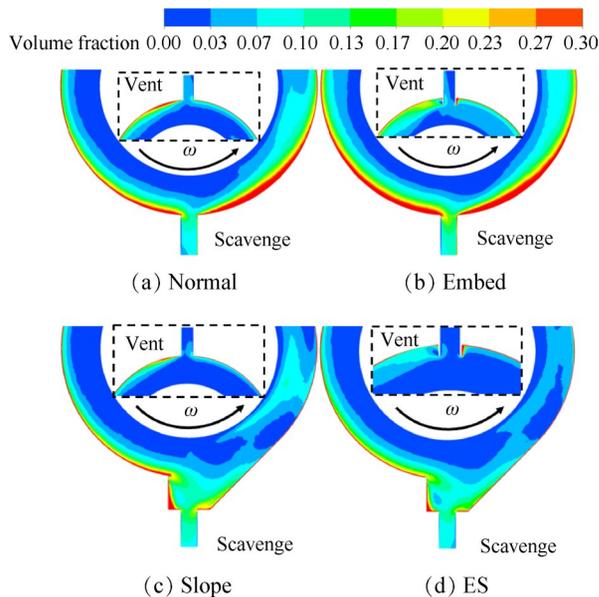


Fig. 14 Volume fraction of chamber under lubricating oil of 1000L/h (9000r/min)

腔内滑油体积分数分布图。通过对比发现,在大流量大转速条件下,嵌入和组合改进方案,腔内滑油体积分数高于常规轴承腔。斜坡改进方案轴承腔壁面滑油量厚度变薄,腔内滑油体积分数低于常规轴承腔。

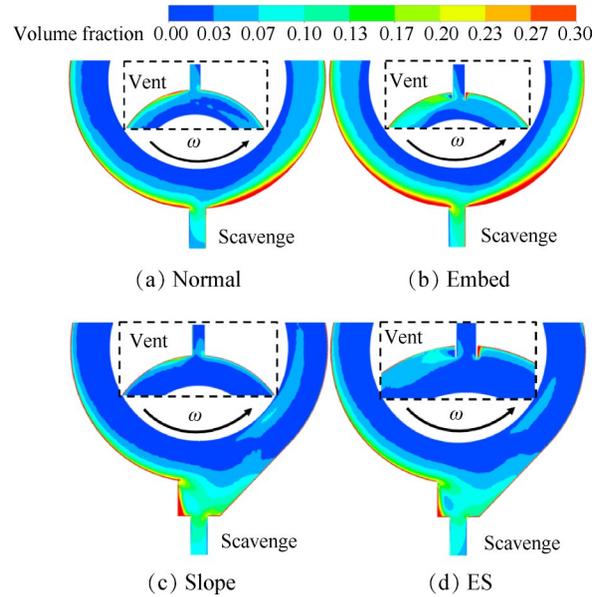


Fig. 15 Volume fraction of chamber under lubricating oil of 1000L/h (15000r/min)

### 3.3 不同改进方案回油特性分析

图16为不同改进方案的回油效率对比。通过对比发现,在各滑油流量和转速不变的条件下,三种改进方案的回油效率均明显高于常规轴承腔。嵌入改进方案嵌入的通风口壁面将滑油阻挡在腔内,使一部分滑油从回油口流出,回油效率进一步增加,但是会导致腔内滑油体积分数的增加。上文图10指出,嵌入改进方案腔内滑油体积分数在15000r/min,1000L/h条件下增加幅度最大,增加了1.51%。斜坡改进方案回油口右侧是倾斜的斜坡,有利于滑油流入回油口,腔内滑油体积分数降低。而组合改进方案会兼顾嵌入改进和斜坡改进方案的优势,从通风口流出的滑油量低于其他轴承腔,从回油口流出的滑油量高于其他轴承腔,回油效率明显高于嵌入和斜坡改进方案,对轴承腔回油效果提升较好。其中相比常规轴承腔结构,当滑油流量为200L/h,转速为15000r/min时,三种改进方案回油效率提升最为明显,嵌入、斜坡和组合改进方案回油效率分别提高了16.47%,13.02%和32.81%。

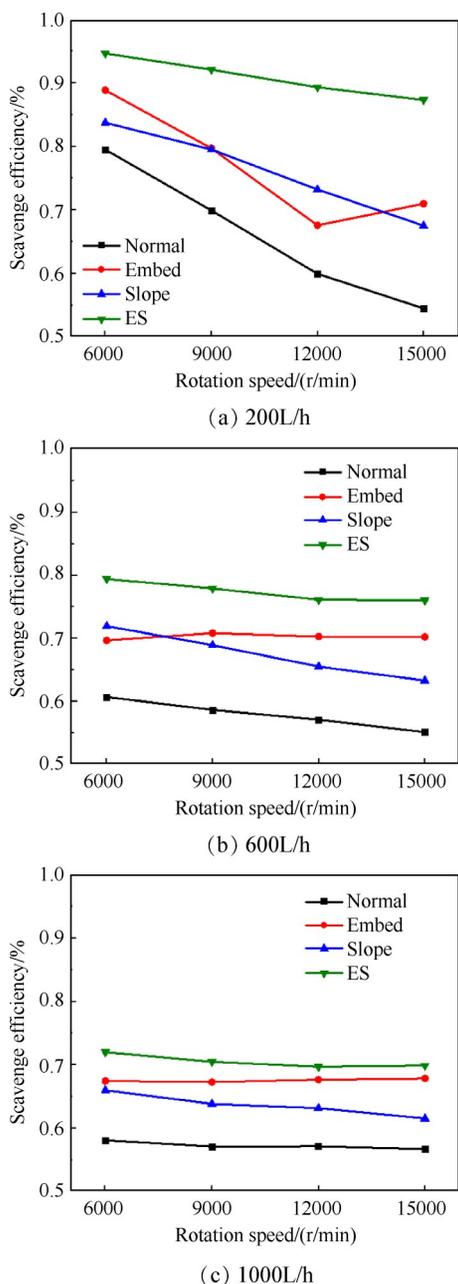


Fig. 16 Return-oil efficiency in different chamber structures under different rotation speeds

## 4 结论

本文对常规轴承腔结构进行改进,利用非定常数值模拟的方法研究改进方案对轴承腔回油特性及流场结构的影响,得到如下结论:

(1)当旋转方向为逆时针,轴承腔右侧腔室滑油受到的重力和腔内空气剪切力方向相反,腔内空气对回油口右侧滑油堆积区拖拽作用明显,不利于滑油流入回油口,在回油口右侧出现大面积的滑油堆积现象。

(2)嵌入改进方案嵌入的通风口壁面将滑油阻

挡在腔内,腔内滑油体积分数增加;斜坡改进方案有利于滑油流入回油口,腔内滑油体积分数降低。组合改进方案会兼顾嵌入改进和斜坡改进方案的优势,从通风口流出的滑油量低于其他轴承腔,从回油口流出的滑油量高于其他轴承腔。

(3)三种改进方案的回油效率均高于常规轴承腔,当滑油流量为200L/h,转速为15000r/min时,三种改进方案回油效率提升最为明显,嵌入、斜坡和组合改进方案回油效率分别提高了16.47%、13.02%和32.81%。

致谢:感谢国家自然科学基金、辽宁省教育厅面上项目和先进航空动力创新工作站(依托航空发动机研究院设立)项目的资助。

## 参考文献

- [1] Willenborg K, Busam S, Roßkamp H, et al. Experimental Studies of the Boundary Conditions Leading to Oil Fire in the Bearing Chamber and in the Secondary Air System of Aeroengines [C]. Amsterdam: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2002.
- [2] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册: 传动及润滑系统(第12分册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [3] 李国权. 航空发动机滑油系统的现状及未来发展[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 49-62.
- [4] Wieth L, Lieber C, Kurz W, et al. Numerical Modeling of an Aero-Engine Bearing Chamber Using the Meshless Smoothed Particle Hydrodynamics Method [C]. Montreal: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2015.
- [5] Aidarinis J, Goulas A. Enhanced CFD Modelling and LDA Measurements for the Air-Flow in an Aero-Engine Front Bearing Chamber: Part I [C]. Düsseldorf: Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2014.
- [6] 王莉娜, 陈国定, 孙恒超. 轴承腔油滴沉积特性及油膜流动特征分析[J]. 航空学报, 2016, 37(10): 3159-3169.
- [7] 孙恒超, 陈国定, 王莉娜, 等. 轴承腔油滴含率及油滴相与空气能量传递分析[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 1060-1073.
- [8] 王莉娜, 陈国定, 孙恒超. 轴承腔油滴碰撞腔壁沉积特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 144-149.
- [9] 方龙, 陈国定. 轴承腔油滴/固体壁面斜碰撞的试验及理论研究[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(4): 627-634.
- [10] 李坤, 高文君, 李宛蓉, 等. 锥形轴承腔油气两相流动与换热数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43(11):

210611. (LI Kun, GAO Wen-jun, LI Wan-rong, et al. Numerical Study of Oil-Air Two-Phase Flow and Heat Transfer in Tapered Bearing Chamber[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11): 210611.)
- [11] Lu P, Ye Q, Fang L, et al. Research on the Air-Oil Two-Phase Flow Regime in an Aeroengine Bearing Chamber Based on Hilbert-Huang Transform[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 236(1): 24-32.
- [12] 杨培杰. 轴承腔油气两相流型及其回油特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [13] 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.
- [14] 胡剑平, 任国哲, 刘振侠, 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.
- [15] Zhao J Y, Lyv Y G, Liu Z X, et al. Numerical Study on the Improvement of Oil Return Structure in Aero-Engine Bearing Chambers[J]. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2018, 35(1): 59-69.
- [16] Simmons K, Chandra B. Experimental Investigation into the Performance of Shallow Aeroengine Off-Takes [C]. *Düsseldorf: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2014.
- [17] Chandra B, Simmons K, Pickering S, et al. Factors Affecting Oil Removal from an Aeroengine Bearing Chamber [C]. *Glasgow: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2010.
- [18] Chandra B, Simmons K, Pickering S, et al. Study of Gas/Liquid Behavior Within an Aeroengine Bearing Chamber [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(5).
- [19] Chandra B, Simmons K. Transient Two-Phase Effects in an Aeroengine Bearing Chamber Scavenge Test Rig [C]. *Montreal: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2014.
- [20] 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*, 2019, 40(6): 643-648.
- [21] Kurz W, Dullenkopf K, Bauer H J. Capacitive Film Thickness Measurements in a Ventless Aero-Engine Bearing Chamber—Influence of Operating Conditions and Offtake Design [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(11).
- [22] Kurz W, Dullenkopf K, Bauer H J. Influences on the Oil Split Between the Offtakes of an Aero-Engine Bearing Chamber [C]. *Copenhagen: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2012.
- [23] Chandra B, Simmons K. Innovative Shallow Sump Customizations for Aero-Engine Bearing Chambers [C]. *Seoul: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2016.
- [24] Chandra B W, Collicott S H, Munson J H. Experimental Optimization of Rolls-Royce AE3007 Sump Design [C]. *Carolina: ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 2017.
- [25] Chandra B, Simmons K, Murphy A. Mechanisms for Residence Volume Reduction in Shallow Sump [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2018, 140(3): 1-35.
- [26] 李炎军, 杨 富, 刘振侠, 等. 轴承腔油气两相介质流动与热分析[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(3): 606-615.
- [27] Farrall M, Hibberd S, Simmons K, et al. Prediction of Airoil Exit Flows in a Commercial Aero-Engine Bearing Chamber [J]. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineer*, 2006, 220(3): 197-202.
- [28] Basha N, Rane S, Kovacevic A. Multiphase Flow Analysis in an Oil-Injected Twin Screw Compressor [C]. *Budapest: Proceedings of the 3rd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'18)*, 2018.
- [29] Gaurav T K, Prakash A, Zhang C. CFD Modeling of the Hydrodynamic Characteristics of a Bubble Column in Different Flow Regimes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2022, 147: 103902.
- [30] Yang Z J, Savari C, Barigou M. Numerical and Experimental Investigations of Horizontal Turbulent Particle-Liquid Pipe Flow [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(32): 12040-12051.
- [31] 胡 朋, 李永乐, 廖海黎. 基于 SST  $k-\omega$  湍流模型的平衡大气边界层模拟[J]. *空气动力学学报*, 2012, 30(6): 737-743.
- [32] Menter F R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [33] Kurz W, Dullenkopf K, Bauer H J. The Impact of Geometry Variations on the Two-Phase Flows in Aeroengine Bearing Chambers [C]. *Gothenburg: International Symposium on Air Breathing Engines*, 2011.

(编辑:白 鹭)