

DOI: 10.7652/xjtuxb201912003

高速球轴承喷油润滑流场特性研究

李潇潇, 闫柯, 葛临风, 朱永生, 洪军

(西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了揭示高速运行条件下轴承腔内油气两相的分布情况,提升高速轴承的喷油润滑效果,考虑滚动体自转及公转运动,通过定义旋转坐标系描述轴承各组件运动关系,构建轴承腔内油气两相流动精确分析模型;在此基础上,采用流体体积函数(VOF)模型及压力耦合方程组的半隐式(SIMPLE)算法对轴承腔内油气流动进行求解,得到油气两相在轴承腔内的分布状态;通过探讨不同工况下润滑油在轴承腔内的宏观运动规律,从压力分布、润滑介质分布特性等角度评估了喷油润滑条件下高速轴承的润滑性能。结果表明:受轴承内部气流影响,润滑油脱离喷嘴后逐渐发生偏移,运行转速越高,偏移越大,导致高速时润滑油难以直接到达滚球与内外圈接触区附近;当转速升高时,运动部件上的润滑油逐渐减少,成为制约喷油润滑效果的关键因素。

关键词: 高速球轴承;喷油润滑;油气两相;润滑性能

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0017-08

Research on Flow Field Characteristics of Oil Injection Lubrication for High-Speed Ball Bearings

LI Xiaoxiao, YAN Ke, GE Linfeng, ZHU Yongsheng, HONG Jun

(Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To reveal the distribution of oil and gas phases in the bearing chamber under high-speed operation conditions and improve the oil injection lubrication effect of high-speed bearings, in this paper, considering the revolution and rotation of the rolling element, the precise analysis model of oil-gas two-phase flow in bearing chamber was constructed by defining the rotating coordinate system to describe the motion relationship of each component of the bearing. On this basis, VOF method and the SIMPLE algorithm were used to solve the oil-gas flow in the bearing chamber, and the distribution of oil and gas phases in the bearing chamber was obtained. The macroscopic motion law of lubricant in bearing chamber under different working conditions was discussed. The lubrication performance of high-speed bearing under oil injection lubrication conditions was evaluated in terms of pressure distribution and lubrication medium distribution. The results show that the lubricating oil gradually shifts away from the nozzle, affected by the air flow inside the bearing; and the higher the running speed, the greater the offset. As a result, it is difficult for the lubricating oil to reach the contact area between the ball and the inner or outer ring directly at high speed. In addition, when the rotating speed increasing, the lubricating oil on

收稿日期: 2019-06-13。 作者简介: 李潇潇(1993—),男,硕士生;闫柯(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875439)。

网络出版时间: 2019-08-22 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190822.1556.006.html>

the moving parts gradually decreases, which becomes the key factor to restrict the lubricating effect of oil injection.

Keywords: ball bearing; injection lubrication; oil and gas phases; lubrication performance

喷油润滑是航空发动机支撑轴承高速、高可靠性运行工况下的首选润滑方式^[1]。随着轴承运转速度不断提高,轴承腔内气相流动愈加剧烈,滚动体附近形成高速气旋,阻碍润滑介质输送至接触区^[2],成为限制高速轴承润滑效率及运行可靠性的关键。因此,开展喷油润滑条件下轴承内部油气两相流场分布特性研究,对于评估和改善轴承润滑状态具有重要意义。

受轴承内部结构及接触特点、组件相对运动等影响,数值计算成为研究轴承内部润滑介质流动及分布状态的有力工具^[3]。Kim 等忽略轴承保持架,率先开展了角接触球轴承腔内气相流动分析^[4]。在此基础上,本课题组考虑了轴承腔内结构与接触特征、保持架引导方式、滚球自转与公转等因素,完善了高速轴承内部气相(单相)流场分析,为研究航空轴承喷油润滑条件下的内部流场分布规律奠定了基础^[2,5]。

在气相研究基础上,国内外诸多学者采用两相流数值计算模型,针对喷油润滑条件下轴承润滑机理及润滑效率等问题开展了一系列研究工作。Glahn 等研究了轴承腔内两相流动中剪应力以及重力对轴承腔内油膜运动特性的影响^[6]。陈国定等研究了航空发动机轴承腔内气液两相流场中油滴的变形及运动^[7]。吴维等采用两相流方法及轴承运转实验研究了喷油润滑轴承转速、供油量、喷嘴数量等对轴承内部润滑介质分布规律的影响,发现在轴承 DN 值(轴承内径与轴承转速的乘积)为 $1.5 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r/min}$ 时,轴承腔内喷嘴附近区域润滑油含量最高,喷嘴数量对润滑介质分布有一定影响^[8-11]。刘红彬等通过两相流数值模型分析了不同供油喷嘴角度和润滑油量下轴承腔内油气两相中油相体积分数随着转速的变化情况,发现轴承腔内润滑油分布与喷嘴角度密切相关^[12-13]。王海洋等实验验证了喷油角度等参数对轴承内部润滑油含量的影响^[14]。上述研究主要关注喷油润滑条件下润滑介质在轴承内部的最终分布状态与润滑性能,忽略了轴承内部的高速高压空气流动对润滑介质流动规律的影响。

本文考虑滚动体自转及公转运动,在轴承腔中定义旋转坐标系描述轴承各组件运动关系,建立了 H7006C 角接触球轴承喷射润滑油精确分析模型,

采用流体体积函数(VOF)模型追踪气液相界面,分析不同工况下轴承内部受气流影响的润滑介质流动路径,进而揭示轴承内部的流场分布特点,并提取关键区域的润滑介质分布情况,评估不同参数下轴承的润滑性能。

1 模型与边界条件

1.1 数学模型

在多相流问题中,描述气液两相流的数学模型主要分为两大类:一类采用 Euler-Lagrange 方法,要求副相所占的相体积分数较小,此时,将主相看作连续的流体介质来求解 Navier-Stokes 方程,对副相的粒子或气泡轨迹进行求解,它们可以与主相之间进行动量、质量以及能量的交换,所以这种数学处理并不适用于轴承腔内油气两相流计算;另一类描述形式采用 Euler-Euler 方法,引入相体积分数的概念,计算过程中对各相采取各自的守恒方程进行求解,各相方程之间的关系通过经验公式来确定。

Euler-Euler 方法主要有 3 种模型:VOF 模型、Mixture 模型、Eulerian 模型。VOF 模型通过共用的动量方程求解两种或多种不相容的界面位置,追踪流体的流动过程^[15]。高速角接触球轴承轴承腔内处于油气两相流动状态,油气互不相容且不可压缩,各相满足流体基本方程。使用 VOF 模型进行数值计算时,每个体积单元内,油气两相的体积分数之和为 1。用 φ_{oil} 表示每个单元内油相的体积分数,用 φ_{air} 表示每个单元内气相的体积分数,它们的数学表达式如下

$$\varphi_{\text{oil}} = 0 \quad (1)$$

表示计算单元内没有润滑油。如果

$$0 < \varphi_{\text{oil}} < 1 \quad (2)$$

表示计算单元中的润滑油体积分数

$$\varphi_{\text{oil}} = 1 \quad (3)$$

表示计算单元内全为润滑油。如果

$$\varphi_{\text{oil}} + \varphi_{\text{air}} = 1 \quad (4)$$

润滑油和空气在计算单元内守恒。对于各相而言,其连续性方程如下所示

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_{\text{oil}}\rho_{\text{oil}}) + \nabla \cdot (\varphi_{\text{oil}}\rho_{\text{oil}}\mathbf{v}_{\text{oil}}) = S_{\varphi_{\text{oil}}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi_{\text{air}}\rho_{\text{air}}) + \nabla \cdot (\varphi_{\text{air}}\rho_{\text{air}}\mathbf{v}_{\text{air}}) = S_{\varphi_{\text{air}}} \quad (6)$$

式中: ρ_{oil} 为润滑油密度; ρ_{air} 为空气密度; $S_{\varphi_{oil}}$ 为润滑油质量源项; $S_{\varphi_{air}}$ 为空气质量源项。

油气两相流动的动量控制方程可以表示为

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} \boldsymbol{u}) = - \nabla p - \boldsymbol{F}_i + \rho \boldsymbol{g} + \nabla \cdot \mu [\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T]$$

(7)

式中: ρ 为混合密度; $\boldsymbol{u}$ 为流体速度; p 为压强; μ 为流体动力黏度; $\boldsymbol{F}_i$ 为体积力矢量; $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度。

考虑到角接触球轴承高速运转时保持架、滚动体、内圈对腔内气流的带动作用,轴承腔内处于高速运动的湍流状态^[2]。现有的湍流模型包括标准 $k-\epsilon$ 模型,RNG $k-\epsilon$ 模型,SST $k-\epsilon$ 模型,而 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型可以很好地描述高速和有旋涡的流动现象^[16-17],所以本文选用该模型描述油气两相在角接触球轴承内部的流动。

1.2 计算模型

本文以 H7006C 角接触球轴承为研究对象,其几何示意图如图 1 所示,轴承参数如表 1 所示。针对侧向喷射润滑工况,喷嘴沿轴向正对滚动体,中心距离内圈表面 1 mm,喷嘴直径为 1 mm。采用 46 号机油,密度为 876 kg/m³,黏度为 0.058 kg/ms。

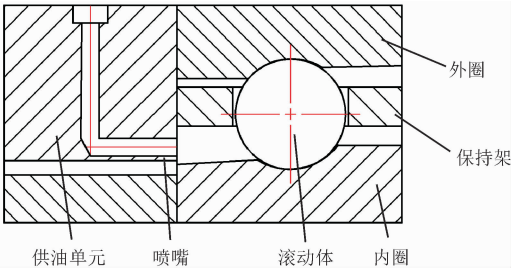


图 1 轴承润滑结构示意图

表 1 H7006C 角接触球轴承结构参数

参数	数值	参数	数值
内径 D_i /mm	30	接触角 $\alpha/(^\circ)$	15
外径 D_o /mm	55	球数	17
滚动体直径 D /mm	6.35	宽度/mm	13

抽取轴承腔内的流体流动区域作为计算域,并采用 ICEM 软件划分网格。考虑到轴承内部复杂的曲面接触特点,其内外滚道、保持架兜孔、滚动体表面等关键润滑区域尺寸跨度大,滚动体直径为 6.35 mm,而滚球与内外滚道间隙在微米尺度。同时,由于轴承腔内结构复杂且不规则,采用非结构四面体网格进行划分,网格总数为 1 279 168。对内外滚道与滚球接触区域加密网格以保证计算精度,网格划分如图 2 所示。

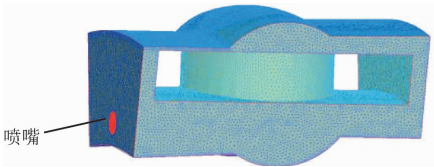


图 2 计算模型网格划分

1.3 边界条件

考虑到滚动体运动时的公转及自转运动特点,如图 3 所示,将滚动体公转与自转合成得到滚动体速度作为滚动体的运动边界^[2],并将滚动体设置为壁面边界。各组件运动关系如下

$$n_c = \frac{n_i(1-\gamma)}{2}$$

(8)

$$n_w = \frac{d_m n_i(1-\gamma^2)}{2D}$$

(9)

$$r = \frac{D \cos \alpha}{d_m}$$

(10)

式中: n_c 为保持架转速; n_i 为内圈转速; n_w 为滚动体转速; d_m 为轴承节圆直径; D 为滚动体直径; α 为滚动体接触角。

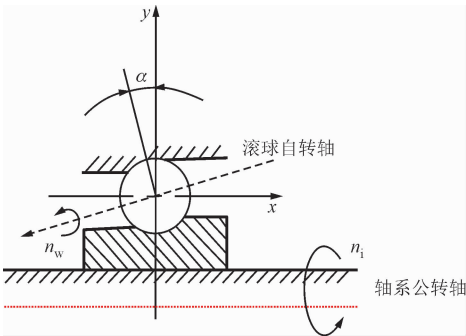


图 3 滚球运动示意图

轴承腔内圈壁面设置为转动壁面边界,轴承腔外圈壁面设置为静止壁面,保持架为壁面边界并有旋转运动。

喷嘴设置为速度入口,喷油速度为 1.05 m/s,对应喷油流量为 50 mL/min。对于计算模型前后截面,为了使模拟结果更加准确,预先计算该模型内气相流动规律,将前截面设置为压力出口,后截面设置为压力入口,其流动规律如图 4 所示。将轴承腔

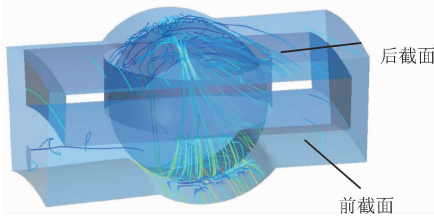


图 4 轴承腔内气相流动路径

内气相流动得到的前后截面压力作为油气两相计算模型的压力边界条件。

2 结果讨论

2.1 轴承腔体内润滑介质流场分布

对于喷油润滑,润滑油从喷嘴出口到轴承接触区的流动过程中,流动轨迹以及在内圈、滚动体、保持架等旋转间隙内的流场分布情况是影响高速轴承润滑性能的关键。例如早期的 J42 型航空发动机主轴轴承 DN 值仅为 $6 \times 10^5 \text{ mm} \cdot \text{r/min}$ 。随着航空发动机技术进步,现有航发主轴轴承 DN 值已达 $2 \times 10^6 \sim 3.5 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r/min}$ ^[18]。对此,本文研究了不同转速下(DN 值为 $4.25 \times 10^5 \sim 2.125 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r/min}$)喷油润滑油进入轴承腔后的分布情况,如图 5 所示。从图上可以看出:当转速较低时,润滑油可以顺利到达滚球附近,并在滚球的自旋运动带动下,进入滚球与外滚道接触区;当转速升高至 $30\,000 \text{ r/min}$ 时,由于内圈高速转动带动轴承腔内气流高速流动,在气流作用下,润滑油沿周向流动加剧,因此只有少量润滑油能够到达滚球与外滚道接触区形成润滑油膜;当转速进一步升高时,滚动体与外滚道接触区附近几乎没有润滑油,这是由于随着转速升高,轴承内部气相流动进一步增强,导致润滑介质从喷嘴流出后,并没有沿着喷射方向分布,而是沿着轴承转动方向发生偏转;当转速达到 $40\,000 \text{ r/min}$ 时,润滑油已不能到达滚球附近,而是沿着轴承转动方向分布。

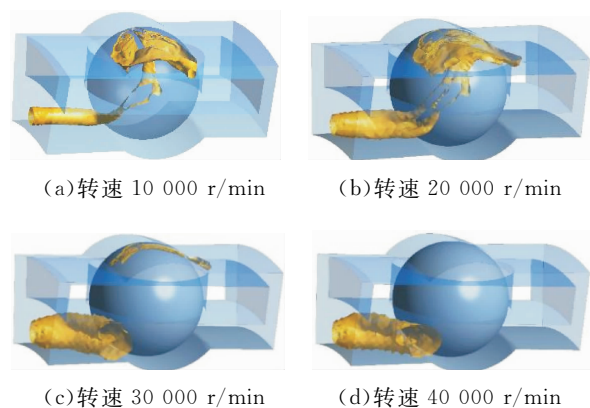


图 5 各转速下润滑油流动分布

2.2 轴承腔内流线与润滑介质流动分析

为了进一步分析轴承腔内润滑油分布与两相流动的关系,对比了不同转速下轴承腔内中心截面流线分布以及中心截面的油相体积分数变化情况,如图 6 所示。当转速在 $10\,000 \text{ r/min}$ 及 $20\,000 \text{ r/min}$ 时,润滑油喷射进入轴承腔后,沿着喷射方向运动到

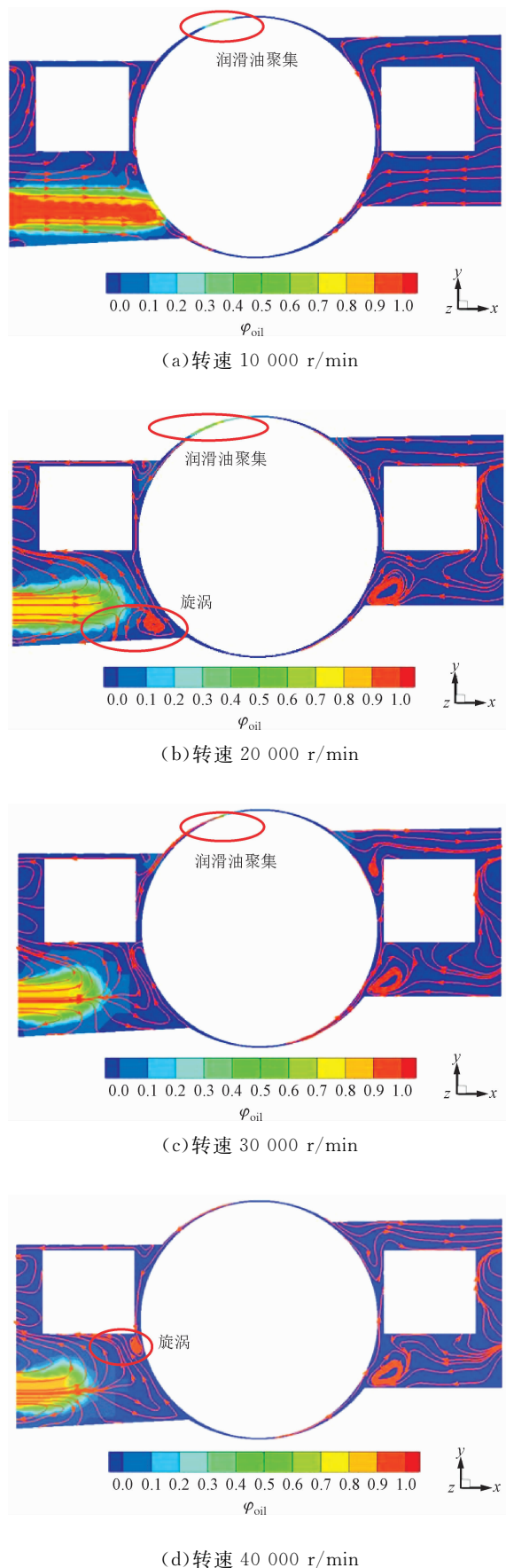


图 6 轴承腔中心截面流线及油相体积分数分布

滚动体附近,部分润滑油在气流的带动下经过保持架与滚动体间隙,进而到达滚动体与外滚道接触附近区域。由于内圈、滚动体与保持架的复杂运动,在内圈与滚动体接触区附近形成旋涡,使得润滑油难以直接进入。当转速升高到 30 000 r/min 时,由于轴承腔内气流流速变快,只有少量润滑油可在气流带动下到达滚动体与外滚道接触区域附近。当转速进一步升高到 40 000 r/min 时,由于保持架与滚动体附近区域的旋涡流动效应,导致润滑油无法通过保持架与滚动体的间隙到达滚动体与外圈附近区域。

2.3 轴承腔内压力分析

高压气帘是影响喷油润滑条件下供油效率的重要因素。图 7 为轴承内部各截面平均压强随着转速变化情况。横坐标 z 为轴承计算域沿轴承运转方向的坐标,中心截面处于 0 mm 位置,每间隔 1 mm 取一周向截面共 7 个截面统计各截面平均压强。从图中可以看出,在中心截面之后,各截面平均压强随着转速增加而逐渐减小;对于位于中心截面前面的截面而言,压力变化相对较小且接近大气压力。

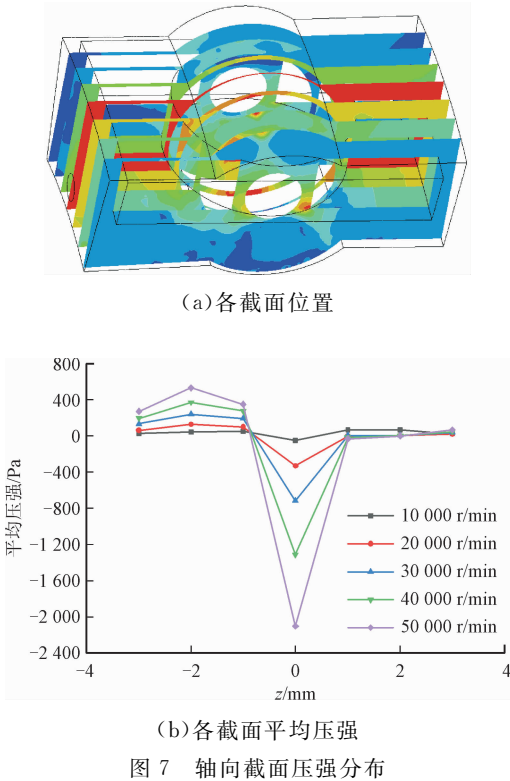


图 7 轴向截面压强分布

如图 8a 所示,取沿轴承周向的截面,分析各截面的压力特性,结果如图 8b 所示。图中横坐标 x 为沿轴向坐标,其中心为 0 mm 位置,每间隔 2 mm 取一周向截面共 7 个截面统计各截面平均压强。从图中分析可知,在滚球两侧区域各转速下平均压强

接近,均接近大气压;在滚球附近区域,转速越高压力值越小,在中间截面处转速 20 000 r/min 时,压强高于其他转速; $x=2$ mm 截面各转速下压强均为负值,且转速越高,压强越低。

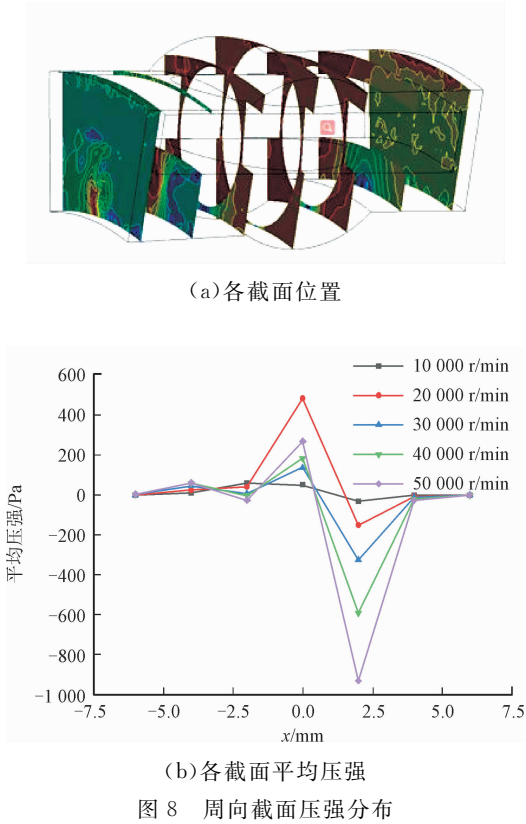


图 8 周向截面压强分布

通过对轴承腔内各截面平均压强分析,可以发现,当轴承转速较低时,各截面压力分布比较均匀;当转速升高,压强分布不均匀性增大。

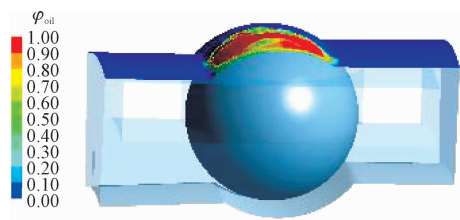
2.4 轴承腔内局部区域润滑性能分析

当轴承高速运转时,其接触区附近、保持架兜孔及滚动体表面等关键润滑区域的润滑油分布及含量,对轴承的整体润滑及其运转可靠性至关重要。

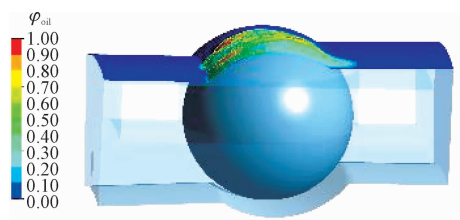
2.4.1 外滚道润滑油分布 图 9 为各转速下外圈滚道上润滑油的分布情况,可以看出,在转速小于 20 000 r/min 时,润滑油可以顺利到达外滚道,有助于润滑;当转速升高到 30 000 r/min 时,到达外滚道的润滑油分布区域以及含量都减少。当转速升高到 40 000 r/min 时,外圈滚道内,几乎没有润滑油分布,表明此刻喷油润滑条件下润滑介质难以有效到达外圈接触区。

当转速低于 20 000 r/min 时,由于轴承腔内周向气流速度较低,润滑油可沿着喷射方向到达滚球附近,在滚动体的作用下到达滚球与外滚道接触区域,实现润滑。当转速进一步升高,由于轴承腔内周

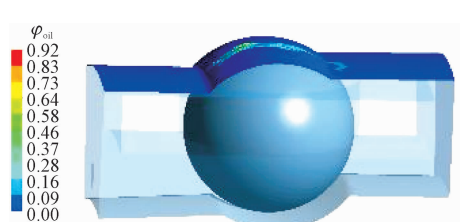
向气流运动加剧,润滑油喷射进入轴承腔后,受气流及旋涡影响,沿轴承运转方向发生偏移,到达滚球附近区域的润滑油减少,从而导致外滚道区域润滑油含量减少。当转速升高到 40 000 r/min 时,由于轴承腔内气流运动导致润滑油不能到达滚球附近,滚动体与外滚道接触区域没有润滑油。



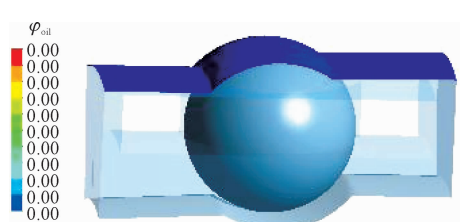
(a) 转速 10 000 r/min



(b) 转速 20 000 r/min



(c) 转速 30 000 r/min

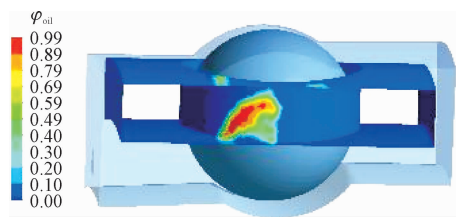


(d) 转速 40 000 r/min

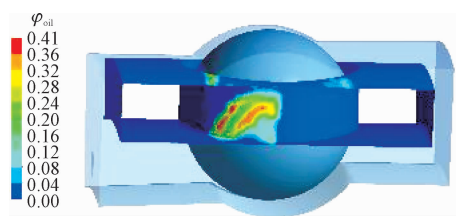
图9 各转速下外滚道润滑油分布

为了量化分析外滚道区域润滑油含量随着转速的变化情况,统计各转速下流入外滚道区域的润滑油流量。当转速在 10 000 r/min 以及 20 000 r/min 时,外滚道区域润滑油流量较大,分别为 4.54×10^{-4} kg/s 和 3.67×10^{-4} kg/s;当转速升高到 30 000 r/min 时,外滚道区域润滑油流量为 3.94×10^{-7} kg/s;而当转速大于等于 40 000 r/min 时,外滚道区域润滑油流量为 0,表示此刻没有润滑油到达外滚道区域。

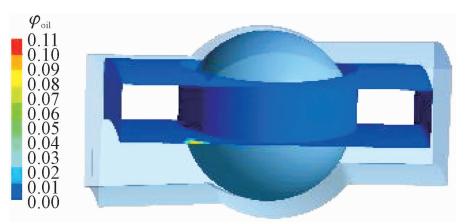
2.4.2 保持架兜孔润滑油分布 图 10 为不同转速下保持架表面润滑油分布情况。在转速低于等于 20 000 r/min 时,从图中可以看出,大量的润滑油可以到达保持架兜孔及保持架上表面;而当转速升高到 30 000 r/min 以上时,保持架兜孔上几乎没有润滑油分布。



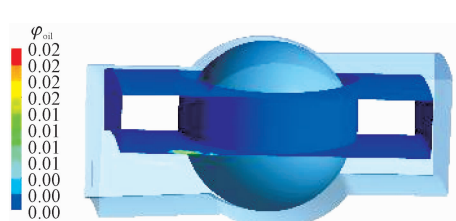
(a) 转速 10 000 r/min



(b) 转速 20 000 r/min



(c) 转速 30 000 r/min



(d) 转速 40 000 r/min

图10 各转速下保持架表面润滑油分布

为进一步分析保持架区域润滑油含量随着转速的变化情况,统计在各转速下流经保持架内外表面的润滑油流量差,以此衡量保持架区域润滑油含量。当转速等于 20 000 r/min 时,保持架内外表面的润滑油流量差较大为 3.58×10^{-4} kg/s;当转速高于到 40 000 r/min 时,保持架内外表面的润滑油流量差几乎 0。当转速在 50 000 r/min 时,保持架兜孔区域流量大于 40 000 r/min 时的流量,由于转速更高轴承腔内气流运动更加剧烈,润滑油在轴承腔内在沿着轴承转动方向运动的同时,少量润滑油沿径向

分散到保持架内圈表面,如图 10d 所示。在侧腔气流作用下,当润滑油无法通过滚球及附近气流带动到达保持架区域时,转速越高到达保持架内表面的润滑油含量越多。由此可得,对于侧向喷油润滑,当轴承运转速度过高时,润滑油无法到达保持架区域实现润滑。

2.4.3 各转速下滚球表面润滑性能分析 由于滚球与内外圈、保持架的复杂接触运动,表面的润滑油分布对于改善滚球的润滑性能具有重要意义。各转速下滚动物体表面润滑油的分布情况如图 11 所示。

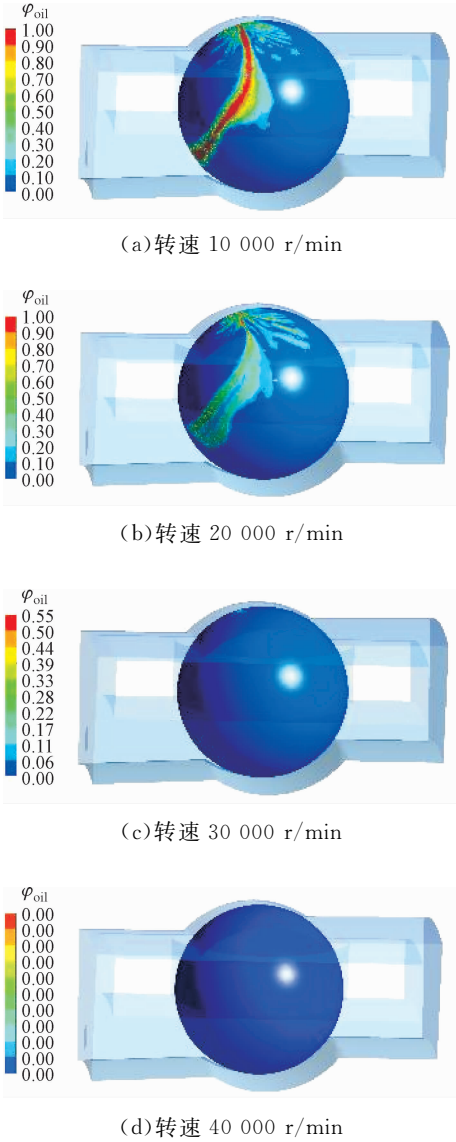


图 11 各转速下滚球表面润滑油分布

在转速为 10 000 r/min 以及 20 000 r/min 时,滚球表面有一定的润滑油附着。在较低转速下,气流速度较低,润滑油进入轴承腔后沿喷射方向流动,当润滑油到达滚球表面,受滚动体的自转运动等影响,润滑油在滚球表面形成了特定的分布规律。当

转速升高到 30 000 r/min 时,滚球表面的润滑油分布如图 11c 所示,滚球表面只有少量润滑油分布。原因在于,转速升高轴承腔内气流运动加剧,当润滑油喷射进入轴承腔,润滑油受到沿轴承运转方向的气流作用,从而偏离喷射方向,导致接近滚球的润滑油含量减少。转速进一步升高到 40 000 r/min 时,几乎没有润滑油到达滚球表面。

滚球表面的润滑油流量越大,润滑效果越好。当转速等于 10 000 r/min 时,进入滚球区域的润滑油流量较大,为 2.31×10^{-4} kg/s;随着转速升高,进入该球面实现润滑的润滑油流量逐渐减少,转速为 30 000 r/min 时,进入滚球区域的润滑油流量减小到 5.68×10^{-7} kg/s。当转速升高到 50 000 r/min 时,滚球表面区域没有润滑油。此刻润滑油从喷嘴流出后,在强剪切气流作用下无法到达滚球表面,从而严重制约了轴承的喷射润滑效率。

3 结 论

本文基于 VOF 数值模型,分析了喷油润滑条件下滚动轴承腔内油-气两相流动特性,揭示了轴承腔内两相流动规律以及润滑油分布规律,具体结论如下。

- (1)当轴承转速较低时,轴承腔内气流速度较低,压力分布较均匀;转速较高时,气流运动加剧,压力分布不均匀。
- (2)随着转速升高,润滑油脱离喷嘴后在轴承侧腔逐渐发生偏移,转速越高,偏移越大,导致转速升高后,润滑油难以直接到达滚球与内外圈接触区附近。
- (3)在较低转速下,润滑油受滚球自转等因素影响,在滚球表面、保持架兜孔面、外圈滚道表面等均有一定的流动分布;当转速升高时,运动部件上的润滑油逐渐减少,成为制约喷油润滑效果的关键因素。

参考文献:

[1] PINEL S I, SIGNER H R, ZARETSKY E V. Comparison between oil-mist and oil-jet lubrication of high-speed, small-bore, angular-contact ball bearings [J]. Tribology Transactions, 2001, 44(3): 327-338.

[2] YAN Ke, DONG Lei, ZHENG Junhao, et al. Flow performance analysis of different air supply methods for high speed and low friction ball bearing [J]. Tribology International, 2018, 121: 94-107.

[3] 翟强, 闫柯, 张优云, 等. 高速角接触球轴承腔内气相流动与传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报,

- 2014, 48(12): 29-33, 40.
- ZHAI Qiang, YAN Ke, ZHANG Youyun, et al. Investigation of air flow pattern and heat transfer efficiency inside cavity of high-speed angular contact ball bearing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(12): 29-33, 40.
- [4] OH I S, KIM D, HONG S W, et al. Three-dimensional air flow patterns within a rotating ball bearing [J]. *Advanced Science Letters*, 2013, 19(8): 2180-2183.
- [5] 王亚泰, 闫柯, 朱永生, 等. 保持架不同引导方式下角接触球轴承腔内气相流动分析 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(1): 72-78.
- WANG Yatai, YAN Ke, ZHU Yongsheng, et al. Investigation on internal air flow pattern of angular contact ball bearing with different cage guiding approaches [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 72-78.
- [6] GLAHN A, WITTIG S. Two-phase air/oil flow in aero-engine bearing chambers: assessment of an analytical prediction method for the internal wall heat transfer [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 1999, 5(3): 155-165.
- [7] 吴昊天, 陈国定. 轴承腔油气两相泡状流动的数值研究 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9): 70-75.
- WU Haotian, CHEN Guoding. Numerical research on two-phase gas/oil bubble flow in bearing chamber [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 70-75.
- [8] WU W, HU C H, HU J B, et al. Jet cooling characteristics for ball bearings using the VOF multiphase model [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 116: 150-158.
- [9] WU Wei, HU Chenhui, HU Jibin, et al. Jet cooling for rolling bearings: flow visualization and temperature distribution [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016 (105): 217-224.
- [10] WU Wei, HU Jibi, YUAN Shihua, et al. Numerical and experimental investigation of the stratified air-oil flow inside ball bearings [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 619-626.
- [11] 郭凯, 苑士华, 邵子桐. 喷射润滑高速轴承内部油气两相流动研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(10): 1022-1025, 1041.
- GUO Kai, YUAN Shihua, SHAO Zitong. Study on oil-air two-phase flow inside the high-speed bearing cavity with jet lubrication [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(10): 1022-1025, 1041.
- [12] LIU Hongbin, LI Yunbin, LIU Gongping. Numerical investigation of oil spray lubrication for transonic bearings [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(8): 401.
- [13] 刘红彬, 张磊, 史永生, 等. 高速滚动轴承环间气流特性数值模拟 [J]. *机械设计*, 2016, 33(6): 61-66.
- LIU Hongbin, ZHANG Lei, SHI Yongsheng, et al. Numerical simulation of airflow characteristics between rings of the high-speed rolling bearing [J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 33(6): 61-66.
- [14] 王海洋. 滚动轴承跨音速绕流喷油润滑油液穿透机理研究 [D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2017: 39-40.
- [15] 鲁勇帅. 高速球轴承喷油润滑与环下润滑的数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018: 17-21.
- [16] XIAO Juliang, ZHU Enqiang, WANG Guodong. Numerical simulation of emergency shutdown process of ring gate in hydraulic turbine runaway [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, 134(12): 124501.
- [17] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [18] 刘红彬, 王海洋, 张磊, 等. 高速滚动轴承喷油润滑油液穿透机理分析 [J]. *航空动力学报*, 2016, 31(7): 1766-1776.
- LIU Hongbin, WANG Haiyang, ZHANG Lei, et al. Analysis on penetration mechanism of oil jet lubrication for high speed rolling bearing [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(7): 1766-1776.

(编辑 杜秀杰)