

高速角接触球轴承喷油润滑雾化分析

刘红彬¹, 郝金华¹, 贾其苏², 杨梦科¹, 申志强¹

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;
2. 中国中信集团有限公司 重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039)

摘 要: 以角接触球轴承为研究对象,为分析喷射润滑油液在环间高速气流作用下的雾化情况,建立了轴承环间气液两相流仿真模型,采用 FLUENT 流体计算软件对高速角接触球轴承进行模拟分析计算,探讨在相同时刻不同转速、不同喷射角度等条件下油液颗粒直径大小的变化,以及在不同时刻索太尔平均直径(SMD)的变化趋势。结果表明:随着润滑油的穿过程程,腔内大粒径油液所占比例逐渐减少,小粒径比例增高;随着转速的增大,进入腔内油量也会随之减少,受环间气流涡的影响,迅速使油液液滴发生碎裂,使雾化加剧,颗粒直径减小,则会使 SMD 减小,不利于轴承的润滑;不同喷射角度条件下,15°的喷射角度轴承腔内的大粒径占比较大。

关 键 词: 角接触球轴承; 粒径大小; 不同转速; 喷射角度; 索太尔平均直径(SMD)

中图分类号: V233.4⁺53; TH133.33 **文献标志码:** A

Oil atomization analysis of jet lubrication for high speed angular contact ball bearing

LIU Hongbin¹, HAO Jinhua¹, JIA Qisu²,
YANG Mengke¹, SHEN Zhiqiang¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;
2. Heavy Industries Company Limited,
China International Trust and Investment Corporation, Luoyang Henan 471039, China)

Abstract: Angular contact ball bearing was taken as investigation object and FLUENT fluid calculation software was used to establish a simulation model of gas-liquid two-phase flow between bearing rings, so as to analyze the atomization of injected lubricating oil liquid under the action of high-speed airflow between rings. The change of oil particle diameter was discussed under the conditions of different rotating speeds and different injection angles at the same time. And the change trend of Sauter mean diameter (SMD) at different times was also discussed. Results showed that with the penetration of lubricating oil, the proportion of oil with large particle size in the cavity decreased gradually, while the proportion of oil with small particle size increased. With the increase of the rotating speed, the amount of oil entering the cavity would also decrease. Influenced by the air vortex between the rings, the oil droplets would disintegrate rapidly, which would intensify the atomization and reduce the

收稿日期:2019-11-29
基金项目:工信部智能制造综合标准化项目(2017ZNZX04); 国家自然科学基金(U1404517)
作者简介:刘红彬(1974—),男,副教授、硕士生导师,博士,研究方向为轴承润滑及力学性能分析。E-mail:hongbin-liu@163.com
引用格式:刘红彬,郝金华,贾其苏,等. 高速角接触球轴承喷油润滑雾化分析[J]. 航空动力学报,2020,35(6):1186-1194. LIU Hongbin,HAO Jinhua,JIA Qisu,et al. Oil atomization analysis of jet lubrication for high speed angular contact ball bearing[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(6):1186-1194.

particle diameter, thus reducing SMD and affecting the bearing lubrication. Under the condition of different injection angles, the proportion of large particle size in the bearing cavity with the injection angle of 15° was relatively large.

Key words: angular contact ball bearing; particle size; different speeds; injection angles; Sauter mean diameter (SMD)

在较高转速的工作条件下,角接触球轴承也能承受轴向负荷和径向负荷,接触角越大,轴向承载能量越高;喷油润滑是高速滚动轴承常见的润滑状态之一,并且喷油润滑结构简单,易于控制,并且具有良好的润滑效果^[1]。

轴承在高速运转过程中,油液经喷嘴喷射到轴承壁面,会有部分的润滑油因冲击、雾化或自身离心力的作用无法进入到轴承环间,从而会影响到轴承的润滑,而进入轴承环间的润滑油会与轴承环间高速气流混合,形成气液两相流^[2-3],喷油润滑在轴承环间形成的两相流与其他润滑方式形成的两相流有本质的区别^[4-8]。油雾润滑是利用油雾发生器将压缩空气与少量的润滑油和一定的气体混合后供给轴承的润滑方式。油气润滑通常适用于轴承运转速度较高的场合,油气润滑系统将少量的润滑油和一定的气体混合,然后供给给轴承。喷油润滑通常用于低或中载荷下以较高转速运转的轴承,是采用高压喷射将润滑油喷射至轴承腔内的润滑方式,因此本文采用喷油润滑的油液进入轴承腔过程中的雾化情况。

近年,一些学者在不同的参数条件下,对轴承雾化进行研究。例如:在国外 Kim 等^[9]研究了单孔柴油喷雾的瞬态雾化特性,比较了不同喷嘴直径对雾化特性的影响。Li^[10]讨论了航空发动机燃油喷嘴的雾化特性,通过相位多普勒粒子分析仪和激光多普勒速度系统(PDPA/LDV),得到了不同工况下的流动特性、雾化粒径和分布。国内单一竈^[11]利用 Fluent 软件,模拟分析了扇形喷嘴的内外流场变化情况,通过喷雾实验,把不同工况下的喷雾锥角、液滴速度及粒径成像。魏南^[12]以气液两相流喷嘴为研究对象,通过理论分析、利用 CFD 软件建立数学模型和实验研究等方法,对射流雾化机理进行研究。李清廉等^[13-14]学者为了研究新型三组元的雾化特性,设计了多种工况试验,得出了平均直径 SMD 的变化规律。王亚军等^[15]分析了流场结构对液柱状破碎雾化过程的影响。目前,国内外学者对轴承雾化的研究,是对轴承油膜压力分布及高速或者超高速的条件下对轴承性能的影响等。

在较高的转速下,油液进入轴承腔后会产生雾化的现象,由于开设沟槽,油液通过喷嘴进入轴承能更好的达到润滑效果,但因油液在进入轴承腔后,经高速气流等因素的影响下腔内油液会产生雾化的现象,因油液颗粒的减小,在轴承运转中不仅不能减少摩擦损失和表面磨损,并且也起不到很好地冷却作用,因此不利于轴承的润滑。前期研究表明:在轴承外圈的内壁上开设圆弧状沟槽,沟槽方向为 60° ,沟槽深度则为 0.8 mm 时,来研究轴承腔内的油液体积分数,对此并开展了相对应的实验验证工作^[16]。因此本文是在之前基础上^[17-18],从理论方面研究了不同转速、不同时刻的变化条件下,液体从喷嘴进入、沟槽诱导进入轴承腔后,由于湍流径向分速度和周围空气相对作用的影响,使液体破碎成粒径很小的液滴甚至产生雾化的现象,通过统计油液粒径大小,来分析轴承腔内油液粒径变化情况;在不同转速的条件下 SMD 的变化情况以及在喷嘴不同的喷射角度时油液粒径变化情况。

1 数值计算模型

1.1 控制方程

1.1.1 $k-\epsilon$ 模型

由于高速角接触球轴承处于气液两相流动状态,因此腔中的流动系统被认为是两种不可压缩且不相容的流体,且每一相都满足流体的基本控制方程(第一相为空气,第二相为油液)。

在不考虑温度场的变化情况下,假设气相介质为绝热且不可压缩的黏性空气,则轴承环间气相介质流动的连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{u}_i) = 0 \tag{1}$$

式中 $\mathbf{u}_i$ 的下标 i 表示方向速度矢量。

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\mathbf{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\mathbf{u}_i\mathbf{u}_j)}{\partial x_i} = & -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_i} \right) + S_i \end{aligned} \tag{2}$$

式中 $\mathbf{u}_j$ 表示 j 方向速度矢量; ρ 表示密度, t 表示

时间, μ 表示气相介质动力黏度; p 表示气相介质压力; S_i 表示广义源项, 这里的 i, j 指标取值都是 1、2、3。

k - ϵ 模型的方程组可以使整个方程封闭, 并且易于求解湍流问题。由于轴承的高速运转, 会使轴承腔内气液两相剪切流动剧烈, 在流体黏度和壁面的作用下容易产生涡流, 为了数值模拟更接近实际情况, 本文的湍流模型则选择 RNG (renormalization group) k - ϵ 模型^[19], 则 k 方程和 ϵ 方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) =$$
$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon - Y_m + G_b + S_k$$

(3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$
$$G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

(4)

式中 k 为湍流动能; ϵ 为湍流动能耗散率, ρ 表示密度, G_k 表示为层流速度梯度产生的湍动能; G_b 是浮力产生的湍动能; Y_m 表示为可压湍流中过度扩散引起的波动, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 为模型常数, 其中 $C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68; C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 是经验常数, σ_k 和 σ_ϵ 是湍动能 k 和耗散率 ϵ 的湍流普朗特数 (Pr) 的倒数, S_k 和 S_ϵ 表示自定义参数。以上各式中 i, j 取 1、2、3, 公式中的经验常数在一定的环境下具有适用性。

1.1.2 油液雾化的均匀度

油液通过喷嘴经沟槽诱导进入轴承腔, 在高速和腔内空气的作用下, 油液液滴会产生雾化的情况, 因油液液滴的雾化不均匀, 所以仅用油液液滴的平均直径表达雾化程度不够全面。相对完善的表达方法, 是要表达出液滴颗粒直径的大小, 又要表示出不同直径液滴的数量和质量, 不过至今还没有比较完善的表达式。目前为止用的比较多的 Rosin-Rammler 关系式

$$R = 100 \exp \left[- \left(\frac{D_i}{\bar{D}} \right)^\varphi \right] \%$$

(5)

式中 D_i 表示液滴直径; φ 表示液滴分布均匀性的指数, 通常为 $1.8 \leq \varphi \leq 4$; R 为尺寸大于 D_i 的液滴质量占全部液滴质量的百分数; $\bar{D}$ 为尺寸常数, $i = 1, 2, 3$ 。

当油液经喷嘴进入轴承腔, 形成的雾化场分布是不均匀的, 最大直径和最小直径之差较大, 因

此只能用液滴平均直径来表示雾化细度。但一般情况下用一个油液液滴尺寸基本上比较均匀的雾化场来代替实际雾化场, 这个均匀的雾化场粒子的直径就是实际的雾化场中液滴的平均直径, 常用的表达式有体积平均直径, 索太尔平均直径 (SMD)。由于液滴直径的大小是不均匀的, 假设液体在高速的喷嘴喷出, 雾化成大量细小的液滴, 最小的液滴直径为 $0 \mu\text{m}$, 则表面积平均直径的公式表示为

$$D_{20} = \left[\frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 \text{d}N}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \text{d}N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

(6)

体积平均直径的公式表示为

$$D_{30} = \left[\frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 \text{d}N}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \text{d}N} \right]^{\frac{1}{3}}$$

(7)

索太尔平均直径的公式表示为

$$D_{\text{Sm}} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 \text{d}N}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 \text{d}N}$$

(8)

其中 N 是直径为 D 的液滴数目。

2 几何模型与网格划分

2.1 几何模型

本文以角接触球轴承的型号 7306 为研究对象, 其结构参数分别如表 1 所示; 整体模型使用非结构网格进行划分, 网格数量为 2867328, 整体模型网格数量太大, 由于滚动轴承运动的周期特性, 对于整个滚动轴承来说, 计算时间较长, 不易完成数值模拟分析, 因此采用以整体轴承模型周向的 $1/12$ 作为计算对象, 并且包括一个滚动体。建立沟槽是诱导油液进入轴承腔, 便于轴承润滑, 因此本文以有沟槽喷嘴的单周期网格为模型。

表 1 轴承参数数值
Table 1 Bearing parameters table

参数	数值
外径/mm	72
内径/mm	30
轴承宽/mm	19
接触角/(°)	15
钢球数目/mm	12

本文对滚动轴承进行气相数值模拟分析则采用 ICEM CFD(integrated computer engineering and manufacturing computational fluid dynamics)的方法。图 1 是轴承简化模型,图中 r 为径向坐标, z 为轴向坐标。喷嘴位置是前期研究结果确定^[20],其喷嘴位置在小端面无量纲的 0.75 处,喷嘴方向与沟槽夹角为 15° ;为了使油液能更好的进入轴承腔,满足轴承的润滑,则在轴承外圈壁上建立圆弧状的沟槽,沟槽方向为 60° ,长为 3.5 mm,宽为 0.65 mm。图 2(a)是轴承在没划分网格之前的三维立体图,图 2(b)是有沟槽喷嘴的单周期网格划分模型;因模型是不规则的,网格划分不容易,因此使用非结构的四面体网格进行划分,对喷嘴、滚动体附近的局部间隙进行加密,如图 2 所示。

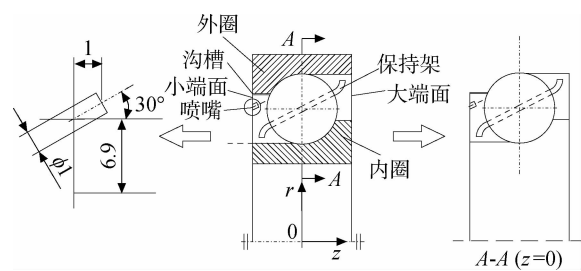


图 1 轴承简化模型(单位:mm)

Fig. 1 Simplified bearing model (unit:mm)

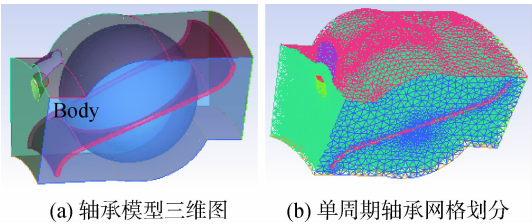


图 2 轴承模型

Fig. 2 Bearing model

2.2 边界设置及数值分析方法

因前期气相流对轴承的研究,则设置喷嘴为速度入口,小端面为压力入口,大端面为压力出口,喷嘴固定,轴承内圈、保持架、滚动体施加相应的转动边界条件,其中滚动体及保持架的公转速度

$$n_m = \frac{n_i}{2} \left(1 + \frac{D_w \cos \alpha}{D_m} \right) \tag{9}$$

其中 n_i 表示为内圈转速, α 表示为接触角, D_w 表示为滚动体节圆直径, D_m 表示为轴承节圆直径。同时本文也考虑滚动体的自转速度,是通过在滚动体外表面设置不同的速度边界实现。

VOF(volume of fluent)模型是一种表面跟踪方法,即在固定的欧拉网格下当需要彼此之间获得一个或多个不会结合流体的界面时,可以使用此模型;离散相模型是计算流场中散布的粒子的运动和轨迹,离散相模型实际上是连续相和离散相物质之间相互作用的模型,本文是利用 VOF 的多相流模型来捕捉轴承腔内部气液两相流的分布状态和运动情况以及使用离散相模型来获油液粒径的分布状况。具体相关计算参数如表 2 所示。

表 2 具体计算参数

Table 2 specific calculation parameters

参数	主相(空气)	次相(汽轮机油)
密度/(kg/m ³)	1.225	876
黏度/(Pa·s)	0.0000179	0.05877

转动速度是根据高速滚动轴承的设计条件给出的,标准壁面函数法用于壁面附近,其余的则设为绝热、固壁、无滑移边界。

当油液进入轴承腔时,受外力的作用下,液体从喷嘴进入、沟槽诱导进入轴承腔后,由于湍流径向分速度和周围空气相对作用的影响,使液体雾化成粒径很小的液滴,离散相模型(discrete phase model,DPM)也称为粒子轨迹模型,对于连续介质与不连续介质形成的多相流,把连续流体称为连续相,不连续的物质称为不连续相。

通过在模型设置面板 DPM 的边界条件设置,定义离散相,通过计算求解,在结果后处理中选中粒子跟踪,粒子直径等对离散相中油液粒径进行结果分析。(其中包括油液颗粒直径分布情况、颗粒轨迹及粒径变化的情况)。

3 结果与分析

3.1 轴承环间气流受湍流强度的影响

图 3 所表示的是轴承的轴向 $z=0$ mm 处截面(图 1 中 A-A 所示)的湍流强度分布示意图,从图中可以看出湍流强度在小端面尤其是在沟槽附近明显是大于大端面的,在小端面喷油的喷嘴受湍流的影响较小,但在小端面处的沟槽附近形成了涡流,因此油液在进入轴承腔内时会受涡的影响。

图 4 是轴承轴向 $z=0$ mm 处截面的油液粒径分布图,图中左侧的标尺数据是由下至上表示的是油液粒径尺寸的大小,深蓝色表示的是油液粒径尺寸最小时,红色表示油液粒径尺寸最大时,由下至上是粒径由小至大。从图中可以看出,油

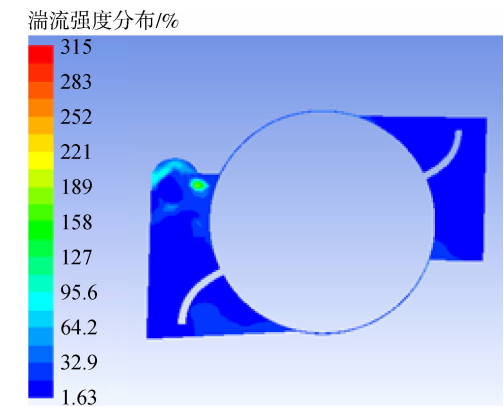


图 3 轴承轴向 $z=0\text{ mm}$ 处截面湍流强度分布图
Fig. 3 Distribution diagram of turbulence intensity of cross section at bearing axial direction $z=0\text{ mm}$

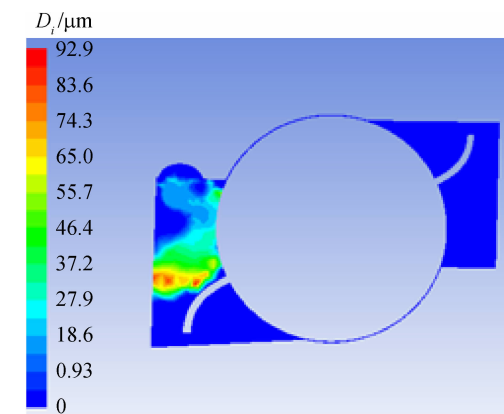


图 4 轴承轴向 $z=0\text{ mm}$ 处截面油液颗粒直径分布图
Fig. 4 Distribution diagram of oil particle diameter at bearing axial direction $z=0\text{ mm}$

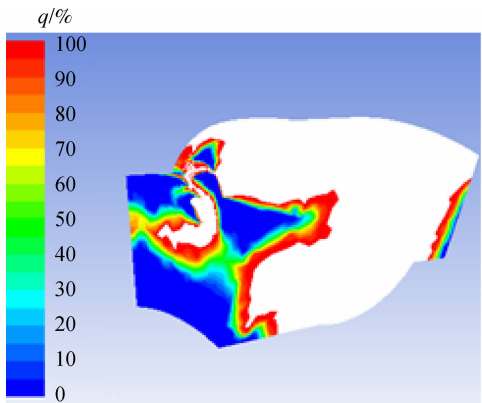
液主要集中在小端面及喷嘴、沟槽及靠近沟槽的滚动体附近,在油液进入轴承腔时,在喷嘴及沟槽附近会受到气流的影响形成涡流,因此在喷嘴沟槽附近的油液粒径较小,因此油液粒径的大小会受到涡流的影响。

3.2 不同时刻腔内油液变化情况

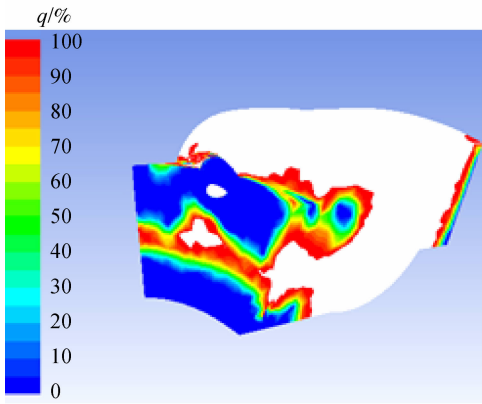
通过数值模拟计算分析得出在不同的时间轴承环间油液变化情况。主要从不同时刻油相的分布情况 and 对应时刻油液粒径变化情况说明油液在腔内不同位置的雾化规律。

为了观察润滑油进入轴承腔内的分布情况,提取了在不同时刻的腔内油相体积比,如图 5(a)~图 5(c)所示。图中标尺数据表示轴承腔内单位体积内油液体积的占比(q),由下至上,蓝色表示轴承腔内油液量较少,红色表示轴承腔内油液量较多。在初始时,轴承腔内的油液相对较少,主要集中在喷嘴和沟槽附近的小端面处,没有

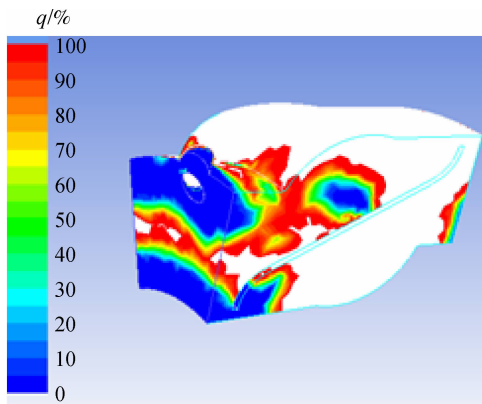
进入到轴承腔内。随着时间(t)的不断增加,轴承腔内的油液不断增多,在轴承腔内聚集,外圈滚道油液也不断增多,但因保持架和滚动体的作用,在保持架附近的油液量较少。



(a) $t=0.5\times10^{-5}\text{ s}$



(b) $t=1.0\times10^{-4}\text{ s}$



(c) $t=1.5\times10^{-4}\text{ s}$

图 5 不同时刻腔内油相体积比
Fig. 5 Oil phase volume ratio in the cavity at different times

图 6 是转速为 1.0×10^5 r/min, 供油量为 3 L/min 时轴承腔内油液粒径变化云图。

从图 6 中可以看出, 在图 6(a) 中, 刚开始时, 油液尚未进入轴承腔, 油液颗粒主要集中在喷嘴、沟槽附近; 在图 6(b) 中可以看出, 随着时间变化油液是沿着轴承外圈内壁逐步扩散, 相对较大的颗粒直径主要在集中在小端面及小端面附近的保持架; 在图 6(c) 中随着保持架、滚动体、内圈的公

转及自转运动的条件下, 沿着轴承转动方向流动, 油液颗粒逐渐扩散至轴承腔且大粒径油液从小端面附近进入轴承腔内, 对轴承起着一定的润滑作用。

从图 5 和图 6 的结果对比来看, 油液在轴承环间的分布和对应位置油液颗粒的大小并不一致, 油液虽然可以随着环间气流诱导进入轴承腔内, 在气流作用下, 其粒径大小也受气流作用不断发生雾化。

3.3 不同时刻轴承腔内油液粒径分布

图 7 中描述了转速 $n=1.0 \times 10^5$ r/min 时, 不同时刻下油液粒径所占百分比变化图。在时间 (t) 为 5.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} s 时为初始阶段, 进入轴承腔的油液量较少, 但油液尚未分散, 大粒径油液所占比例较大, 油液占比变化比较平稳; 在 1.5×10^{-4} 、 2.5×10^{-4} s 时油液进入轴承腔, 油液在轴承腔受气流阻力、保持架和滚动体等的作用下, 折线起伏变化, 特别是在 1.5×10^{-4} s 时, 折线起伏变化最大, 大粒径油液会逐渐破碎粒径变小甚至会雾化, 大粒径油液减少。

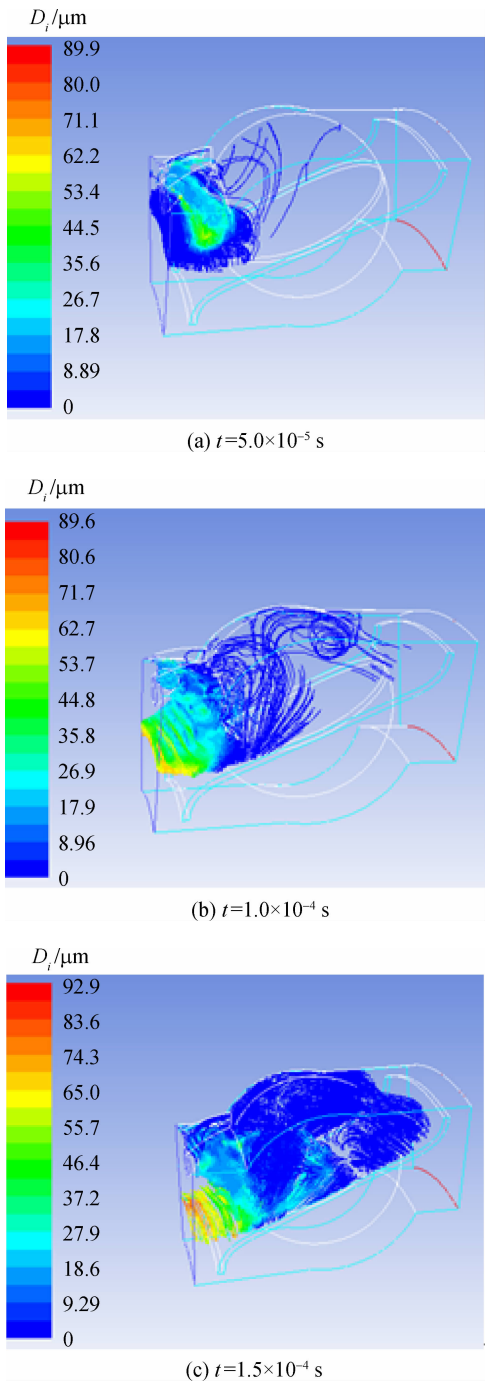


图 6 相同转速, 不同时刻时油液粒径变化云图
Fig. 6 Cloud map of oil particle size change at the same speed and different time

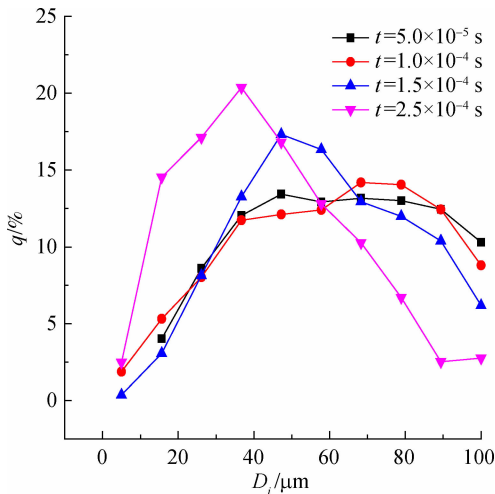
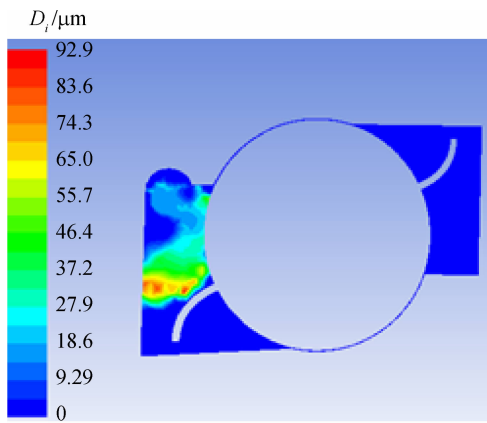


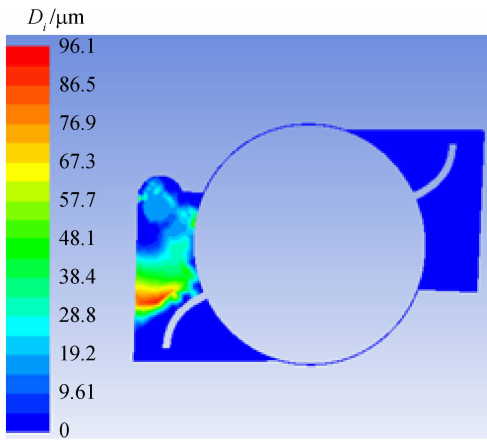
图 7 不同时刻油液粒径变化图
Fig. 7 Oil particle size variation at different times

3.4 不同转速相同截面油液粒径分布

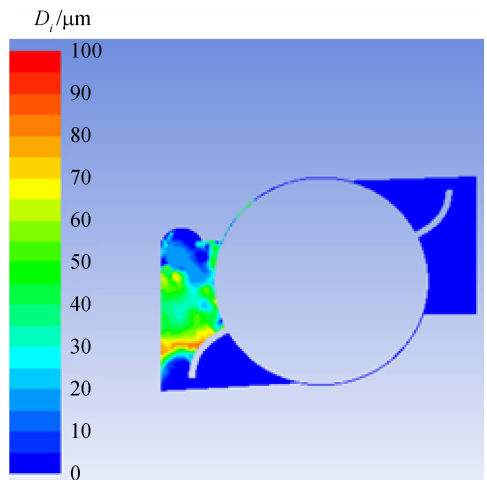
图 8 所示是在不同转速(n)的条件下, 在相同时刻、相同截面情况时油液粒径分布情况。从图中可以看出油液主要集中在小端面附近, 因在沟槽处形成了涡, 因此沟槽附近油液粒径相对于保持架附近较小; 但因转速的不同, 随着转速的增加, 大粒径油液逐渐减少, 在图 8(c) 中小粒径油液占大多数, 并且相较于其他转速油液比较分散。



(a) $n=1.0\times10^5$ r/min



(b) $n=1.5\times10^5$ r/min



(c) $n=2.0\times10^5$ r/min

图 8 不同转速相同截面油液粒径变化分布图

Fig. 8 Variation distribution of oil particles at the same section at different rotational speeds

3.5 不同转速轴承腔内油液粒径分布

图 9 是在相同时刻、不同转速的条件下,油液粒径变化图。从图中可以看出,随时间变化,油液进入轴承腔整体上大粒径所占比逐渐上升;因转速的不同,在转速为 2.0×10^5 r/min 时,粒

径在 $60\mu\text{m}$ 之后,大粒径油液占比明显下降,是因在较高的转速条件下,油液进入轴承腔之后受滚动体、保持架、腔内气流阻力和离心力等的影响下,大粒径油液受其影响破碎粒径减小甚至产生雾化的现象,以至于大粒径油液占比较小。而在转速为 1.0×10^5 r/min 时,相较于其他转速 1.0×10^5 r/min 转速较低,大粒径油液占比相比较而言明显较大,在 $90\mu\text{m}$ 之后油液粒径占比有所减少,但变化较小;因此在较高转速时,大粒径油液明显减少,小粒径油液比例明显增多,会加剧轴承腔内油液的雾化。

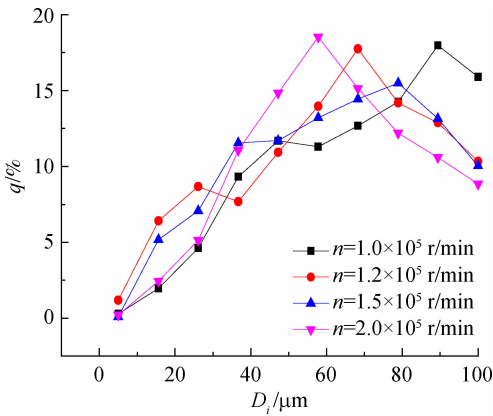


图 9 不同转速油液粒径变化图

Fig. 9 Oil particle size variation at different rotating speeds

3.6 不同转速对油液雾化特性的影响

图 10 为不同转速下随时间变化的雾场液滴的 SMD 分布图。从图中可以看出,随时间的变化,油液粒子的 SMD(记为 D_{sm}) 逐渐减小,随着转速的增大,油液从喷嘴进入沟槽的油量逐渐减

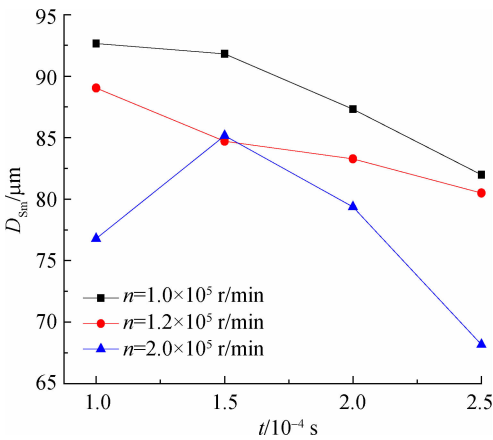


图 10 不同转速时 SMD 随时间变化曲线

Fig. 10 Change curve of SMD with time at different speeds

少,与高速气流发生碰撞,加速油液液滴碎裂,油液颗粒直径减小,产生雾化,则 SMD 减小;因转速的增大,SMD 减小,雾化质量提高,但不利于轴承间的润滑。

3.7 喷嘴不同倾斜角度对轴承腔油液粒径变化影响

图 11 中描述了转速为 $1.0 \times 10^5 \text{ r/min}$ 时,不同喷射角度对轴承腔内油液粒径大小的影响。从图中可以得出 $\alpha = 12^\circ, \alpha = 18^\circ$ 油液的喷射角粒径占比变化趋势基本一致,而 $\alpha = 15^\circ$ 的喷射角度占比的变化处于上升趋势,大粒径油液会随时间变化,但总体来说 15° 喷射角度大粒径油液占比较大,雾化减少,利于轴承润滑。

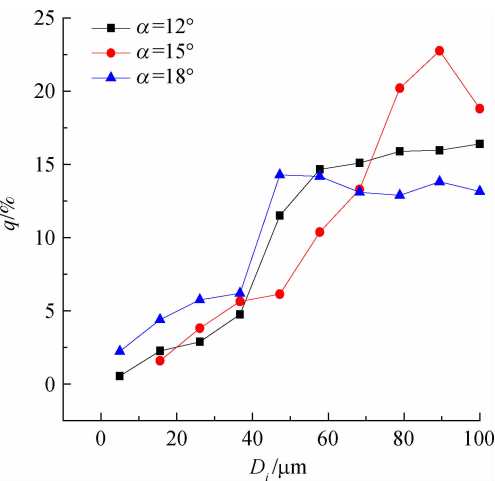


图 11 不同倾斜角度油液粒径变化图
Fig. 11 Oil particle size variation at different tilt angles

4 结 论

本文研究是在之前关于轴承环间气液两相流的数值模拟方法基础上,进一步计算分析轴承腔内油液雾化情况。

1) 轴承的小端面的湍流强度大于大端面,则易在小端面沟槽附近形成了涡,油液在进入轴承腔内时会受涡的影响不断雾化。

2) 随着时间的增加,油液颗粒逐渐扩散至轴承腔且大粒径油液从小端面附近进入轴承腔内,对轴承起着一定的润滑作用。初始阶段,进入轴承腔的油液量较少,但油液尚未分散,大粒径油液所占比例较大,油液占比变化比较平稳;随着时间的增加,大粒径油液会因保持架、滚动体转动、气流阻力等的影响会逐渐变小甚至会产生雾化,大粒径油液减少,轴承间的润滑效果则会降低。

3) 在不同转速的条件下,在相同时刻、相同截面情况时油液主要集中在小端面附近,因在沟槽处形成了涡,因此沟槽附近油液粒径相对于保持架附近较小;但因转速的不同,随着转速的增加,大粒径油液逐渐减少。

4) 相同时刻、不同转速度的条件下,相比较而言在较高转速时,大粒径油液明显减少,小粒径油液比例明显增多,会加剧轴承腔内油液的雾化。随着转速的增大,油液从喷嘴进入沟槽的油量逐渐减少,腔内油液会与高速气流发生碰撞,使油液颗粒直径减小,产生雾化,则 SMD 减小。因转速的增大,SMD 减小,雾化质量提高,但不利于轴承间的润滑。

5) 在不同喷射角度下对比轴承腔内大粒径油液占比,得出喷射角度为 15° 时轴承腔内大粒径油液占比较大,雾化减少,利于轴承润滑。

参考文献:

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

[2] GLAHN A, WITTING S. Two-phase air/oil flow in aero engine bearing chambers: characterization of oil film flows [J]. Journal of Engineering for Gas and Turbines Power, 1996, 118(7): 578-583.

[3] 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 Transaction, 2001, 44(3): 327-338.

[4] 巩彬彬, 张国俊, 王建文, 等. 油气润滑滚动轴承试验装置的研制[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(2): 181-183. GONG Binbin, ZHANG Guojun, WANG Jianwen, et al. Research and development of an experimental device for a rolling bearing lubricated oil and air[J]. Mechanical Science and Technology, 2007, 26(2): 181-183. (in Chinese)

[5] 王建文, 安琦. 油气润滑输送中两相流的形成[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2009, 35(2): 324-327. WANG Jianwen, AN Qi. Investigation of two-phase flow regimes in transport pipe in oil/air lubrication system[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science) 2009, 35(2): 324-327. (in Chinese)

[6] 谢军, 蒋书运, 王兴松, 等. 高速滚动轴承油气润滑试验研究[J]. 润滑与密封, 2006(9): 114-115, 119. XIE Jun, JIANG Shuyun, WANG Xingsong, et al. Experimental research on oil-air lubrication for high-speed ball bearing[J]. Lubrication Engineering, 2006 (9): 114-115, 119. (in Chinese)

[7] 王延忠, 牛文滔, 唐文, 等. 航空直齿轮喷油润滑油气两相流分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(2): 439-444.

WANG Yanzhong, NIU Wentao, TANG Wen, et al. Research on oil-air multiphase flow of spray lubrication of aero spur gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(2):439-444. (in Chinese)

[8] 吴昊天,陈国定. 航空发动机轴承腔润滑的气液两相均匀流研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(1):78-82.

WU Haotian, CHEN Guoding. Homogeneous flow of two-phase gas/liquid flow in aero-engine bearing chamber[J]. Tribology, 2007, 27(1):78-82. (in Chinese)

[9] KIM D J, LEE J K. Analysis of the transient atomization characteristics of diesel spray using time-resolved PDPA data[J]. International Journal of Automotive Technology, 2008, 9(3):297-305.

[10] LI Xu. Experimental investigation on atomization characteristics of a certain type of aero engine fuel nozzle[J]. Advanced Materials Research, 2011, 354-355:468-471.

[11] 单一窍. 两相流喷嘴内外流场雾化特性的数值模拟及实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.

SHAN Yiqiao. Numerical simulation and experimental investigation of characteristics in two phase flow nozzle atomization inside and outside flow field[D]. Jinan: Shandong University of Architecture and Engineering, 2017. (in Chinese)

[12] 魏南. 气液两相流喷嘴的喷射雾化机理的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.

WEI Nan. Research of jet atomization mechanism on gas-liquid two-phase flow nozzle[D]. Jinan: Shandong University of Architecture and Engineering, 2014. (in Chinese)

[13] 李清廉,田章福,周进,等. 新型三组元喷嘴雾化特性研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5):653-656.

LI Qinglian, TIAN Zhangfu, ZHOU Jin, et al. Atomization performance of new type tripropellant injector[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(5):653-656. (in Chinese)

[14] 李清廉,田章福,王振国. 模型三组元喷嘴雾化 SMD 变化规律[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(6):9-12.

LI Qinglian, TIAN Zhangfu, WANG Zhenguo. Variation of SMD for atomization of model tripropellant injectors[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(6):9-12. (in Chinese)

[15] 王亚军,颜应文,党龙飞,等. 喷油直接喷射入横向气流中雾化机理数值研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(10):2464-2471.

WANG Yajun, YAN Yingwen, DANG Longfei, et al. Numerical investigation on atomization characteristics of liquid jet in crossflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10):2464-2471. (in Chinese)

[16] 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. (in Chinese)

[17] 刘红彬,刘公平,王海洋,等. 高速角接触球轴承腔内气液两相流模拟分析[J]. 航空动力学报, 2018, 33(5):1103-1111.

LIU Hongbin, LIU Gongping, WANG Haiyang, et al. Numerical simulation of two-phase air/oil flow in high speed angular contact ball bearing chamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(5):1103-1111. (in Chinese)

[18] 刘红彬,刘公平,郝金华,等. 不同轴承壁面沟槽诱导油液穿透机理[J]. 航空动力学报, 2019, 34(5):1127-1136.

LIU Hongbin, LIU Gongping, HAO Jinhua, et al. Oil penetration mechanism induced by different bearing wall grooves[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5):1127-1136. (in Chinese)

[19] VICTOR Y, STEVEN A O. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1):3-11.

[20] 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. (in Chinese)

(编辑:张 雪)