

内外环对高速球轴承中球体拖曳阻力系数的影响^{*}

李 坤, 高文君, 徐伟鹏, 刘振侠, 潘 迎

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129)

摘 要: 在液体润滑的高速球轴承中, 球体公转运动会受到润滑流体的拖曳阻力, 对球轴承的动力及产热等性能造成显著影响。针对球轴承中球形滚动体公转的流体拖曳阻力问题, 建立平板夹层单球体绕流模型, 通过数值模拟和实验研究的方法, 研究内外环对球体绕流的流动特征及压力分布的影响, 分析单球体绕流的拖曳阻力系数变化规律, 并与开放空间球绕流模型进行对比。研究表明, 建立的数值计算方法和实验结果吻合良好, 误差不超过10%。在相同雷诺数下, 由于内外壁面的限流作用, 球体与壁面接触区域压差阻力明显增大, 导致夹层空间球绕流中球体拖曳阻力系数明显高于开放空间球绕流, 在 $10^3 < Re < 10^5$ 内约为开放空间球体阻力系数的两倍。

关键词: 球轴承; 拖曳阻力; 球体绕流; 内外环; 压力分布

中图分类号: V233.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2020) 10-2173-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190509

Effects of Inner and Outer Rings on Drag Coefficient of Spheres in High-Speed Ball Bearings

LI Kun, GAO Wen-jun, XU Wei-peng, LIU Zhen-xia, PAN Ying

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In high speed oil-lubricated ball bearings, rolling elements are resisted by lubricating fluid, changing the bearing's dynamic and thermal behaviour. In order to investigate the effects of inner and outer rings on the ball's drag coefficient, a numerical simulation model and an experimental device are developed with one single sphere confined by two flat walls. The changing rule of drag coefficient is summarized and compared with that of one sphere in open space. Results show that the numerical model is reliable with an error of less than 10% compared with the experiment. For the same Reynolds number, the pressure difference between the upstream and downstream of the sphere is enlarged obviously with the restriction of two walls, rising the drag coefficient to a high level. It's illustrated that drag coefficient on sphere in restricted space is about two times to that of sphere in open space in the range of $10^3 < Re < 10^5$.

Key words: Ball bearing; Drag force; Flow around sphere; Inner and outer rings; Pressure distribution

1 引 言

高速球轴承是航空发动机主轴支撑的关键部

件,对发动机的性能和可靠性等有至关重要的作用^[1]。为了确保轴承能够在合适的温度范围内工作,需要滑油对轴承进行润滑与冷却^[2-3]。进入轴承空腔

^{*} 收稿日期: 2019-07-16; 修订日期: 2019-09-11。

基金项目: 中央高校基本科研业务 (31020180QD100); 西北工业大学研究生创新创业种子基金 (CX2020137)。

作者简介: 李 坤, 硕士生, 研究领域为航空发动机主轴轴承性能分析。E-mail: likunkelly@163.com

通讯作者: 高文君, 博士, 副教授, 研究领域为航空发动机润滑系统性能分析与设计。E-mail: gaowenj@nwpu.edu.cn

引用格式: 李 坤, 高文君, 徐伟鹏, 等. 内外环对高速球轴承中球体拖曳阻力系数的影响[J]. 推进技术, 2020, 41(10): 2173-2179. (LI Kun, GAO Wen-jun, XU Wei-peng, et al. Effects of Inner and Outer Rings on Drag Coefficient of Spheres in High-Speed Ball Bearings[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10):2173-2179.)

的滑油只有极少量进入轴承接触区形成润滑油膜,大部分滑油会悬浮在轴承内部形成油气混合物^[4-5]。当滚动球体在油气混合物的流体环境中公转运动时,会受到流体的粘滞阻力,称为拖曳阻力。在某些高速应用条件下,拖曳阻力造成的流体粘滞摩擦可能达到轴承总功率损失的 50%。为了精确描述球轴承的动力及产热行为,必须对球体在轴承环境内的拖曳阻力进行精确分析^[6]。

由于高速球轴承复杂的结构及运动特征,真实分析轴承内部球体受到的拖曳阻力是很困难的。Harris 最早将流体力学中经典的球体绕流模型应用到球轴承中球体拖曳阻力的计算,将拖曳阻力描述为无量纲拖曳系数的函数,即

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d \left(\frac{\bar{\omega}_m d_m}{2} \right)^2 A \quad (1)$$

式中 F_d 为球体受到的拖曳阻力, ρ 为流体环境(油气两相流)的等效密度, C_d 为球体承受的拖曳系数, $\frac{\bar{\omega}_m d_m}{2}$ 为球体公转运动的线速度($\bar{\omega}_m$ 为轴承保持架公转角速度, d_m 为轴承的节圆直径), A 为球体的迎风面积^[7]。在计算流体力学中,拖曳系数主要与流体运动的雷诺数有关,经典的理想球体绕流模型中,拖曳系数与雷诺数的关系已被大量的理论及实验研究验证,并被直接引用到球轴承中球体拖曳阻力的分析模型中。

但是,经典的球体绕流模型中,球体处于开放空间中,流场特性不受周围环境的影响。而在实际球轴承结构中,球体处于内外环的夹层空间中,球体绕流会受到内外环结构的约束。同时,球轴承中多个球体串列排布,相邻球体间的流动会产生相互干涉。Yann 等^[8]通过数值计算研究了开放空间中多个球体之间的相互干涉作用,得到球轴承中球体所受的拖曳系数约为单个球体的 1/5。但是 Yann 等的分析没有考虑内外环的影响。Pouly 等^[9]通过实验验证了 Yann 等的分析结果,并将该结果应用到球轴承温度场热分析研究中。高文君等^[10-11]研究了圆柱滚子轴承中圆柱型滚动体受到流体环境的拖曳阻力,考虑了内外环以及多个球体之间的影响,研究发现内外环对圆柱滚动体的拖曳系数影响是非常显著的。而对于近壁面的球体绕流, Takayuki^[12]通过近壁面球绕流实验发现,壁面对球绕流有较大影响。

综上所述,目前对球轴承中球体在润滑流体环境中公转运动受到的拖曳阻力研究,尚未考虑内外环的影响。同时,在流体力学基础理论研究中,同样

缺乏类似结构球体绕流的研究。

本文以航空发动机主轴高速球轴承应用为背景,建立简化的夹缝空间球体绕流模型,通过数值及实验研究方法,分析内外环壁面对球体绕流特性的影响,研究球轴承环境条件下单个球体公转运动受到流体的拖曳阻力。由于本文研究主要针对内外环对球体周围绕流特征及拖曳阻力的影响,因此没有考虑多个球体之间的相互干涉。

2 方 法

2.1 物理模型

高速球轴承在运行过程中需要滑油进行润滑与冷却,并在轴承空腔中形成油气混合物^[13]。当球体在该流体环境中公转运动时,会受到流体的拖曳阻力。在球体绕流这一物理现象中,球体受到的拖曳阻力可以分为粘性阻力和压差阻力两部分。其中粘性阻力主要与流体物性有关,而压差阻力主要与球体前后的压差有关。

本文主要研究球轴承中内外环对球体所受拖曳阻力的影响,因此在具体研究中,采用以下三条假设:

(1) 不考虑球的自转及球体之间的相互干涉影响;(2) 内外环弧度为零,可以认为是两块平行的长直平板;(3) 滑油与空气组成的油气两相流在轴承内均匀分布,流体环境具有均一物性,为不可压缩流体。

因此,球轴承中单个球体的公转绕流问题可以简化为如图 1 所示的夹缝空间来流中单个球体绕流模型。如图 1 所示,单个球体处于上下两个平板间的夹缝空间中,上下表面和球面之间为点接触,模拟球轴承中内外环对球绕流的影响。左右两侧壁面与球面的距离为 $5d$ (d 为球体直径),入口与球体的距离为 $10d$,出口与球体的距离为 $15d$ 。

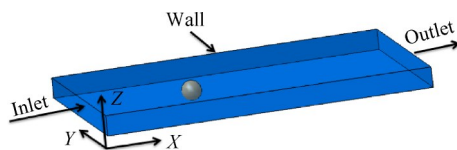


Fig. 1 Physical model of flow past sphere at slit space

2.2 控制方程

本文通过求解夹层空间球体绕流的流体 N-S 方程,研究内外环对球体绕流拖曳阻力的影响,使用有限体积法对本构方程进行离散化,并使用商业软件 ANSYS Fluent 对连续性方程组和雷诺时均运动方程

组进行数值计算,得到流动状态。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \quad (3)$$

式中 $\bar{u}_i$ 是流体速度在 X, Y, Z 三个方向的分量的平均值, $\bar{p}$ 是流体所受的压强, ρ 是流体的密度, $\bar{F}_i$ 为单位微元体所受的体积力。

2.3 边界条件及网格

在夹层空间球体绕流的数值计算中,将球体表面设置为无滑移壁面边界条件。入口边界设置为速度入口条件,取球体直径为特征长度,根据雷诺数匹配入口速度,将出口边界设置为压力出口条件。上下表面代表球轴承的内外环,设置为无滑移壁面边界条件,左右两个壁面距离球体较远,作为流场空间的自由边界条件。使用商业软件 ANSYS ICEM 将计算域划分为六面体网格,经过网格无关性验证,最终将夹层空间球绕流流场划分为 68 万个结构化网格单元,并保证球体表面上网格的 $Y^+ < 1$, 网格划分如图 2 所示^[14]。

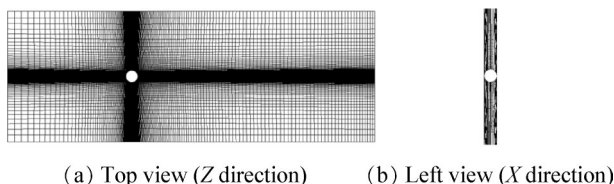


Fig. 2 Domain and mesh for flow past sphere at slit space

由于球轴承进行高速旋转运动,因此轴承空腔中的油气混合物可等效为物性均一的单相流体。流体的粘性和密度可以按照研究所需的雷诺数一一设定。因高速球轴承中滑油的体积比一般都小于 6%, 因此以理想气体的物性参数为基准进行数值计算, 并通过风洞进行实验验证。

2.4 数值计算方法

参考相关文献,本文使用 SST-SAS 湍流模型进行数值计算,计算雷诺数为 $10^3 < Re < 10^5$, 在该范围内, SST-SAS 模型具有较好的计算准确性^[8]。SST-SAS 湍流模型综合了 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 $k-\omega$ 湍流模型,在边界层的内部使用 $k-\omega$ 湍流模型进行计算,对边界层外部的自由剪切流采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算, SST-SAS 能够较为准确地计算绕流问题^[15-17]。

本文选择“求解压力耦合方程组的半隐式方法”(SIMPLE)算法来求解控制方程,该方法对湍流项使用迎风格式计算控制方程,对动量项使用二阶差分格式计算控制方程^[18]。采用瞬态计算的方法,取时间步长为 10^{-7} s, 在求解过程中,对于要求解的项,当同一时间步长内相邻两次迭代计算的残差值 $< 10^{-6}$ 时,就认为该迭代计算的精度满足要求,计算收敛。

2.5 验证实验

为了验证数值计算结果的准确性,本文设计了夹层空间球体绕流实验,实验装置如图 3 所示。实验在一个小型风洞中进行,风洞的试验段长度为 1.2 m, 横截面为边长为 0.3 m 的正方形,试验段风洞的左右两侧壁面上有供观察使用的玻璃窗。风洞速度为 5 m/s~40 m/s, 湍流度低于 5%, 风洞的实验段如图 4 所示。

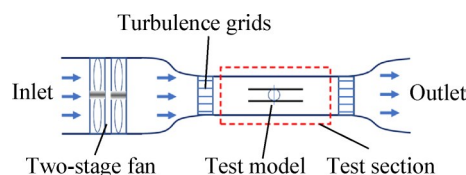


Fig. 3 Wind tunnel structure



Fig. 4 Test section of wind tunnel

实验球体由表面光滑、外径分别为 25 mm 和 50 mm 的两种球壳制作,并在球壳上钻出直径为 5 mm 的对孔,供支撑杆使用。因孔的直径较小可以忽略其对球面流体流动的影响。使用长 600 mm, 宽 5 mm, 高 200 mm 的两块亚克力板作为夹层空间的两个壁板,壁板上固定有压力传感器,球体受到的流体力通过支撑杆传递到传感器上。压力传感器的测量精度为 0.01 N, 测量值通过数值显示器读取,见图 5。

通过实验测量不同雷诺数条件下夹层空间中球体受到的拖曳阻力,利用式 $C_d = \frac{2F_d}{V^2 \rho A}$ 计算得到球体绕流中受到的拖曳阻力系数,得到夹层空间中球体绕流的拖曳阻力系数与雷诺数之间的对应关系。

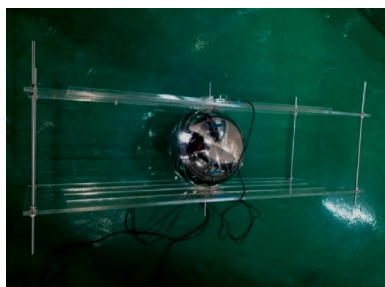


Fig. 5 Experimental device

3 结果与讨论

3.1 计算模型的实验验证

为了验证数值计算结果的准确性和可靠性,将数值计算的结果与实验结果进行对比。如图6所示,为实验测得的夹层空间球体绕流中球体的拖曳阻力系数与雷诺数间的关系,与数值计算结果之间的对比。受风洞实验条件的限制,实验仅测量了航空发动机条件下球轴承中的雷诺数范围,而数值计算不受该条件限制,计算的雷诺数范围更大。

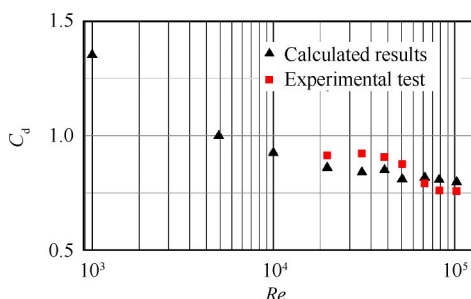


Fig. 6 Drag coefficient calculated numerically and experimentally

由图6可以看出,实验测得的球体拖曳阻力系数随雷诺数的变化趋势与数值计算结果比较接近,在雷诺数 $2 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 的区间内,拖曳阻力系数随雷诺数的变化不明显。在相同雷诺数下实验测得的拖曳阻力系数和数值计算得到的拖曳阻力系数误差不超过10%,因此可以认为本文采用的数值计算方法是可靠的。

3.2 夹层空间球绕流的压力分布

在航空发动机工作条件下,球轴承中球体附近流体流动的雷诺数约为 10^4 量级,在这一范围内拖曳阻力主要由压差阻力决定。为了研究不同雷诺数下球体表面的压力分布,本文引入了无量纲参数压力系数

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} = \frac{p - p_\infty}{p_0 - p_\infty} \quad (4)$$

式中 p 是所求点的静压, p_∞ 是自由来流的静压, p_0 是自由来流的滞止压力, ρ_∞ 是自由来流的密度, V_∞ 是自由来流的速度。

图7为雷诺数 6.8×10^4 时,夹层空间内球体表面的压力系数分布,图8为相同雷诺数条件下,开放空间内球体表面的压力系数分布云图。

图7中,球体迎风面的最前端形成一个滞止区域,该区域压力系数最高,沿流动方向球表面的压力系数逐渐减小。由于夹层壁面和球面接触点的影响,使得靠近接触点位置处的压力系数略高,因此在球体沿流向的中间位置形成了类似于梭形的低压区。在球体背风面压力系数逐渐增大,最终保持不变,形成稳定区域。由于接触点的存在使得球体迎风面的高压区逐渐延伸成为一个椭圆形区域,且等压力线呈空间椭圆形。

图8中,开放空间中球体表面压力系数沿流向的变化趋势与夹层空间相似。球体迎风面前端形成一个圆形的高压区,沿流向中部形成一个低压区,最后在背风面形成一个稳定区域,等压力系数线呈环形。

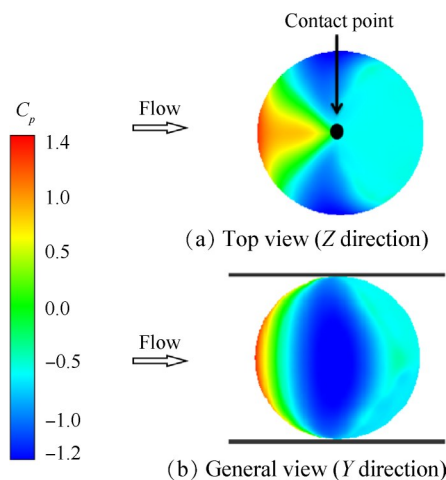


Fig. 7 Pressure distribution of sphere surface at slit space

通过比较图7和图8可以看出,由于夹层空间壁面和球面直接接触,使得夹层空间中球体表面的高压区面积大于开放空间中的球体表面上高压区面积,夹层空间低压区面积小于开放空间中的球体低压区的面积。

在两种流动模型中,球心截面圆上从滞止点开始沿着流动方向绕过半圆到尾端的压力系数分布如

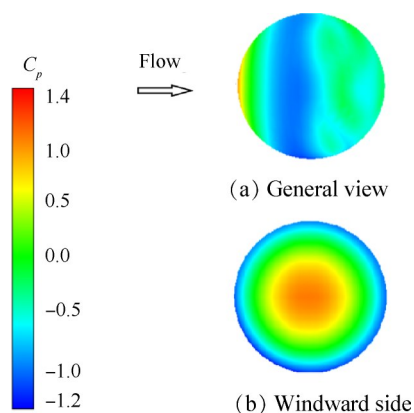


Fig. 8 Pressure distribution of sphere surface at open space

图9所示。开放空间球心截面圆上的压力系数随角度的变化趋势和夹层空间XY平面球心截面圆上的压力系数的变化趋势相同。而夹层空间XY平面球心截面圆上滞止区的压力系数是开放空间的1.5倍,低压区的压力系数低于开放空间球心截面圆上低压区的压力系数,在背风面的稳定区域二者压力系数相同。受到夹层壁面的影响,在XZ平面上的球心截面圆上从滞止点到接触点压力系数有小幅降低,明显高于开放空间的压力系数。接触点后部,开放空间和夹层空间球心截面圆上的压力系数分布基本相同。

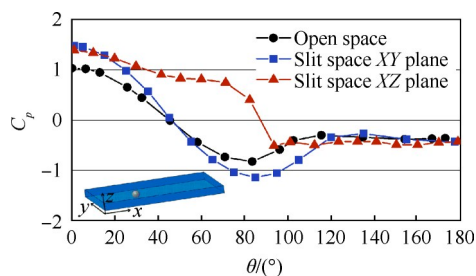


Fig. 9 Pressure distribution of the ball

综上,在夹层空间中球面上高压区的压力系数高于开放空间,且夹层空间中球面上高压区的面积大于开放空间中高压区面积;夹层空间的低压区压力系数低于开放空间的低压区压力系统,且低压区的面积大于开放空间低压区的面积。因此夹层空间球绕流的压差阻力大于开放空间球绕流的压差阻力。

3.3 夹层空间球绕流流动分析

在球绕流的物理模型中,球体附近流体的流动状态决定了球体表面上压力系数的分布。如图10所示,为不同雷诺数条件下夹层空间球体表面的压力系数分布(XZ平面)。如图所示, $Re=5\times 10^3$, 1×10^4 , 5×10^4 时,球体表面压力系数变化的趋势基本相同,而

且随着雷诺数的增大,球体表面的压力系数逐渐减小。 $Re=1\times 10^4$ 和 $Re=5\times 10^4$ 时,球体表面压力系数的分布仅在球面的低压区存在差距,高压区和稳定区的压力系数的分布基本相同。

图11~13为不同雷诺数下,夹层空间中球体附近的流体流动状态和速度分布。雷诺数分别为 5×10^3 , 1×10^4 , 5×10^4 。

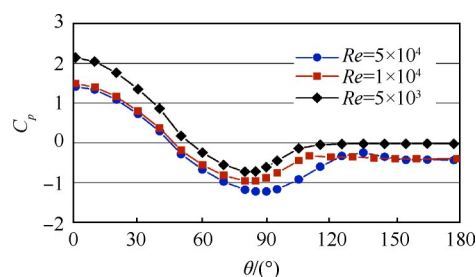


Fig. 10 Pressure distribution of the ball at slit space

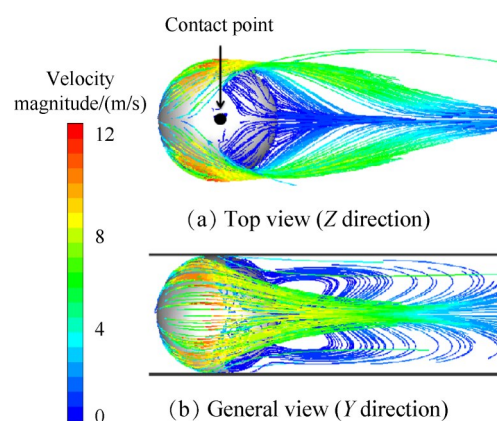


Fig. 11 Flow pattern around the sphere at slit space when $Re=5\times 10^3$

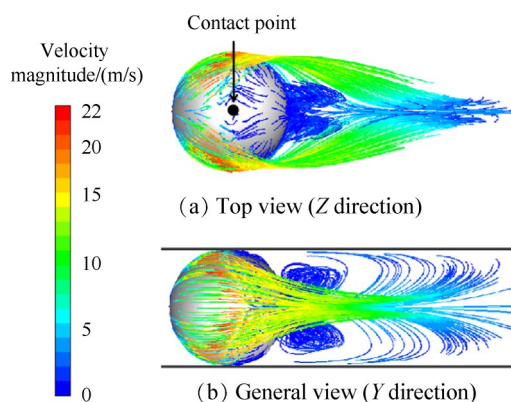


Fig. 12 Flow pattern around the sphere at slit space when $Re=1\times 10^4$

$Re=5\times 10^3$ 时,流体在球迎风面最前端形成滞止区速度为0,沿着流动方向速度逐渐增大。由于流体不能直接通过接触点,因此接触点附近流体速度较低,

接触点后部沿流向形成两个垂直于夹层壁面的漩涡。 $Re=1\times 10^4$ 球面上流体速度的变化与 $Re=5\times 10^3$ 球面上流体速度的变化相同,但是球体背面会形成上下左右对称的四个涡。当雷诺数达到 5×10^4 时,球体背面生成的上下两侧的两个涡会汇聚成一个涡,相比于 $Re=5\times 10^3$ 的流动,涡的位置相同,但是涡的形状更加复杂。

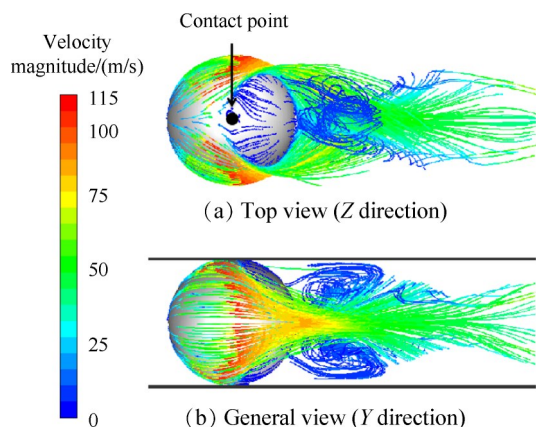


Fig. 13 Flow pattern around the sphere at slit space when $Re=5\times 10^4$

3.4 夹层空间球绕流的拖曳阻力计算分析

为了能够更加准确地描述球轴承中内外环对球体所受拖曳阻力大小的影响,本文分析了不同雷诺数条件下夹层空间中球体受到的拖曳阻力系数,并与开放空间中球体拖曳阻力系数进行了对比,如图14所示。

由图14可以看出,在中低雷诺数范围内拖曳阻力系数随雷诺数的增加降低较快,而在较高雷诺数时拖曳阻力系数随雷诺数的变化不明显。同时,相同雷诺数下夹层空间中球体的拖曳阻力系数显著高于开放空间中球体的拖曳阻力系数。在球轴承运行环境下(雷诺数为 $1\times 10^4\sim 1\times 10^5$),拖曳阻力系数变化不大,约为相同雷诺数下开放空间球体拖曳阻力系数的两倍。

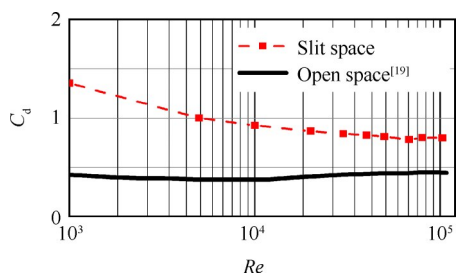


Fig.14 Drag coefficient of sphere at slit space and open space

4 结 论

通过建立简化的夹层空间球绕流模型,进行数值计算及实验测量研究,获得了球轴承内外环对球体绕流流场特征及球体拖曳阻力的影响,得到以下结论:

(1)通过数值计算得到了夹层空间球绕流阻力系数与雷诺数之间的关系,并与实验测量进行了对比。实验结果和数值计算结果相对误差 $<10\%$,证明了数值方法的准确性。

(2)获得了不同雷诺数下夹层空间球绕流尾涡的结构及形态特征,以及球体表面的压力分布,夹层壁板改变了球体表面的高低压区分布,与球体接触区附近压力较高。

(3)雷诺数为 $10^3\sim 10^5$ 时,夹层空间内球体拖曳阻力系数明显大于开放空间球绕流的拖曳阻力系数。在航空发动机中主轴球轴承的工作范围内,夹层空间球绕流的拖曳阻力系数大约是开放空间球绕流拖曳阻力系数的两倍。

本文研究了球轴承中单个球体绕流阻力系数受内外环的影响,而在真实球轴承中,多个球体串列排布,多个球体绕流之间会发生明显的相互干扰,并对球体拖曳阻力系数造成影响,这将在下一阶段工作中进行分析研究。

致 谢:感谢中央高校基本科研业务以及西北工业大学研究生创新创业种子基金的资助,感谢西北工业大学刘振刚副教授、张斐博士对本项目实验测试研究提供的帮助与指导。

参考文献

- [1] 高文君,刘振侠,朱鹏飞,等.基于多节点热网络法的航空发动机主轴轴承温度场分析[J].推进技术,2019,40(2):148-154.(GAO Wen-jun, LIU Zhen-xia, ZHU Peng-fei, et al. Steady Thermal Analysis of Main-Shaft Roller Bearing for Aero-Engine Based on Multi-Nodes Thermal Network Methods[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(2): 148-154.)
- [2] 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 Jing-Yu, LIU Zhen-xia, HU Jian-ping, 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.)
- [3] Harris T A, Kotzalas M N.滚动轴承分析[M].罗继伟,李济顺,译.北京:机械工业出版社,2009.
- [4] 吕亚国,张美华,刘振侠,等.航空发动机轴承腔油

- 气两相流动数值研究及验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2751-2757.
- [5] 赵静宇, 刘振侠, 胡剑平, 等. 考虑油气传热传质耦合的轴承腔内壁油膜运动研究[J]. 推进技术, 2014, 35(7): 973-980. (ZHAO Jing-yu, LIU Zhen-xia, HU Jian-ping, et al. Motion of Wall Oil Film with Consideration of Oil-Gas Coupled Heat and Mass Transfer in Bearing Chamber [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(7): 973-980.)
- [6] 任国哲, 刘振侠, 赵静宇, 等. 基于DPM与VOF方法轴承腔内滑油瞬态特性对比[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 11-15.
- [7] Harris T A, Mindel M H. Rolling Element Bearing Dynamics[J]. *Wear*, 1973, 23(3): 311-337.
- [8] Yann Marchesse, Christophe Chagnenet, Fabrice Ville. Numerical Investigations on Drag Coefficient of Balls in Rolling Element Bearing [J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(5): 778-785.
- [9] Pouly F, Chagnenet C, Ville F, et al. Investigations on Power Losses and Thermal Behavior of Rolling Element Bearings [J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2010, 224(9): 925-933.
- [10] Gao Wenjun, Nelias Daniel, Lyu Yaguo, et al. Numerical Investigations on Drag Coefficient of Circular Cylinder with Two Free Ends in Roller Bearings [J]. *Tribology International*, 2018, 123: 43-49.
- [11] 朱鹏飞, 刘振侠, 高文君, 等. 反转圆柱滚子轴承生热特性研究[J]. 推进技术, 2016, 37(12): 2329-2335. (ZHU Peng-fei, LIU Zhen-xia, GAO Wen-jun, et al. Research on Heat Generation Characteristics of Counter-Rotating Cylindrical Roller Bearing [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(12): 2329-2335.)
- [12] Takayuki Tsutsui. Flow Around a Sphere in a Plane Turbulent Boundary Layer [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6-7): 779-792.
- [13] 高文君, 刘振侠, 朱鹏飞, 等. 航空发动机静止盘腔瞬态特性数值与实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(3): 496-503. (GAO Wen-jun, LIU Zhen-xia, ZHU Peng-fei, et al. Numerical and Experimental Investigation of Transient Response of Static Disc Cavity in Aero-Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(3): 496-503.)
- [14] Absi Rafik. A Simple Eddy Viscosity Formulation for Turbulent Boundary Layers near Smooth Walls [J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2009, 337(3): 158-165.
- [15] Hanjalic K, Launder B. A Reynolds Stress Model of Turbulence and Its Application to Thin Shear Flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 52(4): 609-638.
- [16] Wilcox D C. Formulation of the K-Omega Turbulence Model Revisited [J]. *AIAA Journal*, 2008, 46(11): 2823-2838.
- [17] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, 3(2): 269-289.
- [18] Kim H J, Durbin P A. Observations of the Frequencies in a Sphere Wake and of Drag Increase by Acoustic Excitation [J]. *The Physics of Fluids*, 1988, 31(11): 3260-3265.

(编辑:朱立影)