



润滑与密封

*Lubrication Engineering*

ISSN 0254-0150, CN 44-1260/TH

## 《润滑与密封》网络首发论文

题目：考虑粗糙度时不同衬层材料的水润滑轴承润滑特性比较  
作者：杜媛英，闵为，刘晓艺，曹沁鑫，权辉  
收稿日期：2020-08-02  
网络首发日期：2021-12-29  
引用格式：杜媛英，闵为，刘晓艺，曹沁鑫，权辉. 考虑粗糙度时不同衬层材料的水润滑轴承润滑特性比较[J/OL]. 润滑与密封.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1260.TH.20211229.1125.008.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 考虑粗糙度时不同衬层材料的水润滑轴承润滑特性比较

杜媛英 闵为 刘晓艺 曹沁鑫 权辉

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 730050, 兰州)

**摘要：**以水润滑轴承为研究对象，考虑表面粗糙度的影响，针对倍受关注的四种新型非金属衬层材料，建立润滑数学模型，并推导了水膜厚度方程；采用有限差分法，研究了考虑实际表面粗糙度时，四种新型衬层材料的衬层变形，水膜厚度和水膜压力的变化规律，并与表面光滑的轴承进行了对比分析，最后分析了最大水膜压力和承载力随转速的变化。研究表明：表面粗糙度使得水润滑轴承的衬层变形和水膜厚度均呈波状分布，衬层变形减小，最小水膜厚度变薄；水膜压力有轻微的局部突变，最大水膜压力增大，承载力下降。四种材料的变形量大小依次是丁腈橡胶>赛龙>飞龙>超高分子聚乙烯；最小水膜厚度的大小是丁腈橡胶>赛龙>飞龙>超高分子聚乙烯；水膜压力的大小是超高分子聚乙烯>飞龙>赛龙>丁腈橡胶。在相同工况下，丁腈橡胶衬层材料比其它三种衬层材料相对容易的形成润滑水膜，而超高分子聚乙烯衬层材料可以保证系统承受较大的承载力。此研究对水润滑轴承的材料选型和加工装配有一定的参考意义。

**关键词：**不同衬层材料；表面粗糙度；水润滑轴承；衬层变形；水膜厚度；水膜压力

中图分类号：TG156

## Comparison of the Lubrication Characteristics of Water-Lubricated Bearings under different Lining Materials with Roughness

DU Yuanying MIN Wei LIU Xiaoyi CAO Qinxin QUAN Hui

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, 730050, Lanzhou)

**Abstract:** This study aims at water-lubricated bearings, by considering the influence of surface roughness, for four new non-metallic lining materials that are currently attracting attention, the mathematical model was constructed and the water film thickness equation was deduced. By adopting the finite difference method, the lining deformation, water film thickness and pressure of the four new lining materials are investigated when considering the actual surface roughness, the results were compared with the smooth surface bearings, finally, the varies of maximum water film pressure and bearing capacity with speeds were analyzed. The results show that, the surface roughness makes the lining deformation and water film thickness of the water-lubricated bearings exhibit continuous wave-like distribution, and the lining deformation decreases and the minimum water film thickness becomes thinner; the water film pressure has slight local sudden change, and the maximum water film pressure increases, the bearing capacity decreases. The order of four lining materials deformations and smallest water film thickness are all as follows: nitrile rubber> Thordon> Tenmat> ultra-high molecular polyethylene; and the order of water film thickness are as follows: ultra-high molecular polyethylene> Tenmat> Thordon> nitrile rubber. Under the same working conditions, the nitrile rubber lining material is relatively easier to form a lubricating water film than the other three lining materials, and the ultra-high molecular polyethylene lining material can ensure the system withstand greater bearing capacity. This study can provide reference for the material selection, processing and assembly of water-lubricated bearings.

**Key words:** different lining materials; surface roughness; water-lubricated bearings; lining deformation; water film thickness; water film pressure

收稿日期：2020-08-02.

作者简介(通信作者)：杜媛英(1988-)，女，甘肃平凉人，博士，讲师(E-mail: duyuaning123@126.com)。主要从事轴承润滑与泵等流体机械的流动机理研究。

基金项目：国家自然科学基金(51969014)；甘肃省杰出青年基金项目(20JR5RA456)。

水润滑轴承一般采用新型非金属材料作为衬层材料，赛龙、飞龙、丁腈橡胶和超高分子聚乙烯材料作为目前水润滑轴承中应用较广且备受关注的几种新型衬层材料，具有优异的物理学性能，相比于金属轴承而言，它们更容易形成弹流润滑水膜。然而，大多数的非金属材料，其弹性模量相对较低，在进行机械加工时一般很难达到与金属相同等级的表面粗糙度；同时，水润滑轴承在非稳定工况运行时，转子和轴承之间的间隙会变得极小，此时，其表面粗糙度对润滑特性的影响不能忽略。

国内外学者们对表面形貌和衬层材料等单一因素对水润滑轴承润滑特性的影响做了很多研究。例如在 20 世纪 80 年代，国外学者 Goglia P R 和 Zhu D 等分析了表面形貌对弹流润滑特性的影响<sup>[1-2]</sup>。近年来，也有很多学者探讨分析了表面粗糙度对水润滑轴承润滑特性的影响，例如 Naduvinamani N.B 和 Siddangouda A 等人<sup>[3-4]</sup>研究了表面粗糙度对阶梯滑动轴承的弹流润滑特性，发现负偏斜的表面粗糙度增大了摩擦系数。王优强等考虑固体颗粒和粗糙度的影响，分析了水润滑飞龙轴承热弹流润滑性能，发现粗糙度和固体颗粒的尺寸对飞龙轴承的润滑水膜厚度及水膜压力影响很大<sup>[5]</sup>。Lin J R 和 Hung T C 等基于 Eringen 的微连续谱理论和 Christensen 的随机理论研究了非牛顿流变学和表面粗糙度对滑动轴承动态特性的综合影响，结果表明，与用微极性流体润滑的光滑轴承相比，横向粗糙度的影响增大了承载能力和动态系数，而纵向粗糙度的影响正好相反<sup>[6]</sup>。王家序等利用摩擦试验机分析了载荷、速度、运行时间等因素对水润滑塑料轴承摩擦系数和磨损率的影响<sup>[7]</sup>。Wang J Z 等分析了超高分子量聚乙烯、聚四氟乙烯以及其他复合材料在海水中的摩擦学特性<sup>[8]</sup>。最近，Du Y 等分析了考虑轴颈倾斜和表面粗糙度的水润滑橡胶轴承的润滑特性，发现轴颈倾角和表面粗糙度会使得水膜厚度和水膜压力呈锯齿状分布，同时采用数值模拟方法对不同衬层材料下的水润滑轴承特性进行了研究<sup>[9-11]</sup>。崔旨桃等探讨了尼龙自润滑性与表面织构协同作用对水润滑轴承摩擦磨损性能的影响<sup>[12]</sup>。王亚兵等针对船舶艉轴承轴颈受载倾斜产生的摩擦磨损问题进行了详细分析<sup>[13]</sup>。

综上，目前对水润滑轴承的研究大多基于单一因素影响下其润滑特性的分析，因此，以水润滑轴承为研究对象，考虑表面粗糙度的影响，针对倍受关注的几种新型非金属衬层材料，建立润滑数学模型，研究考虑实际表面粗糙度时，几种新型衬层材料的衬层变形，水膜厚度和水膜压力的变化规律，具有重要的工程实际意义。

## 1 水润滑橡胶轴承的基本参数及结构

### 1.1 水润滑橡胶轴承的基本参数

选取目前性能优越且备受关注的四种新型衬层材料，分别是飞龙、赛龙、超高分子聚乙烯和丁腈橡胶，作为主要的研究对象。计算中所涉及的主要参数如表 1 所示。

表 1 水润滑橡胶轴承结构参数

Table 1. Structural parameters of water-lubricated rubber bearings

参数	数值
轴颈半径 $R/\text{mm}$	163
间隙比 $c \cdot R^{-1}$	0.003
长径比 $L \cdot d^{-1}$	3
转速 $n_s/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	100
衬层厚度系数 $\delta_h$	0.1
水的黏度 $\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$1.005 \times 10^{-3}$

水润滑橡胶轴承结构及坐标系如图 1 所示。其中转子绕轴颈中心  $O_m$  转动， $n_s$  为转速，轴承中心为  $O$ ， $e$  为偏心距， $\varphi$  为偏位角， $h$  为水膜间隙，轴承半径为  $R_0$ ，轴颈半径为  $R$ ， $x$  为轴颈的旋转方向。轴颈旋转时，流体动压润滑在水润滑橡胶轴承的间隙中形成。

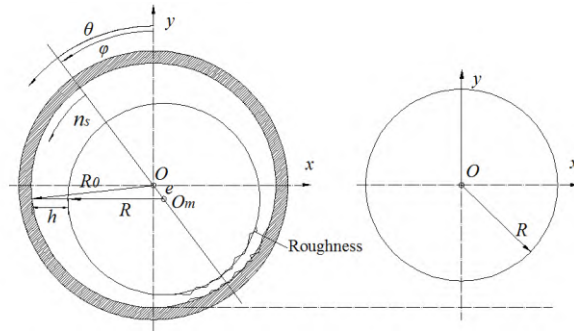


图 1 全圆周水润滑轴承示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of a full-circumference water-lubricated bearing

飞龙、赛龙、超高分子聚乙烯和丁腈橡胶衬层材料的基本参数如表 2 所示。

表 2 不同衬层材料的基本参数

Table 2 Basic parameters of different lining materials

参数	丁腈橡胶	超高分子聚 乙烯	飞龙	赛龙
密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	1190	970	1320	1200
弹性模量 E/GPa	0.008	0.7	0.3	0.49
泊松比ν	0.47	0.46	0.48	0.45

## 2 表面粗糙度的测量

以某水润滑橡胶轴承为测量对象，如图 2 所示利用 TIME3230 表面粗糙度测量仪对轴承表面粗糙度进行测量，得到橡胶轴承实际表面粗糙度分布的波幅和波长的原始数据，并进行去噪处理，发现去噪后的粗糙度分布由一系列的正弦波和余弦波组成。因此，为了数值计算方便，采用余弦函数来表征轴承表面粗糙度的分布。

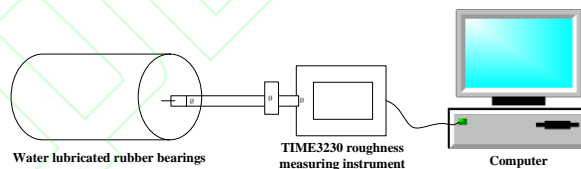


图 2 水润滑橡胶轴承表面粗糙度的测量原理

Fig. 2. Measuring principle of surface roughness of water-lubricated rubber bearings

由于粗糙度为纵向纹理，则其表面分布可以表示为

$$s = A \cos(2\pi \cdot x/l_s) \quad (1)$$

其中， $A$  为表面粗糙度的幅值， $l_s$  为粗糙度的波长。

## 3 控制方程

### 3.1 雷诺方程

水润滑橡胶轴承在实际运行时，由于橡胶衬层变形较大，水的黏度较低，其实际润滑水膜内多为层、湍流共存的混合流态，实际雷诺数不再是某一定值，而是随它的实际水膜厚度变化而变化的。因此采用混合流

润滑条件下的润滑方程。

### 3.2 混合流润滑下的润滑方程

混合流润滑理论下水润滑橡胶轴承的润滑方程为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial}{R\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\omega \frac{\partial h}{\partial x} (\text{Re} < \text{Re}_c) \\ \frac{\partial}{R\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu k_x} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu k_z} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\omega \frac{\partial h}{\partial x} (\text{Re} \geq \text{Re}_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $x$ 、 $z$  为圆柱坐标系的两个坐标轴； $p$  为润滑膜压力； $\mu$  为润滑剂动力黏度； $\omega$  为轴颈角速度；由于青木弘-原田正躬湍流润滑理论在水润滑轴承的实际应用中更具优越性，因此本文采用其作为湍流润滑时的润滑方程<sup>[14]</sup>，其中  $k_x$ 、 $k_z$  为湍流因子， $k_x=1+(0.01392/12)\text{Re}^{0.916}$ ； $k_z=1+(0.0144/12)\text{Re}^{0.854}$ 。

水膜压力的无量纲形式可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( H^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \left( \frac{d}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( H^3 \frac{\partial P}{\partial \lambda} \right) = \frac{\partial H}{\partial \theta} (\text{Re} < \text{Re}_c) \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{H^3}{k_x} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \left( \frac{d}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{H^3}{k_z} \frac{\partial P}{\partial \lambda} \right) = \frac{\partial H}{\partial \theta} (\text{Re} \geq \text{Re}_c) \end{cases} \quad (3)$$

式中：式中， $\theta$  为水润滑橡胶轴承的无量纲周向坐标， $\lambda$  为无量纲轴向坐标， $H$  为无量纲水膜厚度， $P$  为无量纲水膜压力， $L$  为轴承长度， $d$  为轴颈直径。

无量纲化所用的特征量为：

$$\begin{cases} \theta = x/R \\ \lambda = z/L (-1 \leq \lambda \leq 1) \\ H = h/c \\ P = \frac{c^2 p}{6\omega \eta R} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $c$  为轴承间隙。

### 3.3 水膜厚度

#### 3.3.1 弹性变形

水润滑橡胶轴承衬层的弹性变形为<sup>[15]</sup>

$$\Delta h = -\frac{4}{\pi E'} \int \ln|x-\zeta| p(\zeta) d\zeta \quad (5)$$

式中： $\Delta h$  为衬层变形量； $p(\zeta)$  为水膜压力； $x-\zeta$  为压力作用点与弹性变形计算点之间的距离。

#### 3.3.2 水膜厚度方程

考虑粗糙度的水润滑轴承的水膜厚度包括轴承与转子间的间隙、非金属衬层材料的变形量及粗糙度。将表面粗糙度函数（1）式代入水膜厚度方程，可得到水润滑橡胶轴承无量纲化之后的方程为

$$H = 1 + \varepsilon_z \cos(\theta - \varphi_z) + \Delta H - S \quad (6)$$

式中： $\varepsilon$  为轴承的偏心率； $\Psi$  为周向角度； $\varphi$  为偏位角； $\Delta H$  为无量纲化的弹性变形量， $S$  为无量纲化的粗糙度函数。

### 3.4 平衡方程

水膜压力与载荷达到平衡时，水膜压力在  $x$  轴和  $y$  轴上的分力为  $W_x$  和  $W_y$ ，水膜承载力  $W$  为

$$\begin{cases} W_x = \int_0^{2\pi} L \int_0^L p \cos \theta r d\theta dz \\ W_y = \int_0^{2\pi} L \int_0^L p \sin \theta r d\theta dz \\ W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{cases} \quad (7)$$

## 4 数值计算方法及有效性分析

采用有限差分法离散方程(2)，将求解域沿轴向  $\lambda$  和周向  $\theta$  划分为  $n$  和  $m$  个等距区间，求解域定义为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ， $-1 \leq \lambda \leq 1$ ，计算网格的控制域为  $120 \times 120$  个等距的节点。利用半步长中心差分格式可求得水膜压力。图3为求解域的网格划分和差分格式示意图。

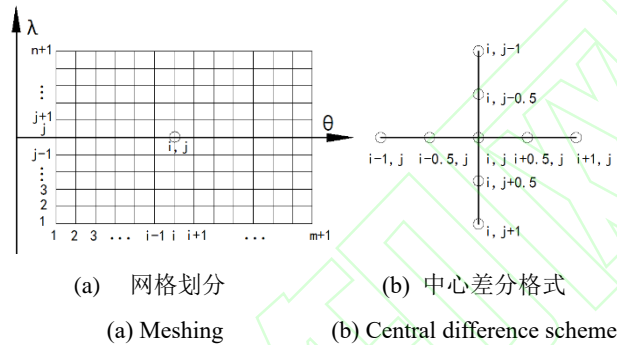


图3 网格划分和差分格式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of meshing and difference format

边界条件为自然破裂，由式(3)可求得各节点的  $P_{i,j}$ 。通过 MATLAB 编写相关分析程序，利用超松弛迭代方法提高计算的精度和效率，收敛精度均为 0.00001。

### 4.1 润滑模型的实验验证

采用与 Litwin 水润滑橡胶轴承试验相同的几何和工况参数，将本程序的计算结果与学者 Litwin<sup>[16]</sup>的试验结果进行比较分析，进行程序的有效性验证。图4所示为本润滑模型计算的水膜压力与 Litwin 试验获得的水膜压力沿轴向的变化曲线图。

由图4可以看出，本程序计算得到的平均水膜压力与实验获得的最大水膜压力误差在 6% 以内，沿轴向大约 80% 的区域为橡胶轴承的主要承压区。这证明本程序可以有效进行水润滑轴承润滑特性的分析。

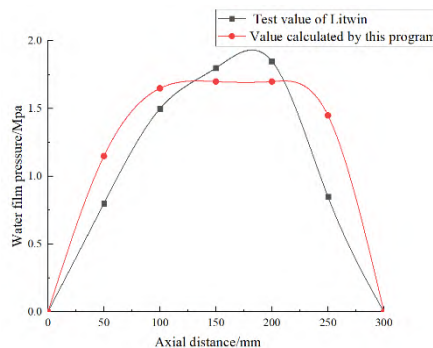


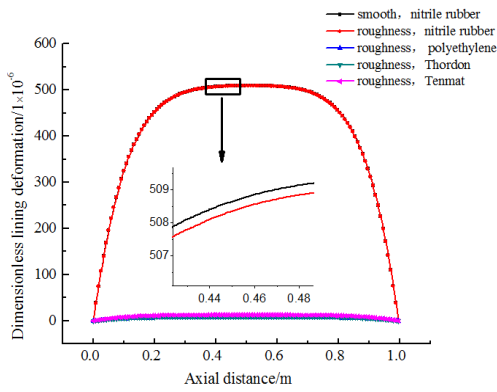
图4 本程序计算的水膜压力与 Litwin 的试验获得的水膜压力比较图

Fig. 4 The water film pressure comparison between the program calculated and Litwin's test

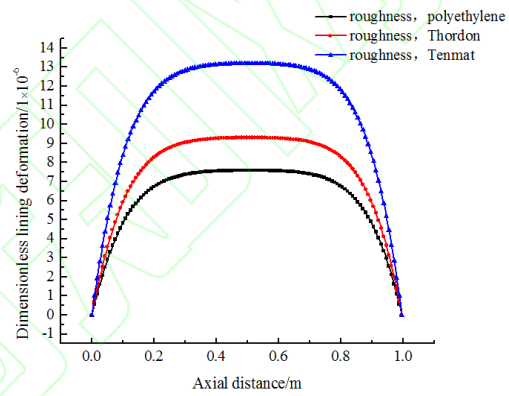
## 5 数值计算及结果分析

采用实验获得的实际表面粗糙度的幅值和波长，分析四种不同衬层材料下水润滑轴承的衬层变形，水膜厚度和水膜压力沿轴承周向和轴向的变化特点，探讨了不同转速下几种衬层材料的承载力和最大水膜压力变化规律；同时也比较分析了考虑粗糙度与表面光滑水润滑轴承的润滑特性。

### 5.1 衬层变形的变化规律



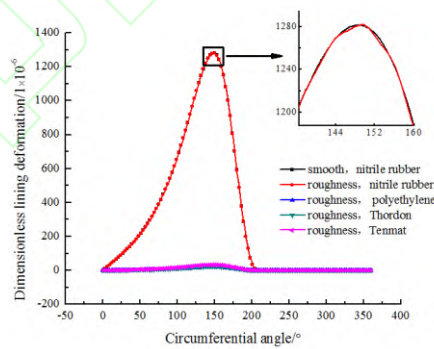
(a) 四种衬层材料沿轴向



(a) Four lining materials in the axial direction

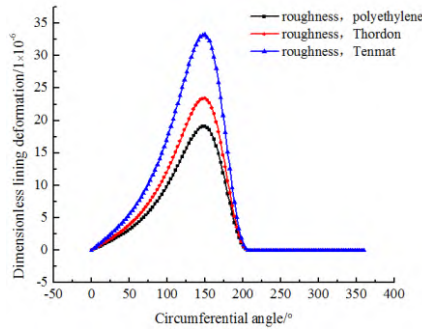
(b) 三种衬层材料沿轴向

(b) Three lining materials in the axial direction



(c) 四种衬层材料沿周向

(c) Four lining materials in the circumferential direction



(d) 三种衬层材料沿周向

(d) Three lining materials in the circumferential direction

图 5 无量纲衬层变形曲线

Fig. 5 Dimensionless lining deformation curves

对表面粗糙、转速  $n_s$  为 300r/min、偏心率  $\varepsilon$  为 0.6 时的丁腈橡胶，飞龙，赛龙及超高分子聚乙烯材料水润滑轴承进行数值计算，并与表面光滑的丁腈橡胶衬层材料进行对比。通过数值计算得到不同衬层材料的变形分布情况如图 5 所示。

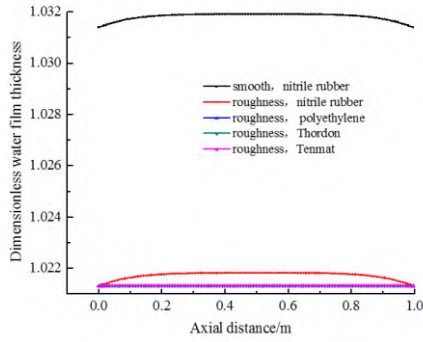
由图 5(a)和(b)可以看出，表面粗糙的四种衬层材料沿轴向的衬层变形分布均呈“簸箕形”，在进出口变形速率较快，在中部变形最大。分析图 5 (a)可知，表面粗糙时丁腈橡胶材料的轴向水膜厚度略小于表面光滑的丁腈橡胶，同时受到粗糙度的影响，表面粗糙丁腈橡胶的水膜厚度呈连续的小波状分布。综合分析图 5(a)和(b)可知，光滑丁腈橡胶材料的衬层变形最大，最大变形量约为  $500 \times 10^{-6}$ ，飞龙材料、赛龙材料和超高分子聚乙烯材料的衬层变形在同一数量级，均在  $0.5 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$  之间；四种衬层材料的变形量大小依次是丁腈橡胶 > 赛龙 > 飞龙 > 超高分子聚乙烯；由图 5(c)和(d)可以看出，表面粗糙的四种衬层材料沿周向的衬层变形呈“正弦波状”分布，且在周向角度为 140° 时到达最大，表面粗糙度使得衬层变形呈波状分布。分析图 5 (c)可以发现，表面粗糙度对最大衬层变形的影响不大。综合分析图 5(c)和(d)可知，丁腈橡胶衬层材料的变形最大，最大变形约为  $1300 \times 10^{-6}$ ，飞龙材料、赛龙材料和超高分子聚乙烯材料的变形在同一数量级，均在  $0.5 \times 10^{-6} \sim 0.035 \times 10^{-6}$  之间；四种材料的变形量大小依次是丁腈橡胶 > 赛龙 > 飞龙 > 超高分子聚乙烯。

## 5.2 水膜厚度分布

图 6 为表面光滑丁腈橡胶衬层材料和表面粗糙时，四种衬层材料沿轴向和周向的水膜厚度变化曲线图。

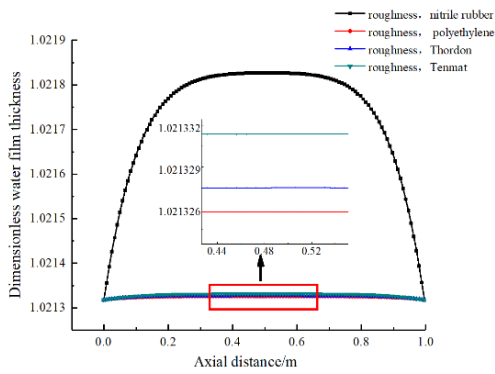
由图 6 (a)和(b)可以看出，表面粗糙的丁腈橡胶衬层材料，其水膜厚度明显小于表面光滑的丁腈橡胶材料；飞龙、赛龙、超高分子聚乙烯及丁腈橡胶的轴向水膜厚度分布沿轴向均呈“簸箕形”，且在进出口变化速率快，在中部水膜厚度较厚，这说明在水润滑轴承内可以形成完整的润滑水膜。综合分析图 6 (a)和(b)可知，表面光滑丁腈橡胶衬层材料的水膜厚度最大，飞龙材料、赛龙材料和超高分子聚乙烯材料的水膜厚度在同一数量级，它们沿轴向的最小水膜厚度大小是丁腈橡胶 > 赛龙 > 飞龙 > 超高分子聚乙烯。由图 6 (c)可看出，四种衬层材料的衬层变形沿周向均呈“正弦波”状分布，有粗糙度的衬层材料使得水膜厚度呈“锯齿状”分布。分析图 6 (c)可知，表面粗糙的丁腈橡胶衬层材料，其相对应的最小水膜厚度明显小于表面光滑的衬层材料，这说明粗糙度对最小水膜厚度有很明显的影响作用，它使得表面粗糙衬层材料的最小水膜厚度明显小于表面光滑的衬层材料。四种衬层材料沿周向的最小水膜厚度总体相差不大；其中赛龙材料、飞龙材料和聚四氟乙烯衬层材料的水膜厚度变化在同一数量级，丁腈橡胶材料的最小水膜厚度比其他三种衬层材料略大，这说明在相同的工作下，丁腈橡胶衬层材料比其他几种衬层材料能更好的保持润滑水膜的完整性。





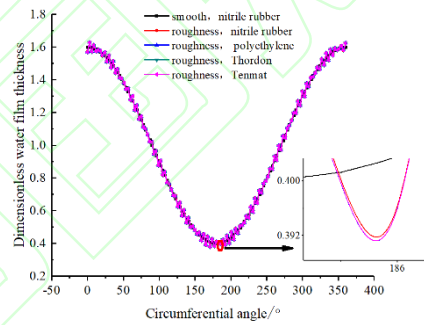
(a) 五种衬层材料沿轴向

(a) Five lining materials in the axial direction



(b) 四种衬层材料沿轴向

(b) Four lining materials in the axial direction



(c) 五种衬层材料沿周向

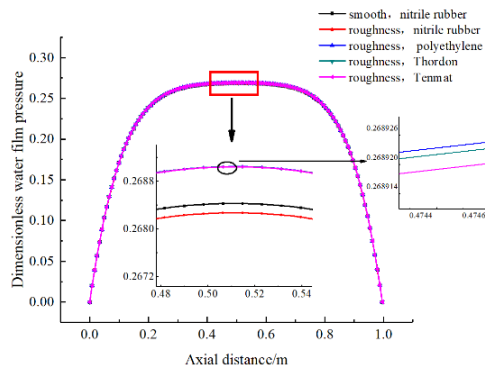
(c) Five lining materials in the circumferential direction

图 6 水膜厚度变化曲线

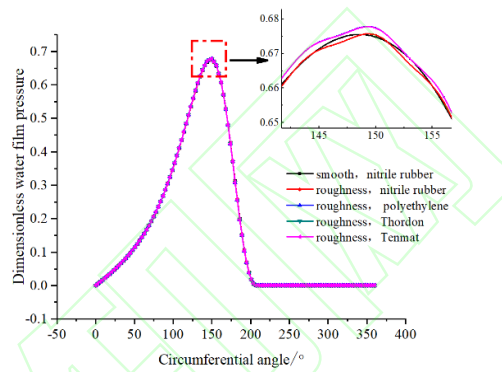
Fig. 6 The Variation curve of water film thickness

### 5.3 水膜压力分布

对表面粗糙，四种不同衬层材料下水润滑轴承的水膜压力进行了数值计算，并与表面光滑丁腈橡胶衬层材料的水膜压力进行了对比分析。图7为表面粗糙度幅值 $A$ 为 $4\mu\text{m}$ 、粗糙度波长 $l_s$ 为 $100\mu\text{m}$ 、转速 $n_s$ 为 $300\text{r/min}$ 、偏心率 $\varepsilon$ 为 $0.6$ 时，表面光滑和表面粗糙的丁腈橡胶材料、飞龙材料和、赛龙材料和超高分子聚乙烯材料沿轴向和周向的水膜压力变化曲线。



(a) 沿轴向



(a) In the axis direction

(b) 沿周向

(b) In the circumferential direction

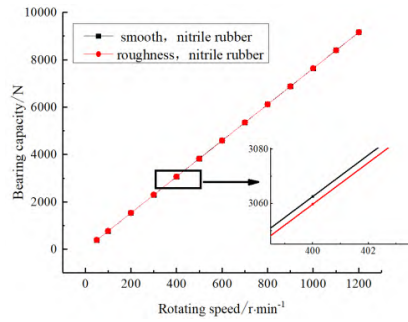
图 7 水膜压力变化曲线

Fig. 7 The Variation curve of water film pressure

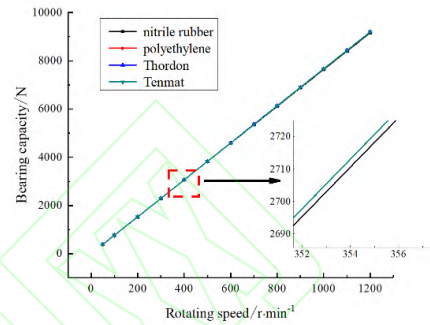
由图 7(a)和(b)可以看出，表面光滑和表面粗糙的丁腈橡胶材料、飞龙材料、赛龙材料和超高分子聚乙烯材料的水膜压力沿轴向均呈现开口“簸箕形”，沿周向呈现类似“正弦波”状分布。分析图 7(a)可知，橡胶衬层材料的水膜压力比其他三种衬层材料小，同时，表面粗糙丁腈橡胶的水膜压力小于表面光滑丁腈橡胶衬层材料的水膜压力。聚四氟乙烯材料、飞龙赛龙和赛龙材料的水膜压力基本处在同一数量级；且这四种衬层材料水膜压力的大小是超高分子聚乙烯 > 飞龙 > 赛龙 > 丁腈橡胶。分析图 7(b)可知，粗糙度使得几种衬层材料的水膜压力呈不规则的波状分布，超高分子聚乙烯材料、飞龙材料和赛龙材料的水膜压力基本处在同一数量级，且这几种衬层材料的水膜压力均大于丁腈橡胶衬层材料的水膜压力；同时表面粗糙的丁腈橡胶衬层材料，其水膜压力略小于表面光滑的丁腈橡胶衬层材料值。

#### 5.4 承载力和最大水膜压力随转速的变化

承载力和最大水膜压力是水润滑轴承性能优劣的重要指标。图 8 为表面粗糙，偏心率  $\varepsilon$  为 0.6，不同转速  $n_s$  下表面光滑和表面粗糙的丁腈橡胶材料、飞龙材料、赛龙材料及超高分子聚乙烯材料的承载力变化曲线图。



(a) 表面光滑和表面粗糙的丁腈橡胶材料



(a) Nitrile rubber material with smooth and rough surface

(b) 四种粗糙表面的衬层材料

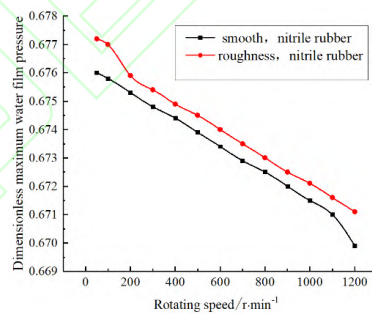
(b) Four lining materials with rough surface

图 8 承载力随转速的变化曲线

Fig. 8 The curve of bearing capacity with speed

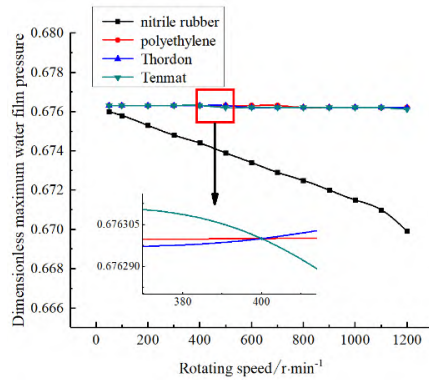
由图 8(a)和(b)可看出, 几种衬层材料下的承载力随转速  $n_s$  的增大呈线性增大的趋势。分析图 8(a)和(b)可知, 丁腈橡胶衬层材料的承载力最小, 且表面光滑的丁腈橡胶衬层材料比表面粗糙丁腈橡胶的承载力略大。飞龙材料、赛龙材料及超高分子聚乙烯材料的承载力大小在同一数量级。

图 9 为表面粗糙, 偏心率  $\varepsilon$  为 0.6, 不同转速下表面光滑和粗糙的丁腈橡胶材料、飞龙材料、赛龙材料及超高分子聚乙烯材料的最大水膜压力变化曲线图。



(a) 光滑表面和粗糙表面

(a) Smooth surface and rough surface



(b) 四种衬层材料

(b) Four lining materials

图 9 最大水膜压力随转速的变化曲线

Fig. 9 The curve of maximum water film pressure with speed

由图 9 可见，丁腈橡胶衬层材料的最大膜压随转速  $n_s$  的增大呈近似线性分布。表面光滑丁腈橡胶衬层材料的最大水膜压力小于表面粗糙的丁腈橡胶衬层材料。这是由于表面粗糙度会使得水润滑轴承的水膜压力出现一些局部的微小压力峰值。分析图 9(b)可知，飞龙材料、赛龙材料及超高分子聚乙烯材料的最大水膜压力值随着转速的增变化较小，且处在同一数量级；而丁腈橡胶材料的最大水膜压力随转速  $n_s$  的增大逐渐近似线性减小，这是由于橡胶材料本身是高弹体决定的。

## 6 结论

首先建立了考虑粗糙度幅值和波长，几种不同衬层材料共同作用的水润滑轴承的润滑模型；然后利用混合流润滑模型，研究了表面粗糙度和不同衬层材料共同作用下水润滑轴承的润滑特性，并与表面光滑的水润滑轴承进行了对比分析。通过研究发现：

(1) 表面粗糙度使得水润滑轴承的衬层变形呈轻微波状分布，衬层变形减小。水膜厚度呈“锯齿状”分布，最小水膜厚度变薄。水膜压力有轻微的局部压力突变，最大水膜压力增大，承载力下降。因此，在进行轴承设计加工时，粗糙度的影响不可忽略；

(2) 在相同工况下，丁腈橡胶衬层材料比其它三种衬层材料相对容易的形成润滑水膜，而超高分子聚乙烯衬层材料可以保证系统承受较大的承载力；

(3) 四种衬层材料下的最小水膜厚度大小是丁腈橡胶 > 赛龙 > 飞龙 > 超高分子聚乙烯，最大水膜压力的大小是超高分子聚乙烯 > 飞龙 > 赛龙 > 丁腈橡胶；超高分子聚乙烯、飞龙和赛龙的承载力在同一数量级，且明显大于丁腈橡胶的承载力；丁腈橡胶材料的最大水膜压力随转速的增加而减小。

上述研究对水润滑轴承的材料选型，结构设计，加工，装配有一定的参考意义，也可为后续分析水润滑橡胶轴承的动力学特性提供理论依据。

## 参考文献

- [1]Goglia P R, Conry T F, Cusano C. The effects of surface irregularities on the elastohydrodynamic lubrication of sliding line contacts: Part I: Single Irregularities[J]. Journal of Tribology,1984, 106( 1) : 104—112.
- [2]Zhu D, Cheng H. Effect of surface roughness on the point contact EHL [J]. Journal of Tribology, 1988,110(1) : 32—37.
- [3]Naduvinamani N. B, Siddangouda A. Effect of surface roughness on the hydrodynamic lubrication of porous step-slider bearings with couple stress fluids[J]. Tribology International, 2007, 40: 780—793.
- [4]Naduvinamani N. B, Syeda T.F, Hiremath P.S. Hydrodynamic lubrication of rough slider bearings with couple stress [J]. Tribology International, 2003, 36: 949—959.

- [5]王优强,董宁,刘前等.考虑固体颗粒和粗糙度的水润滑飞龙轴承热弹流润滑性能分析[J].机械工程学报,2017,53(3): 121-129.  
Wang Y Q, Dong N, Liu Q, et al. Thermal Elastohydrodynamic lubrication property analysis of water-lubricated tenmat bearing considering debris and surface roughnes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 121-129.
- [6]Lin J R, Hung T C, Chou T L, et al. Effects of surface roughness and non-Newtonian micropolar fluids on dynamic characteristics of wide plane slider bearings[J].Tribology International,2013,66(7):150-156.
- [7]王家序,陈战,秦大同. 水润滑塑料轴承的摩擦性能研究[J]. 机械工程材料, 2002, (11): 36-38.  
Wang J X, Chen Z, Qin D T, Friction and wear characteristics of bearings under water lubrication[J]. Materials for Mechanical Engineering,2002(11):36-38.
- [8] Wang J Z, Yan F Y and Xue Q J. Tribological behaviors of some polymeric materials in sea water[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(24): 4541-48.
- [9]杜媛英,李明.考虑轴颈倾斜和表面粗糙度的水润滑橡胶轴承弹流润滑分析[J].船舶力学,2020,24(4):465-473.  
Du Y, Li M. Analysis of elasto-hydrodynamic lubrication of water-lubricated rubber bearings with journal tilting and surface roughness[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(4): 465-473.
- [10] Du Y Y, Li M. Effects on lubrication characteristics of water-lubricated rubber bearings with journal tilting and surface roughness[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234 (2): 161-171.
- [11]杜媛英,李明.几种不同衬层材料水润滑轴承的润滑特性分析[J].润滑与密封,2018,43(12):52-56+62.  
Du Y, Li M. Lubrication characteristics analysis of several water-lubricated bearings with different lining materials[J]. Lubrication Engineering, 2018,43(12):52-56+62.
- [12]崔旨桃,郭智威,谢心等.尼龙自润滑性与表面织构协同作用对 HDPE 基水润滑轴承摩擦磨损性能的影响[J].摩擦学学报,2019,39(4):407-417.  
Cui Z T, Guo Z W, Xie X. et al. The synergistic effect mechanism of PA66 self-lubrication property and surface texture on tribological performance of HDPE water-lubricated bearing[J]. Tribology, 2019,39(4):407-417.
- [13]王亚兵,刘洋洋,王报龙,祝长生,袁小阳.轴颈倾斜的水润滑橡胶轴承的静态特性[J].西安交通大学学报,2020,54(5): 61-69.  
Wang Y B, Liu Y Y, Wang B L. et al. Static characteristics of water lubricated rubber stern bearings with misaligned journal[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020,54(5): 61-69.
- [14] 温诗铸, 杨沛然.弹性流体动力润滑. 北京:清华大学出版社,1992.  
Wen S Z, Y P R. Elastohydrodynamic lubrication[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [15]徐芝纶, 弹性力学 [M].高等教育出版社, 2015.  
Xu Z L, Elasticity. [M].Higher education press, 2015.
- [16] LITWIN W. Experimental research on water lubricated three layer sliding bearing with lubrication grooves in the upper part of the bush and its comparison with a rubber bearing[J]. Tribology International, 2015, 82: 153-161.