表面摩擦磨损与润滑

织构型水润滑轴承动压叠加承载及微动压效应分析

李强[a]，王玉君[a]，张硕[a]，许伟伟[b]，王振波[a]

（中国石油大学（华东） a.化学工程学院，b.储运与建筑工程学院，山东 青岛 266580）

摘 要：目的 提高水润滑轴承承载力，探究织构型水润滑轴承的承载机理。**方法** 采用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法建立三维织构型水润滑滑动轴承和二维织构型平行接触副模型，分别从宏观和微观角度对表面微织构承载机理进行研究。**结果** 宏观角度上，在保证织构结构参数不变时，随着织构分布由液膜最高压力区下游向上游移动，水润滑轴承承载力呈现出先上升后下降的趋势，织构处产生微动压现象，逐渐上升的压力脉动趋势使轴承承载力上升，但原动压区逐渐变成以织构为中心的点状区域，使得承载区面积下降。微观角度上，随着织构向入口方向移动，压力分布整体向左移动，当 Re>1 时，随着惯性效应的增强，压力分布整体上移，考虑空化效应时，织构处压力降低被限制。**结论** 宏观角度上，微动压效应与原动压效应之间的非同向叠加效应决定了织构型水润滑滑动轴承的承载能力，表现为以液膜最高压力区为分界，织构区域位于其上游时，轴承承载力上升，反之，承载力下降。微观角度上，织构的微动压效应主要通过入口卷吸效应、空化作用以及惯性作用产生。

关键词：水润滑轴承；表面织构；计算流体力学；空化；微动压；承载力

中图分类号：TH133 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)05-0180-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.027

Investigation on Hydrodynamic Superposition Loading Mechanism and Micro-hydrodynamic Effect of Textured Water-lubricated Bearings

***LI Qiang*[a], *WANG Yu-jun*[a], *ZHANG Shuo*[a], *XU Wei-wei*[b], *WANG Zhen-bo*[a]**

(a.School of Chemical Engineering, b.School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the loading capacity of the water-lubricated bearing and explore the bearing mechanism of textured water-lubricated bearings. The three-dimensional textured water-lubricated journal bearing and the two-dimensional textured parallel contact model were established respectively by Computational Fluid Dynamics (CFD) to analyze the surface micro-textured bearing mechanism from the macro and micro perspectives. From the macroscopic view, the loading capacity increased firstly and then decreased as the textures zone moved to the downstream from upstream when the structure parameters

收稿日期：2018-08-13；修订日期：2018-10-22

Received：2018-08-13；**Revised**：2018-10-22

基金项目：国家自然科学基金（51506225）；山东省重点研发计划（2018GHY115018）；中央高校基本科研业务费专项（18CX02129A）；中国石油大学（华东）研究生创新工程（YCX2019040，YCX2018030）

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China (51506225), the Key Research and Development Program of Shandong, China (2018GHY115018), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (18CX02129A), the Graduate Student Innovation Project, China University of Petroleum (East China) (YCX2019040, YCX2018030).

作者简介：李强（1984—），男，博士，副教授，主要研究方向为流体动压润滑与表面织构。邮箱：liqiangsydx@163.com

Biography：LI Qiang (1984—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: hydrodynamic lubrication and surface texture. E-mail: liqiangsydx@163.com

kept unchanged. The micro-hydrodynamic effect occurred because of the textures, resulting in an upward pressure pulsation trend which improved the loading capacity. However, the primary pressure region gradually became a dotted area with the textures as centers, thus resulting in the decrease of the bearing area. From the microscopic view, as the texture moved toward the inlet, the pressure distribution moved to the left as a whole. When *Re*> 1, the pressure distribution moved upward as a whole with the increase of inertia effect, and the pressure reduction at the texture was limited when the cavitation effect was considered. From the macro view, the non-homodromous hydrodynamic superposition action between the micro-hydrodynamic effect and the primary pressure effect determines the loading capacity of the textured water-lubricated journal bearing. The high pressure area of the original liquid film is used as the boundary. When the texture area is in the upstream, the bearing capacity rises and on the contrary declines. From the micro view, the micro-hydrodynamic pressure effect is caused by the surface micro-texture mainly through the inlet suction effect, cavitation effect and inertia effect.

KEY WORDS: water-lubricated bearings; textures; Computational Fluid Dynamics (CFD); cavitation; micro-hydrodynamic effect; loading capacity

海洋装备动力定位系统被《中国制造 2025》列为大型海上作业装备的关键核心技术之一，水润滑轴承作为该系统的重要零件，改变了长期以来以金属构件组成摩擦副，以矿物油作为润滑介质的现状，从而有效避免了因矿物油密封泄漏而造成海洋环境严重污染的状况。同时水润滑轴承具有来源广泛、经济性强、节能环保等特点[1-3]，因此被广泛应用于半潜式海洋钻井平台、LNG 船、潜艇等大型海洋装备[4-6]。我国水润滑轴承研究起步较晚，设计方法不完善[7]，其中承载力是水润滑轴承设计的基本参数，因此正确理解水润滑轴承承载机理，具有重要的科学意义和工程使用价值。

为了减小水中砂砾等磨屑对滑动轴承的磨损，传统方法是在水润滑轴承表面加工导水槽以容纳磨屑[8-9]。与润滑油相比，低黏度的介质水会导致轴承承载力下降，而凹槽结构的存在会进一步影响轴承的承载能力[7,10]，使得在低速重载下轴与轴承之间不能形成有效液膜。为此，表面织构技术（简称为织构技术）被引入水润滑轴承，通过在轴瓦内表面引入特殊的表面结构（如分散的凹坑等），可以有效容纳磨屑，并提高轴承承载力[11-15]，能够适应转子-滑动轴承系统中轴颈倾斜、启停阶段、低速重载等条件下导致的轴与轴瓦的短时接触。这对于控制滑动轴承润滑失效，延长其使用寿命具有重要意义，因此织构型水润滑轴承在机械装置，尤其是船舶推进系统中，具有广阔的应用前景。

目前，大部分学者仍然致力于通过求解 Reynolds 方程来研究织构对于润滑性能的影响[14-15]，但是织构的存在会加强惯性效应，从而导致基于 Reynolds 方程的求解方法精度降低[16-19]。 随着流体分析理论和计算机技术的快速发展，国内外许多学者开始通过 CFD 技术直接求解 Navier-Stokes（N-S）方程对织构型轴承的润滑性能进行深入研究。Cupillard 等[20]研究了半球形微织构对无限长滑动轴承承载能力的影响。李以农等[21]分析了矩形织构的尺寸和位置对滑动轴承性能的影响。秦洁等[22]计算了不同转速和偏心率下，微造型对油润滑轴承的压力、承载能力、摩擦力和摩擦系数的影响。上述文献主要是针对织构参数对于滑动轴承的影响开展了分析，但是关于织构在低黏度润滑介质下的应用，尤其是对于其承载机理的研究鲜有涉及。

文中首先在水润滑轴承表面引入织构，建立了三维织构型水润滑轴承的 CFD 模型。宏观上分析了织构对承载力的影响，提出了织构微动压效应与原动压效应之间的非同向叠加效应共同决定了其对与水润滑轴承承载力的影响。进一步建立了二维织构型平行接触副 CFD 模型，分析微动压效应产生的原因。通过对织构型水润滑轴承宏观和微观承载机理的研究，为织构型水润滑轴承的自主设计和工程应用提供了依据。

1　控制方程

1.1　基本流动控制方程

考虑到水润滑轴承黏性产热较少，故忽略温度效应，并将水作为不可压缩流体处理。基本流动控制方程包括连续性方程和动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{m}})+\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}})=0 \tag{1}$$

式中：ρ_{m} 为气液两相的混合密度；$\vec{v}_{\mathrm{m}}$ 为流体平均质量速度。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}})+\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}})=\nabla\cdot\left[\mu_{\mathrm{m}}(\nabla\vec{v}_{\mathrm{m}}+\nabla\vec{v}_{\mathrm{m}}{}^{T})\right]-\nabla p+S_{\vec{v}} \tag{2}$$

式中：μ_m 为气液两相动力粘度；p 为流体微元体上的压力；$S_{\vec{v}}$ 为动量源项。

1.2　空化模型

由于转子偏心运动导致发散楔出现，进而引起发

散楔处产生空化现象[2]。文中采用 Singhal 模型描述该现象，其中，液相水与气相水之间的质量传递由式（3）计算：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_{\mathrm{m}} f\right)+\nabla\left(\rho_{\mathrm{m}} \vec{v}_{\mathrm{m}} f\right)=\nabla\left(\mu_{\mathrm{m}} \nabla f\right)+R_{\mathrm{e}}-R_{\mathrm{c}} \tag{3}$$

式中：f 是气相水的质量分数；R_{e} 和 R_{c} 分别为气相水产生和溶解的速率，由式（4）计算。

$$\begin{cases} R_{\mathrm{e}}=C_{\mathrm{e}} \dfrac{V_{\mathrm{ch}}}{\sigma} \rho_{\mathrm{l}} \rho_{\mathrm{v}} \sqrt{\dfrac{2\left(p_{\mathrm{sat}}-p\right)}{3 \rho_{\mathrm{l}}}}(1-f) & p<p_{\mathrm{sat}} \\ R_{\mathrm{c}}=C_{\mathrm{c}} \dfrac{V_{\mathrm{ch}}}{\sigma} \rho_{\mathrm{l}} \rho_{\mathrm{v}} \sqrt{\dfrac{2\left(p-p_{\mathrm{sat}}\right)}{3 \rho_{\mathrm{l}}}} f & p>p_{\mathrm{sat}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：V_{ch} 为特征速度；σ 为液体表面张力系数；p_{sat} 为给定温度下的饱和蒸汽压；C_{e} 和 C_{c} 为常数，一般取 C_{e}=0.02，C_{c}=0.01；下标 l 和 v 分别代表液相水和气相水。

2　计算模型及有效性验证

2.1　计算模型

三维织构型水润滑轴承模型如图 1 所示。以圆柱形径向滑动轴承为基础，润滑介质由一端进入轴承间隙内，另一端流出。文献[24]指出，方形织构的润滑性能优于其他织构形状。因此本文织构横截面以方形为例，边长为 6 mm，深度为 0.06 mm，周向排布 5 个，轴向排布 7 个，织构间周向角度为 10°，轴向距离为 6 mm。经计算，选取层流模型，设置轴颈为旋转壁面，进出口设置为压力进出口，压力值为 0。

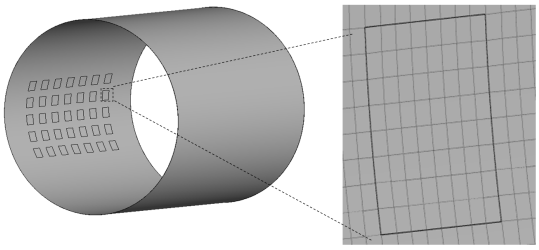
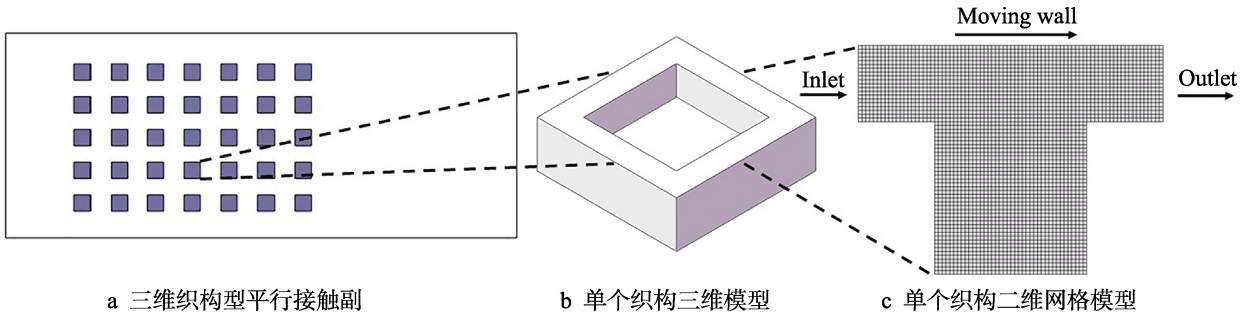


图 1　三维织构型水润滑轴承结构与织构处网格

Fig.1 Structure of 3D textured water-lubricated bearing and mesh of textures

二维织构型平行接触副模型如图 2 所示。上壁面以速度 v 由左至右滑动，同时采用无滑移边界条件，左右进出口采用周期性边界条件，其余壁面为固定边界条件。



a 三维织构型平行接触副　　b 单个织构三维模型　　c 单个织构二维网格模型

图 2　单个织构物理模型及网格模型

Fig.2 Physical model and mesh model of single texture: a) Three-dimensional woven configuration of parallel contact pair; b) Three-dimensional model of single texture; c) Two-dimensional mesh model of single texture

2.2　离散方法及有效性验证

在离散控制方程过程中，为了规避网格高宽比过大带来的影响，采用双精度求解器。压力速度耦合算法选用 SIMPLE 算法，压力差分格式选择 linear 格式。当连续性方程残差降至 10^{-4}，同时进出口流量稳定且基本相等之后，认为计算收敛。主要轴承参数见表 1。

为验证求解方法的有效性，以参考文献[2,23]中的轴承和工况条件分别进行建模，采用前述网格划分和求解方法进行离散和求解，并与文献结果进行对比。数值模拟对比结果如图 3 所示，试验对比结果见表 2，可以看出，本文求解结果与文献中数值计算和试验结果均具有较好地一致性。

表 1　计算参数

Tab.1 Calculation parameters

Parameter types	Specific items	Parameter value
Structural parameters	Length of journal bearing L/mm	100
	Inner diameter of journal bearing D/mm	100.04
	Clearance of journal bearing c/mm	0.02
Media parameters	Density of liquid water ρ_{l}/(kg·m^{-3})	998.2
	Viscosity of liquid water μ_{l}/(Pa·s)	1×10^{-3}
	Density of vapor phase ρ_{g}/(kg·m^{-3})	0.5542
	Viscosity of vapor phase ρ_{l}/(Pa·s)	1.34×10^{-5}
	Saturation vapor pressure ρ_{v}/Pa	3540
Operating parameters	Eccentricity e	0.5
	Rotational speed N/(r·min^{-1})	1500

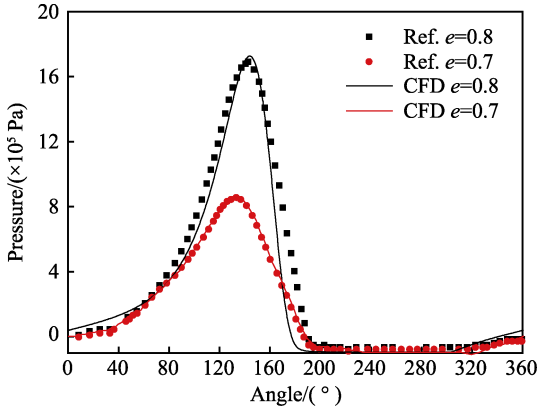


图 3　压力分布对比曲线
Fig.3 Pressure distribution contrast curve

表 2　承载力试验验证对比
Tab.2 Experimental verification of loading capacity

N/(r·min^{-1})	h_1/μm	h_2/μm	Loading capacity/N		Error/%
			CFD	Exp.	
2500	54.86	16.99	3209.39	3210	0.02
3000	53.00	17.95	3209.64	3210	0.01
3500	51.39	18.88	3230.81	3210	0.60

3　织构模型的宏观承载机理研究

为了研究织构对水润滑滑动轴承承载力的影响，本文在保证织构结构、密度相同的情况下，建立了不同织构位置模型，比较了不同织构位置下轴承承载力的变化。织构区域角度均为 40°，沿逆时针方向每隔 10°分别标记为 I—VII，区域 I 位置如图 4 所示。不同织构位置对应的轴承承载力变化曲线如图 5 所示，可以看出，织构的存在会对轴承承载力产生不同的影响。随着织构区域向转子运动方向移动，承载力呈现出先升高后降低的趋势。

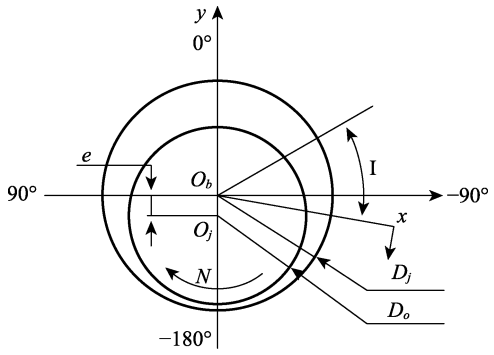


图 4　织构位置
Fig.4 Textured position

光滑型轴承全周压力分布和气相水体积分数变化曲线如图 6 所示，可以看出，其主要承载区即正压区为−160°~−20°。主要承载区的压力分布及气相水体积分数变化曲线如图 7 所示，图中矩形框表示不同织构区域位置，考虑到织构区域布置在−60°~−20°时对于承载力的贡献较小，故而没有在文中呈现。图 8 给出了不同织构位置时的润滑液膜中心截面压力分布曲线及气相水体积分数变化曲线图（I 区域的压力分布与气相水体积分数变化与 II 区域相似，故 I 区域文中没有呈现），为了更直观地表示织构区域与高压区的位置关系，图 8 中两竖线位置表示织构区域的中心位置。由图 8 可以看出，与光滑型轴承相比，润滑介

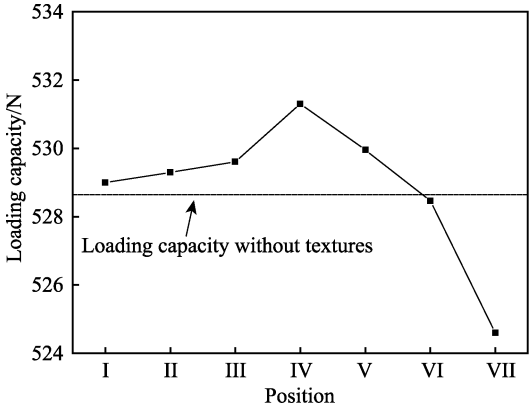


图 5　不同织构位置承载力变化曲线
Fig.5 Change curves of loading capacity under different texture locations

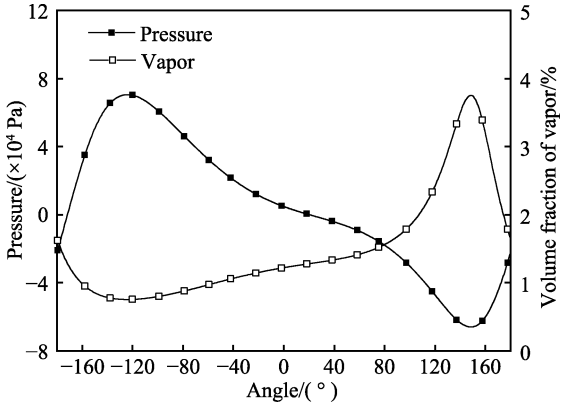


图 6　光滑型轴承全周压力和气相水分布曲线
Fig.6 Pressure and vapor distribution curve of smooth bearing

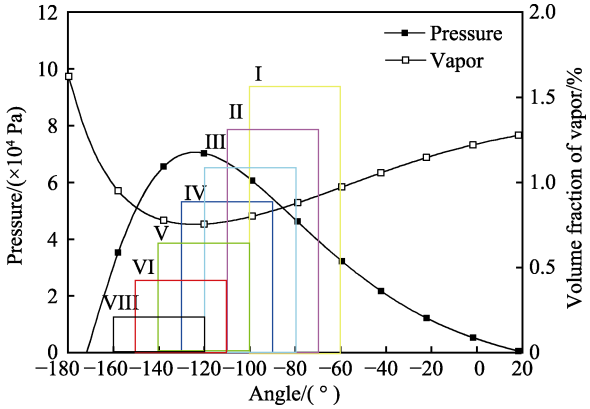


图 7　主要承载区压力分布及气相水分布曲线
Fig.7 Pressure and vapor distribution curve of main bearing area

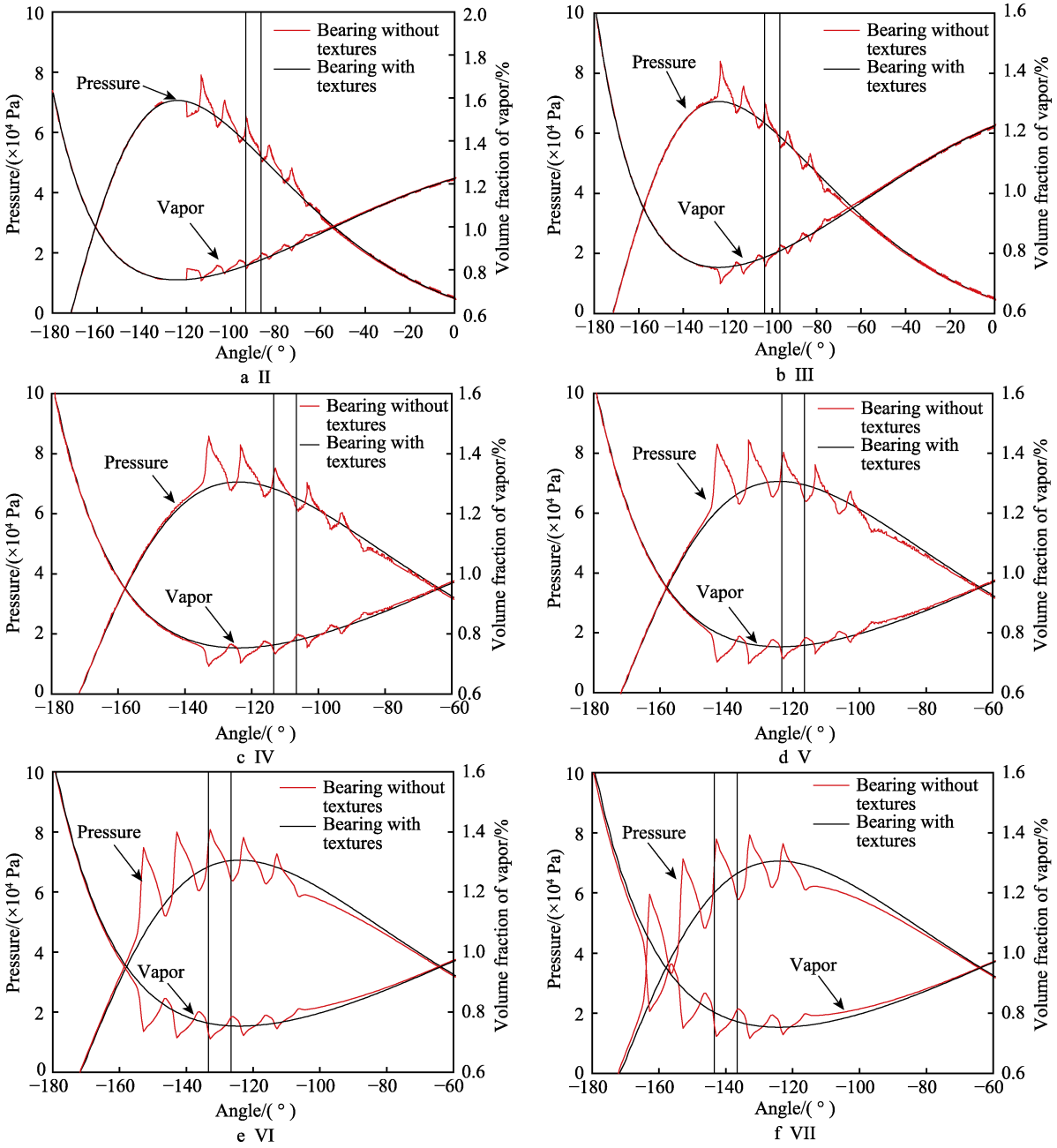


图 8　织构位置对承载力的影响

Fig.8 Effect of textured position on loading capacity

质每经过一次织构，液膜压力就会产生一次脉动。这是由于在织构处储存有润滑介质，与转子之间构成楔形间隙，形成了微动压效应。同时随着织构位置的变化，脉动幅度和脉动趋势随之改变，而压力脉动整体呈现出逐渐上升的趋势，进而导致承载力的提升。

尽管压力脉动使得轴承承载力上升，但由轴颈处的压力分布云图（见图 9）可以看出，织构的存在对轴承主要承载区产生了明显的破坏作用。从 I 区域过渡至 IV 区域的过程中，随着织构区域靠近轴承最高压力区，微动压效应增强，主要承载区最高压力上升。从 IV 区域逐渐过渡至 VII 区域的过程中，随着织构区域由最高压力区上游过渡至下游，承载区最高压力下降，但始终高于光滑型轴承。随着织构区域逐渐过渡至承载区下游，原有连续的动压区域逐渐减小，变成以织构为中心的点状区域，使得承载区面积下降，进而导致轴承承载力的下降。

织构的存在一方面产生压力脉动，即微动压效应提高了最高压力，进而提高轴承承载力；但另一方面，织构的存在又会破坏水润滑滑动轴承主要承载区面积，降低轴承承载力。微动压效应与原动压效应之间的非同向叠加效应决定了织构型水润滑滑动轴承的承载能力，表现为以液膜最高压力区为分界。当织构处于该区域的上游时，微动压效应占主导作用，轴承承载力上升；当织构处于高压区下游时，织构对轴承

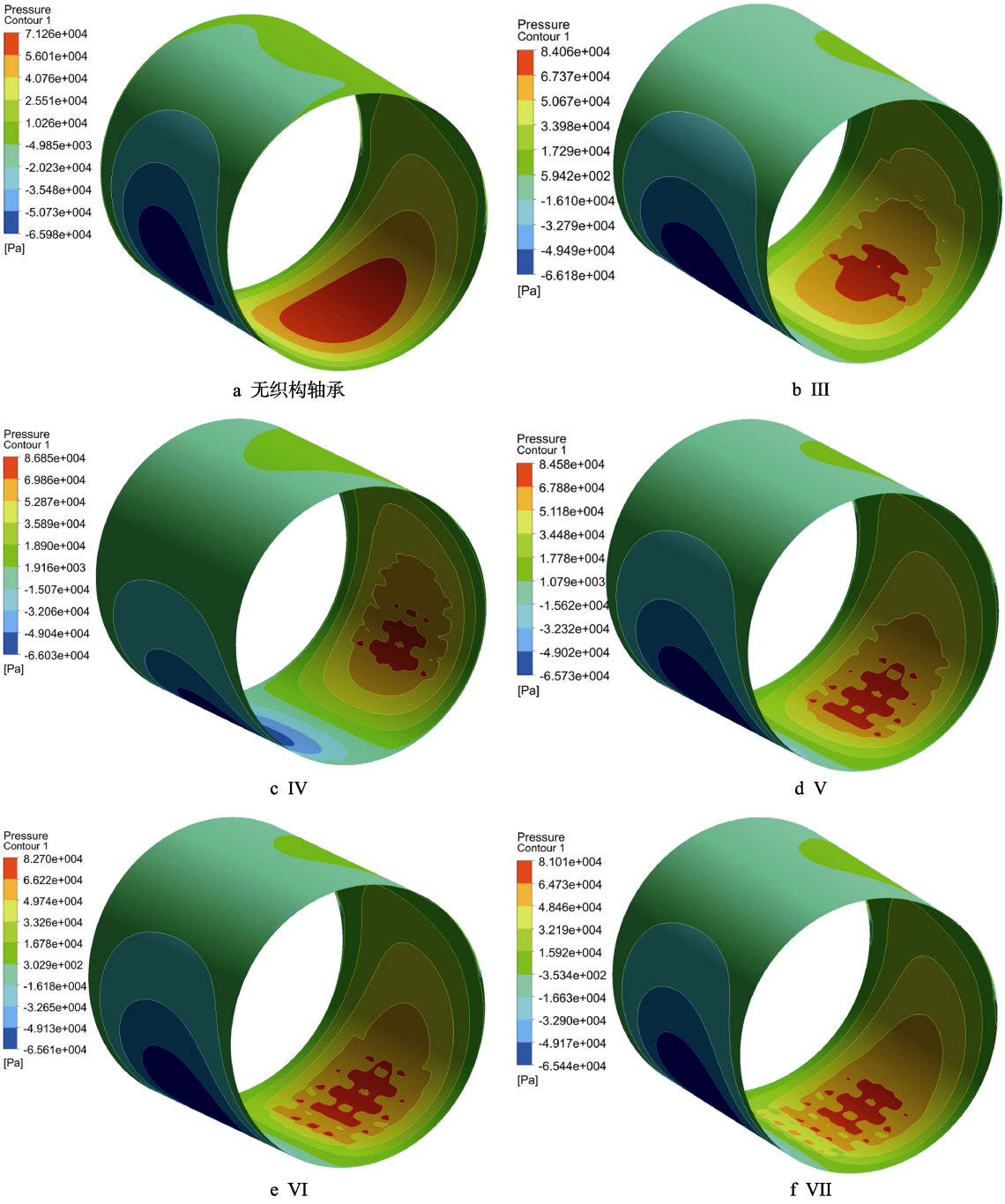


图 9　不同织构位置下压力分布云图

Fig.9 Pressure distribution cloud under different textured positions (Fig.a Bearing without texture)

原有高压区的破坏效应占主导作用，使得轴承承载力下降，甚至低于光滑型轴承。

表 3 给出了不同织构位置时轴承摩擦力的变化，可以看出，织构型轴承的摩擦力始终低于光滑型轴承，但摩擦力对于织构位置的变化不敏感。因此，对于织构型水润滑滑动轴承的优化设计，主要是以提升承载力为目标。

表 3　不同织构位置下水润滑轴承摩擦力

Tab.3 Friction force of water lubricated bearings under different textured positions

Textured position	Without textures	I	II	III	IV	V
Friction/N	0.383	0.352	0.362	0.355	0.359	0.356

4　织构模型的微观承载机理研究

第 3 节宏观分析了织构对水润滑滑动轴承承载性能的影响，发现织构处产生的微动压效应可以提高轴承最高压力，进而提升轴承承载力。为了更深入地研究微动压的产生机理，以单个织构为研究对象，计算了不同工况下织构处的压力分布。

前述分析已经表明，不同织构位置产生的微动压效果不同。为了分析织构位置对压力分布的影响，图 10 给出了压力分布曲线与织构位置之间的关系。可以看出，由于入口卷吸效应的存在，随着织构区域向入口方向移动，上运动壁面压力呈现出明显左上移的趋势，正压区面积逐渐增大，产生承载力；随着织构区向出口方向移动，正压区面积逐渐减小，轴承承载力随之下降。同时，由图 8 中气相水体积分数变化曲线可以看出，织构的存在对润滑介质的空化产生影响，微动压的产生总是伴随空化出现，在液膜压力升高处，空化效应减小，压力降低处，空化效应加剧。为此，图 11 给出了考虑空化效应和不考虑空化效应时上壁面压力分布曲线。当不考虑空化效应时，上运动壁面压力呈现出明显的反对称分布，正压区与负压区面积基本相同，因此上表面承载力近似为 0；考虑空化效应时，当织构入口低压区降到空化压力后，压力降低受到限制，正压区面积大于负压区。

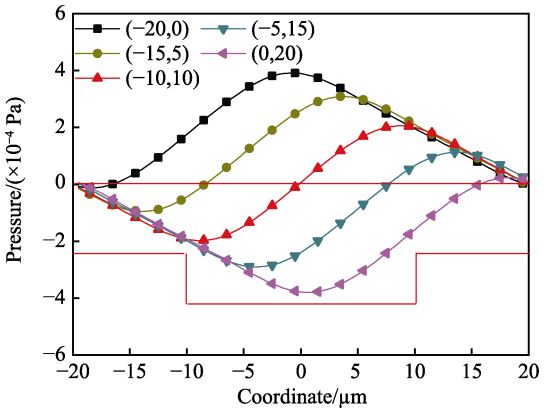


图 10　入口卷吸效应产生微动压

Fig.10 Entrance step effect generating micro-hydrodynamic effect

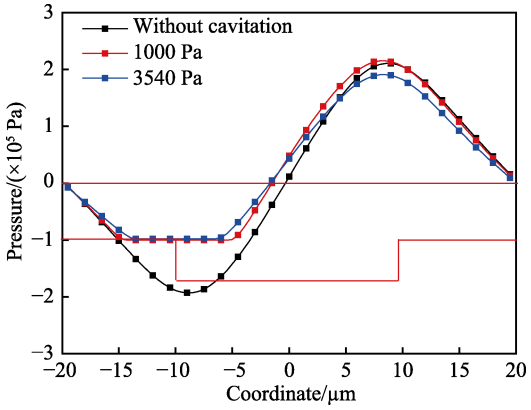


图 11　空化效应产生微动压

Fig.11 Cavitation effect generating micro-hydrodynamic effect

以水作为润滑介质时，运动学黏度相对油润滑减小，且伴随着转速的升高，将会引起惯性效应的加强。由图 12 可以看出，当 $Re \leqslant 1$ 时，随着 Re 的增加，惯性效应对上运动壁面压力分布的影响较小，压力仍然呈现出明显的反对称分布，上壁面承载力几乎为 0；当 $Re \geqslant 1$ 时，随着 Re 逐渐增加，压力分布明显上移，正压区面积逐渐增大，负压区面积逐渐减小，产生承载力。

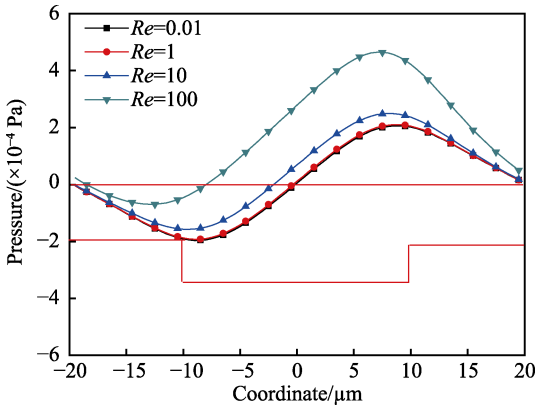


图 12　惯性效应产生微动压

Fig.12 Inertial effect generating micro-hydrodynamic effect

综合分析可得：当在水润滑介质入口处引入织构，间隙结构呈现出阶梯状，因此可以起到类似 Rayleigh 阶梯型轴承的效果，进而产生微动压效应。织构处间隙结构的突然扩大，导致空化出现，空化产生的气相快速充满负压区，抑制了压力的进一步下降，产生微动压效应，正压区面积大于负压区，承载力提高。伴随 Re 的增加，水被运动壁面快速携带而撞击到突然缩小的间隙结构上，导致压力分布整体往右上方移动，引起微动压的产生。进而织构通过产生微动压提高水润滑轴承的承载能力，如图 13 所示。因此在进行织构型水润滑轴承设计时，应将织构区域布置在水润滑轴承高压区上游，以提高轴承承载力。另外，织构型水润滑轴承更适合于重载或高转速工况，以充分发挥织构的空化效应和惯性效应。考虑到惯性效应的存在，织构型水润滑轴承可适当选择较大的轴承间隙。

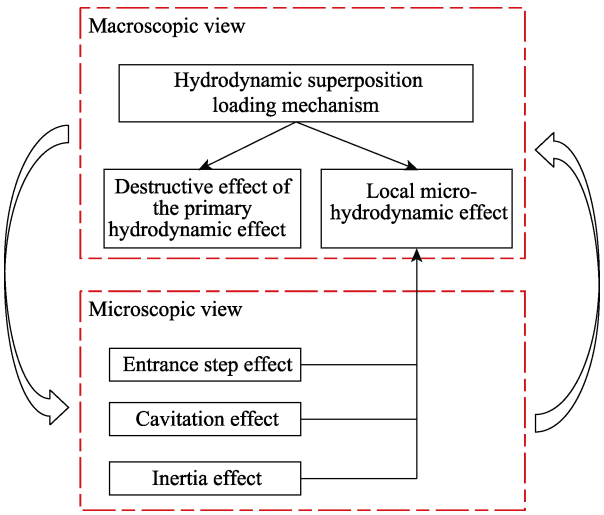


图 13　织构型水润滑轴承承载机理

Fig.13 Bearing mechanism of textured water-lubricated bearings

5　结论

1）建立了三维织构型水润滑滑动轴承和二维织构型平行接触副的 CFD 模型，采用 Singhal 空化模型描述润滑介质的空化，并与文献结果进行对比，具有较好的一致性。

2）基于三维织构型水润滑轴承模型，对织构承载机理进行宏观分析。发现微动压效应与原动压效应之间的非同向叠加效应决定了织构型水润滑滑动轴承的承载能力，表现为以液膜最高压力区为分界，织构区域位于其上游时，轴承承载力上升，反之，承载力下降。

3）基于二维织构型平行接触副对织构处微动压效应进行微观分析。发现织构的微动压效应主要通过入口卷吸效应、空化作用以及惯性作用产生。

参考文献：

[1] WANG X, KATO K, ADACHI K, et al. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water[J]. Tribology international, 2003, 36(3): 189-197.

[2] GAO G, YIN Z, JIANG D, et al. Numerical analysis of plain journal bearing under hydrodynamic lubrication by water[J]. Tribology international, 2014, 75(75): 31-38.

[3] 郭力. 水润滑轴承研究的进展[J]. 精密制造与自动化, 2007(1): 6-9.
GUO Li. Progress of research on water lubricated bearings[J]. Precise manufacturing & automation, 2007(1): 6-9.

[4] ZOU L, LIU Z, HUANG L. Influence of stern shaft inclination on the cooling performance of water-lubricated bearing[J]. China shiprepair, 2016, 29(5): 27-31.

[5] YE X, WANG J, ZHANG D, et al. Experimental research of journal orbit for water-lubricated bearing[J]. Mathematical problems in engineering, 2016(2): 1-11.

[6] YE X, WANG J, ZHANG D, et al. The dynamic characteristic analysis of the water lubricated bearing-rotor system in seawater desalination pump[J]. Advances in mechanical engineering, 2014(8): 356578-356578.

[7] 周广武. 水润滑橡胶合金轴承混合润滑分析与动力学性能优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
ZHOU Guang-wu. Mixed lubrication analysis and dynamic performance optimization of water lubricated rubber alloy bearings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[8] SAVIO D, FALK K, MOSELER M. Slipping domains in water-lubricated microsystems for improved load support[J]. Tribology international, 2018(120): 269-279.

[9] MALLYA R, SHENOY S B, PAI R. Static characteristics of misaligned multiple axial groove water-lubricated bearing in the turbulent regime[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part J—Journal of engineering tribology, 2016, 231(3): 385-398.

[10] TAN K H R T. Modelling of fluid flow in multiple axial groove water lubricated bearings using computational fluid dynamics[D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2007.

[11] YAMAKIRI H, SASAKI S, KURITA T, et al. Effects of laser surface texturing on friction behavior of silicon nitride under lubrication with water[J]. Tribology international, 2011, 44(5): 579-584.

[12] BRIZMER V, KLIGERMAN Y. A laser surface textured journal bearing[J]. Journal of tribology, 2012, 134(3): 31702.

[13] KANGO S, SHARMA R K. Numerical investigation on the influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing[J]. Meccanica, 2012, 47(2): 469-482.

[14] 韩翔. 基于热效应的织构化分形表面的弹流动压性能分析[J]. 表面技术, 2017, 46(12): 141-146.
HAN Xiang. EHL analysis of textured fractal surface based on thermal effect[J]. Surface technology, 2017, 46(12): 141-146.

[15] 华希俊, 许洪山, 陈亚林, 等. 激光微织构滚动轴承表面润滑性能的数值分析[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 36-41.
HUA Xi-jun, XU Hong-shan, CHEN Ya-lin, et al. Numerical analysis on lubrication performance of laser micro-textured roller bearings[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 36-41.

[16] KRAKER A. A multiscale method modeling surface texture effects[J]. Journal of tribology, 2007, 129(2): 485-497.

[17] FELDMAN Y, KLIGERMAN Y, ETSION I. Stiffness and efficiency optimization of a hydrostatic laser surface textured gas seal[J]. Journal of tribology, 2007, 129(2): 407.

[18] ARGHIR M, ROUCOU N, HELENE M, et al. Theoretical analysis of the incompressible laminar flow in a macro-roughness cell[J]. Journal of tribology, 2003, 125(2): 309-318.

[19] SAHLIN F, GLAVATSKIH S B, ALMQVIST T, et al. Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication[J]. Journal of tribology, 2005, 127(1): 96-102.

[20] CUPILLARD S, GLAVATSKIH S, CERVANTES M J. Computational fluid dynamics analysis of a journal bearing with surface texturing[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part J—Journal of engineering tribology, 2008, 222(2): 97-107.

[21] 李以农, 秦洁, 孟凡明, 等. 微造型对滑动轴承摩擦学性能影响的研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(3): 229-234.
LI Yi-nong, QIN Jie, MENG Fan-ming, et al. Effect of dimple on tribological performances of a journal bearing[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2012, 44(3): 229-234.

[22] 秦洁. 基于微造型的发动机滑动轴承摩擦学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
QIN Jie. Research on tribological performance of the engine journal bearing with dimple[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[23] GAO G, YIN Z, JIANG D, et al. Analysis on design parameters of water-lubricated journal bearings under hydrodynamic lubrication[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part J—Journal of engineering tribology, 2016, 230(8): 1019-1029.

[24] UDDIN M S, IBATAN T, SHANKAR S. Influence of surface texture shape, geometry and orientation on hydrodynamic lubrication performance of plane-to-plane slider surfaces[J]. Lubrication science, 2016, 29(3): 153-181.