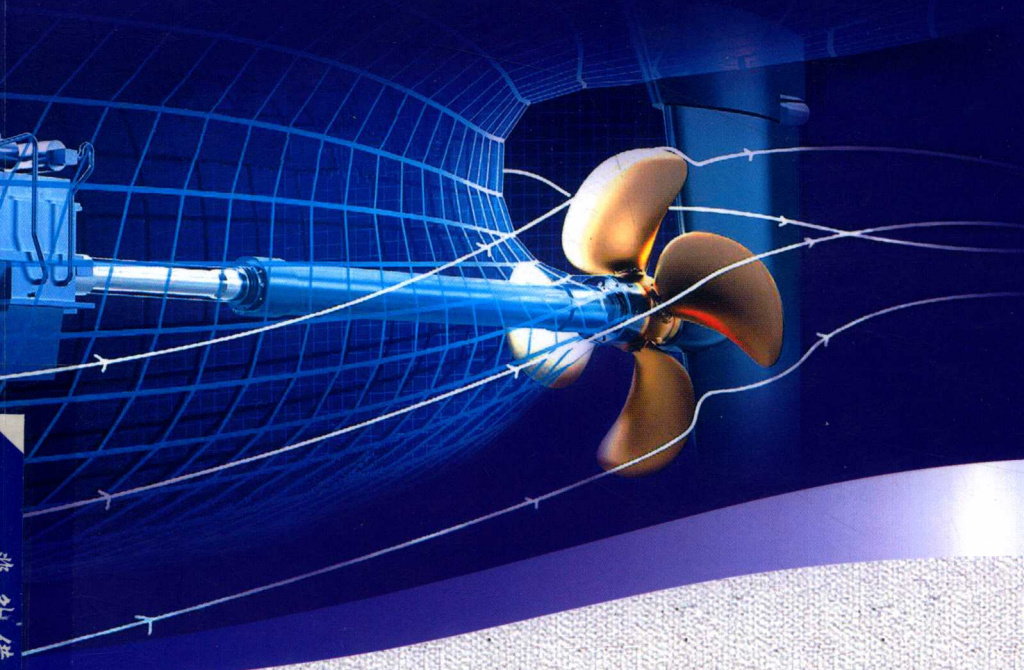


水润滑轴承技术与应用

WATER LUBRICATED BEARING
TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

王家序 著



科学出版社

水润滑轴承技术与应用

王家序 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书综合应用界面力学、摩擦学、表面工程、系统动力学、材料科学、先进制造等理论,系统论述了水润滑轴承及传动系统的润滑机理、摩擦学特性、振动噪声分析与试验方法、高效润滑结构设计方法、橡胶合金衬层配方设计与改性机理以及精密成形方法与技术等内容,深入总结了作者及其团队三十多年来在水润滑轴承技术方面的成果与创新。全书共 15 章,第 1 章为绪论,第 2 章论述水润滑轴承混合润滑原理,第 3、4 章介绍水润滑橡胶轴承设计理论与方法,第 5~9 章介绍水润滑橡胶轴承的摩擦学、振动噪声特性,第 10~15 章阐述水润滑轴承的精密成形和推广应用等内容。

本书可以作为高等院校机械工程、热能与动力工程等专业本科生和研究生的教学参考书,也可作为机械、船舶等工程领域相关学科专业的研究人员、技术人员和管理人员的科研参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水润滑轴承技术与应用/王家序著. —北京:科学出版社,2018. 7

ISBN 978-7-03-051966-5

I. ①水… II. ①王… III. ①水润滑轴承 IV. ①TH133. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 042406 号

责任编辑:裴 育 陈 婕 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 7 月第一次印刷 印张:28

字数:550 000

定价:168.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

王家序,1954年5月生于重庆市,重庆大学教授、博士生导师,国务院学位委员会机械工程学科评议组成员,国务院政府特殊津贴专家,全国优秀科技工作者,教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队和国防科技创新团队带头人,教育部跨世纪优秀人才,重庆市“两江学者”特聘教授。1977年毕业于重庆大学机电专业,2010年5月~2013年5月在美国西北大学做高级访问学者。现任重庆市机电传动与智能控制工程技术研究中心主任、重庆大学机电传动与运载装备研究所所长,兼任四川大学空天科学与工程学院院长。



长期从事机械设计及理论、航空宇航科学与技术等学科领域的人才培养、科学研究和工程应用,主持国家自然科学基金重点项目、863计划项目、国家科技攻关计划项目、国防军工项目和国家火炬计划项目等国家级重点科研及产业化工程项目40余项,主要针对先进制造、船舶海洋、航空航天、国防武器等工程领域重要装备迫切需要解决的共性关键科技难题,提出了基于啮合原理、界面力学、摩擦学、系统动力学、材料科学、可靠性工程等多学科的协同创新设计制造理论和方法,在高精度、高可靠、长寿命、高效率、无污染、低噪声、智能化、高功率密度等高性能机电传动与运载装备创新工程关键科技方面,取得了水润滑橡胶合金轴承及传动系统、高可靠精密滤波传动技术及系统、高性能复合材料传动件智能制造装备及系统等多项具有自主知识产权并达到国际先进水平的科技成果,申请国家发明专利69项,获国家授权发明专利55项,推广应用于机械、船舶、航空航天、武器装备等工程领域,并实现了产品商品化、产业化和国际化。作为第一完成人获得国家技术发明奖二等奖、三等奖各1项,国家科学技术进步奖二等奖1项,何梁何利基金科学与技术创新奖1项,省部级技术发明奖及科技进步奖一等奖9项;发表论文218篇,出版专著2部;获软件著作权6项;培养博士后6人、博士研究生32人、硕士研究生102人。

前 言

滑动轴承是一种机械设备中不可或缺的核心基础零部件。它的主要功能是支撑机械旋转体,降低其动力传动与运动变换过程中的摩擦系数,并保证其回转精度与可靠性等性能要求。随着流体润滑理论的建立和相关技术的发展,滑动轴承已广泛应用于海洋、交通、航空航天、冶金、矿山、化工、水利和国防武器等工程领域各类设备的传动装置中。

据有关资料统计,目前世界上约有 30% 的能源消耗在不同形式的摩擦上,其中滑动轴承的摩擦消耗约占 1/10。为了减少滑动轴承的摩擦损耗,设计者在轴承结构、润滑剂、减摩材料及制造加工工艺等方面进行了大量的改进工作。如何减少滑动轴承与轴之间的动摩擦,提高机械传动效率,特别是满足先进制造业和战略新兴产业的发展,实现高精度、高可靠、高效率、低能耗、无污染、长寿命、智能化等高性能动力传动与运动变换控制,一直是机械设计科技工作者期望解决的共性关键科技问题。

20 世纪 80 年代以来,针对船舶推进系统润滑油泄漏污染水环境日趋严重的问题,以及机械传动系统在特殊与极端环境下难以克服的摩擦磨损、寿命较短、无功能耗等技术瓶颈,特别是舰船及水中兵器推进系统中迫切需要解决的减振、降噪、安全、可靠等重大难题,美国、英国、加拿大等工业发达国家有关企业在水润滑轴承技术与应用研究方面开展了大量工作。但由于其成果涉及商业利益,并可用于有关国防武器装备,所以基本上没有实质性的论文发表。1985 年以来,本书作者及其领导的科研团队针对上述共性关键科技难题,开始水润滑轴承及传动系统的创新研究与应用开发工作,在国家自然科学基金、重点科技攻关、国防基础科研、国家军品配套、火炬计划、重点新产品试制计划、科技创新基金等多项国家级重点科研项目的资助下,通过长期潜心研究,从科学和技术层面揭示了材料、结构、工况、负载、环境与界面形变等对承载能力和摩擦学性能的综合影响规律,提出了用非金属材料替代传统金属材料作为传动件,用自然水替代矿物油作为润滑介质,基于资源节约与环境友好的水润滑轴承及传动系统创新设计制造理论、方法和技术,发明了一种纳米氧化锌晶须等材料与橡胶、塑料共混改性的橡胶合金材料,提出了该材料与金属或非金属轴套高强度黏结为一体的先进制造技术,研制出 BTG 水润滑橡胶合金轴承、动密封装置及传动系统 600 余种规格,该产品具有减振、降噪、耐磨、可靠、高效、节能、节材和环保等性能,攻克了机械传动特别是船舶推进系统高精度与高可靠的自适应变形协调、动力学与摩擦学性能优化、水润滑传动系统水

膜形成困难、艉轴摩擦磨损严重等关键难题,实现了船舶、舰艇艉轴水润滑推进系统全面自主研制,打破了工业发达国家技术垄断和封锁,取得了多项具有自主知识产权并处于国际先进水平的成果,实现了商品化、产业化和国际化。

本书是作者及其领导的科研团队三十多年来在水润滑轴承及传动系统创新设计制造理论、方法和技术研究方向的工作成果总结,并汇集了近年来国内外公开发表的水润滑轴承最新研究进展,系统地论述了水润滑轴承及传动系统的润滑机理、摩擦学特性和振动噪声分析与试验方法、高效润滑结构设计方法、橡胶合金衬层配方设计及改性机理,以及精密成形方法与技术等内容。全书共 15 章,其中第 1 章概况性地介绍水润滑轴承的概念与发展史,并简单介绍 BTG 水润滑橡胶合金轴承;第 2 章阐述水润滑轴承的混合润滑机理;第 3 章系统介绍水润滑橡胶合金轴承润滑结构的设计方法;第 4 章对水润滑橡胶合金轴承材料设计进行讨论;第 5 章主要阐述水润滑橡胶轴承混合润滑分析方法与理论;第 6、7 章对水润滑橡胶轴承的动态特性与振动噪声进行阐述;第 8、9 章介绍水润滑橡胶轴承摩擦磨损试验研究方法;第 10 章主要阐述水润滑橡胶合金轴承精密成形方法与工艺和智能制造装备系统;第 11 章详细介绍水润滑轴承系统;第 12 章系统地介绍硬质高分子复合材料水润滑轴承技术;第 13 章阐述氧化铝、氧化锆等氧化物陶瓷和四氮化三硅、碳化硅等非氧化物陶瓷的水润滑性能;第 14 章主要介绍水润滑轴承的试验方法和规范;第 15 章介绍水润滑轴承技术的工程应用。为了维护应用课题组专利技术成果有关企业的商业利益,在此未对涉及专利技术产品制造等有关核心技术进行详细介绍。

本书的出版对于广大工程技术人员如何利用水润滑轴承创新设计制造理论、方法和技术,解决机械、船舶、海洋、石油、化工及国防武器等工程领域重要装备的高可靠、长寿命、低噪声、无污染与高效节能等共性关键难题,具有重要的科学意义和工程实用价值。此外,本书也可作为机械、制造、国防武器等领域设计和研究工程技术人员参考用书。

本书涉及的研究成果大部分来源于作者所主持的国家自然科学基金重点项目“新型高性能传动件及系统的可靠性设计理论与方法”(50735008),国家自然科学基金面上项目“大尺寸高比压水润滑轴承系统的创新设计理论与方法”(50775230)和“高速重载和极端环境下非金属摩擦副承载与润滑机理”(50475065),国家自然科学基金青年科学基金项目“基于界面超亲水改性的水润滑橡胶轴承摩擦学行为与噪声抑制机理研究”(51605053)和“计入真实粗糙表面形貌的水润滑橡胶轴承混合润滑行为与减摩降噪方法”(51605316),国防基础科研项目“多场耦合条件下××水润滑橡胶合金轴承××理论与方法”(JG××),教育部长江学者和创新团队发展计划项目“高性能机电传动系统的创新设计理论、方法和技术”(IRT0763)。可以说,本书凝聚了以作者为学术带头人的科研团队的集体创造和智慧。本书的

出版得到了国家国防科技工业局国防基础科研项目的资助。在此,向国家自然科学基金委员会和所有资助部门表示深切的谢意。

2010年5月~2013年5月,本书作者在美国西北大学做访问学者期间,应 Q. Jane Wang 教授邀请撰写了由 Springer 出版的图书 *Encyclopedia of Tribology* 中的一章“Water-Lubricated Rubber Alloy Bearings and Transmission System”(水润滑橡胶合金轴承及传动系统)。该书出版后,国内外许多读者希望作者尽快撰写相关内容图书并出版。正是在他们的热情鼓励和大力支持下,作者从那时开始撰写本书。在撰写程中,韩彦峰博士参加了本书撰写并负责所有资料的整理工作。本书吸收了作者科研团队其他研究人员以及著者所指导的历届博士后、博士生和硕士生的有关研究成果,他们是韩彦峰、周广武、蒲伟、肖科、李俊阳、周青华、陈海周、张莹、余江波、彭晋民、陈战、丁行武、郭胤、潘阳、朱娟娟、华细金、李太福、陈敏、王海宝、张瑜、邓学平、邹丞、王定贤、苗亮亮、张文光、李杰、秦国强、卢磊、吴松、王少丽、刘静、李金明、刘文红、袁佳、彭向征、毕承俊、邓海峰、崔洪斌、邱茜等。此外,本书参考和引用了国内外诸多相关文献,在此一并感谢。

由于作者水平有限,加上本书所述内容至今还是发展中的高新技术,书中难免有疏漏或不足之处,恳请广大读者批评指正。

王家序

2017年12月于重庆

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 水润滑轴承的发展历史与研究现状	2
1.1.1 水润滑轴承的发展历史	2
1.1.2 水润滑轴承的研究现状	3
1.2 水润滑轴承的分类及特点	4
1.2.1 铁梨木轴承	4
1.2.2 夹布胶木轴承	7
1.2.3 胶合层板轴承	9
1.2.4 橡胶轴承	16
1.2.5 硬质高分子复合材料轴承	25
1.3 BTG 水润滑橡胶合金轴承简介	26
1.3.1 BTG 水润滑橡胶合金轴承研发背景	26
1.3.2 BTG 水润滑橡胶合金轴承橡胶衬层	26
1.3.3 BTG 水润滑橡胶合金轴承基本结构	29
1.4 BTG 水润滑橡胶合金轴承研究前沿	31
1.4.1 船舶与海洋工程领域	31
1.4.2 国防武器装备工程领域	31
1.4.3 能源工程领域	32
1.4.4 装备制造业工程领域	33
参考文献	35
第 2 章 水润滑轴承的润滑机理	36
2.1 弹性流体动压润滑	36
2.1.1 简化的雷诺方程	36
2.1.2 全雷诺方程	40
2.1.3 特殊工况下的雷诺方程	42
2.2 混合润滑	44
2.2.1 Stribeck 曲线	44
2.2.2 水润滑橡胶轴承润滑状态的判定	45
参考文献	49

第3章 水润滑橡胶合金轴承的结构设计	50
3.1 水润滑橡胶合金轴承润滑结构设计	51
3.1.1 水润滑橡胶合金轴承基本结构	51
3.1.2 橡胶合金衬层设计	59
3.1.3 橡胶轴承的设计比压	66
3.1.4 轴承的速度	67
3.1.5 轴承的 pv 值	67
3.1.6 轴承的 pvT 值	67
3.1.7 长径比设计	69
3.1.8 润滑水量	70
3.1.9 轴承间隙	71
3.1.10 轴承相对运动面粗糙度	72
3.2 螺旋槽水润滑橡胶合金轴承设计	73
3.2.1 螺旋角度对流体动压性能的影响	73
3.2.2 沟槽数量对流体动压性能的影响	73
3.3 板条式水润滑橡胶合金轴承设计	74
3.3.1 板条形状对承载力的影响	74
3.3.2 板条形状对摩擦系数的影响	75
3.4 水润滑橡胶合金轴承微观织构优化设计	75
3.4.1 微凹坑表面织构设计与优化	75
3.4.2 微沟槽表面织构润滑性能设计	89
参考文献	108
第4章 水润滑橡胶合金轴承的材料设计	110
4.1 橡胶合金材料的配方设计	110
4.1.1 橡胶合金材料配方设计的原则	111
4.1.2 橡胶合金材料配方设计的程序	111
4.2 配方设计与橡胶合金力学性能的关系	112
4.2.1 橡胶材料相关标准	112
4.2.2 橡胶材料力学性能设计	113
4.3 水润滑轴承材料摩擦磨损性能改性	124
4.3.1 填料对摩擦系数和磨损量的影响	125
4.3.2 摩擦系数和磨损量的影响因素	126
4.3.3 填料对水润滑轴承材料的改性	129
4.3.4 玻璃纤维和碳纤维对橡胶合金材料力学性能的影响	137
4.3.5 玻璃纤维和碳纤维对橡胶合金材料摩擦磨损性能的影响	139

4.3.6 纳米级氧化锌晶须对橡胶合金材料的改性	140
4.4 水润滑橡胶材料长短链分子配比设计	144
4.4.1 材料机体的选择	145
4.4.2 分子结构设计方法	146
4.4.3 材料物理化学性能分析	149
4.4.4 新型弹性体轴瓦材料力学性能	153
参考文献	158
第5章 水润滑橡胶轴承的混合润滑分析方法	160
5.1 水润滑橡胶轴承混合润滑模型	160
5.1.1 平均雷诺方程	160
5.1.2 微凸体接触模型	164
5.1.3 膜厚方程	165
5.1.4 润滑介质热传递模型	167
5.1.5 轴-轴承热传递模型	168
5.1.6 流固耦合热传递边界条件	169
5.1.7 弹性变形方程	170
5.1.8 载荷平衡方程	170
5.1.9 摩擦力和摩擦系数	171
5.2 热/热变形影响系数快速算法	172
5.2.1 热影响系数快速算法	172
5.2.2 热变形影响系数快速算法	174
5.3 斜网格虚拟节点差分模型	176
5.3.1 斜坐标系下的多工况平均雷诺方程	176
5.3.2 虚拟节点模型	178
5.3.3 虚拟节点模型计算精度	182
5.4 混合润滑并行计算模型	183
5.4.1 OpenMP 多线程并行计算模型	183
5.4.2 并行速度与效率	186
5.5 数值计算方法	190
5.5.1 有限差分法	190
5.5.2 多重网格法	193
5.5.3 渐进网格加密法	198
5.5.4 空穴模型	200
5.6 润滑特性影响因素分析	202
5.6.1 橡胶衬层形变分布	205

5.6.2	载荷对润滑性能的影响	207
5.6.3	转速对润滑性能的影响	209
5.6.4	轴向倾斜度对润滑性能的影响	211
5.6.5	沟槽数量对润滑性能的影响	214
5.6.6	沟槽宽度对润滑性能的影响	215
5.6.7	橡胶弹性模量对润滑性能的影响	217
5.6.8	橡胶衬层厚度对润滑性能的影响	219
参考文献		221
第6章 水润滑橡胶轴承的动态特性分析方法		224
6.1	动载荷下的水膜刚度和阻尼系数计算方法	224
6.1.1	不定常雷诺方程	224
6.1.2	膜厚方程	225
6.1.3	弹性变形方程	225
6.1.4	动态刚度和阻尼	226
6.2	数值求解方法	228
6.3	工况参数对动态刚度和阻尼系数的影响	230
6.3.1	速度对动态刚度和阻尼系数的影响	230
6.3.2	载荷对动态刚度和阻尼系数的影响	231
6.3.3	供水压力对动态刚度和阻尼系数的影响	232
6.4	结构参数对动态刚度和阻尼系数的影响	233
6.4.1	沟槽结构对动态刚度和阻尼系数的影响	233
6.4.2	长径比对动态刚度和阻尼系数的影响	235
6.4.3	轴承间隙对动态刚度和阻尼系数的影响	236
参考文献		237
第7章 水润滑橡胶轴承的振动噪声分析		239
7.1	振动噪声机理	239
7.1.1	振动与噪声的关系	239
7.1.2	摩擦引起的振动与噪声	240
7.1.3	振动噪声动力学理论	244
7.1.4	轴承动力学模型	247
7.2	水润滑橡胶轴承摩擦噪声分析	250
7.3	摩擦噪声影响因素分析	251
7.3.1	摩擦系数对摩擦噪声的影响	251
7.3.2	速度对摩擦噪声的影响	252
7.3.3	载荷对摩擦噪声的影响	253

7.3.4 橡胶硬度对摩擦噪声的影响	253
7.3.5 几何结构对摩擦噪声的影响	254
参考文献	256
第8章 水润滑橡胶轴承的摩擦学性能试验研究	258
8.1 湿磨粒磨损机理	258
8.1.1 湿磨粒磨损的物理过程	258
8.1.2 磨损率的影响因素	263
8.2 水润滑橡胶轴承摩擦学性能试验标准	266
8.2.1 试样	266
8.2.2 仪器	267
8.2.3 试验步骤	267
8.2.4 计算结果	268
8.3 水润滑橡胶轴承摩擦学性能试验	269
8.3.1 试验方法	269
8.3.2 摩擦系数试验研究	270
8.3.3 磨损率试验研究	280
8.3.4 改性材料摩擦学性能	284
8.3.5 沟槽结构摩擦学试验研究	286
参考文献	289
第9章 水润滑橡胶轴承试验平台设计	291
9.1 水润滑橡胶轴承综合性能试验系统研制	291
9.1.1 系统总体方案设计	291
9.1.2 试验台结构设计	293
9.1.3 测试原理与数据处理方法	295
9.2 试验内容及方法	300
9.2.1 试验对象	300
9.2.2 试验内容	301
9.2.3 试验方法及步骤	301
9.3 试验结果分析与讨论	302
9.3.1 摩擦系数	302
9.3.2 水膜压力	304
9.3.3 轴心轨迹	308
9.3.4 动态刚度和动态阻尼	311
9.3.5 振动噪声	313
参考文献	316

第 10 章 水润滑橡胶合金轴承的精密成形方法	317
10.1 水润滑橡胶合金轴承的成形工艺	317
10.1.1 橡胶的硫化	317
10.1.2 水润滑橡胶合金轴承的硫化工艺	321
10.1.3 水润滑轴承橡胶合金材料与瓦背的黏结工艺	325
10.2 水润滑橡胶合金轴承模具	327
10.2.1 水润滑橡胶合金轴承精密成形模具的初步设计	328
10.2.2 螺旋槽水润滑橡胶合金轴承脱模装置	330
10.3 水润滑橡胶合金轴承精密成形数字制造装备	331
10.3.1 精密成形数字制造装备简介	331
10.3.2 工程复合材料精密成形电感应热压模具设计	333
10.3.3 成形装备计算机控制	334
参考文献	335
第 11 章 水润滑轴承系统简介	337
11.1 开式结构的水润滑轴承系统	337
11.2 闭式结构的水润滑轴承系统	338
11.3 闭式结构的水润滑轴承系统密封装置	339
11.3.1 密封装置结构	339
11.3.2 密封装置填料函安装要求	340
11.3.3 试航验收要求	340
11.4 水润滑动密封橡胶合金轴承简介	341
11.4.1 水润滑动密封橡胶合金轴承基本结构	341
11.4.2 水润滑动密封橡胶合金轴承工作原理	342
参考文献	342
第 12 章 硬质高分子复合材料水润滑轴承	344
12.1 简介	344
12.1.1 水润滑赛龙轴承	344
12.1.2 水润滑飞龙轴承	345
12.1.3 水润滑 Vesconite 轴承	347
12.1.4 水润滑 Orkot 轴承	347
12.1.5 水润滑 Railko 轴承	348
12.2 轴承力学特性	350
12.2.1 耐磨性	350
12.2.2 热膨胀性	350
12.2.3 吸水性	351

12.2.4 物理力学性能	351
12.3 轴承设计与分析	355
12.3.1 pvt 曲线	355
12.3.2 轴承壁厚设计	357
12.3.3 轴承长径比设计	359
12.3.4 槽结构设计	360
12.4 成形工艺与方法	361
12.4.1 轴承结构形式	361
12.4.2 轴承的加工方法	362
参考文献	367
第 13 章 水润滑陶瓷轴承	368
13.1 水润滑陶瓷轴承简介	368
13.2 氧化物陶瓷材料的水润滑性能	372
13.2.1 $ZrO_2-Al_2O_3$ 陶瓷的水润滑性能	372
13.2.2 $Al_2O_3-TiO_2$ 复合陶瓷的水润滑性能	375
13.2.3 Cr_2O_3 陶瓷的水润滑性能	380
13.3 非氧化物陶瓷材料的水润滑性能	382
13.3.1 Si_3N_4 陶瓷的力学性能	382
13.3.2 温度与载荷对 Si_3N_4 陶瓷摩擦磨损的影响	383
13.3.3 Si_3N_4 陶瓷的水润滑摩擦学性能	383
13.3.4 Si_3N_4 陶瓷的超润滑现象	390
13.3.5 SiC 陶瓷的水润滑性能	391
参考文献	394
第 14 章 水润滑轴承试验方法和规范	397
14.1 水润滑轴承相关标准与规范	397
14.1.1 适用范围与分类	397
14.1.2 相关标准与规范	397
14.1.3 相关要求	399
14.1.4 检验	401
14.1.5 轴承样品的选择和试样的准备	402
14.1.6 检验实施	406
14.1.7 试验方法	407
14.2 海水配制方法和规范	412
14.2.1 适用范围	412
14.2.2 主要事项	412

14.2.3	所需试剂	412
14.2.4	海水配制	414
14.2.5	含重金属的代用海水的配制	414
14.2.6	配置海水的成分	414
第 15 章	水润滑轴承在工程中的应用	416
15.1	在船舶推进系统中的应用	416
15.2	在机械装备系统中的应用	419
15.2.1	在水轮机上的应用	419
15.2.2	在水泵中的应用	421
15.3	在工程中的应用前景	424
15.4	水润滑轴承的工程应用指南	425
15.4.1	工作环境	425
15.4.2	轴承的装配	427
15.4.3	尺寸公差	429
参考文献		430

第 1 章 绪 论

长期以来,机械传动装置特别是船舶推进系统中的各种摩擦副,往往由金属构件组成,用矿物油作为润滑介质,因此,耗费了大量矿物油和贵金属等战略资源。为了防止油泄漏,需要对传动构件进行密封,这使得其结构相当复杂,很难降低或减少各种机械传动中不可避免的摩擦、磨损、振动、冲击、噪声和无功能耗^[1]。另外,在传动系统中仍然存在可靠性差和寿命较短等问题,特别是存在密封泄漏油污染江河湖海水资源环境日趋严重的状况。

我国船舶航运行业有关部门的统计资料表明,一艘功率为 880kW 的船舶,其推进系统每年因艉轴密封泄漏润滑油在 3t 以上。航行在三峡库区及长江水域采用油润滑轴承系统的船舶共有几十万艘,如果每艘船每年平均泄漏润滑油按 1.5t 计,每年船舶推进系统泄漏润滑油则高达几十万吨。三峡水利工程库区流域是世界最大的内湖之一,由于水的流速陡然减慢,长江自我净化能力大大减弱,船舶推进系统艉轴泄漏的润滑油对三峡库区水环境造成了严重的污染。国内各种船舶共计几百万艘(不含海军舰艇),国内内河航行的船只(除了少数进口的)基本上都采用油润滑,这些船只每年向江河湖海泄漏的润滑油高达几百万吨,给水资源造成了巨大污染,严重破坏了生态环境,并危及人类的生存条件。世界正面临前所未有的能源和资源危机,例如,已探明的石油可采储量只可开采 43 年,已探明的铜可采储量只可开采 26 年。美国政府以法律形式明确规定,禁止以油润滑推进系统的船舶在密西西比河等内陆河流中航行,否则一旦发现泄漏润滑油将处以 2.5 万美元以上的罚款。上海市人民政府也于 1997 年颁布禁止航行在上海港的船舶泄漏润滑油的有关规定,违者将处以 2 万元以上的罚款,甚至扣押违规船舶的处罚,以保护和净化水资源及环境^[2,3]。因此,促使人们去研究开发无污染并具有减振、降噪、耐磨、可靠、高效、节能、高承载能力、长寿命等功效的新型轴承系统,并加以推广应用,以解决江河湖海环境严重污染问题,应该说这是船舶工业、内河航运的当务之急^[4]。

水具有无污染、来源广泛、节省能源、安全性、难燃性等特性,是最具有发展潜力的润滑介质。因此,为了降低或减少各种摩擦副因运动而产生的摩擦、磨损、振动、冲击、噪声、无功能耗、可靠性差和寿命较短等问题,节省大量油料和贵重有色金属等战略资源,特别是为了净化和保护江河湖海水资源等人类赖以生存的环境,利用新型工程复合材料替代传统金属作为机械传动系统的摩擦副,用自然水替代矿物油作为机械传动系统的润滑介质,基于资源节约与环境友好的水润滑轴承、密

封装置等非金属材料摩擦副的科学技术研究课题,引起人们的普遍关注,并已成为世界工业发达国家竞相研究的热点课题之一。

与油润滑技术相比,水润滑技术具有以下特点^[5]:

(1) 水的黏度很低,通常在油的 $1/20$ 以下,因此难以得到流体润滑,故负荷不能太大。但是,在流体润滑状态中,由于水的黏性阻力低,其摩擦系数比油润滑更小。

(2) 在流体润滑条件下,轴承负荷能力与黏度/润滑膜厚度成正比。因此,与油相比,最小水膜厚度变得很小。例如, 400°C 时相对于 ISOVG68 油,水的黏度约为其 $1/100$,因而在同一条件下,水的润滑膜厚度等于油的 $1/10$ 。

(3) 水的黏度低,且压黏效应、温黏效应都比油稳定,因此在给水压力高或水流速度快的情况下容易产生紊流。

(4) 在流体进行润滑时,固体表面与流体之间产生物理化学方面的作用很重要,但是,在水润滑的场合,很难得到具有有效润滑作用的表面吸附物。因此,轴承的材料应是与水的润滑很好匹配的材料。

(5) 轴承和轴颈都必须注意由水产生的腐蚀,特别是由于水中溶解各种盐而发生电离,必须注意电化腐蚀问题。

(6) 水的比热容大,对于摩擦发热的冷却效果比油好。

(7) 从水的沸点来看,水润滑轴承不能用于水温 100°C 以上的环境,反之,也不能用于冰点以下的低温环境。

另外,由于油润滑系统需要配备密封装置,而水润滑系统则不需要,所以水润滑系统可能具有更低的设备成本和运转成本。

近年来,水润滑轴承的逐步推广应用改变了长期以来机械传动系统中往往是以金属构件组成摩擦副的传统观念,不仅节省了大量油料和贵重有色金属,而且简化了轴系结构,避免因使用油润滑金属轴承而泄漏污染水环境的状况。因而水润滑橡胶合金轴承的深入研究,对水润滑轴承的推广应用具有重要的实用意义,对丰富非金属摩擦副的润滑具有重要的理论意义。

1.1 水润滑轴承的发展历史与研究现状

1.1.1 水润滑轴承的发展历史

水润滑轴承的历史可以追溯到 19 世纪 40 年代,在使用蒸汽轮机驱动的螺旋桨作为船的推进系统时,就有了采用黄铜和白色金属材料的水润滑轴承^[6]。由于金属价格昂贵和磨损较快,Penn 采用了以铁梨木为材料的水润滑轴承,明显地提高了在海水中使用的船舶艉轴轴承的耐磨性,但在污染的水质中使用,与黄铜及白