



同济
Tong



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

汤何胜 閻耀保 著

轴向柱塞泵滑靴副热流体润滑机理 及摩擦磨损性能研究

Thermal Fluid Lubrication Mechanism and
Friction and Wear Properties of Axial
Piston Pump Slipper Pair



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

汤何胜 阎耀保 著

轴向柱塞泵滑靴副热流体润滑机理 及摩擦磨损性能研究



Thermal Fluid Lubrication Mechanism and
Friction and Wear Properties of Axial
Piston Pump Slipper Pair



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

随着现代科学技术的飞速发展,在航空航天、工程机械等机械装备领域,对轴向柱塞泵的耐磨延寿设计提出了更高的要求。本书针对轴向柱塞泵滑靴副热流体润滑机理及摩擦磨损性能展开研究,对提高柱塞泵的使用寿命具有重要的理论指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

轴向柱塞泵滑靴副热流体润滑机理及摩擦磨损性能研究/汤何胜, 閻耀保著. —上海: 同济大学出版社, 2017. 8
(同济博士论丛/伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6898-1

I. ①轴… II. ①汤…②閻… III. ①滑靴(液压泵)—流体动力学—研究②滑靴(液压泵)—摩擦磨损性能—研究
IV. ①TH137.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 085656 号

轴向柱塞泵滑靴副热流体润滑机理及摩擦磨损性能研究

汤何胜 閻耀保 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 张崇豪 蒋卓文
责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
排版制作 南京展望文化发展有限公司
印 刷 浙江广育爱多印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 13.25
字 数 265 000
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6898-1

定 价 65.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佶红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾明	顾祥林	钱梦騄
徐政	徐鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

随着现代科学技术的迅猛发展,在航空航天、工程机械等机械装备领域,对轴向柱塞泵的耐磨延寿设计提出了更高的要求。滑靴副是轴向柱塞泵的关键摩擦副之一,频繁承受周期性压力冲击,且运动速度较高,接触比压较大,导致滑靴副极易产生润滑失效,甚至严重磨损,影响柱塞泵的使用寿命。此前,关于滑靴副润滑特性的研究大多局限于等温工况条件,当轴向柱塞泵长期在高速、高压、高温等恶劣工况下运行时,滑靴副黏性摩擦发热所导致的油膜润滑承载失效、功率损失、对偶材料的热力耦合形变以及表面损伤失效等问题可能变得非常突出。因此,本书针对轴向柱塞泵滑靴副热流体润滑机理及摩擦磨损性能展开研究,对提高柱塞泵的使用寿命具有重要的理论指导意义。

本书建立了一种滑靴副流体动力润滑模型,揭示滑靴副油膜润滑承载特性;建立一种考虑油液黏温效应的滑靴副流体动力润滑热效应模型,得到滑靴副的功率损失和油膜温升特性;建立了一种基于热力学第一定律的滑靴副热承载润滑模型,揭示滑靴副热承载润滑特性;建立了一种滑靴副流-固-热多物理场耦合模型,分析滑靴的热力耦合变形,并通过摩擦学实验揭示滑靴副对偶材料的摩擦磨损性能。本书的主要贡

献如下:

(1) 阐明了滑靴副油膜润滑承载特性与工况条件、结构参数的映射关系

目前,国内外大多侧重于对滑靴副成膜机理和动力学特性的分析,关于滑靴副油膜厚度、泄漏流量、摩擦转矩与滑靴倾斜角度耦合关系的研究较少。当滑靴处于高速重载工况时,滑靴因倾覆力矩作用而产生倾斜角度,与斜盘形成楔形油膜,导致油膜压力和厚度的不均匀。研究结果表明,油膜反倾覆力矩可以抵消滑靴的倾覆力矩,降低滑靴倾斜角度,压力越高,滑靴倾斜角度越小,油液动压效应越小,油膜厚度变薄,摩擦转矩增大。主轴转速的提高不仅增大油膜厚度,而且增大滑靴运动速度,使得油液的剪切应力增加,摩擦转矩增大。滑靴半径比的增大有利于增大油膜反倾覆力矩的作用力臂,降低滑靴倾斜角度,增大油膜沿滑靴半径方向的压差,导致油膜厚度变薄。泄漏流量与油膜厚度和压差有关。柱塞腔压力和滑靴半径比的增大有利于增大油膜沿滑靴半径方向的压差,而主轴转速的升高有利于增大油膜厚度,导致泄漏流量增大。滑靴阻尼管长度直径比的增大会增加油液的液阻,增大滑靴油腔压力损失,导致油膜厚度变薄,泄漏流量降低。

(2) 揭示了滑靴副缝隙流动所引起的功率损失和油膜温度特性

传统的滑靴副润滑机理分析通常假定润滑油的黏度保持不变,没有考虑热效应的影响。在高速重载工况下,滑靴底面油液因压差流动和剪切流动所产生的功率损失转换成热量,引起油膜温度升高,油液黏度降低,影响滑靴副的工作性能。研究结果表明,滑靴副功率损失主要集中在泵的排油区,虽然油膜厚度比较薄,泄漏流量较少,降低油液的压差流动,但是,油液剪切应力随油膜厚度变薄而增大,增大油液的剪切流动,导致黏性摩擦功率损失远大于泄漏功率损失,成为滑靴副功率损失的主

要来源。滑靴在倾覆力矩作用下与斜盘形成楔形油膜,造成油膜温度的不均匀,且最高油膜温度出现在油膜厚度最薄的区域。

(3) 提出了新的滑靴副热承载润滑特性评价方法

早期关于滑靴副润滑油膜承载特性的研究仅局限于等温工况条件,忽略了油液黏温效应、热楔效应和对偶材料热变形的影响。在高速重载工况下,滑靴副将机械能转换成热能,实质上是一种热量产生和传递的动态热平衡过程。油膜因温度升高而发生体积膨胀,以致产生热楔压力流动,且对偶材料因温度升高而发生热变形,造成油膜厚度变薄,影响滑靴副润滑特性和承载能力。研究结果表明,滑靴副因黏性摩擦和泄漏所产生的轴功损失是油膜控制体热量的主要来源,引起油膜温度升高,并以间隙泄漏和对流换热的形式传递给壳体内腔油液,造成壳体回油温度升高。随着柱塞腔压力和主轴转速的增大,油膜控制体的热量逐渐积累,引起油膜温度升高。虽然对偶材料在温升作用下产生热变形,减小热平衡间隙,但是,主轴转速的升高会增加油液的热楔支承力,补偿热平衡间隙的减小量,抑制油膜支承刚度增大,降低油膜的承载能力。滑靴材料的导热性能越好,热阻越小,散热速率越快,有利于减小材料的热变形,提高滑靴和斜盘的配合性能。

(4) 揭示了多物理场耦合下滑靴热力耦合变形及摩擦磨损性能

在高速重载工况下,滑靴底面油液黏性摩擦发热,容易引起滑靴温度升高,此时,滑靴温度与滑靴内部的结构变形存在相互耦合作用,引起滑靴产生包含弹性变形和热变形在内的热力耦合变形,导致滑靴处于多物理场耦合状态。目前,国内外关于滑靴副多物理场合问题的研究尚不多见,仍不能解释滑靴的热力耦合变形以及摩擦磨损机理。在柱塞腔压力的作用下,滑靴与斜盘发生黏性摩擦并产生热量,增加滑靴的输入热流密度,引起滑靴温度升高,导致滑靴产生热力耦合变形。研究结果表

明,滑靴的输入热流密度与接触比压成正比,与材料厚度成反比,引起滑靴内部的温度分布不均匀,导致滑靴内部的等效应力存在分层现象,造成滑靴不同区域处的热力耦合变形存在差异。随着柱塞腔压力的工作周期延长,滑靴的等效应力循环次数增多,引起滑靴表面出现凸起变形并形成热点,加剧滑靴表面的接触摩擦,且磨屑在热点区域聚集并形成摩擦转移层,增强磨粒的剪切力,加剧滑靴表面的微切削作用和挤压变形,导致滑靴表面出现条状剥落和凹坑。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 轴向柱塞泵滑靴副润滑特性及摩擦磨损形式	4
1.3 国内外轴向柱塞泵滑靴副相关研究概况	7
1.3.1 滑靴副润滑特性的研究进展	7
1.3.2 测试技术在滑靴副润滑特性研究中应用现状	13
1.3.3 滑靴副对偶材料摩擦磨损性能的研究进展	21
1.4 主要研究内容	28
1.4.1 科学问题	28
1.4.2 研究思路	30
第 2 章 瞬时工况下滑靴副流体动力润滑特性研究	35
2.1 引言	35
2.2 滑靴副楔形油膜的形成机理	36

2.3	滑靴副流体动力润滑模型	38
2.3.1	运动学方程	38
2.3.2	动力学方程	40
2.3.3	油膜厚度方程	42
2.3.4	油膜压力方程	45
2.3.5	泄漏流量方程	46
2.4	数值计算方法	47
2.4.1	油膜压力方程的离散化处理	47
2.4.2	油膜厚度的计算流程	50
2.5	模型预测与验证	53
2.5.1	油膜压力分布	53
2.5.2	油膜厚度分布	53
2.6	滑靴副流体动力润滑特性的影响因素分析	56
2.6.1	柱塞腔压力的影响	57
2.6.2	主轴转速的影响	58
2.6.3	滑靴半径比的影响	60
2.6.4	滑靴阻尼管长度直径比的影响	61
2.7	滑靴副摩擦磨损现象分析	63
2.8	本章小结	67
第3章	滑靴副流体动力润滑热效应分析	68
3.1	引言	69
3.2	滑靴副的热量产生与传递过程	69
3.3	滑靴副流体动力润滑热效应模型	71
3.3.1	滑靴副功率损失模型	71
3.3.2	滑靴副油膜温度模型	74
3.4	数值计算方法	78

3.4.1	能量方程的离散化处理	78
3.4.2	固体热传导方程的离散化处理	80
3.4.3	离散方程的数值求解	81
3.4.4	油膜温度的计算流程	82
3.5	模型预测与验证	83
3.5.1	功率损失实验方法	84
3.5.2	滑靴副功率损失	86
3.5.3	油膜温度分布	87
3.6	滑靴副流体动力润滑热效应的影响因素分析	90
3.6.1	滑靴表面弹性形变的影响	90
3.6.2	滑靴半径比的影响	92
3.6.3	滑靴阻尼管长度直径比的影响	96
3.7	本章小结	100
第4章	基于热力学第一定律的滑靴副热承载润滑特性研究	102
4.1	引言	103
4.2	滑靴副热承载润滑特性的控制体建模方法	104
4.2.1	控制体热力学模型	104
4.2.2	热平衡间隙模型	108
4.2.3	油膜支承刚度模型	110
4.3	模型预测与验证	110
4.3.1	壳体回油温度实验方法	111
4.3.2	壳体回油温度	111
4.3.3	滑靴副热平衡间隙	114
4.4	滑靴副热承载润滑特性的影响因素分析	116
4.4.1	柱塞腔压力的影响	116
4.4.2	主轴转速的影响	118