



国家自然科学基金委员会

机械科学基础研究 20年

雷源忠 主编



武汉理工大学出版社



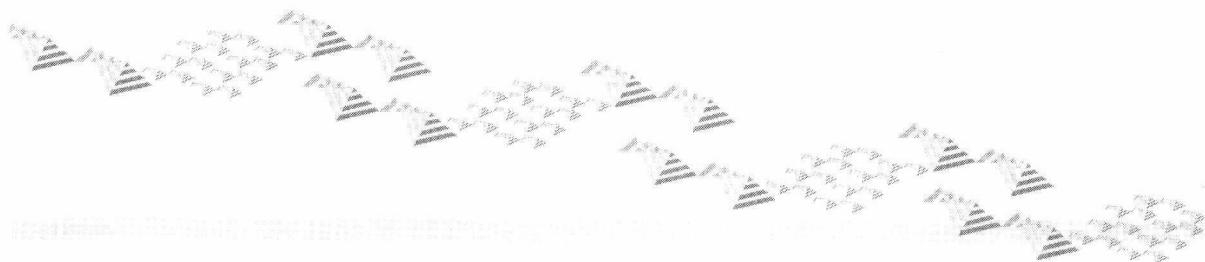
NSFC

机械科学基础研究 20年

主 编 雷源忠

副 主 编 周祖德 王国彪

执行主编 王汉熙



武汉理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械科学基础研究 20 年/雷源忠主编. —武汉:武汉理工大学出版社, 2007. 3
ISBN 978-7-5629-2524-8

I. 机… II. 雷… III. 机械学—中国—文集 IV. TH11-53
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 036164 号

出版发行: 武汉理工大学出版社
武汉市武昌珞狮路 122 号

邮政编码: 430070

经 销 者: 各地新华书店

印 刷 者: 武汉理工大印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 20

字 数: 403 千字

版 次: 2007 年 3 月第 1 版

印 次: 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 1—3000 册

定 价: 60.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请向出版社发行部调换。

本书购书热线电话: (027)87165106

编纂委员会

主 任 黎 明

委 员	温诗铸	钟 掘	潘际銮	路甬祥
	杨叔子	熊有伦	闻邦椿	徐滨士
	王立鼎	宋玉泉	屈梁生	陈予恕
	赵淳生	卢秉恒	胡正寰	李培根
	柳百成	黄尚廉	宋天虎	海锦涛
	范宏才	陈心昭	冯培恩	宁汝新
	张文栋	唐晓青	林忠钦	郭东明
	孔祥东	丁 汉	严隽琪	李兆前
	黎 明	雷源忠	王国彪	黄树槐
	任露泉	蔡 兰	胡海岩	李元元
	周祖德	蒋庄德	葛世荣	涂善东
	黄 真	颜永年	周兆英	董 申
	刘志峰	廖启征	翟婉明	周仲荣
	孙宝元	彭东林	苑世剑	计时鸣
	陈建敏	华 林	秦树人	郭万林
	曾 攀	雒建斌	佟 金	杨 合
	冯吉才	黄庆安	张卫华	赵国群
	尹周平	李光耀	刘 宏	张 璧
	杨建东	赵 军	丁建宁	胡芑庆
	田 煜	朱旻昊	周 明	魏正英
	杜凤山	赵 匀	杨沛然	李建军
	傅 新	计时鸣	赵卓贤	王新华
	刘 泉	胡业发	陈莉敏	王汉熙

2006年机械学科共资助面上项目312项,经费8 621万元,超过了1986年国家自然科学基金委员会成立当年的8 000万元总经费。20年来,机械学科的发展可以说是我国科学基金事业发展的一个缩影,机械学科所走过的发展道路也体现了科学基金的发展道路。在国家自然科学基金的长期资助下,机械学科在加强前沿领域研究、促进学科发展、培养青年科技人才、加快基础研究成果转化和推动机械工程行业发展等方面都取得了显著的进步。

机械学科是国家自然科学基金委员会工程与材料科学部基金资助规模最大的学科,2006年受理的面上项目已经超过了2 000项,面上项目经费约占本科学部面上项目总经费的20%。在长期的基金项目评审工作和管理实践中,机械学科形成了如下的鲜明特点:

高远的战略眼光 机械学科历来重视学科发展战略的研讨工作,结合国家社会进步和经济发展中的重大需求和国家“五年计划”等规划的要求,分别在1988年、1995年、1999年和2004年组织了规模较大的学科发展战略研讨会,并在充分研讨的基础上撰写了《机械制造发展战略研究报告》、《机械学发展战略研究报告》、《机械工程科学技术前沿》、《先进制造技术基础》和《机械学与制造科学发展战略研究报告》等。通过制定学科发展战略,了解了国际学术动态,把握了学科前沿方向,发挥了科学基金的引领作用,并为科学基金重大重点项目的部署和立项提供了科学决策的依据。

超前的资助意识 前瞻性和探索性是科学基金资助项目的重要特点之一。微机械和快速原型制造技术是当前机械工程科学领域中十分活跃的前沿研究方向,是机械工程科学与信息技术、材料科学和物理等学科的交叉研究领域。机械学科早在上个世纪90年代初就敏锐地觉察到了这两个新领域的发展趋势并在国内率先设立基金重点项目给予支持,清华大学、华中科技大学和西安交通大学等单位在科学基金资助下开展了基础研究,并得到了国家其他部门的后续支持,其研究成果在汽车和家电等产业领域得到了广泛的应用,部分具有自主知识产权的快速原型制造装备开始向国外出口。基金重大项目“先进电子制造中的重要科学技术问题研究”也是结合我国电子制造业的现状和重大需求,经过专家论证和对相关企业的调研,在国内首先设立并得到了“973”计划的继续支持。

突出的人才培养 基础研究人才的培养是科学基金的重要任务。自国家杰出

青年科学基金设立以来，机械工程科学领域已有36位优秀的青年学者获此殊荣，有两个以杰出青年科学基金获得者为主的创新研究群体得到科学基金的长期资助。另外，在机械学科的组织下，海内外青年制造科学会议已经连续举办了7届，不仅吸引了一批优秀的海外青年学者回国讲学和进行学术交流，同时还活跃了学术气氛，促进了国内一大批青年学者的成长。

活跃的国际合作 机械学科十分重视开展国际合作研究与学术交流，并且形成了自己的特色与传统。学科多次组团参加美国国家科学基金会机械工程领域的受资助者会议，不仅交流了学术，而且对美国国家科学基金的管理方式有所了解，并在借鉴的基础上改进了海内外青年制造科学会议，把学术交流、展示基金项目研究进展/研究成果与项目检查结合起来，起到了很好的作用。此外，学科还组织了海峡两岸制造技术研讨会、中美制造技术研讨会、中德微纳米制造和测量研讨会和中英测试技术研讨会等系列国际学术会议。这些学术交流活动的开展，扩大了我国科学基金的影响，推动了机械工程科学领域的国际合作和交流，促使我国机械工程科学领域基础研究走向世界。

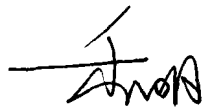
良好的工作氛围 科学基金能有今天的发展，是与其“平等竞争、科学民主、鼓励创新”的运行机制分不开的，也是科学共同体共同努力的结果。在科学基金的评审和管理工作中，学科工作人员依靠专家，建立了良好的工作关系，工作上得到专家的支持和配合，遇到困难和问题也能得到专家的理解与体谅。在学科内部形成了高效和民主的工作作风，工作中既坚持公开、公平和公正的民主作风，同时又敢于严格管理。无论是学科工作人员还是短期兼聘人员，在机械学科工作都感受到了集体的温暖，基金文化的熏陶，不仅学到了专业知识并积累了管理经验，而且对个人的发展也是十分有益的。

通过科学基金的资助，应该说我们已经取得了很好的成绩，但也必须清醒地认识到我们与世界先进水平相比还有很大的距离。根据文献统计，在机械工程科学领域，2004年我国科学家发表的论文被SCI收录1 145篇，仅次于美国位列世界第二位。但在论文引用方面，根据ESI 1996-2006年10年累计统计数据，我国科学家在机械工程科学领域发表论文总引用次数在前20位的国家中排第19位，在机械工程领域排名世界前20位的研究机构或大学中没有中国的，在个人引用的前20名中没有中国学者的名字。与世界发达国家相比，我国在机械工程科学领域中跟

踪性研究较多，原始性创新较少，低水平研究和重复研究比较多，科研成果缺乏学术影响力。如在摩擦学领域，基础研究的特点相对其他工程科学领域比较明显，发表的文章比较容易被SCI收录。在机械学科，仅有的两个创新研究群体都是在摩擦学领域从事研究工作的，国家杰出青年科学基金获得者最多的也在这个领域。但是，在几个重要的方面却没有中国学者的地位，如一年一度的国际摩擦学金牌奖中国学者还没有获得过，在国际摩擦学理事会等国际学术机构中没有中国学者的位置，一些大型的有影响的国际学术会议和活动还没有在中国举行过，尚未有标志性的重大基础研究成果，也没有中国学者在有重大影响的国际学术会议上做特邀报告。要真正实现建设创新型国家的目标，提高机械工程科学领域自主创新的能力，机械学科任重而道远！

风物长宜放眼量。随着国家在基础研究方面经费的不断增加，国家自然科学基金应结合国家发展的战略目标和社会发展与经济进步的重大需求，准确把握国家自然科学基金“支持基础研究，坚持自由探索，发挥导向作用”的战略定位，完善和发展中国特色的科学基金制，着力营造有利于源头创新的良好环境，推动学科均衡、协调和可持续发展，培养和造就一批具有国际影响力的杰出科学家，提升基础研究整体水平和国际竞争力，为增强我国的自主创新能力和建设创新型国家做出应有的贡献。

本文集能够结集出版，得益于各位专家提供了丰富而翔实的素材、稿件或论文，机械学科各位负责人细致的组织工作，武汉理工大学领导的支持，数字制造科学编辑部工作人员花费了大量的心血对文集进行设计和编排，在此表示衷心感谢！



在又一个充满希望和生机的春天到来之际，我们把这部著作献给读者。它是我国机械与制造工程科学领域的知名专家和学者撰著的近20年来在学科发展、基础研究、人才培养、学科及基地建设等方面取得的部分成就及工作感悟。

1986~2006年，机械学科资助各类项目共计3 444项。其中面上项目2 926项，重大和重点项目83项，杰出青年科学基金及海外青年合作基金50项，创新群体2个，资助总额6.3亿元。2006年机械学科的年度资助经费首次超过1亿元。20年来，机械学科年资助项数增长了3倍，年度资助经费增长了近30倍。

资助项目的成果斐然，有的领域取得了突出进展和原创性成果，为我国经济建设和机械工程提供了大批新理论、新方法和新技术，在国内外产生了重要影响，其中有的领域已在国际学术界占有一席之地。

在摩擦学领域，如清华大学温诗铸、雒建斌等学者的“纳米薄膜润滑理论与实验”研究成果被Granick, Hartl, Spikes等摩擦学界国际知名学者评价为“提出的薄膜润滑架起了流体动力润滑和边界润滑之间的桥梁”，“是对润滑研究的一个重要贡献”。与之同类的原创性成果还有北京邮电大学章继高教授的“颗粒对电接触可靠性影响及防护”，中国科学院兰州化学物理研究所刘维民、陈建敏等学者的“先进润滑材料与性能”，西南交通大学周仲荣教授的“微动摩擦学”，吉林大学任露泉、佟金等教授的“地面机械脱附减阻仿生技术”，以及青岛理工大学杨沛然、郭峰等教授的“热弹性流体动力润滑理论”等。

在机械动力学研究领域，如西南交通大学翟婉明教授的“机车系统耦合动力学理论与模型”（翟-孙模型）在我国高速机车车辆设计及性能分析中发挥了重大作用，“翟-孙模型”被国际同行称为该领域的4个代表性模型之一。作为机械动力学的重要分支，转子动力学方面的原创性成果还有西安交通大学屈梁生教授的“全息谱动平衡理论与技术”，南京航空航天大学胡海岩教授的“振动控制系统非线性动力学”，天津大学陈予恕、清华大学褚福磊等教授的“转子系统非线性动力学”，以及南京航空航天大学赵淳生教授的“超声电机研究”等。

在机构学、机械传动和结构强度领域，如北京邮电大学梁崇高、廖启征等教授解决了国际学术上称为机构学的珠穆朗玛问题——“7R空间机构位移分析”，被国际机器和机构学联合会主席Angeles称为“机构学发展的一个里程碑”。与之同类的原创性成果还有燕山大学黄真、上海交通大学高峰等教授的“并联机器人及其机构学理论”，哈尔滨工业大学陈湛闻教授的“双圆弧齿轮强度计算方法”，重庆大学王家序教授的“水润滑复合材料动密封轴承”，中国矿业大学葛世荣教

授的“矿井提升机补偿制动技术及安全装备”，西安交通大学卢秉恒等学者的“基于迷宫流道流动特性的滴灌灌水器抗阻设计”，以及华东理工大学涂善东教授的“高温结构完整性理论与技术”等。

在机械制造加工和成形领域，如湖南大学钟志华、李光耀等学者的“汽车覆盖件成形工艺和模具技术”，吉林大学宋玉泉教授的“金属超塑性成形理论”，华中科技大学师汉民、杨叔子等学者的“机床切削非线性颤振理论”，以及山东大学艾兴、黄传真等学者的“颗粒和晶须协同增韧陶瓷刀具材料与工艺”等。

在机械测量理论与方法领域，如哈尔滨工业大学谭久彬、赵维谦等教授的“超精密特种形状测量技术与装置”，天津大学叶声华教授的“先进制造中空间尺寸测量的现场校准方法和装置”，大连理工大学孙宝元教授的“新型压电石英传感器及测量技术”，北京航空航天大学张广军教授的“激光视觉在线动态测量系统及关键技术”，中北大学张文栋教授的“三轴加速度传感器及新型压缩存储测试系统”，西安交通大学蒋庄德教授的“耐高温压力微传感器”，重庆大学秦树人教授的“智能控件式虚拟仪器”，以及重庆工学院彭东林教授的“时栅位移传感器及其测试系统”等。

此外，在数字制造、生物制造、微纳制造、电子制造、绿色制造与再制造等领域，也取得了与国际水平相当的进展和成果。

喜看今日的机械科学，生机盎然，与信息科学、生命科学、材料科学、纳米科学和管理科学交叉而生辉，与国家和社会的需求相适而发展。

与此同时，国家自然科学基金培养了一大批高素质科研人才，涌现出翟婉明、胡海岩、丁汉、周仲荣、曾攀、刘维民、雒建斌、葛世荣、林忠钦、黄田、李元元、杨合、尹周平、钱林茂等众多优秀青年学者，他们已成为我国机械工程科学界的领军学者或学术骨干；一些多次获得基金资助的优秀学者，如温诗铸、熊有伦、宋玉泉、赵淳生、卢秉恒、钟志华等当选为院士。

20年来，国家自然科学基金对我国机械和制造业中关键科学技术问题的解决、我国机械工程科学和国民经济的发展，以及培养造就高素质科技人才的过程中发挥了重要作用。

机械科学能有如此成就，从根本上说，是由“平等竞争、科学民主、鼓励创新”的运行机制，以及“依靠专家、发扬民主、择优支持、公正合理”的评审方针决定的。基金委成立之初就聘请了雷天觉、路甬祥、黄树槐、范宏才、潘际銮、闻邦椿、黄尚廉、邓家诤、叶尚辉、王棣堂等机械领域知名专家组成第一届

学科评审组，他们为学科的早期发展起到了奠基和开拓作用。近年来，由钟掘、朱剑英、温诗铸、杨叔子、陈心昭、熊有伦、冯培恩、卢秉恒、海锦涛、赵淳生、柳百成、王立鼎、宋天虎、徐滨士、刘又午、叶声华、郭东明、葛世荣、董申、秦树人、李培根、屈梁生、宁汝新等专家组成的具有高学术性、权威性、代表性和公正性的各届学科评审组，在决策资助方向、遴选学科优先领域、制定项目指南和项目评审等工作中作出了重大贡献。学科还拥有1 700多名学术水平较高、评审认真公正的同行专家，在项目评审工作中起到了重要作用。

机械学科在1988~2006年期间组织专家进行了多次学科发展战略研究，撰写了《机械制造》（冷加工）、《机械制造》（热加工）、《机械学》、《机械工程科学技术前沿》、《先进制造技术基础》、《机械与制造科学》以及《摩擦学发展前沿》等发展战略研究报告，对把握学科的发展方向、遴选优先领域以及重大和重点项目的立项起到了重要作用。

青年是学科的未来，国际学术交流和合作是实现我国基础研究走向世界的必由之路。在基金委领导的积极倡导和支持下，机械学科先后组织了7届海内外青年制造科学研讨会，加强国内外学者在设计与制造领域的学术交流和合作，吸引了众多海外学者回国服务。会议期间展示的机械学科资助项目进展和成果，促进了海内外的学术交流合作和项目的进展，推动了学科的发展。

全球化、信息化、知识化和绿色化是21世纪制造业发展的大趋势，中国正在成为制造大国，但还不是制造强国，如何发扬自主创新精神，实现从“Made in China”到“Made by China”的转变，仍然是我国制造业今后的长远目标。国家已经制定了发展制造业、制造技术与科学的战略规划，制造业和机械工程将面临一个大发展的机遇。

我国的制造业与发达国家相比还有很大的差距，我国制造业至今还没有几个世界级名牌产品和名牌企业，在世界上有重大影响的自主创新的制造技术还太少。

在国际学术界，我国机械与制造科学虽然在有的领域已占有一席之地，但总体上仍然与发达国家有较大差距，主要表现在缺乏国际级学术大师和国际知名学者，缺乏国际上有重要影响的、能在世界科技史上留下痕迹的重大理论和技术成果。

在机电装备和仪器领域，许多高技术仪器和重要装备目前还要依赖从国外进口。在产品设计和制造领域，我国还不拥有如大型飞机、高精密仪器、高技术装备（如微电子）、高档轿车等大型复杂系统的自主设计和制造的理论、技术和能力。

机械制造的基础工艺、基础技术和基础数据对提升我国制造业竞争能力十分重要，新工艺可导致技术发明，但如何提炼工艺中的关键科学问题却非易事。基础数据非常重要，但并未引起人们的足够重视。

微机电系统领域的研究，虽然已经开展了10余年，但关键的微纳尺度效应、制造工艺、测量和机械学问题并没有根本解决。仿生机械与生物制造、微纳制造领域已经有了很好的进展，但如何深入进行学科交叉研究以及与工程需求结合，还面临许多新的课题。

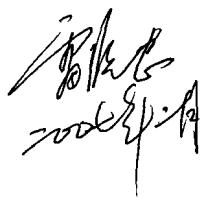
工业工程在我国是一个年轻的领域。但如何实现制造技术与制造管理科学的有机融合，开创中国特色的工业工程科学，还有不小差距。网络制造、绿色制造是非常重要的研究领域，但关键科学问题却不容易提炼和挖掘。

我国制造业的振兴和发展需要基础研究提供自主创新的现代制造理论和先进技术及装备。机械和制造基础研究要“顶天立地”，一要瞄准学科前沿，研究应具有基础性、前瞻性和探索性；二要瞄准机械工程实际和制造业中的关键技术和科学问题，研究应具有先导性和应用前景。

在基金项目申报中，目前存在一种“重数字仿真、轻物理模拟，重理论模型、轻物理实验”的缺“钙”综合症，高校与企业在制造基础研究领域紧密合作研究还不够多。在学术界，存在一种忙于获取项目和经费，轻视成果的研究和产出，急于和重复发表论文，评定成果的浮躁现象，不利于研究工作的深入和创新成果的产出。实际上，项目多，经费多，不一定成果多；论文多，专利多，不一定水平高。

20年来，我国机械制造业和机械工程科学基础研究取得了重大进展和突破。但离时代的要求、科技的发展和国家的需求仍存在较大差距。好在道路已经开通，航线已经探明，“乘风破浪今是时，直挂云帆济沧海”。21世纪中华民族的伟大复兴宏图为我们提供了极好的机遇和严峻的挑战。挑战和机遇并存，风险与成功同在。机械与制造科学将与我国制造业一起，在此宏图伟业中共同发展和强盛。

感谢本著所有作者和编纂委员会专家、学者的大力支持和指导！感谢武汉理工大学和数字制造科学编辑部的大力支持！感谢所有为中国机械科学基础研究作出贡献的人们！



张亮

序	黎 明	I
前言	雷源忠	V
学科发展		
纳米摩擦学研究进展	温诗铸	1
非线性转子动力学理论与工程应用	陈予恕, 曹树谦, 丁 千	13
振动利用工程学科的形成与发展	闻邦椿	17
地面机械脱附减阻仿生研究进展	任露泉	21
并联机器人的机构学理论	黄 真	24
生物制造工程的研究进展	颜永年	29
微流体控制系统技术基础研究	周兆英, 杨 岳, 叶雄鹰, 等	34
微纳米加工表面形成机理及技术研究	董 申	37
再制造研究创新与发展	徐滨士, 张 伟	41
绿色设计研究进展	刘志峰, 黄江鸿, 刘光复	46
数字制造科学研究进展	周祖德	51
典型成果		
攀登7R机构运动学的高峰	廖启征	57
机车车辆-轨道耦合动力学理论及工程应用	翟婉明	60
振动控制系统的非线性动力学研究	胡海岩	64
微动摩擦学研究	周仲荣	69
超声电机关键技术的基础研究	赵淳生	73
工程摩擦学理论及技术	葛世荣	77
全息谱原理与全息动平衡技术	屈梁生	82
压电测试新原理与技术创新	孙宝元	90
耐高温压力传感器的发明	蒋庄德	93
金属粉末高致密化精密成形理论与技术	李元元	97
精密位移测量中的时空转换原理与技术	彭东林	102
内高压成形理论与技术	苑世剑	106
特种润滑、密封材料和材料表面工程技术	陈建敏	112
高温结构完整性理论与技术的研究	涂善东	117
大功率激光切割、焊接及切焊组合加工技术与设备	段正澄, 周祖德, 胡伦骥	122
连续局部精密塑性成形技术研究与应用	华 林	126

虚拟测试仪器的创新研究	秦树人	129
-------------------	-----	-----

优秀人才

复杂环境下机械结构三维破坏理论到前沿交叉学科研究	郭万林	134
工程中数值分析的复杂力学高精度建模理论与应用	曾攀	137
薄膜润滑和超光滑表面加工	雒建斌	142
土壤机具系统仿生摩擦学研究	佟金	144
精确塑性成形与关键技术研究	杨合	150
陶瓷和金属的连接	冯吉才	156
微机电系统	黄庆安	160
机车车辆系统动力学及控制研究	张卫华	166
材料塑性加工过程数值模拟理论与关键技术研究	赵国群	170
数字建模与计算制造	尹周平	176
三维壳体接触碰撞过程的分析理论及关键技术	李光耀	181
空间机器人手系统和生物机电一体化技术	刘宏	185
纳米结构材料精密磨削机理及相关技术的研究	张壁	189
固着磨料超精密高速研磨研究	杨建东	193
新型梯度功能陶瓷刀具材料及其切削性能研究	赵军	197
微纳机械学与微纳制造基础研究	丁建宁	201
转子系统混沌行为与故障预测方法	胡莒庆	205
电流变液动态力学性能与结构研究	田煜	209
关键零部件微动磨损与疲劳损伤	朱晃晃	213
光子制造与光子测试研究	周明	216
滴灌灌水器的迷宫型结构与快速开发技术研究	魏正英	221

学科建设

问泉何得清如许，为有源头活水来 ——国家自然科学基金资助下的燕山大学机械工程学科	杜凤山，许立忠	226
木铎声声催奋进 ——有感国家自然科学基金项目推动江苏大学机械学科的发展	蔡兰，丁建宁，周明，等	232
科学基金促进了浙江理工大学学科建设和人才成长	赵匀	236
热弹性流体动力润滑的基础理论研究.....	杨沛然，郭峰，王静，等	238

基地建设

- 牵引动力国家重点实验室 张卫华 244
- 汽车车身先进设计制造国家重点实验室 李光耀 248
- 材料成形与模具技术国家重点实验室 李建军 251
- 流体传动及控制国家重点实验室 傅 新 254
- 机械制造及自动化教育部重点实验室 计时鸣 258
- 湖北省数字制造重点实验室 周祖德, 胡业发, 龙毅宏 263

团队建设

- “高速列车运行安全的关键科学技术研究”创新研究群体 周仲荣 267
- “空间润滑材料与技术研究”创新研究群体 刘维民 269

我与基金

- 加强基础研究, 走自主创新的道路 黄树槐 272
- 我与自然科学基金 宋玉泉 274
- 参加机械学科初建的感受 赵卓贤 277
- 我与机械学科 雷源忠 279
- 美国国家科学基金会设计与制造创新学科的认识 王国彪 284
- 我们对自然科学基金的理解与体会 王新华, 帅 梅 299

- 编后记 王汉熙 303

纳米摩擦学研究进展

温诗铸

1 前言

纳米摩擦学(或称微观摩擦学)是在纳米尺度上研究摩擦界面上的行为、变化、损伤及其控制的一门科学。摩擦学就其性质而言属于表面科学范畴,摩擦过程中材料表面所表现的宏观特性与其微观结构密切相关。纳米摩擦学研究提供了一种新的思维方式,即从分子、原子尺度上揭示摩擦磨损和润滑机理,建立材料微观结构与宏观特性之间的构性关系。因此更加符合摩擦学的研究规律,标志着摩擦学发展进入了一个新阶段。

纳米摩擦学研究有着广泛的应用需求。随着精密机械和高新技术装备的发展,特别是纳米科技所推动的新兴学科,例如纳米电子学、纳米生物学和微机电系统的研究都涉及微观摩擦和表面界面行为。由于尺度效应和表面效应的影响,这些问题所遵循的规律已不再是宏观摩擦学原理^[1]。

在 20 世纪 80 年代,我国摩擦学工作者在科研实践中意识到未来摩擦学研究的发展趋势是由宏观性能的考察深入到微观机理。因此,在 90 年代初期,当国际上开始兴起纳米摩擦学研究时,我国摩擦学工作者就迅速启动了该领域的研究,并取得可喜成果。本文仅就摩擦学国家重点实验室(清华大学)的研究,概述在纳米摩擦学方面的研究进展。

在国家自然科学基金资助下,摩擦学国家重点实验室(清华大学),在纳米薄膜润滑理论、受限液体行为、微粘附与微摩擦机理、微磨损与超精抛光、超薄膜研究等方面取得重要成果。同时,还研制出多项实验研究装置和测试技术,发展了分子动力学模拟计算技术在纳米摩擦学研究中的应用软件。其中“纳米润滑的研究和实验”获得国家自然科学二等奖、“NGY-2 型纳米级润滑膜厚度测量仪”获得国家技术发明三等奖。此外,还获得教育部科技进步一等奖 3 项,二等奖 1 项。出版学术专著《纳米摩擦学》(清华大学出版社,1998),参编“Advance in Tribology”(Marcel Dekker, Inc., 2004),发表学术论文 300 余篇。

2 薄膜润滑

通过对弹性流体动力润滑(简称弹流润滑)研究的实践,我们认识到,在边界润滑与弹流润滑之间存在以纳米膜厚为特征的薄膜润滑状态^[2,3]。

根据对润滑理论体系的分析不难看出,无论从润滑膜厚度的连续性还是润滑膜特征由吸附边界膜转变到粘性流体膜都表明,在边界润滑与弹流润滑之间存在一个还不被完全认识的过渡区。

现代制造技术的发展,机械加工的 surface 品质日益提高,再加上微观弹流润滑膜压力对粗糙峰具有展平作用,以及润滑膜高压下的固化现象,都大大地加强了实现薄膜润滑状态的可能性。此外,薄膜润滑往往是保证现代一些高科技装备和超精密机械工作的关键技术。

雒建斌等学者^[4,5]在自行研制的纳米膜厚点接触弹流润滑实验装置上对薄膜润滑进行了系统的研究。实验表明,当膜厚薄到数个纳米时仍然可以实现全膜润滑状态(见图1)。当膜厚小于30 nm左右时,膜厚随工况参数的变化规律不再遵循传统的弹流润滑理论,从而构成一种新的润滑状态。此外,薄膜润滑的膜厚与摩擦副材料的表面能密切相关,表面能最高的TiO₂具有最厚的油膜。因此,表面效应是决定润滑行为的关键因素,这是薄膜润滑的主要特征。

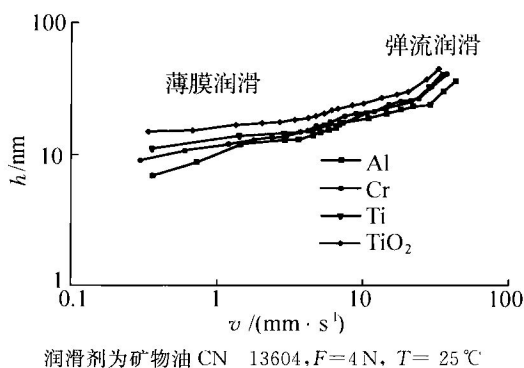
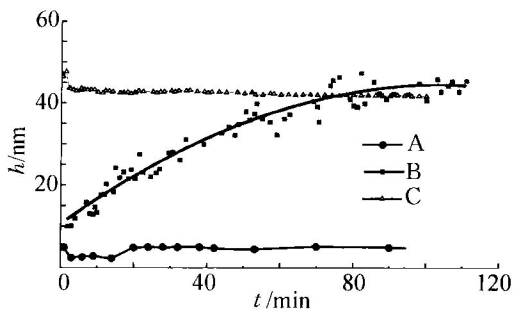


图1 薄膜润滑

实验研究还揭示出薄膜润滑另一个重要特征——时间效应,即油膜厚度随连续运行时间而增加^[6]。图2中A、C分别为边界润滑和弹流润滑状态,它们的油膜厚度值稳定不变。B为薄膜润滑,其油膜随时间不断增厚,逐渐达到稳定数值。这是由于润滑油分子在固体表面能的作用下,向表面聚集并趋于有序排列,使有序层厚度逐渐增加。随着有序层厚度增加,表面力的作用也随之减弱,最终油膜厚度达到稳定值。

在系统考察特性的基础上,我们提出了薄膜润滑的物理模型^[7]。

弹流润滑膜是油分子无序的流体膜,其性能服从粘性流体力学规律。对于边界润滑状态,润滑膜是分子吸附在固体表面形成分子有序排列而呈类固态的吸附膜,通常是单分子吸附膜。薄膜润滑状态的润滑膜是由流体膜、有序膜和吸附膜组成的多层结构(见图3)。其中,有序膜是由于表面能作用而形成的分子有序的液态膜。



A: 十二烷+3%棕榈酸, $F=4\text{ N}$, $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v=0\text{ mm/s}$, $d=25.4\text{ mm}$;
 B: 十二烷+3%棕榈酸, $F=4\text{ N}$, $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v=3.12\text{ mm/s}$, $d=25.4\text{ mm}$;
 C: 机油 1, $F=20\text{ N}$, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v=54.5\text{ mm/s}$, $d=25.4\text{ mm}$

图2 时间效应

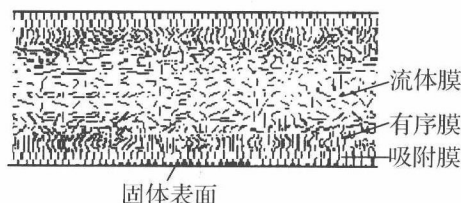


图3 薄膜润滑模型

当润滑膜较厚时,流体膜占主导地位,润滑性能服从弹流润滑规律。随着润滑膜变薄,有序膜的厚度所占比例增大,则呈现薄膜润滑特征。而当膜厚进一步减小,单分子吸附层将起主导作用,这就是边界润滑状态。在此基础上,我们建立了这3种润滑状态之间的转变准则^[5]。

本项研究首次揭示出纳米薄膜润滑特征及状态转变规律,对于完善润滑体系的理论与实践具有重要意义,受到 Granick、Israelachvili 等学者的高度评价。他们认为该项研究是“在摩擦学的学科前沿问题上作出了创造性贡献”,“将润滑膜区分3种特性膜,即流体膜、有序液体膜和边界吸附膜,是对润滑研究的一个重要贡献”,“薄膜润滑架起了流体动力润滑和边界润滑之间的桥梁”,“明确地区分了厚膜向薄膜润滑的转变,对后续纳米量级的摩擦机理研究有着重要影响”。

3 受限液体特性与有序分子膜润滑

超精密机械和微机电系统的润滑,以及某些微纳制造工艺都需要了解两表面纳米间隙中微量液体的性能。这种液体被称为受限液体(Confined Liquid)。当间隙中液体厚度小于5~10个液体分子直径时,在表面力作用下,受限液体具有与体相截然不同的分子结构和特性^[1]。

在纳米摩擦学研究中,受限液体的分子排布和有序化结构,以及流动过程中的相变和流变性能等是决定分子膜润滑行为的重要因素。对此,胡元中等学者^[8]采