



2014—2015

机械工程 学科发展报告 (摩擦学)

REPORT ON ADVANCES IN
MECHANICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编 中国机械工程学会 编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

0313.5-12

2014—2015

机械工程

学科发展报告（摩擦学）

REPORT ON ADVANCES
IN MECHANICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编

中国机械工程学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

2014—2015 机械工程学科发展报告 (摩擦学) / 中国科学技术协会主编 ; 中国机械工程学会编著 . —北京 : 中国科学技术出版社 , 2016.2

(中国科协学科发展研究系列报告)

ISBN 978-7-5046-7071-7

I. ① 2… II. ① 中… ② 中… III. ① 摩擦—理论—学科发展—研究报告—中国—2014—2015 IV. ① O313.5-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 025905 号

策划编辑	吕建华 许 慧
责任编辑	李 红
装帧设计	中文天地
责任校对	何士如
责任印制	张建农
出 版	中国科学技术出版社
发 行	科学普及出版社发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编	100081
发行电话	010-62103130
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn
开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	374 千字
印 张	17.25
版 次	2016 年 4 月第 1 版
印 次	2016 年 4 月第 1 次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-7071-7 / O · 188
定 价	70.00 元

(凡购买本社图书 , 如有缺页、倒页、脱页者 , 本社发行部负责调换)



2014—2015

机械工程学科发展报告（摩擦学）

首席科学家 雒建斌 刘维民

专 家 组（按姓氏笔画为序）

马国政	王文中	王文健	王廷梅	王庆良
王国彪	王建章	王晓波	王海斗	古 乐
田 煜	白少先	白秀琴	冯大鹏	邢志国
吉爱红	朴钟宇	朱旻昊	刘 焜	刘大猛
刘树海	刘洪涛	严新平	李 健	李红轩
何永勇	汪家道	张永振	张执南	张招柱
张俊秋	张俊彦	张洪玉	张晨辉	张德坤
陈光雄	岩 雨	岳 文	金 国	周 峰
郑 靖	孟祥铠	赵春华	郝俊英	段海涛
姚萍屏	袁成清	钱林茂	卿 涛	高晓明
郭 峰	郭智威	唐光泽	黄伟峰	彭旭东
傅迎庆	温泽峰	靳忠民	蔡振兵	

学术秘书 左晓卫 于宏丽 王 乐

党的十八届五中全会提出要发挥科技创新在全面创新中的引领作用，推动战略前沿领域创新突破，为经济社会发展提供持久动力。国家“十三五”规划也对科技创新进行了战略部署。

要在科技创新中赢得先机，明确科技发展的重点领域和方向，培育具有竞争新优势的战略支点和突破口十分重要。从2006年开始，中国科协所属全国学会发挥自身优势，聚集全国高质量学术资源和优秀人才培养队伍，持续开展学科发展研究，通过对相关学科在发展态势、学术影响、代表性成果、国际合作、人才队伍建设等方面的最新进展的梳理和分析以及与国外相关学科的比较，总结学科研究热点与重要进展，提出各学科领域的发展趋势和发展策略，引导学科结构优化调整，推动完善学科布局，促进学科交叉融合和均衡发展。至2013年，共有104个全国学会开展了186项学科发展研究，编辑出版系列学科发展报告186卷，先后有1.8万名专家学者参与了学科发展研讨，有7000余位专家执笔撰写学科发展报告。学科发展研究逐步得到国内外科学界的广泛关注，得到国家有关决策部门的高度重视，为国家超前规划科技创新战略布局、抢占科技发展制高点提供了重要参考。

2014年，中国科协组织33个全国学会，分别就其相关学科或领域的发展状况进行系统研究，编写了33卷学科发展报告（2014—2015）以及1卷学科发展报告综合卷。从本次出版的学科发展报告可以看出，近几年来，我国在基础研究、应用研究和交叉学科研究方面取得了突出性的科研成果，国家科研投入不断增加，科研队伍不断优化和成长，学科结构正在逐步改善，学科的国际合作与交流加强，科技实力和水平不断提升。同时本次学科发展报告也揭示出我国学科发展存在一些问题，包括基础研究薄弱，缺乏重大原创性科研成果；公众理解科学程度不够，给科学决策和学科建设带来负面影响；科研成果转化存在体制机制障碍，创新资源配置碎片化和效率不高；学科制度的设计不能很好地满足学科多样性发展的需求；等等。急切需要从人才、经费、制度、平台、机制等多方面采取措施加以改善，以推动学科建设和科学研究的持续发展。

中国科协所属全国学会是我国科技团体的中坚力量，学科类别齐全，学术资源丰富，汇聚了跨学科、跨行业、跨地域的高层次科技人才。近年来，中国科协通过组织全国学会

开展学科发展研究，逐步形成了相对稳定的研究、编撰和服务管理团队，具有开展学科发展研究的组织和人才优势。2014—2015 学科发展研究报告凝聚着 1200 多位专家学者的心血。在这里我衷心感谢各有关学会的大力支持，衷心感谢各学科专家的积极参与，衷心感谢付出辛勤劳动的全体人员！同时希望中国科协及其所属全国学会紧紧围绕科技创新要求和国家经济社会发展需要，坚持不懈地开展学科研究，继续提高学科发展报告的质量，建立起我国学科发展研究的支撑体系，出成果、出思想、出人才，为我国科技创新夯实基础。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Shi Meng, the President of the Chinese Association of Science and Technology.

2016 年 3 月

摩擦学是一门与机械表面界面科学密切相关的学科，它主要研究相对运动表面之间的摩擦、磨损和润滑规律及其控制技术，涉及传统机械加工、交通运输、航空航天、海洋、化工、生物工程等诸多工业领域。统计资料显示，摩擦消耗掉全世界约 1/3 的一次性能源，磨损致使大约 60% 的机器零部件失效，50% 以上的机械装备恶性事故起源于润滑失效或过度磨损。因此，对摩擦学领域中科学问题的不断研究和其研究成果的工业应用，一直是我国摩擦学领域科学家们的关注焦点，而该领域近年来所取得的一系列研究成果更是得到了国际摩擦学界的一致认可。根据《中国科协学科发展研究项目管理实施办法（2014 年修订）》的精神和要求，中国机械工程学会于 2014 年组织了以学会常务理事、中国科学院院士雒建斌、中国科学院院士刘维民为首席科学家的专家撰写组，分设 7 个专题小组，对摩擦学领域的学科进展和技术应用开展调研。参与项目的专家学者在充分收集资料、科学分析数据的基础上，经多次深入研讨和广泛意见征求，不断修改完善，编写了《2014—2015 机械工程学科发展报告（摩擦学）》（以下简称《报告》）。

《报告》设综合报告及制造领域摩擦学、陆地交通领域摩擦学、航空航天摩擦学、能源领域摩擦学、海洋装备领域摩擦学、生物与仿生领域摩擦学 6 个专题报告，涵盖了与摩擦学密切相关的主要领域。雒建斌院士和刘维民院士直接负责组织并撰写了《报告》的综合报告，在两位首席科学家的带领下共有 60 多位专家学者参与了《报告》的专题研究及撰写工作，所有撰稿者都来自摩擦学领域研究第一线，特别是他们中间的很多年轻专家学者都已是该领域的佼佼者。《报告》在成稿过程中不但获得学会很多理事专家的鼎力帮助与指导，还得到了中国科学院咨询项目“我国产业高能耗原因分析与节能降耗新技术发展趋势”（雒建斌院士负责）、“高端润滑材料体系发展战略研究”（刘维民院士负责）的支持，在此表示衷心的感谢！

2015 年 5 月公布的《中国制造 2025》，提出了我国实施制造强国战略的第一个十年行动纲领，改变我国制造业大而不强以及在自主创新、资源利用、产业结构水平、信息化程度、质量效益等方面的短板，实现转型升级和跨越发展的任务紧迫而艰巨。《报告》力求

通过系统的研究、分析和总结，客观、科学地评价近年来机械工程学科摩擦学领域研究的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法和新技术；结合摩擦学领域国际上的发展动向和国内重大研究计划和课题，分析比较国内外发展研究现状，提出研究方向；并对未来摩擦学领域的发展趋势做出预测，为从事机械工程及相关领域教学、科研、生产的科技人员以及国家相关科研管理和决策部门提供借鉴与参考。

由于时间、信息、研究和撰写水平的局限，《报告》中难免存在疏漏之处，欢迎读者指正。

中国机械工程学会

2015 年 11 月

序 / 韩启德

前言 / 中国机械工程学会

综合报告

摩擦学研究的进展与趋势 / 3

一、引言 / 3

二、近年最新研究进展 / 4

三、国内外研究进展比较 / 31

四、发展趋势及展望 / 45

参考文献 / 49

专题报告

制造领域摩擦学发展研究 / 59

陆地交通领域摩擦学发展研究 / 86

航空航天摩擦学发展研究 / 107

能源领域摩擦学发展研究 / 135

海洋装备领域摩擦学发展研究 / 173

生物与仿生领域摩擦学发展研究 / 202

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report / 241

Development of Tribology Research in China / 241

Reports on Special Topics / 250

Development of Tribology in Manufacture / 250

Development of Tribology in Transportation / 252

Development of Tribology in Aerospace / 253

Development of Tribology in Energy Industry / 254

Development of Tribology in Ocean Equipment / 256

Development of Bio-tribology and Bionic-tribology / 257

索引 / 259

综合报告



摩擦学研究的进展与趋势

一、引言

摩擦学是一门与机械表面界面科学密切相关的学科，它主要研究相对运动表面之间的摩擦、磨损和润滑规律及其控制技术。它涉及传统机械加工、交通运输、航空航天、海洋、化工、生物工程等诸多工业领域。统计资料显示，摩擦消耗掉全世界约 1/3 的一次能源，磨损致使大约 60% 的机器零部件失效，而且 50% 以上的机械装备恶性事故都起源于润滑失效或过度磨损。欧美发达国家每年因摩擦、磨损造成的经济损失占其国民生产总值（GNP）的 2% ~ 7%，而在工业生产中应用摩擦学知识和研究成果可以节约的费用占 GNP 的 1.0% ~ 1.4%^[1]。我国已经成为制造大国，但远不是制造强国，在生产与制造过程中对资源和能源的浪费严重，单位国内生产总值（GDP）能耗约为日本的 8 倍，欧盟的 4 倍，世界平均水平的 2.2 倍，若按 GDP 的 5% 计算，2014 年我国摩擦、磨损造成的损失达 31800 亿元，因此，开发和应用先进摩擦与润滑技术实现能源与资源节约的潜力巨大。另外，机械产品中的摩擦界面除了起到传递运动和能量的作用，还可具备防腐、减阻、吸声等特殊功能，对机械系统的效率、精度、可靠性和寿命等性能具有重要的甚至是决定性的作用。摩擦学理论与技术可用于改善机械系统工作效率、延长使用寿命、减少事故发生，为解决人类社会面临能源短缺、资源枯竭、环境污染和健康问题提供有效的解决方案。

人类很早就生活在生产实践中应用摩擦与润滑技术，而对摩擦规律的科学探索也有数百年的历史^[2]。早在 15 世纪，意大利的列奥纳多·达·芬奇就开始对摩擦学理论进行探索，1785 年法国摩擦学及物理学家库仑提出干摩擦的机械啮合理论，英国的鲍登等人于 1950 年提出了黏着摩擦理论。关于润滑，英国人雷诺于 1886 年根据前人观察到的流体动压现象，总结出流体动压润滑的基本理论，其后相继发展出了边界润滑（1921 年）、

弹性流体动力润滑（1949 年）和薄膜润滑（1990 年）理论。鉴于摩擦、磨损与润滑的研究进展和在工业中的广泛应用及重要地位，1966 年英国的 H. Peter Jost 首次提出“摩擦学”这一术语，将其定义为“研究相对运动表面间的摩擦、润滑和磨损，以及三者间相互关系的理论与应用的一门边缘学科”。对摩擦的研究主要是揭示摩擦力的起源及其能量耗散规律等基本的物理过程及机理。对材料磨损的研究旨在揭示材料去除机制以及影响因素，进而建立物理模型和数学描述，以及寻求润滑、表面处理等技术，以减少摩擦和控制磨损，对国民经济的发展具有重要意义。润滑是降低摩擦、减少或避免磨损的必要手段。研制和正确使用润滑剂和润滑技术是大幅度提高机械效率、保证机械长期可靠地工作、节约能源的最主要技术途径。为了生态环境的可持续发展，近年来摩擦学研究紧跟时代需要，以绿色、高效、多功能作为润滑技术的发展新方向。随着研究从宏观向微观领域的不断深入，表面效应和界面效应愈来愈突出，一方面为摩擦学基础理论和技术问题的突破提供了导向作用，另一方面又催生出更为宽广的一个新的研究领域——机械表面界面科学。

随着我国从制造大国向制造强国的发展目标迈进，摩擦学专门知识对相关技术的指导作用及其重要性愈加凸显。随着我国产业升级的发展，制造业、航空航天、地面交通运输、能源、海洋、生物与仿生等不同工业领域对摩擦学技术提出了大量的迫切需求。特别地，近年来，我国政府部门和科技界十分重视工业基础，即关键基础材料、核心基础零部件/元器件、先进基础工艺和产业技术基础（简称“四基”）等能力薄弱的问题。2014 年 1 月，工业和信息化部向中国工程院发出“关于委托开展工业强基战略研究的函”，指出基础能力不强是制约工业由大变强的主要瓶颈。摩擦学基础理论和技术的研究与“四基”密切相关，比如轴承、齿轮、螺栓、密封件、刹车片等基础零部件虽然看似简单，但是对其摩擦学机理及材料和生产技术的研究匮乏，严重制约了我国高端装备的升级换代与性能提升。针对各行业对摩擦学需求的迅猛发展，本报告主要概述了近 5 年我国在摩擦、磨损与润滑基础理论研究以及在不同工业领域应用中取得的创新性和突破性研究进展，通过对国内外研究进展进行对比，对今后摩擦学基础理论和应用技术的研究趋势进行了展望。

二、近年最新研究进展

（一）摩擦学基础理论

1. 摩擦机理及控制

摩擦的起源与能量耗散机制及其控制一直是摩擦学基础研究的核心科学问题。黏着摩擦理论认为摩擦力来自表面间微观真实接触处的黏着点或表面膜的剪切应力，摩擦二项式中提出摩擦力由表面间机械作用和分子间作用力组成。从原子分子尺度来看，摩擦力主要与摩擦界面在滑动过程中存在的能量积累和突然释放的非稳态过程相关，非稳态过程导致原子振动并最终耗散为热。黏着和摩擦分别反映了接触界面发生相对运动时在法向和切向

遇到的抗力。法向黏着迟滞与切向摩擦能量耗散往往存在着耦合关系。材料的摩擦学行为是由摩擦副材料的跨尺度特性决定的,微观分子、原子尺度的接触和作用需要与宏观材料的力学特性结合,建立跨尺度多物理场模型,系统全面揭示宏观摩擦学现象与微观原子、分子尺度的表面界面作用的联系。微观界面的能量耗散最终导致了宏观摩擦中的热、力、光、电磁辐射等现象。很多关于摩擦机理的研究都是围绕不同尺度下的摩擦表面之间的基本行为和规律去展开的。

(1) 原子尺度摩擦和固体超滑机理

摩擦总是直接发生在两固体表面之间的原子、分子间的直接接触与分离过程中。常见材料的摩擦通常伴随着磨损,导致固体表面的形貌异常变化,从而不容易开展分子原子量级的摩擦机理的研究。为了对摩擦机理进行深入探讨,人们尽量寻找一些原子级光滑的表面来进行研究,其中一些层状二维材料,如云母、石墨等是比较理想的选择。

二维层状材料是由二维材料(如单层石墨烯、 MoS_2 、 h-BN 等)堆叠而成的材料体系,因其层间剪切强度低,可以作为良好的固体润滑材料。胡元中小组通过计算体系势能起伏和任意滑移路径上的滑动能垒,获得了层间剪切强度,分别研究了石墨烯、氧化石墨烯、氟化石墨烯、 MoS_2 层间摩擦机理。研究发现氧化石墨烯的静电吸引和氢键作用会导致较大的层间摩擦力,而理想氟化石墨烯(化学计量比1:1)由于强电负性的氟原子之间具有的静电排斥作用,从理论上可以获得层间较小的摩擦力^[3]。此外,层间摩擦力并不取决于界面电荷密度的绝对值,而是取决于滑动过程中的电荷密度涨落。当界面电荷呈现摩尔纹形状分布时,滑动过程中电荷密度涨落显著降低,从而获得超滑状态^[4]。氟化非晶碳基薄膜在高真空条件下摩擦过程中通常表现为瞬间磨损失效,迄今为止,这种磨损失效的本质机制仍不清楚。王立平小组研究表明高真空条件下塑性变形引起的接触界面间强黏着是薄膜的主要失效机制。摩擦界面的C—F键和C—C键对周围的应力场分布和化学环境非常敏感,当施加应力或改变对偶材料的成键状态时,与摩擦密切相关的界面电荷分布发生明显改变,导致界面C—F键和C—C键的键长和键能发生相应变化,从而影响界面的稳定性和黏着相互作用^[5]。

清华大学郑泉水小组、魏飞小组在厘米级石墨片间和双壁碳纳米管管壁之间(卷曲的石墨烯层间)实现了超滑现象^[6]。在研究中,他们制备了超长碳纳米管并用 TiO_2 纳米颗粒进行标记和修饰,在光学显微镜和电子显微镜中分别进行了单根碳纳米管的操纵实验。在光学显微镜下,用气流吹动碳纳米管,发现在气流的作用下双臂碳纳米管的内层被拔出,气流减小后内层可以进行快速的回缩,这一实验结果预示了管壁之间可能存在超低的摩擦力。进而在扫描电镜中,利用纳米硅悬臂对双壁碳纳米管内外层间摩擦力进行了精确的测量,发现双壁碳纳米管内外层的层间摩擦力在纳米量级,摩擦力随着内层拔出长度没有明显改变,并计算了内外层间的剪切强度在帕斯卡量级。与碳管或者石墨烯之间的固体超滑类似,锥建斌小组将石墨烯涂到 SiO_2 小球,然后与高取向石墨(HOPG)对摩,实现了超滑(摩擦系数为0.002),胡元中小组和张俊彦小组分别都对类金刚石固体薄膜的超滑

开展了理论和实验研究，丰富了对类金刚石剪切石墨化和表面钝化的超滑机理的理解。

（2）界面摩擦调控

摩擦现象无时无刻不存在于各种机械与人们日常生活中的相对运动表面之间。通常，在确定摩擦与润滑材料之后，经过磨合，人们能得到一个相对稳定的摩擦系数。要对摩擦力进行在线调控只能通过对法向载荷的调节来实现，而不能对摩擦系数进行调控。从材料科学角度来看，界面摩擦性能与两个接触界面之间相互作用强度有关，因此可以通过多种方式控制两个接触界面之间相互作用强度，从而在一定程度上实现界面之间摩擦“主动”调控。目前国内的研究人员在这方面已开展不少研究。

清华大学的孟永钢、田煜等人对摩擦的电磁场主动调控开展了长期研究，主要使用外加电磁场强度控制微纳表面之间的电磁力作用强度，从而改变两相对运动表面之间的法向和切向力作用强度。此外，通过控制导电摩擦副表面的电势来控制带电基团在固体表面的吸附或脱附，从而改变固体表面的剪切强度，调控得到不同的边界润滑状态和摩擦系数^[7]。除了深入研究基于水基润滑的电控摩擦机理，还针对有机溶剂和离子液体体系，使用不同的离子液体（如 1-辛基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐（[OMIM]BF₄）、1-辛基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐（[OMIM]PF₆）和 1-癸基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐（[DMIIm]PF₆），溶解在碳酸丙烯酯中，对钢材质的球-盘摩擦主动控制开展了研究，得到了电势依赖的摩擦磨损行为，并可通过吸附的离子种类和表面浓度来解释相关现象^[8]。

中国科学院兰州化学物理研究所的周峰等人通过对固体表面修饰或无机/有机复合将一些响应性官能团引入固体表面或基体之中构筑各种响应性表面，通过施加外界刺激来改变固-液界面水化程度、微观形貌、化学组成、界面电荷等，实现固体表面润湿、黏附和摩擦的调控。通过将离子型单体接枝到固体表面，改变其亲疏水性实现了固-固界面摩擦电解质调控，摩擦系数可以从极低（~0.001）到极高（~1）连续调控^[9]。将温度敏感单体（如 N-异丙基丙烯酰胺）、酸碱敏感单体（含羧基、氨基官能团等）引入固体表面（或聚合物基体中），通过改变外界温度或环境 pH 值来改变特征官能团的水化程度从而实现摩擦系数的温度和酸碱度调控。通过改变接枝聚合物（或凝胶表面）在不同溶剂中的溶胀程度，或多元聚合物在不同溶剂之中重组可以实现固体表面溶剂调控^[10]。据此原理，将两种或多种响应聚合物单体引入聚合物基体之中可以实现双刺激或多刺激敏感表面，实现了摩擦系数的多重调控^[11]。

通过外界刺激来改变界面摩擦系数，使得人们在不接触界面前提下可依据人的意志来改变界面的润滑性能。这些摩擦可控的界面在智能机械系统中有广阔的应用前景。

（3）微纳结构的黏/脱附控制机理

当固体结构尺寸减小到微纳米尺度，尺寸越小，表面力对微纳结构的黏附与摩擦行为的影响越大。随着纳米技术与纳米制造的发展，纳米摩擦学在微纳机电系统以及生物与仿生技术中的作用越来越大。除了人们通过现代纳米制造技术制造微纳米结构外，研究发现自然界的壁虎、蚂蚁、蜜蜂、苍蝇、蜘蛛和蜥蜴等动物或昆虫的强黏附和摩擦的控制能力

与它们足部的微纳米尺度的刚毛结构密切相关。与通常机械加工得到的粗糙表面可用球形或者椭球等来近似描述微观的粗糙峰形状不同,在扫描电镜下观察壁虎脚趾刚毛的微观结构发现其末端是纳米量级的铲状薄板结构。传统接触模型考虑的多为常见加工表面的粗糙度,发展了考虑球/平面接触的 Johnson-Kendall-Roberts (简称 JKR) 等模型,在这些模型中主要考虑了不同表面之间作用势的分布情况,预测了脱附黏着力的大小,该力在不同分离方向上是各向同性的。传统球/平面的接触模型不能解释生物体刚毛这样的各向异性微纳结构的易脱附行为。

清华大学的田煜与国外合作,提出了同时考虑摩擦力和黏着力的薄板剥离模型^[12]:接触区域范德华力产生摩擦力,剥离区范德华力产生黏着力。壁虎通过脚趾卷入和卷出宏观动作,和刚毛自身的弯曲结构,可调节对刚毛末端的铲状薄板结构的剥离角度。脚趾卷入时对应小剥离角度和强黏着与摩擦,卷出时大剥离角度对应弱黏着与摩擦,从而可改变摩擦力和黏着力三个数量级以上,实现强黏附和易脱附。这种分区域考虑微观黏着与摩擦的模型也适用于其他微纳米结构的摩擦学行为的分析。根据黏着的剥离区域模型,提出了通过调节表面背部基底刚度、倾斜微柱几何与力学参数去优化强黏附、易脱附性能的方法,制备了末端带薄板结构的仿生表面,具有与天然壁虎刚毛类似的黏着与摩擦的各向异性,并研制了可对平面结构进行垂直抓持与释放的夹持器原型^[13, 14]。这些研究有助于深入理解微纳米结构的黏着与摩擦来源及其耦合规律,并展示控制和利用微纳结构与表面间的范德华力产生的黏着力的方法。

2. 材料磨损

对材料磨损的研究旨在揭示摩擦过程中的材料去除机制,以及寻求润滑和表面处理技术控制摩擦和减少磨损。它对于国民经济的发展具有重要意义,不仅能够通过减摩降噪为国家节约资源和能源,同时可为我国高端制造业的发展奠定技术基础。本小节着重介绍近5年我国在材料磨损基础研究领域取得的重要进展,主要包括化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 中的磨损、微观磨损、复合微动磨损、碳基薄膜磨损和载流磨损5个方面。

(1) CMP 抛光中的磨损

CMP 是超大规模集成电路制造的关键工艺步骤之一,是同时实现晶圆局部及全局平坦化的唯一手段。一直以来,超精密加工过程中产生的摩擦和磨损现象属于摩擦学研究领域,同样,CMP 过程中的材料去除机理也需要用摩擦与磨损理论解释。CMP 受化学作用、机械作用、热效应等各种因素的影响,过程极为复杂,到目前为止材料去除机理尚不完全清楚。因此,对 CMP 过程中的摩擦、磨损与润滑现象进行研究,是揭示材料去除机理的基础,也是提升 CMP 效率和质量的关键。

清华大学雒建斌、路新春团队针对集成电路铜互连布线和新型阻挡层的 CMP 过程中的润滑状态、摩擦化学行为和化学机械协同作用下的材料去除机理等关键问题开展了系统研究,并取得了一定进展,具体包括:①研制出 CMP 过程中纳米颗粒运动观测系统^[15],