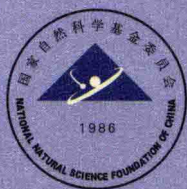


学术引领系列



国家科学思想库

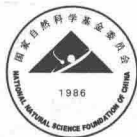
中国学科发展战略

润滑材料

国家自然科学基金委员会
中国科学院

 科学出版社

学术引领系列



国家科学思想库

中国学科发展战略

润滑材料

国家自然科学基金委员会
中国科学院



科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

润滑材料 / 国家自然科学基金委员会, 中国科学院编. —北京:
科学出版社, 2019.7

(中国学科发展战略)

ISBN 978-7-03-061592-3

I. ①润… II. ①国… ②中… III. ①润滑剂—学科发展—发展
战略—中国 IV. ①TE626.3-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 113216 号

丛书策划: 侯俊琳 牛 玲

责任编辑: 朱萍萍 陈 琼 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 黄华斌 陈 敬

联系电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 7 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 7 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 232 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国学科发展战略

联合领导小组

组 长：丁仲礼 李静海
副 组 长：秦大河 韩 宇
成 员：王恩哥 朱道本 陈宜瑜 傅伯杰 李树深
杨 卫 汪克强 李 婷 苏荣辉 王长锐
邹立尧 于 晟 董国轩 陈拥军 冯雪莲
王岐东 黎 明 张兆田 高自友 徐岩英

联合工作组

组 长：苏荣辉 于 晟
成 员：龚 旭 孙 粒 高阵雨 李鹏飞 钱莹洁
薛 淮 冯 霞 马新勇

中国学科发展战略·润滑材料

研 究 组

组 长：刘维民

成 员（以姓氏笔画为序）：

马建霞	王齐华	王晓波	王黎钦	古 乐
田 煜	汤仲平	严新平	李 健	李红轩
杨 军	张广安	张东恒	张永胜	张春辉
张俊彦	张晟卯	邵天敏	周 峰	袁成清
雒建斌				

秘 书：李维民 魏 秀



总 序

白春礼 杨 卫

17 世纪的科学革命使科学从普适的自然哲学走向分科深入，如今已发展成为一幅由众多彼此独立又相互关联的学科汇就的壮丽画卷。在人类不断深化对自然认识的过程中，学科不仅仅是现代社会中科学知识的组成单元，同时也逐渐成为人类认知活动的组织分工，决定了知识生产的社会形态特征，推动和促进了科学技术和各种学术形态的蓬勃发展。从历史上看，学科的发展体现了知识生产及其传播、传承的过程，学科之间的相互交叉、融合与分化成为科学发展的重要特征。只有了解各学科演变的基本规律，完善学科布局，促进学科协调发展，才能推进科学的整体发展，形成促进前沿科学突破的科研布局和创新环境。

我国引入近代科学后几经曲折，及至 20 世纪初开始逐步同西方科学接轨，建立了以学科教育与学科科研互为支撑的学科体系。新中国建立后，逐步形成完整的学科体系，为国家科学技术进步和经济社会发展提供了大量优秀人才，部分学科已进入世界前列，有的学科取得了令世界瞩目的突出成就。当前，我国正处在从科学大国向科学强国转变的关键时期，经济发展新常态下要求科学技术为国家经济增长提供更强劲的动力，创新成为引领我国经济发展的新引擎。与此同时，改革开放 30 多年来，特别是 21 世纪以来，我国迅猛发展的科学事业蓄积了巨大的内能，不仅重大创新成果源源不断产生，而且一些学科正在孕育新的生长点，有可能引领世界学科发展的新方向。因此，开展学科发展战略研究是提高我国自主创新能力、实现我国科学由“跟跑者”向“并行者”和“领跑者”转变

的一项基础工程，对于更好把握世界科技创新发展趋势，发挥科技创新在全面创新中的引领作用，具有重要的现实意义。

学科发展战略研究的核心是结合科学技术和经济社会的发展需求，在分析科学前沿发展趋势的基础上，寻找新的学科生长点和方向。在这个过程中，战略科学家的前瞻引领作用十分重要。科学史上这样的例子比比皆是。在1900年8月巴黎国际数学家代表大会上，德国数学家戴维·希尔伯特发表了题为“数学问题”的著名讲演，他根据过去特别是19世纪数学研究的成果和发展趋势，提出了23个最重要的数学问题，即“希尔伯特问题”。这些“问题”后来成为许多数学家力图攻克的难关，对现代数学的研究和发展产生了深刻的影响。1959年12月，美国物理学家、诺贝尔奖得主理查德·费曼在加利福尼亚理工学院举行的美国物理学会年会上发表了题为“物质底层大有空间——一张进入物理新领域的请柬”的经典讲话，对后来出现的纳米技术作出了天才的预见。

学科生长点并不完全等同于科学前沿，其产生和形成不仅取决于科学前沿的成果，还决定于社会生产和科学发展的需要。1841年，佩利戈特用钾还原四氯化铀，成功地获得了金属铀，但在很长一段时间并未能发展成为学科生长点。直到1939年，哈恩和斯特拉斯曼发现了铀的核裂变现象后，人们认识到它有可能成为巨大的能源，这才形成了以铀为主要对象的核燃料科学的学科生长点。而基本粒子物理学作为一门理论性很强的学科，它的新生长点之所以能不断形成，不仅在于它有揭示物质的深层结构秘密的作用，还在于其成果有助于认识宇宙的起源和演化。上述事实说明，科学在从理论到应用又从应用到理论的转化过程中，会有新的学科生长点不断地产生和形成。

不同学科交叉集成，特别是理论研究与实验科学相结合，往往也是新的学科生长点的重要来源。新的实验方法和实验手段的发明，大科学装置的建立，如离子加速器、中子反应堆、核磁共振仪等技术方法，都促进了相对独立的新学科的形成。自20世纪80年代以来，具有费曼1959年所预见的性能、微观表征和操纵技术的

仪器——扫描隧道显微镜和原子力显微镜相继问世，为纳米结构的测量和操纵提供了“眼睛”和“手指”，使得人类能更进一步认识纳米世界，极大地推动了纳米技术的发展。

作为国家科学思想库，中国科学院（以下简称中科院）学部的基本职责和优势是为国家科学选择和优化布局重大科学技术发展方向提供科学依据、发挥学术引领作用，国家自然科学基金委员会（以下简称基金委）则承担着协调学科发展、夯实学科基础、促进学科交叉、加强学科建设的重大责任。继基金委和中科院于2012年成功地联合发布“未来10年中国学科发展战略研究”报告之后，双方签署了共同开展学科发展战略研究的长期合作协议，通过联合开展学科发展战略研究的长效机制，共建共享国家科学思想库的研究咨询能力，切实担当起服务国家科学领域决策咨询的核心作用。

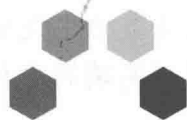
基金委和中科院共同组织的学科发展战略研究既分析相关学科领域的发展趋势与应用前景，又提出与学科发展相关的人才队伍布局、环境条件建设、资助机制创新等方面的政策建议，还针对某一类学科发展所面临的共性政策问题，开展专题学科战略与政策研究。自2012年开始，平均每年部署10项左右学科发展战略研究项目，其中既有传统学科中的新增长点或交叉学科，如物理学中的软凝聚态物理、化学中的能源化学、生物学中的生命组学等，也有面向具有重大应用背景的新兴战略研究领域，如再生医学、冰冻圈科学、高功率、高光束质量半导体激光发展战略研究等，还有以具体学科为例开展的关于依托重大科学设施与平台发展的学科政策研究。

学科发展战略研究工作沿袭了由中科院院士牵头的方式，并凝聚相关领域专家学者共同开展研究。他们秉承“知行合一”的理念，将深刻的洞察力和严谨的工作作风结合起来，潜心研究，求真唯实，“知之真切笃实处即是行，行之明觉精察处即是知”。他们精益求精，“止于至善”，“皆当至于至善之地而不迁”，力求尽善尽美，以获取最大的集体智慧。他们在中国基础研究从与发达国家“总量并行”到“贡献并行”再到“源头并行”的升级发展过程中，

脚踏实地，拾级而上，纵观全局，极目迥望。他们站在巨人肩上，立于科学前沿，为中国乃至世界的学科发展指出可能的生长点和新方向。

各学科发展战略研究组从学科的科学意义与战略价值、发展规律和研究特点、发展现状与发展态势、未来5~10年学科发展的关键科学问题、发展思路、发展目标和重要研究方向、学科发展的有效资助机制与政策建议等方面进行分析阐述。既强调学科生长点的科学意义，也考虑其重要的社会价值；既着眼于学科生长点的前沿性，也兼顾其可能利用的资源条件；既立足于国内的现状，又注重基础研究的国际化趋势；既肯定已取得的成绩，又不回避发展中面临的困难和问题。主要研究成果以“国家自然科学基金委员会—中国科学院学科发展战略”丛书的形式，纳入“国家科学思想库—学术引领系列”陆续出版。

基金委和中科院在学科发展战略研究方面的合作是一项长期的任务。在报告付梓之际，我们衷心地感谢为学科发展战略研究付出心血的院士、专家，还要感谢在咨询、审读和支撑方面做出贡献的同志，也要感谢科学出版社在编辑出版工作中付出的辛勤劳动，更要感谢基金委和中科院学科发展战略研究联合工作组各位成员的辛勤工作。我们诚挚希望更多的院士、专家能够加入到学科发展战略研究的行列中来，搭建我国科技规划和科技政策咨询平台，为推动促进我国学科均衡、协调、可持续发展发挥更大的积极作用。



前 言

高端润滑材料一般指应用于高端装备的润滑材料，是航空航天、交通运输、新能源装备等不可或缺的关键材料，对维持运动及动力传动系统的可靠运行、提高生产效率、延长设备使用寿命具有重要作用。随着《中国制造 2025》以及“一带一路”倡议等的提出以及我国从“制造大国”向“制造强国”及“智能制造”的产业升级，高端装备制造、航空航天、交通运输、能源、海洋等领域对高端润滑材料的迫切需求更为突出。高端润滑材料的战略研究，旨在通过对我国润滑材料的发展历程、技术瓶颈、产业需求、学科前沿等进行分析，提出我国润滑材料发展方向及重点研究领域，为高端润滑材料的发展战略提供科学基础与技术支撑。

本书是在中国科学院技术科学部的领导下，由中国科学院刘维民院士牵头，组织国内从事润滑材料科研、生产、应用及信息研究等的 30 多位专家学者共同完成的。本书分为 5 章，主要由刘维民院士策划并组织实施。第一章由周峰研究员负责完成，从润滑材料的种类与作用、润滑材料的应用及战略价值、几类重要润滑材料的制备科学与技术等方面进行分析和阐述。第二章由张俊彦研究员负责完成，从润滑材料的历史沿革、润滑材料的发展规律和研究特点等方面进行分析，并提出一些研究发展建议。第三章由马建霞研究员负责完成，总结 2007~2016 年润滑材料领域的研究状况，并对我国在润滑材料领域的资助情况、资助成果、学术地位、产业现状、人才队伍、平台建设、存在问题及举措等情况进行分析。第四章由王晓波研究员负责完成，主要对润滑材料的制备科学以及高端装备对润滑材料的技术需求、润滑材料的应用现状及发展态势进行

分析，指出润滑材料的未来发展方向及目标。第五章由刘维民院士负责完成，重点分析制约我国高端润滑材料发展的关键问题，提出一些机制与政策建议。

在编写过程中，本书还得到了国内外许多同行专家及国家自然科学基金委员会、中国科学院领导的支持、关注与指导，在此一并表示感谢。由于润滑材料种类繁多、高端装备应用领域广泛且受限于战略研究报告篇幅要求与编写时间，本书未能覆盖所有润滑材料，内容中也不可避免地存在不准确、不完善之处，恳请相关专家读者批评指正。

刘维民

中国学科发展战略·润滑材料研究组组长

2018年12月



摘要

高端润滑材料是高端装备制造业的重要支撑材料，也是实现节能减排及动力传动系统平稳可靠运行的重要保障。本书较全面地总结分析了2007~2016年我国润滑材料的研究现状、发展动态、学科发展规律，并指出我国润滑材料领域存在的问题、学科发展趋势及推动产业进步的相关意见和建议。

一、意义与战略价值

高端机械装备向绿色高效、极端工况、高可靠运行等方向的发展，对润滑学科和润滑材料提出更高的要求，使得润滑对国民经济、国防及相关高新技术产业发展的支撑作用更加显著。随着“中国制造2025”、“一带一路”倡议的推进和抢占科技革命制高点的历史必然，有必要重新审视研讨润滑材料学科的发展方向，以提升我国润滑材料在国际上的影响力，支撑我国先进装备制造业的发展。现今我国润滑材料的发展呈现雨后春笋般的增长态势，整体产学研水平取得显著进步，为解决我国工业界存在的实际问题及国家重大工程以及国防军工建设提供了有力支撑。随着国家对高技术产业的关注越来越多，润滑材料发展所面临的挑战也越来越多，同时预示着润滑材料面临新的发展机遇。润滑材料科学与技术的发展对高端装备制造业的发展起着重要支撑作用，润滑材料已经成为我国装备制造业升级不可或缺的关键基础材料。

二、发展规律与研究特点

润滑材料是指在摩擦过程中可以降低摩擦、减少磨损的材料，

既属于摩擦学也属于材料科学范畴。润滑材料的内涵丰富,包含了绝大多数材料种类,跨接众多学科领域,涉及从微观到介观直至宏观等不同层次、不同跨度的丰富物质结构与性质,在航空、航天、航海、交通、电力、建筑等现代工业领域得到广泛应用,覆盖了从基础科学到工程技术的众多内容。因此,润滑材料既是一个以探索材料科学自身规律为目标的基础学科领域,又是一个与摩擦学密切相关的工程技术领域,是一个多学科交叉的、前沿的、综合性的研究领域,代表了科学技术发展的一种趋势。

润滑材料具有悠久的历史,从古埃及人利用液体(水或油)润滑建造金字塔开始,润滑材料从远古时代的水、动植物油脂发展到工业革命时期的矿物基础油,再到第二次世界大战之后的合成润滑油、固体润滑材料(如石墨、二硫化钼、软金属等),最终发展到现代的固体自润滑复合材料等先进润滑材料,并在材料的合成、制备和使用过程中不断改进、创新,从而发展成为一门独立学科。润滑材料具有独特的发展规律和研究特点,其发展主要得益于以下三个方面:①材料科学、物理学、化学、机械工程等多学科的交叉融合;②工业整体发展水平及对润滑材料的需求;③科学技术进步及高精测试表征设备的发展。其中材料科学、物理学、化学、机械工程等多学科的交叉融合为润滑材料的制备等提供了理论依据(即怎样制备润滑材料),从而促进了润滑材料学科的发展;工业整体发展水平及对润滑材料的需求为其发展指明了方向(即需要什么样的润滑材料),从而指引学科发展;而科学技术进步及高精测试表征设备的发展则为研究润滑机理等提供了先进的技术手段(即润滑机制是什么),从而推动了润滑材料学科发展。随着科学、工业和技术的不断进步,润滑材料的发展必将取得更大的突破,为国家高技术工业的发展,尤其是装备制造业的发展提供重要保障。

三、发展现状与发展态势

总体而言,2007~2016年我国在润滑材料领域的科学研究与产业化均取得了显著的进步,其中在部分研究领域达到了国际先进水平。从论文发表情况来看,2007~2016年我国在该领域发表研究论

文的总数为 6559 篇，居世界首位。这主要得益于我国经济的快速发展，工业领域新型润滑材料的研究、开发、应用有较强劲的技术需求，因此在该领域的科研投入较多，涌现出大量的科研成果，科学技术水平发展迅速。2007~2016 年共检索到润滑材料领域的专利 125 567 件，总体呈现上升趋势，这表明润滑材料领域的技术创新仍较活跃。总体来看，全球在润滑材料领域的发展趋势主要有以下特点：一是在经费投入方面仍将持续不断增加，相关经费除支持润滑材料基础研究外，应用基础研究和工程化技术研究方面的支持力度将不断增大；二是更加重视关键科研装备的研发及应用；三是润滑材料的标准化程度将越来越高，更多、更高标准的出现将有力地保证润滑材料的性能与质量；四是研究方向和领域将更体现多学科交叉的特点；五是对原创性成果将更加重视。

在学科建设方面，我国在摩擦学与润滑材料领域若干学科方向上取得了重要的进展与突破，形成了一些优势学科与方向以及原创性研究成果，整体学科跻身国际先进水平，如离子液体润滑剂、润滑材料摩擦化学、仿生润滑材料、纳米润滑材料、表面工程摩擦学、超滑等领域。同时，润滑材料研究领域也存在一些值得关注的问题，包括原创性理论成果缺乏、关键核心润滑材料欠缺、科研与产业缺乏融合、关键科研装备自主化水平低、润滑材料标准化有待加强等。

在人才团队建设方面，我国在摩擦学与润滑材料领域新增院士 2 人、国家杰出青年科学基金获资助者 9 人、优秀青年科学基金获资助者 10 人。2 人获国际摩擦学金奖（薛群基和温诗铸），表明我国摩擦学与润滑材料研究获得了国际认可。在平台建设方面，2007~2016 年有 3 个新的国家级研究平台获批建设，将为摩擦学与润滑材料的研究增添新的活力。

四、发展思路与发展方向

高端润滑材料的科学研究、设计开发与工程应用是现代机械装备长寿命、高可靠运行的重要保障。本书分别从高端润滑材料的设计制备科学与技术及高端装备对润滑材料的技术需求两个方面对润

滑材料的发展现状及未来十年发展布局进行了论述。

（一）在高端润滑材料的设计制备科学与技术方面

矿物基础油是目前用量最大的基础油，约占基础油总量的95%。从总体趋势来看，矿物基础油正逐步从美国石油学会（American Petroleum Institute, API）I类基础油向低磷、低硫、低灰分、高氧化安定性、良好清净性和分散性、低挥发性、良好黏温性能和低温流动性的II类基础油、III类基础油发展。

国内矿物基础油产业应在传统工艺基础上发展具有自主知识产权的加氢工艺技术以提高基础油品质。天然气合成基础油（gas to liquid, GTL）是一类新型高性能基础油，具有成本低、综合性能优异等特点，目前我国尚未掌握该技术。我国应首先从关键催化剂制备及机理研究入手，进一步开展规模化制备工艺研究及装置设计、油品应用验证试验的研究等方面的工作。在现代工业使用的合成基础油中，聚 α -烯烃（poly-alpha-olefins, PAO）占30%~40%。随着我国汽车、装备制造业的迅速发展，PAO的需求量逐年上升。为提升我国在PAO基础油方面的研究水平，应重点支持PAO聚合催化剂及聚合工艺的研发，基于我国资源特点发展煤制烯烃制备PAO工艺技术，同时结合装备应用工况需求开展PAO润滑油品的设计开发与使役行为研究。合成酯由于具有独特的分子结构以及优良的综合性能而应用于航空、汽车、石油化工、冶金、机械等工业领域。从发展趋势来看，具有更高热安定性及高温润滑性能合成酯的设计制备、高端装备用合成酯类润滑剂的研发与应用以及具有特殊结构与性能合成酯的设计制备将是未来主要的研究方向。对于植物基润滑材料，新颖的植物基润滑材料创新设计，绿色、低成本、规模化改性工艺技术研究，植物基润滑材料产品的研制与应用以及新型水基植物油润滑剂的研究等将是需要关注的热点。

此外，为满足特殊装备对高端润滑材料性能方面的特殊需求，我国还应当开展油溶性聚醚基础油的研制与工程应用研究，低毒性磷酸酯的研制与磷酸酯水解性能及抑制方法研究，特种合成基础油（全氟聚醚、聚氧硅烷等）用润滑、抗氧、抗腐等添加剂的研究以及高热安定性聚苯醚基础油的研制工作。

添加剂是现代高端润滑油的精髓，润滑油的综合性能、服役特性等在很大程度上受制于添加剂技术的发展。目前全球 90% 的添加剂市场被美国四大添加剂公司垄断，我国在润滑油添加剂领域的研究水平与国外存在较大差距。新型润滑油单剂的创新设计、性能与机理研究，多功能润滑油添加剂的设计制备与性能研究，环境友好润滑油添加剂的相关研究，润滑油添加剂相互作用关系研究，以及高性能发动机油、工业油复合剂的研制开发与应用，将是我国添加剂产业未来的重点发展方向。润滑脂的应用领域几乎涵盖了工业机械、农业机械、交通运输、航空航天、电子信息和军事装备等各个领域。在润滑脂基础研究方面，应重视润滑脂油膜的分布与厚度研究、润滑脂皂纤维的形成机理研究；在润滑脂应用研究方面，应加强对高端产业（如高速铁路、机器人、风电、汽车、无人机等）用高端设备以及精密制造产业用高速、低噪声和长寿命轴承润滑脂的研发与工程应用。随着我国装备制造业的不断升级，未来十年我国金属加工液市场需求将保持较快增长，其技术水平、产业化、规模化程度将不断提升。因此有必要发展环境友好 / 纳米水基金属加工液润滑添加剂，开展水基润滑剂的摩擦化学机理以及特种合金（如铝合金、铝镁合金、钛合金）、单晶硅等新材料加工工艺用润滑剂的研制开发与应用等研究工作，以满足我国装备制造产业需求。

在新型润滑材料领域，离子液体是近些年发展的新型润滑材料，因其具有较优异的摩擦磨损性能以及结构的可调控性，引起了摩擦学界的广泛关注。我国在该领域的研究处于国际先进水平。在离子液体润滑材料领域，应当重点关注抗空间辐照离子液体、绿色离子液体润滑剂的设计制备以及离子液体润滑材料的工程应用技术开发等领域。纳米润滑油添加剂拥有良好的减摩、抗磨性能，以及独特的自修复功能，在发动机节能减排、重载工况领域获得应用，但总体仍处于起步阶段。纳米润滑油添加剂的结构、组分与摩擦学性能的量化关系研究，纳米润滑油添加剂的宏量制备技术，纳米润滑油添加剂与其他润滑油添加剂配伍规律研究，自分散纳米润滑油添加剂的设计合成及摩擦学机制研究将是未来十年的主要发展方

向。在生物与仿生润滑材料方面，应当开展微结构封存气膜的创新设计思路、原位产生气膜减阻的新设计方法、关节软骨的仿生设计与材料制备、关节润滑液与关节软骨协同作用机制等研究。

在固体润滑材料方面，聚合物基润滑材料应重点关注聚四氟乙烯（polytetrafluoroethylene, PTFE）树脂新改性体系的研发；结构可控和分子量分布可控的高耐热、耐辐射空间环境的聚酰亚胺（polyimide, PI）合成工艺研究及规模化生产工艺开发；聚醚醚酮（polyetheretherketone, PEEK）及其复合材料改性的摩擦机理研究；高润滑性能和力学性能的新型橡胶润滑材料的制备；耐高温、高润滑、耐磨损的新型氟橡胶的合成工艺研究及规模化生产工艺研究；橡胶类聚合物的共混改性研究，高相容性、高分散性的固体润滑材料的工艺研究，以及橡胶的新交联技术、润滑增强技术及相关的基础科学问题研究。金属基润滑材料的发展趋势在于通过组分设计、结构调控、工艺优化开发出高性能的金属基润滑材料，满足机械系统在特殊工况（高温、高速、重载、真空、载流、腐蚀、辐射等）下的使役性能要求，发展重点包括：①结构与功能一体化的金属基润滑材料的新设计、新方法；②极端工况下金属基润滑材料的结构演变与润滑性能的响应关系；③多因素耦合作用下金属基润滑材料的磨损失效机制与延寿方法；④金属基润滑材料使役性能的基础研究等。陶瓷基润滑材料在苛刻工业环境和高技术领域具有广泛的应用前景与价值。在陶瓷基润滑材料领域，应重点关注极端环境服役长寿命陶瓷基润滑材料的仿生设计与可控制备技术研究；界面特性对高韧性仿生结构陶瓷基润滑材料综合性能的影响规律研究；高性能纳米复合陶瓷基润滑材料结构与制备技术研究；自修复陶瓷基润滑材料的设计与自修复性能研究；陶瓷基润滑材料与金属构件的高可靠连接技术，极端服役环境下陶瓷基润滑材料和构件的失效仿真模拟及寿命预测研究。固体润滑涂层以其优越的性能在解决高温、高负荷、超低温、高真空、强辐照、腐蚀性介质等特殊及苛刻环境工况下的摩擦、磨损、润滑、防护及动密封问题方面发挥了其他材料不可替代的重要作用，广泛应用于军工高技术领域和民用机械工业领域。结合我国航空航天等军工领域和民用机械工业的发展需要及固体润滑涂层的发展趋