



材料延寿与可持续发展

# 表面耐磨损与 摩擦学材料设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写  
高万振 刘佐民 高新蕾 编 著



化学工业出版社

014058425

TB39  
75



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

材料延寿与可持续发展

# 表面耐磨损与 摩擦学材料设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写  
高万振 刘佐民 高新蕾 编 著



TB39  
75



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1745185

014028452

本书是《材料延寿与可持续发展》丛书之一。在让读者了解摩擦学和摩擦磨损的知识的基础上,本书重点对耐磨设计的基本要求、要点、技术选择、材料选用进行了深入浅出的阐述;富有创新意义的是,本书对新型摩擦学材料的原理、制备以及应用进行了系统的阐述。最后,本书还给出了实际应用中表面耐磨设计的实例。

本书对于机械设计、设备维护和维修,以及新型摩擦学材料开发的工程技术人员,是很有价值的参考图书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

表面耐磨损与摩擦学材料设计/高万振,刘佐民,高新蕾编著. —北京:化学工业出版社,2014.7  
(材料延寿与可持续发展)

ISBN 978-7-122-20532-2

I. ①表… II. ①高… ②刘… ③高… III. ①耐磨材料—设计 IV. ①TB39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第084017号

---

责任编辑:段志兵 王清颖  
责任校对:王素芹

文字编辑:孙凤英  
装帧设计:王晓宇

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张17½ 字数342千字 2014年8月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

## 《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干 勇 肖纪美

委 员（按姓氏拼音排序）：

安桂华	白忠泉	才鸿年	才 让	陈光章	陈蕴博
戴圣龙	俸培宗	干 勇	高万振	葛昌纯	侯保荣
柯 伟	李晓红	李正邦	刘翔声	师昌绪	屠海令
王淀佐	王国栋	王亚军	吴荫顺	肖纪美	徐滨士
严东生	颜鸣皋	钟志华	周 廉		

## 《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干 勇

主 任（总主编）：

李金桂 张启富

副 主 任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委（按姓氏拼音排序）：

白新德	蔡健平	陈建敏	程瑞珍	窦照英	杜存山
杜 楠	干 勇	高克玮	高万振	高玉魁	葛红花
顾宝珊	韩恩厚	韩雅芳	何玉怀	胡少伟	胡业锋
纪晓春	李金桂	李晓刚	李兴无	林 翠	刘世参
卢凤贤	路民旭	吕龙云	马鸣图	沈卫平	孙 辉
陶春虎	王 钧	王一建	武兵书	熊金平	许淳淳
许立坤	许维钧	杨卯生	杨文忠	袁训华	张 津
张 炼	张启富	张晓云	赵 晴	周国庆	周师岳
周伟斌	朱文德				

办 公 室：袁训华 张雪华

## 《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

## 《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

## 《表面耐磨损与摩擦学材料设计》编委会

主任：高万振

委员（按姓氏拼音排序）：

高新蕾 高万振 李 键 刘佐民 卢进玉 赵 源

# I 总序言 I

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展。”

这实际上是涉及到我们人类所赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及到人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的、是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损磨蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失效的案

例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个科研院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员会有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士  
中国工程院院士

师昌绪

# 总前言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放三十多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连续30多年GDP年均10%左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料寿命”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

“材料延寿与可持续发展”丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，



延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球“科学、和谐”发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士  
中国工程院副院长

# | 前言 |

磨损、腐蚀和断裂是机械零部件、工程构件的三大主要破坏形式，它们所导致的经济损失十分巨大。

在摩擦学系统中服役时，材料作为摩擦副的物质要件，在摩擦副的配副之间相对运动中会发生接触表面间的相互作用，产生摩擦，在不利情况下还会产生磨损。引起磨损的负荷称为摩擦学负荷，以区别于引起物体（主要是机械零件）破坏和失效的其他类型负荷。可见，摩擦学负荷作用下的材料延寿必然是材料延寿总命题中的一个重要的、不可或缺的方面。摩擦副表面耐磨损设计及新型摩擦学材料设计是解决摩擦学负荷作用下材料延寿的重要技术措施。因此，我们编写了《材料延寿与可持续发展》丛书中的《表面耐磨损与摩擦学材料设计》分册。

表面耐磨损设计必须针对具体摩擦副对象采取有区别的方案，因而具体对象的表面耐磨损设计是千差万别的，本书希望为读者提供表面耐磨损设计的共性原则和思路，对实际工作起到一般性指南的作用。

摩擦学材料和摩擦学材料设计的概念对于非摩擦学专业的读者或许是陌生的；有针对性地设计新型摩擦学材料，有时是解决在极端（严酷）环境中服役或要求具有独特功能的摩擦副材料延寿的唯一手段。然而，面对不同的摩擦学应用要求，具体的摩擦学材料设计在所应用的摩擦学和材料学知识以及设计思路、原则和方法上往往有很大差异。本书给出两个新型摩擦学材料设计的实例，希望借此使读者对于摩擦学材料设计在材料延寿中的重要性有些概念，并给对摩擦学材料设计有兴趣或需要的读者以启发式的指南作用。

摩擦学失效分析是材料延寿的一个重要领域。通过分析，得出现场工作条件下摩擦学系统特性的符合实际的结论，为改进摩擦学设计或采用再制造技术恢复摩擦学系统功能提供依据，达到摩擦学系统中使用材料的延寿效果，是摩擦学失效分析的主要目的。我国在摩擦学失效分析方面的研究历史很短，摩擦学失效分析尚未发展成为一门成熟的科学技术。本书介绍了两例重大水电工程中典型摩擦副摩擦学失效分析实例，以及根据分析结果提出的采用再制造工程手段对摩擦副表面进行耐磨损设计和防护的措施。希望在建立摩擦学失效分析的科学思路方面对读者有所启示。

本书的7.2节由武汉轻工大学高新蕾教授撰写，7.3节由武汉理工大学刘佐民教授撰写，其余章节由武汉材料保护研究所高万振研究员撰写。全书由高万振统稿，由刘佐民审阅。

鉴于本书的内容及写法有很大的探索意味，书中存在不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

高万振

# 目录

# 前言

## 第1章 绪论

- 1.1 摩擦学科学与工程应用的重大意义 /001
- 1.2 摩擦学及摩擦学设计 /003
  - 1.2.1 摩擦学定义 /003
  - 1.2.2 摩擦学系统 /004
  - 1.2.3 摩擦学设计的基本问题——摩擦副子系统设计 /004
- 1.3 基本摩擦学规律 /006
  - 1.3.1 摩擦学第一公理——摩擦学行为是系统依赖的 /006
  - 1.3.2 摩擦学第二公理——摩擦学元素的特性是时间依赖的 /007
  - 1.3.3 摩擦学第三公理——摩擦学行为是多个学科行为之间强耦合的结果 /008
- 参考文献 /009

## 第2章 摩擦学基础和摩擦副

- 2.1 摩擦副子系统的结构与参数 /010
  - 2.1.1 摩擦副子系统的基本结构 /010
  - 2.1.2 摩擦副子系统的参数概述 /011
  - 2.1.3 摩擦副的材料 /015
  - 2.1.4 负荷集 /016
  - 2.1.5 负荷持续时间 /019
  - 2.1.6 接触条件 /020
- 2.2 摩擦副中磨损造成损伤的机理和现象 /041
  - 2.2.1 磨损造成损伤的基本类型 /041
  - 2.2.2 黏着磨损 /043
  - 2.2.3 磨料磨损 /047
  - 2.2.4 疲劳磨损 /049
  - 2.2.5 腐蚀磨损 /053
  - 2.2.6 磨损过程的合成及微动磨损 /056
  - 2.2.7 摩擦疲劳学关于磨损-疲劳损伤的概念 /059
- 2.3 磨损特性的描述与可靠性 /071
  - 2.3.1 磨损率 /071
  - 2.3.2 磨损表征 /076

2.3.3 可靠性 /076

参考文献 /079

### 第3章 摩擦副匹配设计必须考虑的基本问题

3.1 摩擦磨损过程的通则 /081

3.2 抗剪强度梯度法则和外摩擦 /082

3.3 磨合和平衡粗糙度 /083

参考文献 /087

### 第4章 摩擦副表面耐磨损设计的基本要求

4.1 耐磨损表面保护的基本模型 /088

4.2 耐黏着磨损表面保护的基本要求 /090

4.3 耐磨料磨损表面保护的基本要求 /092

4.4 耐疲劳磨损表面保护的基本要求 /094

4.5 耐腐蚀磨损表面保护的基本要求 /095

4.6 主要耐磨表面保护技术类型 /096

参考文献 /098

### 第5章 摩擦副表面耐磨损设计要点

5.1 黏着磨损条件下服役的摩擦副 /099

5.1.1 影响黏着磨损行为的因素 /099

5.1.2 提高抗黏着磨损能力的措施 /109

5.2 磨料磨损条件下服役的摩擦副 /114

5.2.1 影响磨料磨损行为的因素 /114

5.2.2 提高抗磨料磨损能力的措施 /124

5.3 疲劳磨损条件下服役的摩擦副 /132

5.3.1 影响疲劳磨损行为的因素 /132

5.3.2 提高抗疲劳磨损能力的措施 /135

5.4 腐蚀磨损条件下服役的摩擦副 /136

5.4.1 影响腐蚀磨损行为的因素 /136

5.4.2 提高抗腐蚀磨损能力的措施 /141

5.5 常用摩擦副系统中出现的磨损机理及常用摩擦学材料的选用 /142

参考文献 /144

### 第6章 耐磨表面工程技术的选用

6.1 选用的基本原则 /145

6.2 摩擦学系统分析 /147

6.3 表面保护覆层类型的确定 /154

6.3.1 表面保护覆层类型选择专家系统的结构 /154

6.3.2 类型选择算法的说明 /156

- 6.4 表面保护覆层类型的评价 /170
  - 6.4.1 技术性评价 /170
  - 6.4.2 经济性评价 /172
  - 6.4.3 表面保护覆层的磨损特征值汇集 /173
- 6.5 应用实例 /183
- 参考文献 /189

## 第7章 新型摩擦学材料设计实例

- 7.1 摩擦学材料的定义 /190
- 7.2 具有自身选择性转移效应的改性超高分子量聚乙烯 /193
  - 7.2.1 选择性转移的概念 /193
  - 7.2.2 具有自身选择性转移效应的改性超高分子量聚乙烯的设计思路 /193
  - 7.2.3 Schiff 碱铜络合物+甘油-聚乙烯微胶囊改性超高分子量聚乙烯的制备和表征 /195
  - 7.2.4 Schiff 碱铜络合物+甘油-聚乙烯微胶囊改性超高分子量聚乙烯的自身选择性转移效应 /197
- 7.3 高温发汗自润滑复合材料 /207
  - 7.3.1 仿生润滑及高温发汗自润滑概念 /207
  - 7.3.2 高温发汗自润滑复合材料基体结构形态仿生设计及其表征模型 /209
  - 7.3.3 高温发汗自润滑复合材料基体成型机理及其工艺设计 /211
  - 7.3.4 多元固体润滑体设计 /216
  - 7.3.5 多元固体润滑体熔渗复合工艺设计 /222
  - 7.3.6 高温发汗自润滑复合材料的摩擦学特性 /224
  - 7.3.7 高温发汗自润滑复合材料的工程应用 /228
- 参考文献 /230

## 第8章 典型摩擦副摩擦学失效分析及防护工程实例

- 8.1 国产 125MW Kaplan 水轮发电机枢轴/铜瓦摩擦副 /233
  - 8.1.1 枢轴/铜瓦摩擦学系统结构和摩擦学负荷集 /233
  - 8.1.2 枢轴/铜瓦摩擦副失效分析 /235
  - 8.1.3 用摩擦疲劳学观点分析枢轴/铜瓦损伤现象 /237
  - 8.1.4 枢轴/铜瓦摩擦副维修和防护方案探讨 /240
- 8.2 国产 125MW Kaplan 水轮发电机转子磁轭/磁极铁芯摩擦副 /242
  - 8.2.1 水轮发电机转子结构及其磁轭/磁极铁芯配副 /242
  - 8.2.2 转子磁轭/磁极铁芯摩擦学系统结构和摩擦学负荷集 /244
  - 8.2.3 转子磁轭/磁极铁芯失效分析 /245
  - 8.2.4 转子磁轭/磁极铁芯损伤表面维修和防护方案建议 /252
- 参考文献 /258

## 索引

# 第 1 章

## 绪论

### 1.1 摩擦学科学及工程应用的重大意义

凡是有相对运动的地方就存在摩擦与磨损，为了控制摩擦与磨损，人们往往采用润滑。摩擦不仅消耗能量，而且还产生磨损导致材料损失；润滑是解决摩擦磨损问题的一个重要手段，不正确地使用会造成润滑材料的过度消耗，增加排放；生产和置换被磨损零件的材料（含失效的润滑材料）同样会消耗能量，增加排放。

国外统计资料表明：摩擦消耗掉全世界 1/3 的一次性能源，约有 80% 的机器零部件都是因为磨损而失效，而且 50% 以上的机械装备的恶性事故都是起因于润滑失效和过度磨损。美国、英国、德国等工业国家每年因摩擦、磨损造成的损失占其国民生产总值（GNP）的 2%~7%<sup>[1]</sup>，而在工业中应用摩擦学知识可节约的费用占 GNP 的 1.0%~1.4%<sup>[2]</sup>。国外的经验表明，大力开展摩擦学研究与应用以及摩擦学知识的教育、培训和普及可显著地节约能源和资源，改善生态环境，消除安全隐患，提高生命质量。因此，在全球面临日益加剧的资源、能源和环境问题的严峻形势下，摩擦学的研究、工业应用及教育、普及受到发达国家的高度重视。

我国在 2006 年由全国工程学会主持，对中国工程院主持，对全国冶金、能源化工、铁道机车、汽车、航空航天、船舶、军事装备、农业装备等 8 个工业部门的摩擦学在节能、降耗、减排中的地位与作用进行了全面调查。调查显示<sup>[3]</sup>，2006 年全国消耗在摩擦、磨损和润滑方面的资金估计为 9500 亿元，其中如果正确运用摩擦学知识可以节约的人民币估计可达 3270 亿元，占 2006 年我国国内生产总值（GDP）210871 亿元<sup>[4]</sup>的 1.55%。由此可见，摩擦学的应用对我国经济和社会发展具有巨大作用，必将对我国节能、节约资源（包括材料延寿）、降耗、减排、实现可持续发展做出重大贡献。

自从 1966 年对摩擦学下了定义（参见本书 1.2.1 节）以来，如果说在 20 世纪的后 35 年里，人们对摩擦学科学与工程在经济和社会发展中的战略地位的认识，较多的是从它对节能节材所发挥的巨大作用中得到的；那么，当人类迈入 21 世纪后，对摩擦学科学与工程的战略地位的认识还应更加突出它对环境保护、可持续发展和人类生存质量的巨大影响。

按照全寿命周期评估方法可以证实<sup>[5]</sup>, 现代摩擦学对于减少对生态平衡的冲击可做出显著的贡献并具有很大潜力。这不仅在于摩擦学技术在产品的上游阶段可以发挥巨大的节能节材作用, 通过减少资源消耗达到减少对生态平衡的冲击; 还在于在产品的使用阶段, 摩擦学科学与工程能提供对环境友好的技术, 直接减少对生态平衡的冲击<sup>[6]</sup>。

以对“人类健康”、“生态系统质量”和“资源”的影响为例。

① 通过降低摩擦的技术, 可实现能量消耗的减少和能耗产物  $\text{CO}_2$  的减排, 从而减少对气候、臭氧层和石油资源的冲击。科学分析表明, 如果所有类型的机器的摩擦损失都降低 1%, 会导致  $\text{CO}_2$  的排放量降低相同的比例, 即大约 1%; 与此同时, 会导致资源消耗减少类似的比例<sup>[7]</sup>。

② 通过减少磨损的技术, 可改善生态系统质量。许多国家已立法禁止在刹车材料中使用石棉, 因为石棉磨损颗粒进入到大气中, 具有致癌作用。许多国家还立法禁止在汽车轮胎中使用硬骨架, 因为硬骨架自身及被硬骨架磨掉的道路材料的磨损颗粒具有致癌作用并增加空气中的可吸入物。这两个例子说明, 人们对于道路-汽车、铁道-火车、地面-鞋、电梯-提升机构等在开放空间里运行的系统, 通过磨损颗粒对生态平衡造成冲击的高度可能性已有所警惕。存在于空气、水和(或)土壤中的磨损颗粒对于人类健康或生态系统的影响可能是及时而明显的, 也可能是在一定时间后才显现的, 这取决于磨损颗粒的性质及其扩散速度。

众所周知, 来源于柴油发动机的排放物  $\text{NO}_x$  和固体微粒对人类健康和生态平衡造成负面冲击。冷废气再循环 (cooled exhaust gas recirculation) 是目前降低柴油发动机  $\text{NO}_x$  和固体微粒排放量的关键技术。然而, 采用冷废气再循环技术带来一个新问题, 那就是它会增加发动机零件的磨损; 因此, 需要有更耐磨的表面来适应它。为此正在研发新的涂层和表面处理技术。

③ 通过减少磨损的技术, 可减少对气候、矿产资源和石油资源的冲击。在能源结构中, 水力和风力发电是在使用阶段不消耗石油资源的能源产业。水力和风力发电对生态平衡的冲击主要发生在全寿命周期的上游阶段, 即它们通过原材料提炼、制材、运输、制造和组装环节消耗资源。零件和摩擦副的气蚀和腐蚀磨损是水轮机组和风力透平更换的主要原因, 这种类型的磨损增加了机器全寿命周期中总的能量消耗。通过发展更好的耐磨表面和材料, 降低零件和摩擦副的气蚀和腐蚀磨损, 是开发水力和风力发电潜能, 以减少对气候、矿产资源和石油资源冲击的有效途径。

④ 通过新型润滑剂和润滑技术, 可减少润滑材料对环境和健康的影响。发动机油中的硫、磷和镁是增加  $\text{NO}_x$  和固体微粒排放的化学物质。由此造成的对生态平衡的冲击体现在致癌作用、可吸入物、生态中毒、酸化的增加。来自润滑油的另一个直接影响是, 当采用燃烧方法处理废油时, 会产生二噁英这种高致癌物质。这类涉及人类健康和生态系统质量的问题对摩擦学提出的挑战是, 研发更好的润滑油添加剂以取代目前的商用添加剂, 达到使润滑油用量最小化; 研发可降

解润滑油。总之，人们渴望获得环境友好的润滑剂和润滑方法。

## 1.2 摩擦学及摩擦学设计

### 1.2.1 摩擦学定义

摩擦学 (tribology) 是研究做相对运动的、相互作用的表面上的各种现象 (主要是摩擦、磨损、润滑及其相关的现象) 产生、变化和发展的规律及其应用的一门科学和技术<sup>[3]</sup>。它既是以自然界和工程中普遍存在的摩擦、磨损和润滑现象为主要研究对象的一门涉及面很广的基础学科, 也是一门以节约资源、能源, 保护生态环境, 提高生命质量为主要研究目标的实用性很强的应用学科。目前, 它已成为许多学科、技术和工程领域的重要科学基础与技术支撑。

摩擦学作为独立学科的建立, 源于 50 年前的英国的一次著名的调查活动。1964 年 12 月 22 日, H. P. Jost 博士受英国教育与科学国务大臣 Bowden 勋爵的委托, 组成一个工作组, 历时 11 个月, 调查了英国润滑教育和研究的现状, 并就工业对此方面的需求提出了建议, 所完成的报告 (Jost 报告<sup>[8]</sup>) 于 1966 年 2 月公开发表。报告的主要结论是:

① 重视润滑技术, 每年在工业上可节约 5 亿英镑, 并可大大提高技术的发展速度, 为实现国家经济目标做出非常重大的贡献;

② 为了不至于因为 lubrication (润滑) 一词的局限性而导致忽视这门边缘学科, 经与牛津大学出版社英语词典增补版编辑磋商之后, 建议采用 “tribology” (摩擦学, 即摩擦科学技术) 一词来表达这门学科的内涵。摩擦学的定义是: “研究做相对运动的相互作用表面及其有关理论和实践的一门科学技术<sup>[8]</sup>”。它的名称源于希腊单词 “tribos”, 是摩擦的意思。摩擦体现为阻抗两物体接触表面发生切向相对运动的现象, 其方向与相对运动的方向相反。

自从 1966 年对摩擦学下了定义以来, 摩擦学一词已经被公认为一个新的综合概念, 它涉及机器设备和机械装置中有关能量和材料转移及消耗的一切问题, 包括摩擦、磨损和润滑及其相关科学技术方面的各种课题。为了说明摩擦学的重要意义, 早在定义摩擦学之后的第四年就有人着重指出了其中三点<sup>[9]</sup>。

#### (1) 摩擦学的经济意义

有人估计, 全世界工业部门产生的能量, 大约有 30% 最后消耗在摩擦过程中, 而在英国、日本或德意志联邦共和国等高度工业化国家里, 每年约有 20 亿美元由于磨损过程而损失掉<sup>[10]</sup>。即使这些数字仅仅是粗略估计出来的<sup>[11]</sup>, 它们也能清晰地表明摩擦学对节约能量和材料的重要性。

#### (2) 摩擦学的科学意义

众所周知, 自然界的一切宏观过程都是不可逆的。科学在其 “纯” 理论方面



大多忽略了这种不可逆性，因为提出“理想”过程的定律要容易得多。摩擦学应当设法详细研究力学的不可逆过程，并解释能量和材料消耗的复杂效应。

### (3) 摩擦学的多学科意义

由于摩擦学的定义是“研究做相对运动的相互作用表面的科学技术”，因此它不仅包括对材料的表面性能感兴趣的物理学家、化学家和材料科学家，而且还包括在各种机器中利用相互作用的表面来传递运动、力、功等的工程师们的工作。因此，摩擦学关联到科学技术的好几个分支，如物理学、化学、材料科学、机械工程、润滑工程等。

摩擦学创立独立学科至今已经半个世纪了，摩擦学科学和技术的发展已经取得了巨大成就，这些成就不断丰富和深化着摩擦学所具有的经济、科学和技术多种意义的内涵。

## 1.2.2 摩擦学系统

一台机器中所有摩擦副和支持子系统的集合，构成一个摩擦学系统。摩擦副是摩擦学定义里的相对运动中相互作用的表面副，是摩擦学系统的基本组成部分，即摩擦副子系统。这些摩擦副子系统的结构、载荷、相对运动和环境可能有很大差别，但它们又是处在同一系统中，相互之间有着多方面的联系和影响。

一台机器中通常有多个摩擦副子系统，此外，为了保证摩擦副正常工作，还需要许多支持子系统，如润滑子系统、状态检测和故障诊断子系统、状态补偿和控制子系统等。这些支持子系统一般都是针对整个系统而不是针对哪一个摩擦副子系统的。关于支持子系统的详细内容已超出本书的范围，故不展开叙述。

## 1.2.3 摩擦学设计的基本问题——摩擦副子系统设计

在机器或机械系统的功能结构中，运动保证功能是最基本和最重要的一个子功能，这是因为机器的各个部分之间都必须有确定的相对运动。这是由两方面要素来保证的：构件和运动副。摩擦副就是运动副的物理实现或具体化，摩擦副是摩擦学研究的基本对象。机器中任何一对摩擦副失效，都将使机器全部或有关部分产生超过设计允许的运动，或称非法运动。因此摩擦副子系统设计也就是摩擦学设计中的基本问题。

摩擦学设计目标是可靠地和经济地实现运动保证功能。具体包括如下内容<sup>[12]</sup>：

- ① 最小摩擦功耗；
- ② 在材料上获得最大经济效益；
- ③ 与摩擦学失效有关的最大可靠性；
- ④ 最大的生产率。

减少摩擦功耗可以节约能源。更重要的节约资源和能源来自节约材料（包括摩擦副材料和润滑剂）。提高摩擦副可靠性，延长摩擦副寿命以减少维修中的更