

清华大学学术专著

Interface Science and Technology

界面科学与技术

温诗铸 黄平 等著

清华大学出版社



清华大学学术专著

Interface Science and Technology

界面科学与技术

温诗铸 黄平 等著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书在阐述界面科学原理的基础上,汇集了与现代机械工程发展密切相关的界面科学与技术最新进展以及作者及其同事们在该领域的研究成果,力求全面反映该学科的研究现状与发展趋势。

全书共 15 章。首先阐述了固体和液体表面性能,进而系统地介绍了各种界面包括固-气、固-液和固-固界面的特性。在此基础上,针对现代机械工程发展中提出的有关界面科学的关键技术问题,诸如表面有序分子膜、微流体流动、表面粘附、微摩擦磨损的行为特征、机理和影响因素等,分别进行了全面讨论,并力求说明其在工程实践中的应用。

本书可以作为机械学科的硕士研究生和博士研究生教材,也可供从事表面科学与技术相关专业的研究人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

界面科学与技术/温诗铸,黄平等著. —北京:清华大学出版社,2011.3
(清华大学学术专著)

ISBN 978-7-302-24702-9

I. ①界… II. ①温… ②黄… III. ①界面—研究 IV. ①O357.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 018774 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印 张:28 彩 页:1 字 数:470 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版 印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:79.00 元

产品编号:040935-01

Introduction

After introduction of the scientific principles of interface science and technology, the book presents the new developments of this field in modern mechanical engineering, especially the latest research results of authors and their colleagues. In the book we try our best to give a thorough reflection of the present situation and development trend of the subject.

The book includes fifteen chapters. At first, it expounds the surface properties of solid and liquid, and then systematically introduces a variety of features of interfaces, including interfaces of solid-gas, solid-liquid, and solid-solid. Then, some key issues of the interface science and technology in modern mechanical engineering, such as ordered molecular films, micro-fluid flow, surface adhesion, micro-features of friction and wear mechanism, and influential factors, are separately discussed in detail to explain the applications of the studies in engineering practice.

The book can be as a textbook for masteral or doctoral post-graduate students. It can also serve as a reference book for technicians in mechanical engineering.

序 言

1915年著名化学家 Wolfgang Ostwald 将表面/界面科学称为“被忽略尺度的世界”。意思是说,表面/界面科学研究所涉及的空间尺度超出了当今科学研究的范围,例如,微观尺度的原子、分子,或者宏观尺度的固体、液体。因此,表面/界面科学属于边缘科学范畴,迄今研究工作进行得不多,发展也不十分成熟。

表面科学或者界面科学的研究对象都是物质体系中由一相向着另一相转变的空间区域。通常在科技文献中表面与界面的概念难以明确地区分,而且时常相互混淆。严格的定义应该是:表面是一个凝聚相(固相或者液相)与一个气相或真空构成的空间区域;而界面则是两个凝聚相(固相与固相、液相与液相或者固相与液相)之间的空间区域。由此可知,在现实存在的绝大多数表面通常都是固体或者液体与气体构成的界面,它是一种特定的界面。这样,我们就可以采用界面一词统称表面/界面。

界面实际上是具有一定厚度的空间区域,即界面层。整个体系的固有性能在界面层中由一相按一定规律转变成另一相,所以界面层是固有性能变化的过渡区。它的结构和性能都很复杂,而且依照空间位置的不同而变化。界面稳定存在的必要条件是需要具有一定数量的界面自由能(简称界面能)。通过外界对它做功输入能量就可以使界面扩大。反之,如果界面不具有有一定数量的正值自由能,就不可能有稳定的边界存在。

界面科学有时也被称为表面科学,在物理化学领域中进行了长期的研究,已经取得了许多理论的和工业应用的成就。但是在机械学科中,界面科学与技术对于现代机械发展的重要意义尚未引起人们足够的重视,也还没有将它作为具有广泛应用前景的研究领域开展研究。

事实上,无论是机械制造还是机械设计,或者机械装备的运行维护和状态监控,都涉及许多界面行为与控制方面的重要问题,为了解决这些问题,人们在长期工程实践中也累积了丰富的经验。然而,随着现代科技的发展,

机械装备中的表面/界面性能与控制将日益广泛地成为制约未来发展的关键科学技术问题。基于这种认识和在科学研究实践中的感受,近年来,我与同事们提出了开展界面科学与技术研究的重要性和迫切性,希望能引起同行们的认同,并共同推动该学科领域的发展。以期经过若干年的努力,实现由我国科技工作者创新建立机械学科中的界面科技理论和工程实用技术。这就是我极力建议和推动黄平教授等人参与撰写本书的初衷。

我与本书作者黄平教授等人共事多年,长期从事机械设计理论和摩擦学研究。实践中我们认识到,机械零部件的表面品质和界面行为是影响机械零件性能,诸如接触疲劳强度、摩擦功耗、磨损寿命和抗腐蚀能力等至关重要的因素。又如,机械装备的动态性能以及振动和噪声也在很大程度上取决于各个接触界面的刚度和界面阻尼特性。

近30年来,我与同事们包括本书各位作者在摩擦学研究中,随着研究工作的深入不断推动学科发展。由宏观摩擦学发展到纳米(微观)摩擦学研究,随后又扩展到界面科学与技术研究领域。前者是推动学科沿深度方向发展,而后者是沿广度方向发展。

正确的思维来自科学的实践。我们对于摩擦学学科发展的认识是在长期科学研究实践中产生的。事实上,摩擦学属于表面科学范畴,只是研究对象局限于研究摩擦表面之间发生的现象、变化、损伤机理和控制。而通常所指的摩擦表面是由两个固体表面沿切向相对滑动所构成的界面。如果所研究的界面的构成物质不限于两个固体而相对运动也不限于切向滑动,这样就很自然地使摩擦学的研究领域扩展到界面科学与技术的研究领域。

应当强调指出,从传统的摩擦学研究转变到界面科学与技术研究,不是单纯的研究领域的扩大,而伴随着理论基础、思维方式和研究方法等的转变。通常摩擦学是以降低机械装备的摩擦能耗和提高抗磨损寿命为主要研究目标,其基本的研究模式主要是根据材料的体相性能进行力学计算;或者针对材料表面的结构、组成进行显微分析,考察它们在磨损过程中的变化和损伤机理;以及模拟工程实际工况条件进行对比实验研究。显然,宏观摩擦学的理论基础主要是连续介质力学、材料科学和摩擦化学等。随着研究工作的发展,我们认识到为了要深入地揭示摩擦磨损机理,研究模式的发展应当是“由宏观进入微观、由定性进入定量、由静态进入动态以及由单一学科角度的分析进入多学科的综合研究”(参见:温诗铸.摩擦学原理.清华大学出版社,1990)。这里强调了宏、微观结合建立微观结构和宏观性能之间的构性关系;建立摩擦学性能与工况参数的数学描述;以磨损过程的形

态变化代替通常采用的磨损前后类比分析的研究方法；以及扩大学科领域和理论基础等的重要意义。

可以说纳米摩擦学的蓬勃兴起适应了上述发展趋势。由于尺寸效应的影响,显示出表面能和表面原子、分子结构以及界面行为对于微摩擦磨损的重要作用。在研究模式方面,促进了表面物理化学、纳米科技与传统摩擦学研究的理论基础的深层次结合；开辟了现代微观实验技术和分子尺度理论分析的探索和应用。纳米摩擦学是界面科学与技术中特定的一部分,即两个固体构成的界面在切向相对滑动过程中的界面行为与控制。

现代机械学科日益向着精密化和微型化的方向发展。在高新技术装备、精密机械和仪器、微机电系统,以及电子制造、微纳制造等领域中,广泛存在着许多涉及界面科学与技术的问题,它们往往是阻碍发展的关键。因此,我认为本书的出版对于介绍与机械工程密切相关的界面科学与技术的基本知识,推动该领域的科学研究和发展,进而促进现代化机械装备的研发具有重要的现实意义。

参加本书撰写的作者都长期在机械设计理论领域从事教学和科学研究,具有丰富的实践经验和写作能力。在广泛收集资料的基础上,又收入了自身和国内外学者的研究成果,因此,本书取材新颖,具有学术先进性。同时,力求全面系统地阐述机械中界面科学与技术的基本内容。然而,本书毕竟是作者们汇集整理相关资料撰写而成的第一本介绍界面科学与技术的书籍,缺点错误实属难免,敬请读者批评指正。在此基础上,通过广大科技工作者共同努力,可望在我国逐步形成具有较高理论和实践水平的更加完善的新学科领域及著作。

本书由温诗铸教授组织编写,黄平教授负责全书的审定、调整和统稿。参加各章初稿撰写的人员如下。清华大学温诗铸教授:序言,第1章;南昌大学刘莹教授:第2,11,13章;西南交通大学钱林茂教授:第7,8章;清华大学田煜研究员:第5,6,15章;清华大学刘宇宏讲师:第10章;其余各章均由华南理工大学黄平教授撰写。本书的编写得到清华大学摩擦学国家重点实验室的老师和研究生们的热情支持和建议,任婧硕士对于全书文稿进行了校对工作。在此对本书出版而付出辛勤劳动的人们致以衷心的感谢。

温诗铸

2010年11月2日于清华园

目 录

1 固体表面结构分析	1
1.1 固体表面形貌	1
1.2 固体表面结构	10
1.3 固体亚表面结构	13
1.4 固体接触	16
参考文献	27
2 固体表面性能	28
2.1 固体表面的基本特征	28
2.2 固体表面重构	31
2.3 界面势垒	33
2.4 公度与破缺	37
参考文献	41
3 液体及其表面性质	43
3.1 液体性质	43
3.2 液体边界层性质	52
3.3 液体表面性质	57
参考文献	63
4 固-液界面	64
4.1 固-液界面湿润性	64
4.2 固-液界面膜	68
4.3 吸附热力学	73
参考文献	75

5 气-固界面	76
5.1 气-固界面吸附现象	76
5.2 吸附热力学	77
5.3 影响吸附和脱附的因素	87
5.4 摩擦学中的气-固界面	90
参考文献	93
6 固-固界面	95
6.1 固-固界面能	95
6.2 粘附理论——球-平面接触模型	97
6.3 粘附影响因素	99
6.4 表面处理	108
参考文献	113
7 有序分子膜	115
7.1 有序分子膜的制备与表征	115
7.2 有序分子膜的性能	123
7.3 表面有序膜的应用	136
参考文献	139
8 表面微磨损	142
8.1 微机电系统中的微磨损	142
8.2 微磨损研究	145
8.3 镍钛形状记忆合金和单晶硅的微磨损研究	151
8.4 纳动磨损及其损伤机理研究	164
参考文献	172
9 计算机硬盘的界面问题	176
9.1 硬盘驱动器中的稀薄气体润滑	177
9.2 磁头飞行姿态测试装置与方法	186
9.3 磁头飞行高度高精度动态测试技术研究	201
9.4 磁头气体薄膜润滑设计理论的实验验证	210
9.5 影响磁头/磁盘工作性能的其他因素	216

参考文献	223
10 固-液界面微观流动	226
10.1 铺展与聚集	226
10.2 铺展和聚集的分子动力学模拟	230
10.3 界面微滑移	238
参考文献	249
11 表面改性与涂层	251
11.1 表面性能对表面磨损特性的影响	251
11.2 表面改性	255
11.3 表面涂层	261
11.4 涂层性能测试	269
参考文献	276
12 界面微观摩擦学	277
12.1 界面摩擦	277
12.2 界面摩擦振子模型	286
12.3 基于振子模型的摩擦计算	293
12.4 基于声子模型的能量耗散分析	302
参考文献	317
13 表面与界面实验分析	324
13.1 原子力显微镜表面分析	324
13.2 微观摩擦	351
13.3 微接触与粘着现象	358
13.4 微观磨损	362
13.5 分子膜与边界润滑	368
参考文献	378
14 表面电效应及其应用	380
14.1 电流变体	380
14.2 电控摩擦技术	392

14.3	双电层效应的润滑机理.....	403
	参考文献.....	410
15	粘附应用.....	412
15.1	粘附与摩擦.....	412
15.2	粘滑现象.....	418
15.3	壁虎的粘着研究.....	420
15.4	固体材料表面处理.....	424
	参考文献.....	429

Contents

- 1 Analysis of the solid surface structure 1**
 - 1.1 Solid surface topography 1
 - 1.2 Solid surface structure 10
 - 1.3 Sub-surface structure of solid 13
 - 1.4 Solid contacts 16
 - References 27

- 2 Properties of solid surface 28**
 - 2.1 Basic properties of solid surface 28
 - 2.2 Reconstruction of solid surface 31
 - 2.3 Barriers of interface 33
 - 2.4 Commensuration and breakage 37
 - References 41

- 3 Properties of liquid and its surface 43**
 - 3.1 Properties of liquid 43
 - 3.2 Properties of liquid boundary layer 52
 - 3.3 Properties of liquid surface 57
 - References 63

- 4 Solid-liquid interface 64**
 - 4.1 Wetting of solid-liquid interface 64
 - 4.2 Solid-liquid interface film 68
 - 4.3 Adsorption thermodynamics 73
 - References 75

5	Gas-solid interface	76
5.1	Gas-solid interface adsorption	76
5.2	Adsorption thermodynamics	77
5.3	Factors affecting adsorption and desorption	87
5.4	Gas-solid interface in tribology	90
	References	93
6	Solid-solid interface	95
6.1	Solid-solid interface energy	95
6.2	Adhesion theory—ball-plane contact model	97
6.3	Adhesion influence factors	99
6.4	Surface treatment	108
	References	113
7	Ordered molecular film	115
7.1	Preparation and surface features of ordered molecular film	115
7.2	Properties of ordered molecular film	123
7.3	Applications of surface ordered film	136
	References	139
8	Surface micro-wear	142
8.1	MEMS micro-wear	142
8.2	Micro-wear study	145
8.3	Micro-wear of NiTi shape memory alloy and monocrystalline silicon	151
8.4	Mechanism of nano dynamic wear and damage	164
	References	172
9	Interface problems in computer hard disk drive	176
9.1	Rarefied gas lubrication of hard disk drive	177
9.2	Magnetic head flight attitude test devices and methods	186
9.3	High precision head flying height testing technology	201

9.4	Experimental verification of head design theory of gas film lubrication	210
9.5	Other influence factors on magnetic head/disk performances	216
	References	223
10	Microscopic flow of solid-liquid interface	226
10.1	Spreading and aggregation	226
10.2	Molecular dynamics simulations of spreading and aggregation	230
10.3	Interfacial micro-slip	238
	References	249
11	Surface modification and coating	251
11.1	Influence of surface properties on surface wear characteristics	251
11.2	Surface modification	255
11.3	Surface coating	261
11.4	Coating properties testing	269
	References	276
12	Interface micro-tribology	277
12.1	Interface friction	277
12.2	Oscillator models of interface friction	286
12.3	Friction calculation by oscillator model	293
12.4	Analysis of energy dissipation based on phonon model	302
	References	317
13	Experimental analysis of surface and interface	324
13.1	Atomic force microscopy surface analysis	324
13.2	Micro-friction	351
13.3	Micro-contact and micro-adhesion phenomena	358
13.4	Micro-wear	362

13.5	Molecular film and boundary lubrication	368
	References	378
14	Surface electric effects and applications	380
14.1	Electrorheological (ER) fluid	380
14.2	Electric friction control technology	392
14.3	Effect of electric double layer lubrication mechanism	403
	References	410
15	Adhesive applications	412
15.1	Adhesion and friction	412
15.2	Stick-slip phenomena	418
15.3	Adhesion of gecko	420
15.4	Surface treatment of solid materials	424
	References	429

固体表面结构分析

1.1 固体表面形貌

1.1.1 表面几何形状误差

从宏观上看光滑且平整的表面,在显微镜下观察时,却显示出由许多不规则的微凸峰和凹谷所组成。这是因为在加工过程中,刀痕、切削和磨削引起的塑性变形以及加工设备的振动等原因,造成任何加工表面都是由许多不同形状的微凸峰和凹谷组成的,如图 1.1 所示。表面几何特征对于混合润滑和干摩擦状态下的摩擦、磨损和润滑有着决定性影响。

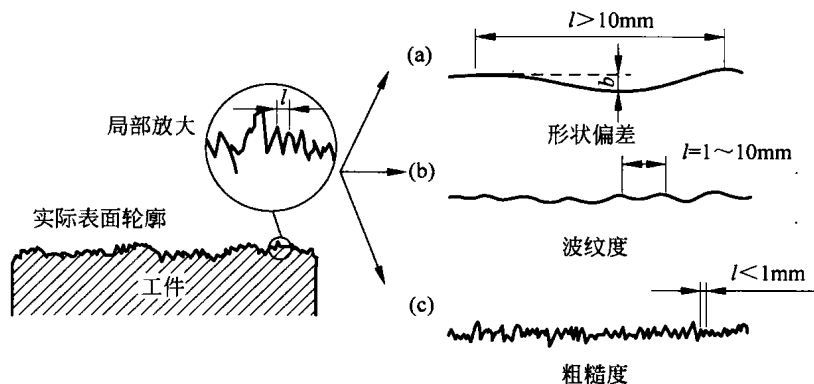


图 1.1 实际表面轮廓

1. 宏观几何形状误差

表面的宏观几何形状误差又称为表面形状偏差,主要用不直度和不平度表示平面几何形状误差。不直度是指在指定方向上,其实际的轮廓线与

理论直线的直度偏差,当用刀形样板平尺进行校验时,刀口与被检表面的最大空隙 b 即为所检范围内的不直度;而不平度则是指整个平面各方向上所存在的最大不直度,如图 1.1(a)所示。波距 $l > 10\text{mm}$ 的偏差属于形状偏差。

对圆柱形表面,在垂直于轴线的横剖面内,最典型的误差有椭圆度;在通过轴线的纵剖面内,最典型的误差有鼓形度、鞍形度、弯曲度和圆锥度。

2. 中间几何形状误差

中间几何形状误差又称为表面波纹度,是一种较宏观几何形状误差范围更小的误差,通常采用波纹度表示,它是在表面上周期性重复出现的一种几何形状误差,如图 1.1(b)所示。波距 l 在 $1 \sim 10\text{mm}$ 间属于波纹度范围。

3. 微观几何形状误差

表面微观几何形状误差又称为表面粗糙度,它不像表面波纹度那样具有明显的周期性,其波距 $l < 1\text{mm}$,如图 1.1(c)所示。微观几何形状误差越大,表面越粗糙。一般来说,表面粗糙度是影响摩擦性能最重要的表面几何形状特征。

综上所述,表面粗糙度、波纹度和形状偏差三者的区别,通常以两波峰或波谷的距离(波距)的大小来区别。一般而言,波距大于 10mm 的属于形状偏差;波距为 $1 \sim 10\text{mm}$ 的属于波纹度范围;波距小于 1mm 的属于表面粗糙度范围,如图 1.1 所示。将图 1.1(a),(b)和(c)叠加在一起,即是表面的实际情况。

1.1.2 表面粗糙度

在摩擦学中,最重要的和常用的表面形貌参数是表面粗糙度,它取表面上某一个截面的外形轮廓曲线来表示。根据表示方法的不同,可分为一维、二维和三维的表面形貌参数。

一维形貌通常用轮廓曲线的高度参数来表示,如图 1.2(a)所示,它描绘出沿截面水平方向(x 方向)上轮廓高度 z 的起伏变化,选择轮廓的平均高度线即中心线为 x 轴,使轮廓曲线在 x 轴上、下两侧的面积相等。

一维形貌参数种类繁多,最常用的有以下几种。