



Interface Mechanics

界面力学

黄平 郭丹 温诗铸 著



清华大学出版社

014006856

034
58



Interface Mechanics

界面力学

黄平 郭丹 温诗铸 著



清华大学出版社

北京



北航

C1690172

034

58

内 容 简 介

本书共 11 章。第 1 章绪论,介绍界面的分类、形成和本书的主要内容。后 10 章分为两篇。固体界面力学篇和受限流体界面力学篇。固体界面力学篇,共 6 章,介绍了固体接触力学、界面滑动分析、界面黏着滑动、界面接触刚度、滚动分析和接触疲劳力学等内容。本篇对界面滑动、摩擦理论、黏滑等现象和产生原因做了分析。分析了不同接触条件下的接触刚度,介绍了纯滚、滑滚、滚动疲劳破坏等现象和机理。受限流体界面力学篇,共 4 章,首先分析了流体在界面上的吸附-解附机理和湿润性对界面性能的影响。然后对当前常用的求解界面流体力学问题的三种方法——雷诺方程、分子动力学和玻耳兹曼输运方程做了介绍。之后介绍了有序分子膜、LB 膜和液晶的润滑机理和性能。最后,本书还对边界层的形成界面滑移现象做了较深入的探讨,介绍了由边界滑移导致的性能变化。

本书可以作为从事界面科学工作者的参考用书,也可以作为相关专业高年级本科生和研究生的教学用书。

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

界面力学/黄平,郭丹,温诗铸著.--北京:清华大学出版社,2013
ISBN 978-7-302-33628-0

I. ①界… II. ①黄…②郭…③温… III. ①界面—力学 IV. ①O34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 206331 号

责任编辑:庄红权 洪 英

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 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:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印张:14.75 插页:1 字 数:306 千字

版 次:2013 年 11 月第 1 版

印 次:2013 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:68.00 元

产品编号:055792-01

序言



在国民经济各行各业中使用的许许多多构造不同、功能各异的机械装备,都是由若干不同结构的机械零件按照一定规则组合而成的整体。而构成机器的这些零件又都是通过相互接触而形成的表面/界面连接在一起的。所以,可以概括地认为,各种各样的机器的共同点都是由若干独立的零件和它们之间相互接触的若干表面/界面两部分组成的。

早在 1915 年,著名化学家 Wolfgang Ostwald 就提出表面/界面科学研究的必要性,他认为表面/界面是“被忽略尺度的世界”。也就是说表面/界面研究所涉及的空间尺度超出了当今科学研究的尺度范围,即微观尺度的原子、分子或者宏观尺度的体相物质。由于长期以来人们忽视了该领域的研究,使得表面/界面科学的发展迄今还不十分完善。

表面或者界面的科学含义为物质体系中由一相向着另一相转变的空间区域。在科技文献中表面和界面的概念通常没有明确的区分,而且时常相互混淆,因此界面性能有时也被称为表面性能。严格的定义应该是:表面是一个凝聚相(固相或者液相)与一个气相或者真空构成的空间区域;而界面则是两个凝聚相之间的空间区域。由此可知,在工程实际中存在的表面都是由固相或者液相与气相构成的界面。这样,我们可以将表面/界面统称为界面。当今机械装备中的界面主要是固相与固相、固相与液相或者气相组成的界面,以及两个固相之间夹持液相或者气相所构成的液体薄膜或气体薄膜,即所谓的受限流体。

界面实际上是具有一定厚度的空间区域,即界面层。整个物质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,所以界面层的固有性能是依照空间位置不同而变化的过渡区。

构成机械装备基本单元的机械零件是保证机械整体工作性能的基础。根据材料体相性能,并以连续介质力学为基础而建立的机械零件设计和制造理论是机械工程学科的主要组成部分,经历了长期的生产和科学实践已日益完善。然而,在对机械设

计、制造和运行的考察中,人们通常集中关注各个零件本身的工作情况和性能,而较少重视零件与零件之间界面的作用。事实上,机械装备在运行过程中各个分散的零件个体都是依靠界面连接起来从而保证彼此间的相互位置和作用以及传递信息的,显然,机械的运行性能不可避免地受到界面行为的约束。例如,零件之间作用力的传递和运动变换,以及相互位置精度和运行平稳性就受到界面接触情况的影响。而机械装备的运行阻力和能量消耗也主要源于界面,甚至机械常见的损伤,如磨损、疲劳、腐蚀等失效也都来自各个零件之间的界面。

随着现代科技的进步,机械装备不断向着高速、重载、精密、智能化方向发展,超大型复杂机械和微型机械以及特殊环境下工作的机械装备不断涌现,界面力学性能与控制必将日益突出地成为制约未来发展的关键科学问题。基于这种认识和科学实践中的体验,我们提出开展界面科学和技术研究的重要性和迫切性,特别是开展界面力学的研究,作为现代机械工程学科的补充。为此,我极力建议和推动本书的出版。

本书作者在广泛收集相关文献的基础上,努力做到取材新颖,使本书具有学术先进性。同时,从现代机械工程发展的实际出发,力求能够全面系统地阐述机械设计中涉及的界面力学的基本内容及其应用。我认为本书的出版对于介绍界面力学知识,推动相关领域科学发展,进而促进现代机械装备的研制具有重要意义。

应当指出,本书是作者汇集、整合相关文献撰写而成的第一本从机械工程实际出发介绍界面力学的书籍。在撰写过程中,作者对全书的安排和主要内容虽几经讨论修改,但缺点、错误实难避免,敬请读者批评指正。我们希望通过广大科技工作者的共同努力,以期在我国逐步形成具有较高理论和实践水平的更加完善的该学科领域的科技著作。

本书作者黄平教授和郭丹副教授曾先后在清华大学工程力学系从事博士学位论文研究,并获得固体力学专业工学博士学位,随后在清华大学摩擦学国家重点实验室工作。他们长期在机械学科领域进行教学和科学研究,并与我合作共事多年,取得重要研究成果,具有丰富的科学实践经验和较高的学术水平。对于他们在本书撰写中表现的科学精神和付出的辛苦劳动致以诚挚的敬意。同时,本书撰写中引用了国内外许多学者的研究成果,对于他们以及在本书出版过程中给予热情支持与帮助的同事和研究生们表示最真诚的谢意。

中国科学院院士

清华大学机械工程系教授

温诗铸

2013年6月13日

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 界面分类	1
1.1.1 光滑与粗糙界面	1
1.1.2 界面间的介质	2
1.1.3 不同物质间的界面	2
1.1.4 界面组成的尺度比较	3
1.2 界面形成	4
1.2.1 表面接触	4
1.2.2 表面变形	4
1.3 表面运动与受力	6
1.3.1 表面运动	6
1.3.2 表面受力	6
1.4 粗糙表面	8
1.4.1 表面形貌参数	8
1.4.2 表面形貌的统计参数	10
1.5 本书的内容与构成	14
1.5.1 本书的内容	14
1.5.2 本书的构成	14
参考文献	15

第 1 篇 固体界面力学

第 2 章 固体接触	19
2.1 赫兹弹性接触理论	19
2.1.1 赫兹线接触理论	19

2.1.2 赫兹一般接触理论	22
2.2 非赫兹弹性接触	24
2.2.1 接触表面不连续	24
2.2.2 协调表面接触	25
2.2.3 界面摩擦对接触应力的影响	26
2.2.4 表面效应的影响	29
2.3 粗糙表面接触	33
2.3.1 单峰接触	33
2.3.2 理想粗糙表面接触	34
2.3.3 随机粗糙表面的接触	35
2.3.4 塑性指数	36
2.4 弹塑性接触	37
2.4.1 屈服判据	37
2.4.2 弹性体接触屈服力和屈服载荷	38
2.4.3 理想刚塑性固体的接触	39
2.4.4 弹塑性压入	41
参考文献	42
第3章 界面滑动分析	44
3.1 无滑动面接触	44
3.2 滑动面接触	46
3.2.1 滑动摩擦基本定律	46
3.2.2 摩擦界面静力学	46
3.3 弹性变形摩擦界面力学	49
3.3.1 基本假设	50
3.3.2 切应力对压力分布的影响	50
3.3.3 局部区域滑动	51
3.4 粗糙变形摩擦界面力学	52
3.4.1 等高球体粗糙弹性接触	52
3.4.2 随机粗糙表面接触	53
3.5 滑动摩擦特性	55
3.5.1 静止接触时间	55
3.5.2 跃动现象	55
3.5.3 预位移	56
参考文献	57
第4章 界面黏着滑动	58
4.1 固体界面能	58

4.1.1	固体表面力场	58
4.1.2	固体表面能和表面张力	60
4.1.3	固体界面能	61
4.2	固体摩擦振动与黏滑	61
4.2.1	摩擦振动	61
4.2.2	黏滑现象	62
4.2.3	黏滑与减噪	64
4.3	黏着影响因素	65
4.3.1	粗糙度的影响	65
4.3.2	表面微结构的影响	67
4.4	壁虎黏着研究	68
4.4.1	壁虎刚毛微观结构	69
4.4.2	壁虎微细结构的黏附机理	71
4.5	固体材料表面处理与改性	74
4.5.1	固体表面增黏处理	74
4.5.2	固体表面的减黏防污	76
4.5.3	表面清洁	78
4.5.4	机械处理与热处理	79
4.5.5	表面改性技术	79
	参考文献	82
第5章	界面接触刚度	85
5.1	两体接触刚度	85
5.1.1	接触刚度的定义	85
5.1.2	球体接触刚度	86
5.1.3	正交圆柱接触刚度	88
5.1.4	一般接触刚度	88
5.1.5	平行圆柱接触	89
5.2	多体接触刚度	92
5.2.1	组合接触刚度	92
5.2.2	止推轴承接触刚度	95
5.2.3	径向轴承接触刚度	96
5.3	粗糙界面接触刚度	97
5.3.1	等高粗糙接触刚度	98
5.3.2	随机粗糙接触刚度	98
	参考文献	99

第 6 章 滚动分析	100
6.1 纯滚运动	100
6.1.1 滚动摩擦系数	100
6.1.2 滚动摩擦机理	101
6.2 滑滚运动	102
6.2.1 宏观滑滚运动及滑滚比	102
6.2.2 微观滑动	103
6.2.3 从微观滑动到宏观滑动	104
6.3 黏滑牵引机制	105
6.3.1 固-固界面间的黏着功	105
6.3.2 黏附理论——球/平面接触模型	106
6.3.3 滚动区域内的黏着	107
6.3.4 影响轮轨黏着的因素	109
6.4 其他滚动摩擦理论	110
6.4.1 弹性迟滞理论	110
6.4.2 塑性变形理论	111
参考文献	112
第 7 章 接触疲劳力学	114
7.1 表面疲劳	114
7.1.1 表面疲劳磨损的种类	114
7.1.2 裂纹的起源与扩展	115
7.2 接触疲劳分析	116
7.2.1 接触应力状态	116
7.2.2 接触疲劳强度准则	117
7.2.3 接触疲劳寿命	119
7.3 疲劳磨损理论与计算	120
7.3.1 疲劳磨损理论	120
7.3.2 剥层磨损理论	120
7.3.3 磨损计算方法	122
7.4 影响疲劳磨损的因素	123
7.4.1 载荷性质	124
7.4.2 材料性能	125
7.4.3 润滑剂的物理与化学作用	126
7.4.4 摩擦副材料的选配	127
参考文献	127

第 2 篇 受限流体界面力学

第 8 章 界面膜	131
8.1 吸附现象	131
8.1.1 气-固界面吸附	131
8.1.2 液-固界面吸附	132
8.1.3 表面膜强度	136
8.2 表面湿润性	136
8.2.1 表面张力与接触角	136
8.2.2 表面张力引起的液体内部压力	138
8.2.3 湿润性对界面膜性能的影响	139
8.2.4 湿润性对黏着的影响	140
8.3 表面膜吸附热力学	142
8.3.1 液体吸附热力学	142
8.3.2 解附临界温度	143
参考文献	145
第 9 章 受限流体模型与分析	146
9.1 界面流体流动分析模型	146
9.1.1 连续流体介质	146
9.1.2 非连续流体介质	148
9.1.3 统计力学	149
9.2 利用连续流体介质力学求解界面问题	150
9.2.1 流体动压润滑分析	150
9.2.2 弹性流体动压润滑分析	153
9.3 利用分子动力学模拟求解界面问题	156
9.3.1 分子动力学模拟方法	156
9.3.2 粗粒珠簧模型与势能函数	157
9.3.3 PFPE 在光滑表面上的铺展现象	157
9.4 利用玻耳兹曼方程求解稀薄气体润滑方程	160
9.4.1 基本方程	160
9.4.2 边界条件	162
9.4.3 任意克努森数的广义润滑方程推导	165
9.4.4 稀薄效应对负压型磁头性能的影响	166
参考文献	167
第 10 章 受限薄膜	169
10.1 有序分子膜类型	169

10.1.1	分子自组装膜	169
10.1.2	LB膜	173
10.1.3	分子沉积膜	175
10.2	有序分子膜性能	176
10.2.1	有序分子膜性能的实验研究	177
10.2.2	分子结构对自组装膜性能的影响	178
10.2.3	湿度和水膜对自组装膜摩擦性能的影响	184
10.2.4	超薄分子膜摩擦耗散的微观机制	186
10.3	液晶膜	186
10.3.1	液晶化合物的分类	187
10.3.2	液晶润滑分析	189
10.3.3	液晶润滑添加剂的摩擦机理	193
	参考文献	195
第 11 章	流-固界面边界层分析	197
11.1	边界层滑移	197
11.1.1	边界滑移现象	197
11.1.2	滑移边界条件	198
11.1.3	滑移边界流速分布	199
11.2	边界滑移理论	203
11.2.1	滑移长度模型	203
11.2.2	极限剪应力滑移模型	205
11.2.3	界面滑移的影响因素	207
11.3	考虑稀薄气体效应的雷诺方程	211
11.3.1	流量分析	211
11.3.2	广义雷诺方程	212
11.3.3	磁头/磁盘超薄气体润滑计算	213
11.4	界面滑移测试技术	216
11.4.1	近界面流体速度直接测量	216
11.4.2	基于微管道流量的测量	216
11.4.3	基于液体压力的测量	217
	参考文献	218
	中英文对照及索引	219

Contents



Chapter 1 Introduction	1
1.1 Interface classification	1
1.1.1 Smooth and rough interface	1
1.1.2 Interface with medium	2
1.1.3 Fluid-solid interface	2
1.1.4 Scale comparison of interface compositions	3
1.2 Interface formation	4
1.2.1 Surface contact	4
1.2.2 Surface deformation	4
1.3 Surface movement and action on interface	6
1.3.1 Surface movement	6
1.3.2 Action on interface	6
1.4 Rough surface	8
1.4.1 Parameters of surface topograph	8
1.4.2 Statistic parameters of surface topograph	10
1.5 Contents and compositions of the book	14
1.5.1 Contents of the book	14
1.5.2 Compositions of the book	14
References	15

Part I Solid interface mechanics

Chapter 2 Solid contact	19
2.1 Hertz contact theory	19
2.1.1 Hertz contact theory in line contact	19
2.1.2 Hertz contact theory in point contact	22

2.2	Non-Hertz contact of elastic solid	24
2.2.1	Contact of non-continuous surface	24
2.2.2	Coordination surface contact	25
2.2.3	Interfacial friction effect on contact stress	26
2.2.4	Surface effect on contact	29
2.3	Rough surface contact	33
2.3.1	Single peak contact	33
2.3.2	Ideal rough surface contact	34
2.3.3	Random rough surface contact	35
2.3.4	Plasticity index	36
2.4	Elasto-plastic contact	37
2.4.1	Yield criteria	37
2.4.2	Yield strength and yield load of elastic contact	38
2.4.3	Ideal rigid-plastic solid contact	39
2.4.4	Elastic-plastic indentation	41
	References	42
Chapter 3	Analysis of interface sliding	44
3.1	Non sliding surface contact	44
3.2	Sliding surface contact	46
3.2.1	Fundamental laws of sliding friction	46
3.2.2	Sliding interface mechanics analysis	46
3.3	Friction interface mechanics of elastic deformation	49
3.3.1	Basic assumptions	50
3.3.2	Effect of shear stress on pressure	50
3.3.3	Local sliding	51
3.4	Friction interface mechanics of rough deformation	52
3.4.1	Elastic contact of equal high balls	52
3.4.2	Elastic contact of random roughness	53
3.5	Characteristics of sliding friction	55
3.5.1	Static contact time	55
3.5.2	Jerking phenomenon	55
3.5.3	Pre-movement	56
	References	57
Chapter 4	Interface adhesive sliding	58
4.1	Solid interface energy	58
4.1.1	Solid surface force field	58

4.1.2	Solid surface energy and surface tension	60
4.1.3	Solid interface energy	61
4.2	Solid friction vibration and stick-slip	61
4.2.1	Friction vibration	61
4.2.2	Stick-slip phenomenon	62
4.2.3	Stick-slip and noise reduction	64
4.3	Affecting factors of adhesion	65
4.3.1	Roughness effect	65
4.3.2	Surface micro-structure effect	67
4.4	Adhesion study of gecko	68
4.4.1	Micro structure of gecko setae	69
4.4.2	Adhesion mechanism of micro structure of gecko	71
4.5	Surface treatment and modification of solid materials	74
4.5.1	Solid surface thickening	74
4.5.2	Solid surface visbreaking and antifouling	76
4.5.3	Surface cleaning	78
4.5.4	Mechanical and thermal treatment	79
4.5.5	Surface modification technology	79
	References	82
Chapter 5	Interface contact stiffness	85
5.1	Two objects contact stiffness	85
5.1.1	Contact stiffness definition	85
5.1.2	Spherical bodies contact stiffness	86
5.1.3	Orthogonal cylinders contact stiffness	88
5.1.4	General contact stiffness	88
5.1.5	Parallel cylinders contacts	89
5.2	Multi object contact stiffness	92
5.2.1	Combination contact stiffness	92
5.2.2	Thrust bearing contact stiffness	95
5.2.3	Radial bearing contact stiffness	96
5.3	Rough interface contact stiffness	97
5.3.1	Equal high roughness contact stiffness	98
5.3.2	Random roughness contact stiffness	98
	References	99
Chapter 6	Rolling analysis	100
6.1	Pure rolling movement	100

6.1.1	Rolling friction coefficient	100
6.1.2	Rolling friction mechanism	101
6.2	Sliding-rolling movement	102
6.2.1	Macro sliding-rolling movement and sliding-rolling ratio	102
6.2.2	Micro sliding	103
6.2.3	From micro slide to macro slide	104
6.3	Stick-slip traction mechanism	105
6.3.1	Adhesion energy of solid interface	105
6.3.2	Adhesion theory-ball-flat contact model	106
6.3.3	Adhesion in rolling area	107
6.3.4	Influence factors on wheel-rail adhesion	109
6.4	Other rolling friction theories	110
6.4.1	Elastic hysteresis theory	110
6.4.2	Plastic deformation theory	111
	References	112
Chapter 7	Contact fatigue mechanics	114
7.1	Surface fatigue damage	114
7.1.1	Types of surface fatigue wear	114
7.1.2	Origination and expansion of crack	115
7.2	Analysis of contact fatigue	116
7.2.1	Contact stress state	116
7.2.2	Contact fatigue strength criteria	117
7.2.3	Contact fatigue life	119
7.3	Theory and computation of fatigue wear	120
7.3.1	Theory of fatigue wear	120
7.3.2	Theory of delamination wear	120
7.3.3	Wear calculation methods	122
7.4	Impact factors of fatigue wear	123
7.4.1	Load nature	124
7.4.2	Material properties	125
7.4.3	Physical and chemical actions of lubricant	126
7.4.4	Matching of friction materials	127
	References	127
	Part II Restricted fluid interface mechanics	
Chapter 8	Adsorption film	131
8.1	Adsorption phenomena	131

8.1.1	Adsorption of gas-solid interface	131
8.1.2	Adsorption of liquid-solid interface	132
8.1.3	Strength of surface film	136
8.2	Surface wettability	136
8.2.1	Surface tension and contact angle	136
8.2.2	Internal pressure caused by surface tension of liquid	138
8.2.3	Influence of wettability on interfacial film performance	139
8.2.4	Influence of wettability on adhesion	140
8.3	Thermodynamics of adsorption of liquid-solid surface film	142
8.3.1	Liquid adsorption thermodynamics	142
8.3.2	Critical temperature of desorption	143
	References	145
Chapter 9	Confined fluid models and analysis	146
9.1	Interface fluid flow analysis model	146
9.1.1	Continuous fluid medium	146
9.1.2	Non-continuous fluid medium	148
9.1.3	Statistic mechanics	149
9.2	Solve interface problem by continuous fluid mechanics	150
9.2.1	Hydrodynamic lubrication analysis	150
9.2.2	Elasto-hydrodynamic lubrication analysis	153
9.3	Solve interface problem by molecular dynamics simulation	156
9.3.1	Molecular dynamics simulation method	156
9.3.2	Coarse ball-spring model and potential energy function	157
9.3.3	Spreading phenomenon of PFPE on a smooth surface	157
9.4	Solve rarefied gas lubricated equation problem by Boltzmann equation	160
9.4.1	Basic equations	160
9.4.2	Boundary conditions	162
9.4.3	Generalized lubrication equation with arbitrary Knudsen number	165
9.4.4	Influence of rarified effect on performances of negative magnetic head	166
	References	167
Chapter 10	Confined thin film	169
10.1	Types of ordered molecular film	169
10.1.1	Self-assembled molecular monolayer	169

10.1.2	LB film	173
10.1.3	Deposition molecular film	175
10.2	Performances of ordered molecular film	176
10.2.1	Experimental study on performances of ordered molecular film	177
10.2.2	Molecular structure on self-assembled film performance	178
10.2.3	Humidity and water film on self-assembled film frictional performance	184
10.2.4	Microscopic friction dissipation mechanism of super thin molecular film	186
10.3	Liquid crystal film	186
10.3.1	LCD compounds classification	187
10.3.2	LCD lubrication analysis	189
10.3.3	Friction mechanism of LCD lubricant additive	193
	References	195
Chapter 11	Boundary layer analysis of fluid-solid interface	197
11.1	Slip of boundary	197
11.1.1	Boundary slip phenomenon	197
11.1.2	Boundary conditions of slippage	198
11.1.3	Velocity distribution on slip boundary	199
11.2	Boundary slip theory	203
11.2.1	Slip length model	203
11.2.2	Slip model of limiting shear stress	205
11.2.3	Factors affecting on boundary slip	207
11.3	Reynolds equation considering effect of rarefied gas	211
11.3.1	Flow analysis	211
11.3.2	Generalized Reynolds equation	212
11.3.3	Calculation of head/disk ultra thin gas lubrication	213
11.4	Technology of interfacial slippage testing	216
11.4.1	Direct measurement of fluid velocity near interface	216
11.4.2	Flow measurement based on micro-pipeline	216
11.4.3	Pressure measurement for liquid	217
	References	218
	Chinese-English List and Index	219