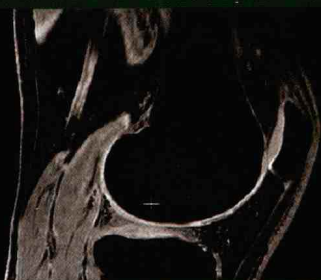


Human Biotribology

人体生物摩擦学

王成焘 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

人体生物摩擦学

王成焘 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是论述人体中生物摩擦学问题的科学专著,由我国从事该领域研究的多位专家合作撰写。全书分为两大部分:第1章至第5章为共性部分,论述人体生物摩擦学中的共性问题;第6章至第12章为专题部分,论述了关节、软骨、接骨板等植入物、滑液、牙齿、心血管系统和皮肤的摩擦学问题,涉及天然和人工组织器官两方面内容。

本书不仅向人体生物摩擦学领域的专家和研究人员提供了系统、翔实的科研成果和资料,其内容对专业从事相关医疗器械产品生产开发的工程技术人员也具有重要作用。由于当今医学与工程学之间日益紧密的交叉与融合,这部著作对相关领域的医生也有重要的参考价值。该著作同时还可作为工科和医科领域大学本科生和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

人体生物摩擦学 = Human Biotribology / 王成焘等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-022456-9

I. 人… II. 王… III. 人体生理学:摩擦学 IV. R318.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 099771 号

责任编辑:刘宝莉 沈 建 / 责任校对:鲁 素

责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 9 月第 一 次印刷 印张: 39 1/4

印数: 1—2 000 字数: 764 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

序

40 多年前，工业中的许多问题使人们对于“摩擦学”这个名词及其概念有了新的认识。很快，人们就发现：在生物系统研究领域，深刻理解负载、活动表面之间相互作用的性质规律同样非常重要。“生物摩擦学”这个名词在 1970 年得以首次使用，并在 1973 年被定义为“与生物系统相关的摩擦学现象”。这本书的主旨是探讨人体中的摩擦学现象，这方面最为突出的表现就是：天然承载滑膜关节性能优良，而用人工关节取代后，承载性能下降，尽管关节置换术可减轻患者痛苦，并使他们能在术后重新站立行走。该书前面几章将对此进行专题讨论，并在后面的章节中进一步提及其他器官。

在工程摩擦学的基础上加上生物学的概念，使人们在研究固体间复杂表面相互作用的机理方面，遇到了巨大的挑战，同时也产生了激动人心的发现。从摩擦学问题（包括从自然界发现的一般性问题以及从人体中发现的特殊性问题）的解决方案中，虚心学习的工程技术人员与科学家可获益良多。有关将自然界对于摩擦学问题的解决方案运用到当前某些工程领域的可行性，已引起人们的极大兴趣，这可以从仿生学领域的发展得到印证。

中国对摩擦学的研究由来已久，并在摩擦学史上占据显赫地位。在中国摩擦学学会的大力支持下，有关人体生物摩擦学的这本专著得以编辑出版。全书以系统、生动的方式对该主题进行阐述，表明人们对此兴趣越来越浓厚。该书为人体生物摩擦学这一领域做出了突出贡献，它不仅为众多读者介绍了这一领域内许多引人入胜的、新的研究工作，同时也为中国摩擦学领域的近期学术活动带来了盎然生机。

能有幸应邀作此序言，甚感荣幸，并谨向参与本专著写作的人员致以祝贺！

Duncan Dowson

2007 年 5 月于英国利兹大学

Preface

Industrial problems were responsible for the recognition of both the concept and the word *Tribology* some forty years ago. It soon became clear that an understanding of the nature of interactions between loaded, moving surfaces was equally important in studies of biological systems. The word *biotribology* was first used in 1970 and defined in 1973 as “*those aspects of tribology concerned with biological systems*”. The present text addresses the subject of tribology in the human body. The most familiar manifestation of the subject is the performance of natural, load bearing synovial joints and the replacement of degenerate bearings with man made components. Joint replacement has brought great relief from pain and restored mobility for very many people. These topics are addressed in the early chapters with mention of other organs following in later sections of the book.

The addition of biological concepts to those of engineering tribology has resulted in major challenges and exciting revelations about the nature of detailed surface interactions between solids. Humble engineers and scientists can learn much from solutions to tribological problems found in nature in general and the human body in particular. There is considerable interest in the possibility of applying nature's solutions to tribological problems in some engineering situations at the present time, as evidenced by the expanding field of biomimetics.

China holds a long and distinguished place in the history of tribology. The present monograph on aspects of biotribology within the human body has been compiled under the auspices of the Chinese Tribology Society. The subject is introduced in a systematic and interesting manner and near simultaneous publication of texts on this topic in China and England* reflects the rapid growth of interest in the topic. The book is an important contribution to the subject of biotribology in the human body. It not only presents much new work which will be of

interest to many readers but also provides a fascinating update on recent activity in this field in China.

I was honoured by the invitation to write this preface and I congratulate all involved in the preparation of this major work.

A handwritten signature in black ink, reading "Duncan Dowson". The signature is stylized with large, flowing loops for the first part and a more cursive, connected script for the name "Dowson". A long, horizontal flourish extends from the end of the signature.

Duncan Dowson, Leeds, May, 2007.

前 言

21 世纪, 人类将会投入更多的精力探索人体自身的奥秘, 摩擦学界也不例外。从 20 世纪 80 年代起, 中国国家自然科学基金、各部委和省市的研究基金先后支持了许多人体生物摩擦学相关的研究课题, 取得了一批可喜的成果。中国机械工程学会摩擦学分会于 2000 年正式成立了“生物摩擦学与医学植入物”专业委员会, 相继在上海交通大学、西南交通大学、中国矿业大学召开了学术会议。通过日益密切的学术交流活动, 大家感到有必要共同撰写一本专著, 总结交流十多年来中国在人体生物摩擦学领域的研究成果, 为进一步的研究工作打好基础。这一动议获得了摩擦学分会和科学出版社的大力支持, 构成本书的出版背景。

本书由中国摩擦学学会“生物摩擦学与医学植入物”专业委员会主任、上海交通大学王成焘教授和两位副主任——西南交通大学周仲荣教授及中国矿业大学葛世荣教授共同发起, 通过发挥专业委员会各成员单位的研究特长, 集体进行撰写。专业委员会副主任、西安交通大学李涤尘教授对这项工作给予了热情的支持。全书主要反映作者们自身的研究成果, 同时按照学科本身的科学性与系统性, 补充相关资料, 形成各章完整的知识体系, 力争使著作比较全面地反映我国在人体生物摩擦学领域的研究成果, 成为国内该领域一部具有代表性的科学专著。

全书由王成焘教授任主编, 葛世荣、周仲荣两位教授任副主编, 共同对全书内容进行了反复的筛选和协调, 并对稿件进行了认真的审阅和交互讨论。各章撰写人如下: 第 1 章, 上海交通大学王成焘教授和博士生李锋; 第 2 章, 上海交通大学王成焘教授和博士生张希安等; 第 3 章, 中国矿业大学葛世荣教授和王庆良教授; 第 4 章, 上海交通大学王成焘教授和博士生苏永琳, 英国利兹大学靳忠民教授以上海交通大学兼职教授的身份参加了全章的写作, 提供了大量的资料, 参与了各轮稿件的修改, 并给予了热情的指导; 第 5 章, 南京理工大学熊党生教授负责全章的编写, 中国矿业大学王庆良教授撰写了其中的第 4 节; 第 6 章, 中国矿业大学葛世荣和王庆良教授负责全章的编写, 南京理工大学熊党生教授撰写了其中的第 6 节; 第 7 章, 南京理工大学熊党生教授; 第 8 章, 四川大学华西口腔医学院于海洋主任医生、西南交通大学周仲荣教授和郑靖副研究员; 第 9 章, 上海大学张建华教授、博士生华子恺和苏世虎工程师; 第 10 章, 西南交通大学周

仲荣教授和郑靖副研究员；第 11 章，西南交通大学黄楠教授和冷永祥教授；第 12 章，西南交通大学周仲荣教授和李炜博士。

许多专家为本书的出版工作付出了热情的劳动，他们当中有：上海大学陶德华教授，他长期从事人工滑液的研究，对第 9 章的编写给予了热情的指导；青岛理工大学杨沛然教授，他在第 4 章的写作过程中提出了很多宝贵建议；口腔修复专家李玲博士，她受主编委托对本书第 10 章进行了认真的审阅并交换了重要意见。还有很多研究生以各种方式参加了本书的编写工作，他（她）们是：南京理工大学陈晓林、霍明峰和林健明硕士；西南交通大学研究生肖枫、黄毅等；中国矿业大学博士生钱善华、硕士生史兴岭；上海交通大学博士生张琳琳、聂文忠、季文婷、唐刚，硕士生李云婷、胡妍、王洪生等。对他们为本书作出的贡献我们表示衷心的感谢。

在本书的编写工作中得到了主管部门和企业的热情支持。中国医疗器械行业协会外科植入物专业委员会理事长姚志修教授为本书的编写提供了宝贵的资料和建议，副秘书长陈文女士对全书多个章节内容提出修改意见并提供了相关资料。天津医疗器械检测中心董双鹏工程师提供了第 3 章中有关我国植入物生物材料检测的规范和要求，对这一部分的稿件进行了认真的阅读并亲自撰写了某些段落。北京蒙太因华佗生物力学实验室刘勤主任提供了有关人工关节模拟试验的宝贵心得和资料。我们在此一并表示感谢。

本书的作者们一致认为，在这本书出版之际应对中国国家自然科学基金致以衷心的感谢，因为本书的所有作者都先后得到过生物摩擦学相关项目的基金资助，特别是“植入假体的生物摩擦学关键基础问题研究（50535050）”重点项目的支持，本书的出版是该项目的成果之一。

这本专著的出版是中国摩擦学学会长期以来大力支持和推进生物摩擦学研究的成果之一。中国摩擦学学会前任理事长张嗣伟教授，中国工程院院士、前中国摩擦学学会理事长谢友柏教授，中国科学院院士、清华大学摩擦学国家重点实验室前主任温诗铸教授对本专著的撰写和出版给予了大力的支持和指导，在此表示深切的谢意。

世界著名生物摩擦学权威，弹性流体动力润滑理论的奠基者，英国里兹大学的 Dowson 教授为本书作序，在此对 Dowson 教授表示崇高的敬意和深深的感谢。

王成焘

上海交通大学 教授

目 录

序

Preface

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 人体生物摩擦学的定义与研究对象	1
1.1.1 摩擦学的定义	1
1.1.2 生物摩擦学的定义	4
1.1.3 人体生物摩擦学的定义与研究对象	5
1.2 人体生物摩擦学中的天然摩擦副	7
1.2.1 关节摩擦副	7
1.2.2 软组织器官中的摩擦副	13
1.2.3 口腔中的摩擦副	14
1.3 人体生物摩擦学中的人工摩擦副	14
1.3.1 假体与植入物	14
1.3.2 人工表面与人体体内组织与介质构成的摩擦副	16
1.3.3 植入物内部的人工摩擦副	16
1.3.4 人工表面与人体体表组织构成的摩擦副	17
1.4 人体生物摩擦学中的基础理论问题	17
1.4.1 人体组织摩擦表面的特性与接触问题	18
1.4.2 人体组织摩擦面的摩擦力生成与润滑机理	25
1.4.3 摩擦与人体组织的损伤、变异和病理学反应	27
1.4.4 人体环境与摩擦效应的互动作用	30
1.4.5 人体组织微动界面的摩擦、磨损与长合机制	32
1.4.6 摩擦与人体中物质的微交换机制	35
1.5 假体与植入物摩擦学设计中的基本问题	36
1.5.1 人体生物力学分析	36
1.5.2 减摩与抗磨设计	38
1.5.3 润滑设计	39
1.5.4 界面的抗微动设计	39
1.6 人体生物摩擦学学科发展展望	40

参考文献	41
第2章 人体骨-肌-关节系统的运动与受力分析	46
2.1 人体骨-肌-关节系统中的生物力学问题	46
2.2 人体的运动测量	47
2.2.1 运动捕捉系统	47
2.2.2 人体肢体运动测量	50
2.2.3 人体咀嚼运动测量	53
2.3 人体的力学测量	55
2.3.1 肢体的力学测量	55
2.3.2 足底力测量	55
2.3.3 足底压力分布测量	57
2.3.4 殆力测量	59
2.4 肌电测量	60
2.4.1 肌肉的电生理特性	60
2.4.2 肌电仪及肌电测量	61
2.4.3 肢体肌肉群肌电测量	63
2.4.4 咀嚼肌肌电测量	63
2.5 肌肉力的理论计算	66
2.5.1 骨肌系统动力学仿真建模	66
2.5.2 基于骨肌系统模型的肌肉力优化计算法	68
2.5.3 步态下肢骨肌肉群的肌肉力计算	71
2.5.4 下颌肌肉群的肌肉力计算	73
2.6 人体关节的运动与受力分析	73
2.6.1 下肢关节的运动与受力分析	73
2.6.2 上肢关节的运动与受力分析	81
2.6.3 脊柱的运动与受力分析	83
2.6.4 颞下颌关节的运动与受力分析	86
2.7 人体骨-肌-关节系统生物力学研究展望	87
参考文献	89
第3章 人体生物摩擦学中的生物材料	92
3.1 生物材料定义和分类	92
3.1.1 生物材料的定义	92
3.1.2 生物材料的分类	92
3.1.3 生物材料的基本要求	94
3.2 金属材料	96

3.2.1 不锈钢材料	97
3.2.2 钴基合金材料	98
3.2.3 钛及钛合金材料	100
3.2.4 其他金属材料	104
3.3 高分子材料	107
3.3.1 超高分子量聚乙烯	108
3.3.2 骨水泥	117
3.4 陶瓷材料	121
3.4.1 氧化铝陶瓷	123
3.4.2 氧化锆陶瓷	125
3.5 碳素材料	127
3.5.1 碳素材料的种类和性能	127
3.5.2 碳素材料的医学应用	129
3.6 表面涂层材料	131
3.6.1 多孔钛涂层	131
3.6.2 羟基磷灰石涂层	133
3.6.3 其他表面涂层	135
3.7 生物材料的评价标准与检测	136
3.7.1 生物材料的评价标准	136
3.7.2 生物材料的检测	137
3.7.3 生物材料的生物学评价标准和检测	142
3.8 人体生物摩擦学相关材料的研究展望	147
参考文献	149
第4章 人工关节的润滑分析	155
4.1 人工关节中的润滑	155
4.2 人工髋关节的 EHL 计算模型与基本方程	158
4.2.1 坐标系	158
4.2.2 人工髋关节的 EHL 计算模型	159
4.2.3 髋关节的运动与受力	161
4.2.4 润滑方程	162
4.2.5 膜厚方程	164
4.3 方程的无量纲化及弹性流体动力润滑的数值求解	169
4.3.1 方程的无量纲化	169
4.3.2 EHL 数值解法的基本原理	171
4.3.3 基本方程的数值解法	174

4.4	人工髋关节非稳态 EHL 计算分析	178
4.4.1	“硬相-软相”的非稳态 EHL 计算分析	179
4.4.2	“硬相-软相”的纯挤压 EHL 计算分析	182
4.4.3	“硬相-硬相”的非稳态 EHL 计算分析	184
4.5	人工髋关节稳态 EHL 计算分析	189
4.5.1	稳态下的 EHL 计算	189
4.5.2	几何参数对 EHL 的影响分析	191
4.6	人工髋关节二维轴对称纯挤压 EHL 数据库计算法	196
4.6.1	基本方程	196
4.6.2	方程的无量纲化	197
4.6.3	数据库的建立	198
4.6.4	基于数据库的人工髋关节 EHL 膜厚计算法	199
4.6.5	人工关节参数对纯挤压膜厚的影响	201
4.7	人工髋关节 EHL 膜厚的近似估算方法	202
4.7.1	挤压膜的简化公式	202
4.7.2	考虑曲率影响的中心膜厚计算公式	203
4.8	人体摩擦副润滑分析方法研究展望	204
4.9	主要符号	205
	参考文献	207
第 5 章	人体环境中植入物的磨损问题	211
5.1	人体环境中的机械磨损	211
5.1.1	机械磨损类型	211
5.1.2	黏着磨损	212
5.1.3	磨粒磨损	214
5.1.4	疲劳磨损	215
5.1.5	冲蚀磨损	216
5.2	人体环境中的腐蚀磨损	221
5.2.1	腐蚀磨损概念	221
5.2.2	人体环境中各种金属植入物腐蚀磨损	223
5.3	人体环境中的微动磨损	229
5.3.1	微动及微动磨损概念	229
5.3.2	微动磨损机理	230
5.3.3	人体环境中的微动磨损问题	231
5.3.4	纯钛及钛合金植入物的微动磨损	233
5.3.5	不锈钢植入物的微动磨损	234

5.3.6 植入物表面 HA 涂层的微动磨损	235
5.3.7 植入物表面 DLC 涂层的微动磨损	237
5.4 人体环境中的磨损颗粒	238
5.4.1 磨损颗粒	238
5.4.2 磨损颗粒的分布与迁移	241
5.4.3 磨损颗粒的组织学反应	243
5.5 磨粒的物理化学分析	246
5.5.1 磨损产物观察方法	247
5.5.2 磨损颗粒的分离与辨别	252
5.6 人体环境中磨损问题研究展望	261
参考文献	261
第 6 章 人工关节摩擦学	272
6.1 天然活动关节的解剖学结构	272
6.1.1 下肢活动关节解剖学结构	274
6.1.2 上肢活动关节解剖学结构	277
6.1.3 颞下颌关节解剖学结构	280
6.2 人工关节的结构	281
6.2.1 人工关节概述	281
6.2.2 下肢人工关节的结构	282
6.2.3 上肢人工关节的结构	290
6.2.4 人工颞下颌关节的结构	294
6.3 人工关节的固定	296
6.3.1 骨水泥型人工关节的固定	296
6.3.2 非骨水泥型人工关节的固定	297
6.4 人工关节摩擦学	299
6.4.1 人工关节的磨损	299
6.4.2 UHMWPE 人工关节的磨损	303
6.4.3 全金属人工关节的磨损	311
6.4.4 全陶瓷人工关节的磨损	314
6.5 人工关节松动的机理与对策	321
6.5.1 人工关节的无菌松动	322
6.5.2 人工关节无菌松动的机理	323
6.5.3 人工关节无菌松动的对策	325
6.6 人工关节摩擦学性能测试与评价	327
6.6.1 人工关节摩擦学性能评价参数	328

6.6.2 人工关节摩擦学常规试验设备	330
6.6.3 人工关节模拟磨损试验设备	332
6.6.4 人工关节摩擦学性能评价标准	339
6.7 人工关节摩擦学设计展望	346
参考文献	347
第7章 天然与人工软骨摩擦学	356
7.1 天然关节软骨的相关研究	356
7.1.1 天然关节软骨结构与特征	356
7.1.2 天然关节软骨的摩擦学机理	360
7.2 天然关节软骨的损伤与修复	364
7.2.1 天然关节软骨的损伤	364
7.2.2 修复技术	365
7.3 人工关节软骨	368
7.3.1 人工关节软骨的材料学研究	368
7.3.2 人工关节软骨的力学性能	369
7.3.3 人工关节软骨的摩擦学性能	375
7.3.4 组织工程化软骨	389
7.4 关节软骨的试验研究	392
7.4.1 摩擦实验装置	392
7.4.2 润滑液	394
7.5 关节软骨摩擦学的研究展望	400
参考文献	401
第8章 天然骨/植入物的微动磨损	411
8.1 天然骨/植入物的界面与微动	411
8.1.1 天然骨/植入物的界面	411
8.1.2 植入体-骨界面的微动	412
8.2 天然骨/植入物界面的力学分析	415
8.2.1 骨接触力学研究方法	416
8.2.2 数学模型	416
8.2.3 过盈量与应力分布	417
8.3 天然骨/金属植入物的微动磨损	421
8.3.1 TA2/人体股骨横断面的微动磨损	422
8.3.2 人体股骨纵断面的微动磨损	427
8.3.3 TA2/骨纵断面、TC4/骨纵断面两种不同摩擦副的微动损伤分析	431
8.4 研究展望	434

参考文献	434
第9章 天然与人工滑液	438
9.1 天然滑液	438
9.1.1 唾液	438
9.1.2 泪液	439
9.1.3 胃液	440
9.1.4 汗液	441
9.1.5 天然关节滑液	441
9.2 人工滑液	446
9.2.1 人工唾液	446
9.2.2 人工泪液	447
9.2.3 人工仿生关节滑液	447
9.2.4 医用外科辅助滑液	451
9.3 人工关节润滑系统	452
9.3.1 人工关节滑液系统及仿生关节囊	452
9.3.2 仿生关节囊性能测试	453
9.4 天然与人工滑液的试验研究	457
9.4.1 天然关节滑液的物理性能研究	457
9.4.2 复合滑液摩擦学性能测定	458
9.4.3 复合滑液生物相容性测定	461
9.5 人工滑液的研究展望	461
参考文献	462
第10章 牙齿摩擦学	467
10.1 牙齿的功能与解剖学结构	467
10.1.1 牙齿的功能	467
10.1.2 牙齿的解剖学结构	467
10.2 牙齿的摩擦学问题	475
10.2.1 口腔内的化学环境和咀嚼参数	475
10.2.2 牙齿的磨损起因	475
10.2.3 牙齿的磨损类型	476
10.3 人体天然牙的摩擦行为	478
10.3.1 健康恒牙的摩擦行为	478
10.3.2 天然牙摩擦行为的增龄性变化	480
10.3.3 四环素牙的摩擦行为	482
10.3.4 口腔环境因素对天然牙摩擦行为的影响	483

10.4 人体天然牙的磨损行为·····	485
10.4.1 健康恒牙釉质的磨损行为·····	485
10.4.2 健康恒牙本质和釉质牙本质界的磨损行为·····	494
10.4.3 天然牙磨损行为的增龄性变化·····	496
10.4.4 四环素牙的磨损行为·····	498
10.4.5 口腔环境因素对天然牙磨损行为的影响·····	500
10.4.6 牙齿磨损在考古学中的应用·····	502
10.4.7 小结·····	503
10.5 牙科修复材料摩擦学研究·····	504
10.5.1 金属材料·····	504
10.5.2 陶瓷材料·····	506
10.5.3 塑料义齿·····	510
10.5.4 种植牙·····	516
10.6 牙科材料的摩擦学性能测试·····	517
10.6.1 牙科材料的标准·····	517
10.6.2 牙科材料的摩擦学性能测试·····	518
10.7 牙齿摩擦学的研究展望·····	519
10.7.1 研究对象·····	520
10.7.2 研究方法·····	521
参考文献·····	521
第 11 章 人工心血管系统摩擦学 ·····	528
11.1 心脏瓣膜疾病及其治疗·····	528
11.1.1 心脏瓣膜功能及心脏瓣膜疾病·····	528
11.1.2 心脏瓣膜疾病的治疗·····	529
11.2 人工机械心脏瓣膜的结构与摩擦学问题·····	531
11.2.1 人工机械心脏瓣膜的分类及其结构·····	531
11.2.2 人工机械心脏瓣膜失效及其摩擦学问题·····	535
11.2.3 人工心脏瓣膜表面改性·····	545
11.3 心脏机械辅助循环装置——心室辅助装置和人工心脏·····	548
11.3.1 全人工心脏的发展及其结构·····	548
11.3.2 心室辅助装置·····	550
11.4 人工心脏与心室辅助装置的摩擦·····	551
11.4.1 人工心脏与心室辅助装置的失效和摩擦·····	551
11.4.2 人工心脏与心室辅助装置的摩擦行为·····	551
11.5 人工心血管系统摩擦学试验研究与性能检测·····	555

11.6 技术发展展望·····	557
参考文献·····	557
第12章 皮肤的摩擦学问题 ·····	561
12.1 天然皮肤的功能与结构·····	561
12.1.1 皮肤的功能·····	561
12.1.2 皮肤的结构·····	561
12.2 天然皮肤的摩擦学问题·····	563
12.2.1 皮肤的摩擦行为机制·····	564
12.2.2 皮肤摩擦运行机制的力学特征·····	570
12.2.3 皮肤的生理性反应·····	573
12.2.4 皮肤的病理性反应·····	577
12.2.5 自然因素对皮肤摩擦特性的影响·····	583
12.2.6 疤痕皮肤的摩擦学特性·····	586
12.2.7 介质对皮肤摩擦特性的影响·····	593
12.3 皮肤摩擦的实验方法·····	595
12.3.1 试验设备·····	595
12.3.2 试验材料·····	597
12.3.3 试验工况·····	597
12.3.4 表面分析方法·····	598
12.4 皮肤摩擦学的医学应用·····	598
12.4.1 假肢接受腔界面的设计·····	598
12.4.2 矫形支架的摩擦学设计·····	599
12.4.3 糖尿病人鞋及鞋垫的摩擦学设计·····	599
12.4.4 皮肤病理学的评定·····	600
12.5 皮肤摩擦学的工业应用·····	600
12.5.1 在护肤品和化妆品开发中的应用·····	600
12.5.2 在纺织面料开发中的应用·····	602
12.5.3 在日用品和劳动工具设计中的应用·····	602
12.6 皮肤摩擦学发展展望·····	602
参考文献·····	603