

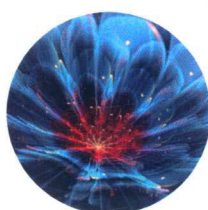


973、863、国家自然科学基金项目系列专著

# 高温发汗自润滑材料 仿生胞体结构的接触稳定性研究

GAOWEN FAHAN ZIRUNHUA CAILIAO  
FANGSHENG BAOTI JIEGOU DE JIECHU WENDINGXING YANJIU

解 芳 著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

973、863、国家自然科学基金项目系列专著

# 高温发汗自润滑材料仿生胞体 结构的接触稳定性研究

解 芳 著

华中科技大学出版社

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书主要基于高温发汗自润滑材料的仿生胞体结构特征,揭示了其强韧性与其内部胞孔结构形态的互耦合机理,探讨了提高仿生胞体结构稳定性的途径。全书共8章,内容包括绪论、高温发汗自润滑材料的仿生胞体结构特征及其建模理论、高温发汗自润滑仿生胞体的接触力学研究、单孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究、多孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究、异形孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究、环境工况对厚壁仿生胞体接触稳定性的影响、总结与展望。

### 图书在版编目(CIP)数据

高温发汗自润滑材料仿生胞体结构的接触稳定性研究/解芳著. —武汉:华中科技大学出版社, 2015.10

(973、863、国家自然科学基金项目系列专著)

ISBN 978-7-5680-1231-7

I. ①高… II. ①解… III. ①自润滑材料-结构稳定性-研究 IV. ①TB390.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 222027 号

高温发汗自润滑材料仿生胞体结构的接触稳定性研究

解 芳 著

策划编辑:严育才

责任编辑:王 晶

封面设计:刘 卉

责任校对:曾 婷

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:9

字 数:201千字

版 次:2015年12月第1版第1次印刷

定 价:25.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

运用仿生学原理开展特种润滑材料的研究,是近年来国内外摩擦学领域的研究热点。高温发汗自润滑材料是基于人体汗腺结构及其发汗原理开发的自补偿仿生润滑材料。该材料由具有有序微孔结构的多孔基体(仿生胞体结构)和浸渍于微孔(胞孔)中的固体润滑剂(润滑体)两部分组成。在摩擦过程中,仿生胞体结构主要起承担载荷的作用,而润滑剂则主要起降低摩擦表面的摩擦系数、减小磨损的作用。由于仿生胞体结构的强韧性与其内部的胞孔结构形态密切相关,因此必须要明确胞孔形状、大小及其分布对材料接触载荷适应性的影响规律,探讨提高仿生胞体结构稳定性的途径。该研究不仅可以反馈指导高温发汗自润滑材料组分及制备工艺的设计,而且可用于预测具有胞孔结构特征材料的承载极限,以设计高温发汗自润滑材料的环境及工况适用范围,为开发高强韧性的高温发汗自润滑材料提供理论依据和实验基础。

本书基于作者多年从事高温发汗自润滑材料的研究成果,并参考了国内外相关的科技文献与资料,论述了结构形态与仿生胞体结构接触稳定性的耦合机理。本书内容主要包括绪论、高温发汗自润滑材料的仿生胞体结构特征及其建模理论、高温发汗自润滑仿生胞体的接触力学研究、单孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究、多孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究、异形孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究、环境工况对厚壁仿生胞体接触稳定性的影响、总结与展望。

在本书的编写过程中,武汉理工大学刘佐民教授、武汉材料保护研究所高万振教授对本书进行了审阅并提出了许多宝贵意见,武汉理工大学燕松山老师参加了资料收集和书稿整理,武汉理工大学摩擦学研究所王二虎工程师在试验方面给予了无私帮助,在本书出版之际,向本书所引用的文献与资料的原作者以及支持和帮助本书出版的专家和同仁们表示由衷的谢意。

本研究课题是在国家自然科学基金资助项目(50775168)、国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070497105)、中国博士后科学基金第54批面上资助项目(2013M541985)、河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A460808)、留学回国人员科技活动择优资助项目(豫留学函[2014] 27号)的资助下完成的,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限加之时间紧迫,书中的缺点、错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正,并提出宝贵意见。

作 者

2015年4月5日

## 主要符号表

| 符号         | 意 义            | 符号            | 意 义                        |
|------------|----------------|---------------|----------------------------|
| $R_o$      | 胞元正多边形外壁的内切圆半径 | $F$           | 法向外载荷                      |
| $R_i$      | 正多边形胞孔的内切圆半径   | $P$           | 法向单位长度载荷                   |
| $\lambda$  | 孔结构特征参数        | $a$           | 接触半宽                       |
| $S_i$      | 正多边形多胞体的胞孔总面积  | $q_0$         | 最大接触压力                     |
| $S_o$      | 正多边形多胞体的总面积    | $R$           | 胞壁等效曲梁的平均半径                |
| $N$        | 基础胞元的个数        | $A$           | 胞壁等效曲梁的轴向横截面面积             |
| $n$        | 正多边形基础胞元的边数    | $k$           | 胞壁等效曲梁的截面系数                |
| $\rho^*$   | 胞体材料的密度        | $h$           | 胞壁厚度的二分之一                  |
| $\rho_s$   | 构成胞壁材料的密度      | $R'$          | 胞壁等效曲梁的轴线 $oo'$ 弯曲变形后的曲率半径 |
| $\psi$     | 孔隙率            | $R_o'$        | 接触点的实际曲率半径                 |
| $t$        | 胞体壁厚           | $\alpha$      | 接触点处曲率半径的增大系数              |
| $l$        | 胞体接触长度         | $\delta$      | 厚壁胞体的总径向位移                 |
| $\sigma$   | 胞体材料的抗压强度      | $\sigma_{xc}$ | 由接触变形引起的 $x$ 向应力           |
| $\sigma_0$ | 构成胞壁材料的抗压强度    | $\sigma_{yc}$ | 由接触变形引起的 $y$ 向应力           |
| $m$        | 经验常数           | $\sigma_{xb}$ | 由弯曲变形引起的 $x$ 向应力           |
| $E^*$      | 胞体材料的弹性模量      | $\sigma_x$    | 由接触变形和弯曲变形引起的总的 $x$ 向应力    |
| $E_s$      | 构成胞壁材料的弹性模量    | $\sigma_y$    | 由接触变形和弯曲变形引起的总的 $y$ 向应力    |
| $\mu^*$    | 胞体材料的泊松比       | $T$           | 工况环境温度                     |
| $\mu_s$    | 构成胞壁材料的泊松比     | $c$           | 试样的个数                      |
| $C$        | 与材料有关的特征值      | $F_s$         | 接触失效力                      |
| $R_d$      | 胞孔的分布半径        | $f$           | 摩擦系数                       |
| $K$        | 胞孔形状的种类        | $L$           | 圆柱体试样的轴向长度                 |
| $\beta_i$  | 各形状胞孔的相对孔隙率    | $\phi_i$      | 各形状胞孔所占的孔隙率                |

# 目 录

|       |                          |      |
|-------|--------------------------|------|
| 第 1 章 | 绪论                       | (1)  |
| 1.1   | 仿生摩擦学的研究现状               | (2)  |
| 1.2   | 多孔材料研究现状                 | (22) |
| 1.3   | 高温发汗自润滑材料的研究现状           | (29) |
| 1.4   | 课题研究的背景                  | (35) |
| 1.5   | 本课题研究的目的和意义、内容及技术路线      | (36) |
| 第 2 章 | 高温发汗自润滑材料的仿生胞体结构特征及其建模理论 | (39) |
| 2.1   | 引言                       | (39) |
| 2.2   | 高温发汗自润滑材料的仿生胞体结构特征       | (39) |
| 2.3   | 高温发汗自润滑材料多胞体理论模型的建立      | (41) |
| 2.4   | 仿生多胞体结构参数对材料物理特性的影响      | (46) |
| 2.5   | 本章结论                     | (48) |
| 第 3 章 | 高温发汗自润滑仿生胞体的接触力学研究       | (50) |
| 3.1   | 引言                       | (50) |
| 3.2   | 厚壁仿生单胞体接触力学模型            | (50) |
| 3.3   | 胞壁等效曲梁计算方法               | (52) |
| 3.4   | 基于模型的有限元法验证              | (57) |
| 3.5   | 孔隙率对厚壁仿生胞体结构接触力学特性的影响    | (59) |
| 3.6   | 孔隙率对厚壁仿生胞体结构局部应力的影响      | (61) |
| 3.7   | 厚壁仿生胞体结构破坏形貌及机理分析        | (62) |
| 3.8   | 本章结论                     | (65) |
| 第 4 章 | 单孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究         | (67) |
| 4.1   | 引言                       | (67) |
| 4.2   | 胞孔结构形态设计                 | (67) |
| 4.3   | 试验设计                     | (68) |
| 4.4   | 试验结果分析                   | (69) |
| 4.5   | 裂纹产生位置及扩展方向的比较分析         | (74) |
| 4.6   | 本章结论                     | (77) |
| 第 5 章 | 多孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究         | (78) |
| 5.1   | 引言                       | (78) |
| 5.2   | 试样设计                     | (78) |

---

|       |                               |       |
|-------|-------------------------------|-------|
| 5.3   | 试验结果分析·····                   | (80)  |
| 5.4   | 破坏形貌分析·····                   | (83)  |
| 5.5   | 本章结论·····                     | (87)  |
| 第 6 章 | 异形孔厚壁仿生胞体的接触稳定性研究 ·····       | (88)  |
| 6.1   | 引言·····                       | (88)  |
| 6.2   | 异形孔厚壁仿生胞体模型·····              | (88)  |
| 6.3   | 试验设计·····                     | (90)  |
| 6.4   | 结果及讨论·····                    | (91)  |
| 6.5   | 破坏形貌分析·····                   | (94)  |
| 6.6   | 本章结论·····                     | (95)  |
| 第 7 章 | 环境工况对厚壁仿生胞体接触稳定性的影响 ·····     | (97)  |
| 7.1   | 引言·····                       | (97)  |
| 7.2   | 温度对厚壁仿生胞体接触稳定性的影响·····        | (97)  |
| 7.3   | 切向力对厚壁仿生胞体应力分布及接触稳定性的影响 ····· | (103) |
| 7.4   | 本章结论 ·····                    | (117) |
| 第 8 章 | 总结与展望·····                    | (119) |
| 8.1   | 总结 ·····                      | (119) |
| 8.2   | 创新点 ·····                     | (120) |
| 8.3   | 未来展望 ·····                    | (121) |
| 附录 A  | ·····                         | (122) |
| 附录 B  | ·····                         | (124) |
| 参考文献  | ·····                         | (126) |



# 第 1 章 绪 论

摩擦学主要研究相互运动表面之间的摩擦、磨损、润滑以及相关问题。自从 1966 年,英国 H. Peter Jost 教授在著名的 Jost 报告中首次提出了摩擦学(tribology)的概念<sup>[1]</sup>以来,摩擦学得到了长足的发展,特别是近年来生物摩擦学、仿生摩擦学、微/纳米摩擦学及特殊工况环境下的摩擦学研究取得了显著的成就<sup>[2-3]</sup>,其研究范围涉及机械零部件、系统和装备中的表面界面行为与性能设计、机械制造和微/纳米制造过程中的表面界面行为及控制、生物与仿生机机械系统中的表面界面特性与规律,此外,还涉及自然界和人类日常生活中的许多表面界面现象。

摩擦学的研究成果可以用于改善机械系统的工作效率、延长使用寿命、提高机械系统和装备的可靠性,为解决人类社会面临能源短缺、资源枯竭、环境污染和健康问题提供有效方案,对社会和工业发展产生了巨大的推动作用。以机械装备中常用的深沟球轴承为例,先进的高能效轴承较普通轴承能耗降低 30%~50%,轴承工作时的温升降低 5%~15%,若用高能效轴承全部替代电动机中的普通轴承,则每年可以省电数十亿度。又如,通过改进表面增强技术和摩擦学设计可以延长机械的使用寿命,减少其维修成本和零件更换次数;通过表面自修复技术可以减少汽车尾气的排放;通过研发高效水基润滑剂、空气润滑和固体润滑技术可以逐步取代矿物油润滑剂,减轻对石油的依赖和对环境的污染;等等。根据国家统计局发布的《2014 年国民经济和社会发展统计公报》显示,我国 2014 年的国民经济生产总值为 636463 亿元,如果将与摩擦、磨损有关的花费按国民经济年生产总值的 5% 预估,就损失了 31823.15 亿元。由此可见,在提倡国民经济可持续发展的今天,摩擦学在社会经济中的地位达到了前所未有的高度。

润滑是摩擦学研究的重要内容之一,也是改善摩擦副的摩擦状态、降低摩擦、减缓磨损、提高摩擦副的使用寿命并减少能源消耗的最为有效的技术措施之一。随着现代科学技术及工业的发展,如电子机械、汽车、冶金、有色、石化、电力,特别是航空航天技术的快速发展,材料在极限工况(如高温、重载、高速、真空等)下的润滑问题日益受到工程界的关注<sup>[4]</sup>,如高速发动机、内燃机、燃气冶炼热风炉、火力发电厂和核能发电厂中的汽轮发电机、金属加工/成型设备、汽车制动盘及制动片、战略武器的定向装置、航空航天推进系统等的重要零部件的润滑性能和使用寿命,直接影响到其技术发展水平和安全可靠,这促使特种润滑材料的研制和开发成为目前摩擦学领域的研究重点之一<sup>[5]</sup>。

运用仿生学原理,开展特种润滑材料的研究是近年来国内外摩擦学领域的研究热点,如基于水生动物(如黄鳝、泥鳅等)体表滑液减阻机理的仿生润滑<sup>[6]</sup>,基于蚯蚓



体表液减黏脱土机理的仿生润滑<sup>[7]</sup>,以及基于人体汗腺结构及发汗原理的仿生润滑<sup>[8]</sup>等。这些仿生润滑研究的共性是采用人工方式重构生物体的胞体结构及其润滑特性,以实现具有类生物特性的润滑。由于仿生润滑的载体与生物体存在很大的差异,因此从仿生润滑液到载体结构形态存在大量的理论问题需要探索,特别是润滑液及仿生胞体结构对摩擦环境的适应性问题,直接影响到仿生润滑的效果。

本书针对高温发汗自润滑材料主要应用在高温和重载工况条件下的环境特征,开展了对其多孔基体(即仿生胞体)的接触稳定性研究,其目的是探讨胞孔结构、形态及分布对材料基体接触强度的影响,本研究将为该材料的设计、制备和环境适应性预测提供理论依据。

## 1.1 仿生摩擦学的研究现状

### 1.1.1 生物摩擦学

生物体在 35 亿年的进化过程中,为了适应生存环境,形成了许多优异的生物摩擦学特性,如人体关节液对关节的运动起到了润滑的作用;天然牙齿表面的釉质具有良好的耐磨性;荷叶的自清洁功能使其“出淤泥而不染”(见图 1-1);芋叶(芋头叶子)的表面特殊结构能对水和尘土起到脱附作用,使其保持长久清洁(见图 1-2);土壤类动物(如蚯蚓)和鱼类(如泥鳅、黄鳝等)(见图 1-3)表面分泌的特殊液体,可以减小其在土壤及水中的运动阻力;壁虎(见图 1-4)、苍蝇(见图 1-5)等动物脚底板的超细绒毛结构具有极强的吸附和脱附能力;鸟类的翅膀形状和羽毛结构有利于减小小飞行时的空气阻力(见图 1-6);鲨鱼皮的特殊结构可以有效降低海水阻力(见图 1-7);蛇类表皮的摩擦各向异性驱动蛇类呈 S 形蠕动(见图 1-8);贝类生物的外壳具有杰出的力学性能(见图 1-9);木材及竹材的特殊结构可以减小磨损(见图 1-10);等等。这些生物特有的优异摩擦学特性引起了人们极大的研究兴趣,生物摩擦学作为摩擦学的一个重要分支,其研究对象正在从宏观向微观、从人体向其他生物体迅速扩展<sup>[9-10]</sup>。

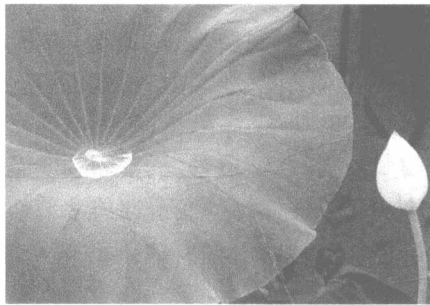


图 1-1 荷叶的自清洁效果图

Fig. 1-1 Self cleaning effect of lotus leaves



图 1-2 芋叶的脱附作用效果图

Fig. 1-2 Desorption effect of taro leaves



(a)



(b)



(c)

图 1-3 体表分泌滑液的动物

(a) 蚯蚓; (b) 泥鳅; (c) 黄鳝

Fig. 1-3 Synovial fluid secreting from animal skins

(a) earthworm; (b) loach; (c) ricefield eel

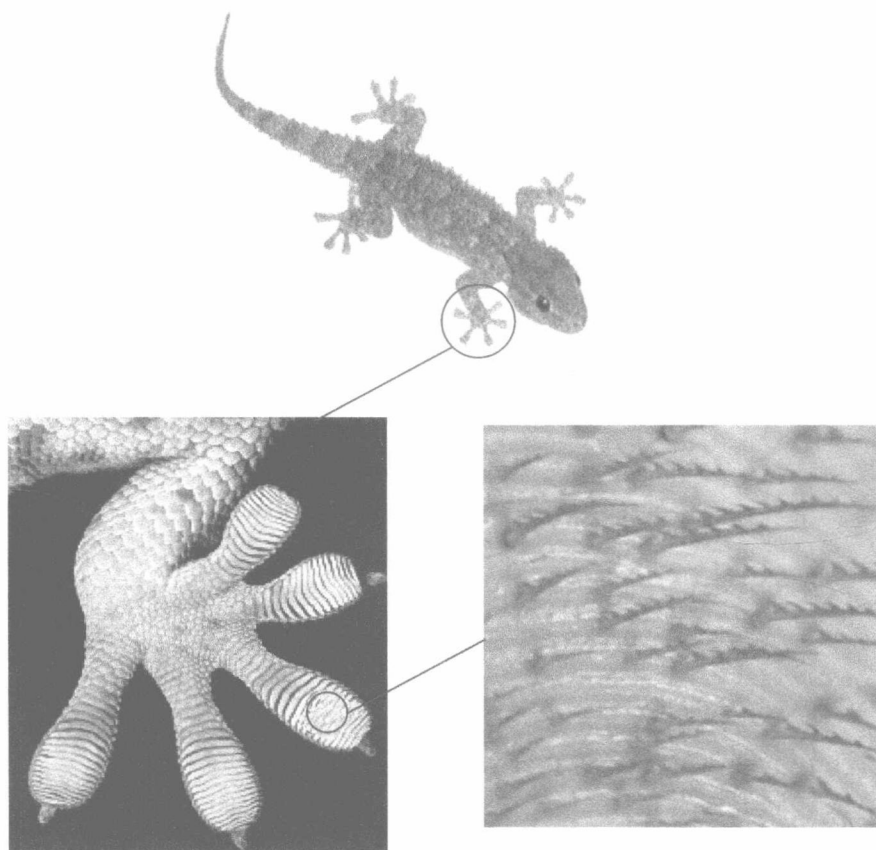


图 1-4 壁虎足底结构

Fig. 1-4 Foot structure of gecko

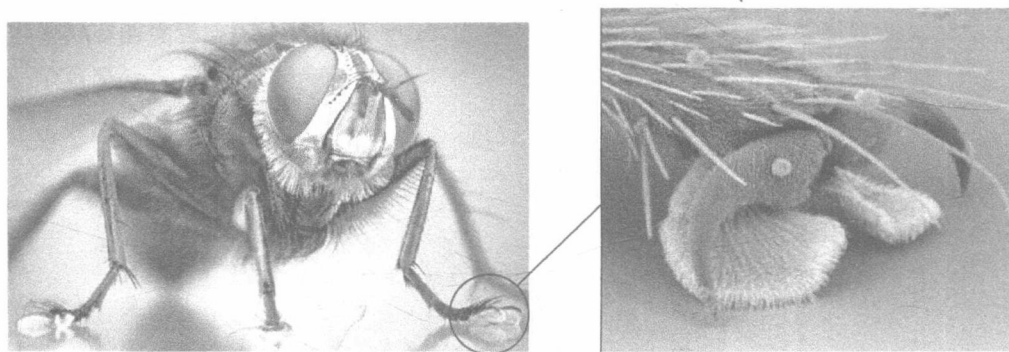


图 1-5 苍蝇足底结构

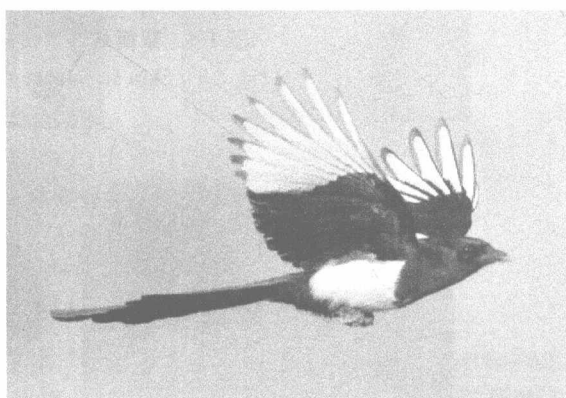
Fig. 1-5 Foot structure of fly



(a)



(b)



(c)

图 1-6 鸟类翅膀外形图

(a) 海鸥; (b) 麻雀; (c) 喜鹊

Fig. 1-6 Wing shape of birds

(a) seagull; (b) sparrow; (c) magpie

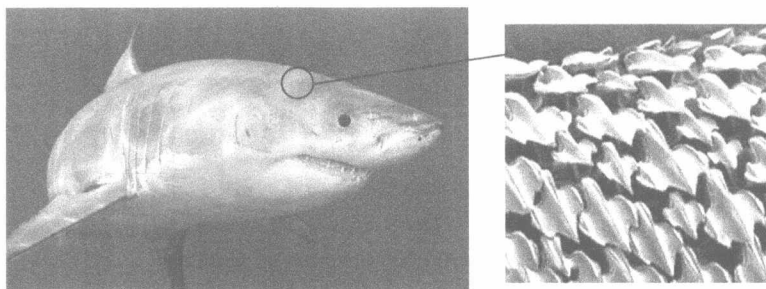


图 1-7 鲨鱼表皮结构图

Fig. 1-7 Skin structure of shark

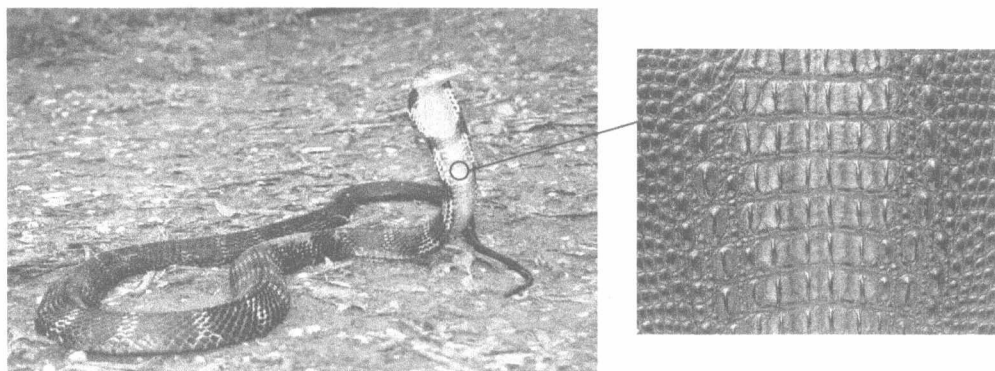
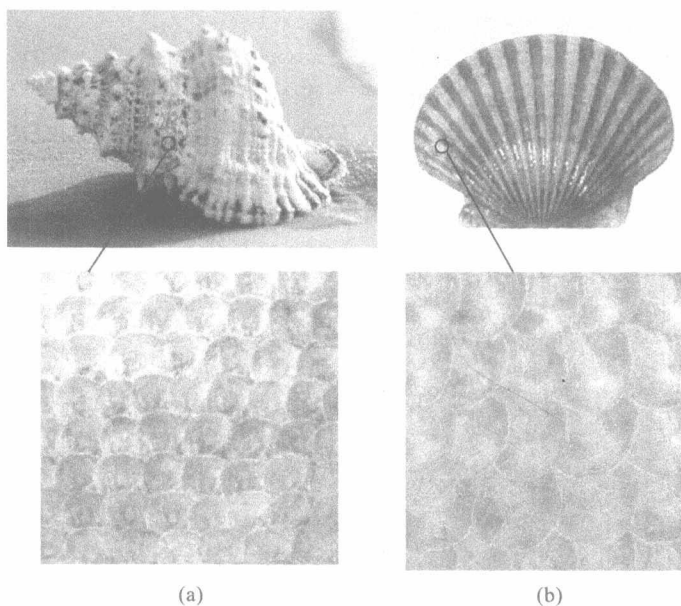


图 1-8 眼镜蛇表皮结构图

Fig. 1-8 Skin structure of cobra



(a)

(b)

图 1-9 贝类耐磨表面结构图

(a)海螺;(b)扇贝

Fig. 1-9 Wear-resistant surface of shellfish

(a)conch;(b)fan shell

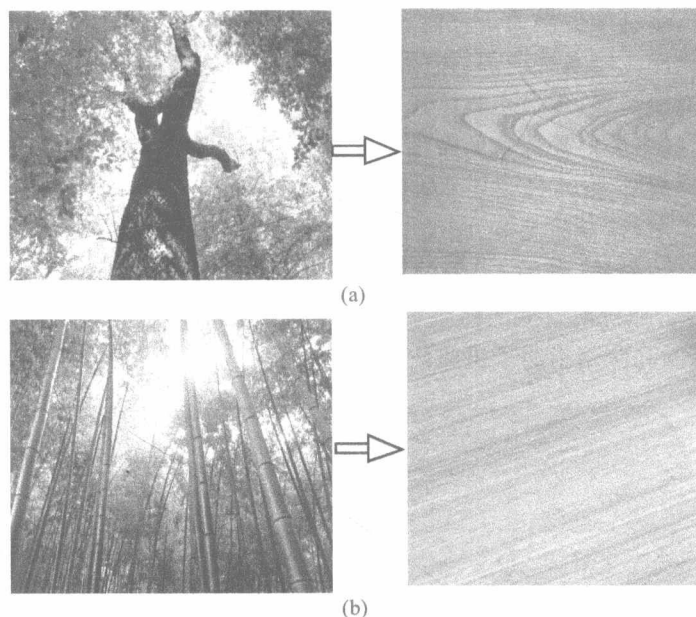


图 1-10 木材与竹材制作的耐磨地板

(a) 木材; (b) 竹材

Fig. 1-10 Wear-resistant floor made of wood and bamboo

(a) wood; (b) bamboo

英国 Dowson 和 Wright 教授于 1973 年提出了生物摩擦学(bio-tribology)的定义,指出凡是与生物系统相关的摩擦学问题都属于生物摩擦学的研究范畴<sup>[11]</sup>。目前,生物摩擦学的研究对象主要包含生物体的内部器官和外部表皮组织两大部分,如图1-11所示。

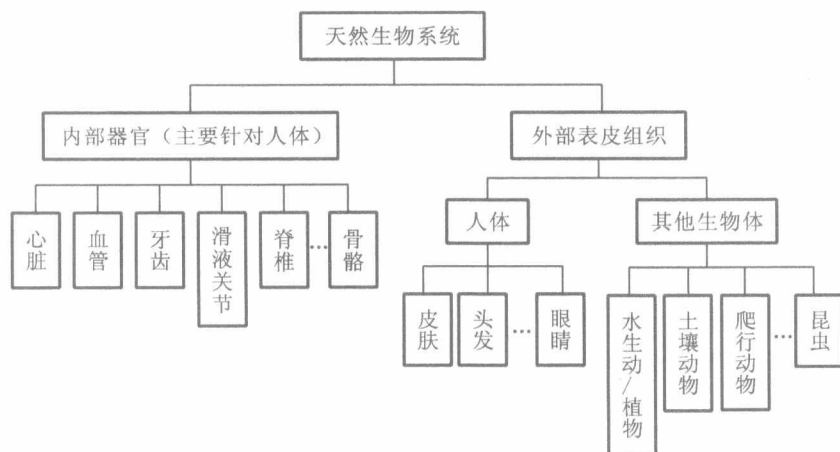


图 1-11 生物摩擦学研究对象关系图

Fig. 1-11 Research object schema of bio-tribology

迄今为止,生物摩擦学的研究内容主要集中于以下两方面。

(1)研究天然生物系统内部器官和外部表皮组织特有的生物摩擦学性能,认识其摩擦、磨损和润滑机理,掌握生物体适应摩擦学的行为规律。

其中对生物系统内部器官的摩擦学性能研究主要是针对人体展开的。如心脏和血管中血液的流动和冲蚀<sup>[12-13]</sup>(见图 1-12);天然牙齿的构造(见图 1-13)与磨损<sup>[14-15]</sup>;滑液关节(包括髋关节、膝关节(见图 1-14)、踝关节、指关节、颞下颌关节等)的润滑机理<sup>[16-17]</sup>;脊椎(见图 1-15)的受力变形<sup>[18]</sup>;骨骼的多孔状结构(见图 1-16)与应力集中<sup>[19]</sup>等。通过对这些天然生物内部器官的摩擦学性能的研究,为人工器官和生物材料的研制和应用指明了道路。

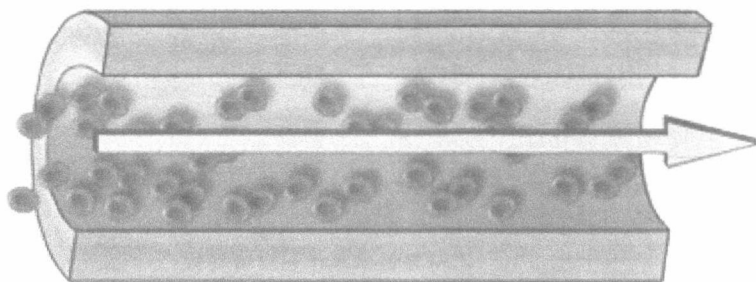


图 1-12 血管中血液的流动形态

Fig. 1-12 Flow patterns of blood in blood vessels

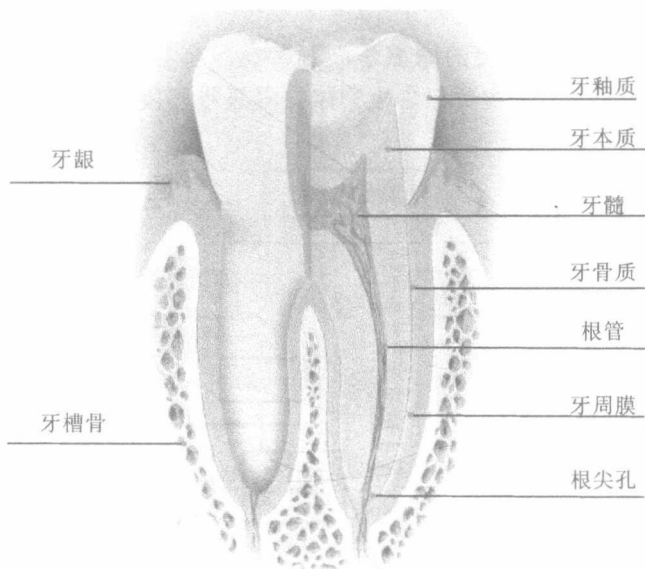


图 1-13 天然牙齿的构造

Fig. 1-13 Structure of natural teeth



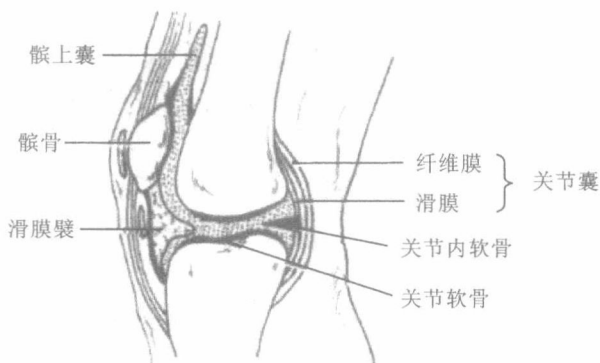


图 1-14 膝关节的构造

Fig. 1-14 Structure of knee joint

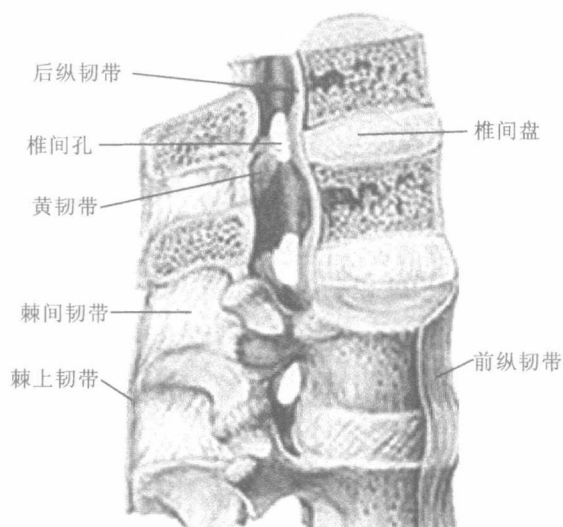


图 1-15 脊椎的结构

Fig. 1-15 Structure of spine

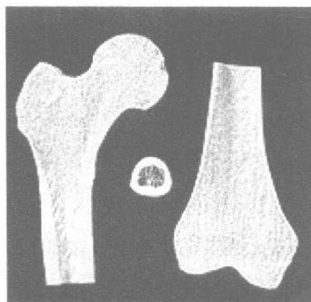


图 1-16 骨骼的多孔状结构

Fig. 1-16 Porous structure of bone

对生物系统外部表皮组织的研究最初主要集中于人体的皮肤、头发和眼睛。通过研究头发的表面形态(见图 1-17)、摩擦性能对头发的梳理性、顺滑性和美发护发产品的适用性的影响,为研制优质洗发水、护发素奠定了摩擦学基础。而研究眼睛的基本结构(见图 1-18)及其生物摩擦学行为对研制低摩擦系数、具有生物舒适性的隐形眼镜具有借鉴意义。此外,人体皮肤结构(见图 1-19)具有新陈代谢的特性,在摩擦过程中具有自我适应和自我修复的能力。控制皮肤摩擦是降低手脚摩擦损伤、提高衣着舒适性和假肢适用性以及开发高品质护肤品的重要基础。

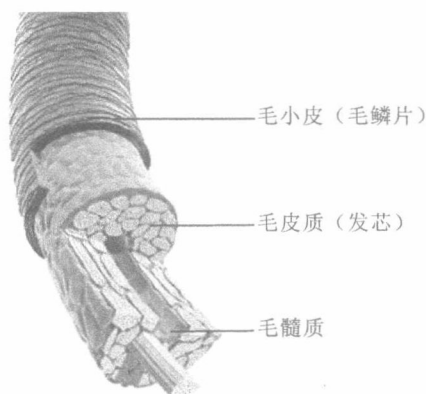


图 1-17 头发的表面形态

Fig. 1-17 Surface morphology of hair

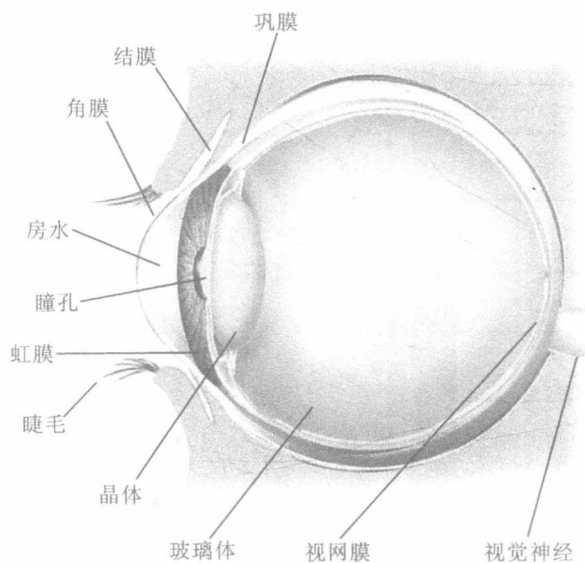


图 1-18 眼球的基本结构

Fig. 1-18 Basic structure of eyeball