

·学科进展与展望·

# 人体生物摩擦学的基础科学问题

葛世荣\*

(中国矿业大学材料科学与工程学院,徐州 221008)

**[摘要]** 人体的生物摩擦副包含头发、皮肤、眼睛、味觉、牙齿、关节、心脏、血液等,它们对人体健康和康复质量具有重要影响。本文对人体生物摩擦学的特点、生物摩擦学行为对人体生命质量的影响、人体生物摩擦学的科学问题进行了探讨,提出了人体内植物“少磨损、低危害”的生物摩擦学质量概念,以及实现这个目标所需要的 NBIC 摩擦学融合技术,即 Nanotribology, Biotribology, Implants materials, Coating technology 四方面相互交叉融合产生的摩擦学新技术。

**[关键词]** 生物摩擦学,生物材料,生物润滑,磨损,磨屑,生物反应

## 前言

人体的许多器官都会由于相互接触和相互滑动而产生摩擦,研究这种摩擦行为的学科称之为生物摩擦学。我们建立摩擦学学科的时间近 40 年,研究摩擦学的历史只有 500 年,利用摩擦学知识的时间已有 5000 多年,但是生物摩擦现象却从生物出现之时就随之存在。经过成千上万年的进化,人体(也包括动物)内的摩擦副成为适应性好、性能优越的天然摩擦副,这种摩擦副是目前人工制造的摩擦副所不能比拟的。

由于我们对人体生物摩擦学行为认识有限,使得我们无法对失效的体内摩擦副进行“修复”,也不能对摩擦损伤进行“预防”,更缺乏模仿人体生物摩擦学结构来制造伤残器官替代体的基础。随着摩擦学、医学、生物技术、材料科学的快速发展,人类对生物摩擦学的研究日益重视。伴随人们对生命质量的要求提高,体内置换的仿生器官会越来越多,而生物摩擦学行为对置换器官的使用寿命和可靠性极为重要,因此也迫切需要深入开展人体生物摩擦学研究。

## 1 人体生物摩擦学的特点

生物摩擦学可分为人体生物摩擦学和动物仿生摩擦学。人体生物摩擦学研究对象置于人体内,研

究人体器官的摩擦、磨损和润滑,以及生物介质与磨损产物的生物反应。动物仿生摩擦学主要研究动物体外适应自然环境的摩擦学行为,摩擦副置于体外,不涉及生物介质与磨损产物的相互作用,因而比人体生物摩擦学简单一些。目前,国内外的生物摩擦学研究大多数是面对人体摩擦学。生物摩擦学研究对保障人体健康和提高生命质量具有重要影响。

摩擦学的定义由 P. Jost 于 1966 年提出,是研究摩擦、磨损、润滑以及相对滑动干涉表面行为科学。生物摩擦学的定义由 D. Dowson and V. Wright 于 1973 年提出,是研究与生物系统相关的所有摩擦学问题<sup>[1]</sup>。人体生物摩擦学的特点在于摩擦副由人体构成,在生物环境中产生摩擦学行为,摩擦副具有感知和自适应能力,摩擦磨损行为受到生命物质(细胞、蛋白质等)的影响,磨损产物(磨屑)会引起体内生物反应。可见,人体生物摩擦学涉及先进材料、物理学、生物学、医学等科学领域,它比传统的机械摩擦学更具有复杂性和挑战性。

人体生物摩擦学研究的对象是人工关节、心脏、头发、眼睛、牙齿、口腔(舌头、喉咙)、皮肤、血液等,如图 1 所示。从该图可见,人体生物摩擦学的摩擦副小至血细胞,大到髋关节,都会发生摩擦和磨损现象。这些摩擦学现象对人体的损害,轻的是皮肤损伤(例如擦伤血泡、红肿),重的是人工心脏失效而危

\* 2002 年度国家杰出青年科学基金获得者。

本文于 2005 年 1 月 10 日收到。

及生命。

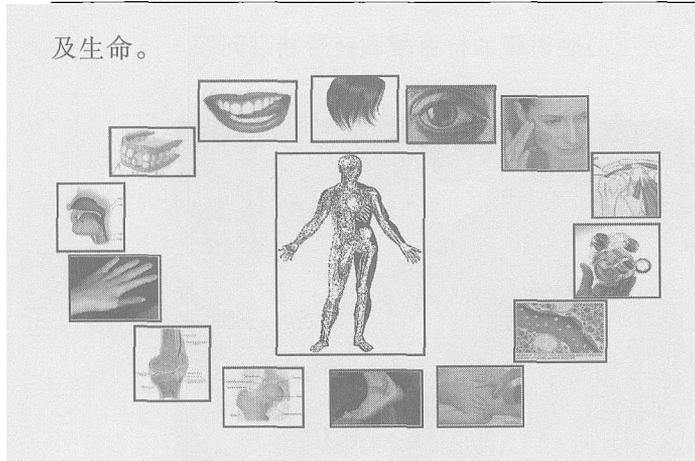


图1 人体生物摩擦学涉及对象示意图

人工关节是目前生物摩擦学领域研究最多的对象,以人工关节为主题的论文占有所有生物摩擦学研究论文的95%左右,以至于人们提及生物摩擦学就认为是针对人工关节的摩擦学问题;对牙齿、头发、眼睛、皮肤的摩擦学行为也开始有了一些研究;对人工心脏、口腔、血液和人骨的摩擦学行为尚无研究。

## 2 人体生物摩擦学的影响

用AFM对人发表面观察表明,人头发表面为多孔结构,可吸收35%自重的水分;人发表面具有极性,其表面能与表面纳米级形貌分布基本一致。因此,烃基液体容易吸附在头发的极性边缘,从而起到良好的润滑作用,而极性液体(例如水、甘油等)却不易吸附在头发的极性表面,其润滑作用较弱<sup>[2]</sup>。所以,头发的表面形态、摩擦性能对头发的梳理性、顺滑性和美发护发品的适用性有很大影响,开展人发生物摩擦学研究是开发高品质护发用品的重要科学基础。

牙齿(骨)的生物摩擦学体现在天然牙齿的磨损、种植牙的磨损、牙齿在唾液中的生物润滑行为等。目前对牙齿的磨损研究有一些报道,实验得到的人牙与不锈钢的摩擦系数约为0.2,人牙与钛合金在合成唾液润滑时的摩擦系数约为0.1<sup>[3]</sup>。作者用猪骨进行的生物摩擦学实验表明,血浆润滑下猪骨与猪骨的摩擦系数约为0.15,干摩擦时可达0.3,磨损率在0.05 mg/(N·m)左右<sup>[4]</sup>。研究人骨的磨损率对提高伤骨固定和修复可靠性具有很大意义。

眼睛是典型的生物流体动力润滑系统。研究表明,眼角膜厚度约为520 $\mu\text{m}$ ,粗糙度0.5 $\mu\text{m}$ ;眼泪薄膜的粘度约为0.0013Pa·s,膜厚约为15 $\mu\text{m}$ ;眨眼速度7—15cm/s,眼睑对眼球的压载荷200—250mN。

因此,眼球表面可以形成流体动力润滑,在眨眼时出现高剪切率(15000 1/s)、低剪切应力,这种情况下的摩擦系数约为0.005。而人造隐形眼镜的摩擦系数实验值达到了0.08<sup>[5]</sup>,远大于天然眼球的摩擦系数。因此,研究眼睛的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。

皮肤的摩擦是手脚摩擦损伤、衣着舒适性、假肢适用性以及护肤品性能的重要影响因素。对手臂皮肤的摩擦性能进行实验显示,手臂表皮的摩擦系数在0.4—0.6之间,其差异源自手臂上的不同测量位置,而性别、年龄的差异对皮肤摩擦系数影响不大<sup>[6]</sup>。那么,不同品质的护肤品在皮肤上的摩擦性能如何?不同摩擦学特性的皮肤对护肤品的适应性如何?这都是与皮肤生物摩擦学关系密切的问题。

目前对人工心脏、口腔、血液的生物摩擦学行为还很少研究,而它们的摩擦学行为对人体健康和生活具有重要影响。红细胞呈轴对称双曲表面的碟形体,其直径约为8 $\mu\text{m}$ ,厚度1—2.5 $\mu\text{m}$ ,如图2(a)所示,而红细胞流动的毛细血管直径为5—10 $\mu\text{m}$ ,细胞在毛细血管中流动时会发生挤压剪切,见图2(b)。因此,红细胞在毛细血管中的流动阻力、与血管壁的摩擦力以及流动特性都是血液生物摩擦学的研究内容。

口腔的生物摩擦学涉及嘴唇、舌头、咽喉等部位的摩擦与润滑。唾液润滑是口腔生物摩擦学的重要特点;唇部润滑对化妆品(唇膏)的品质有很大影响。舌头的生物摩擦学行为会影响对食物的味觉,巧克力的摩擦系数是否与其口感有关系?咽喉的摩擦是发声的重要基础,其生物摩擦和润滑对音质和音量至关重要。

人工心脏泵分为螺旋泵(图3a)和叶片泵(图3b),它们的运动部件中都有支撑摩擦副、密封摩擦副和滑动摩擦副,它们时刻不停地在血液和生物介质中发生摩擦和磨损。人工心脏泵所要求的工作可靠性是极高的,而生物摩擦学性能对可靠性具有非常重要的影响。人工心脏瓣膜(图3c)植入体内之后,保持架寿命决定瓣膜的工作寿命,保持架发生断裂,瓣膜就停止工作。一般情况下,心脏瓣膜与保持架之间每年要承受约4000万次的周期性血流冲击力,这使得支架和瓣膜片的接触界面发生冲击磨损,因此生物环境下的耐冲击磨损性能是影响人工瓣膜疲劳寿命的重要因素。我国每年10万危重患者实施人工瓣膜置换手术,植入者生存率达到12年的仅为40%左右。其中需要高度关注的生物摩擦学问题

题是人工心脏运动部件的生物润滑和抗血凝问题, 人工心脏瓣膜的抗血凝和疲劳断裂问题。

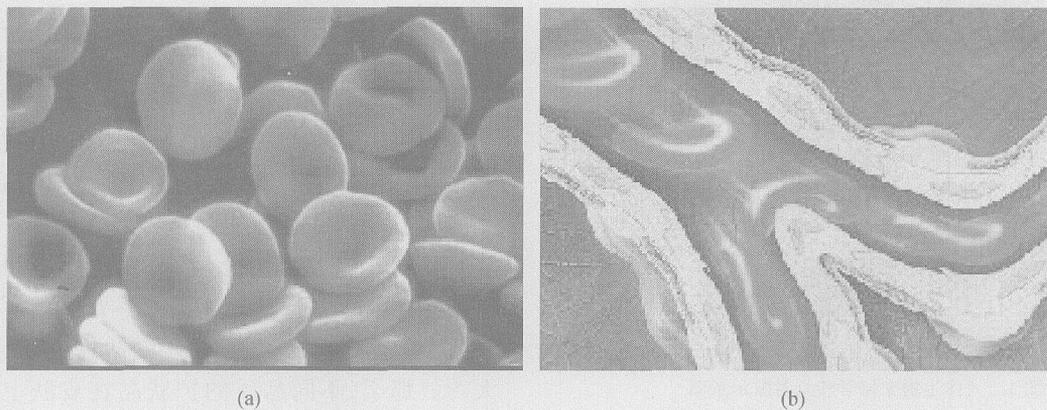


图2 红血细胞及其流动摩擦示意图

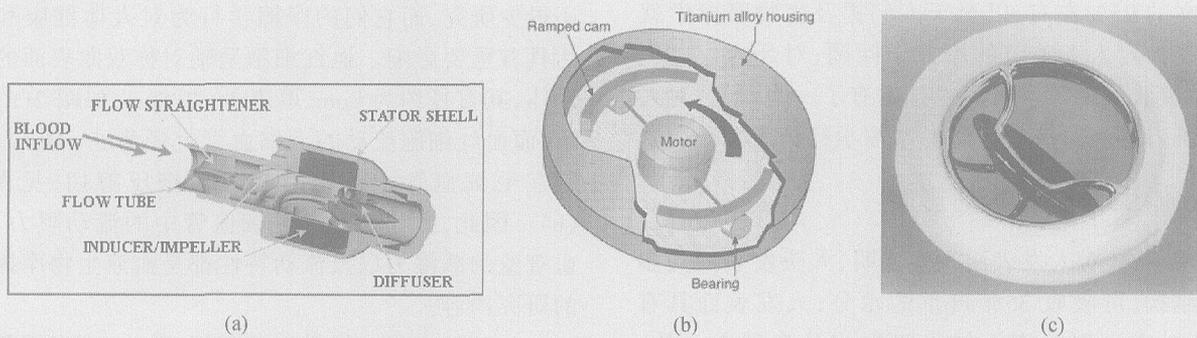


图3 人工心脏系统的摩擦副示意图

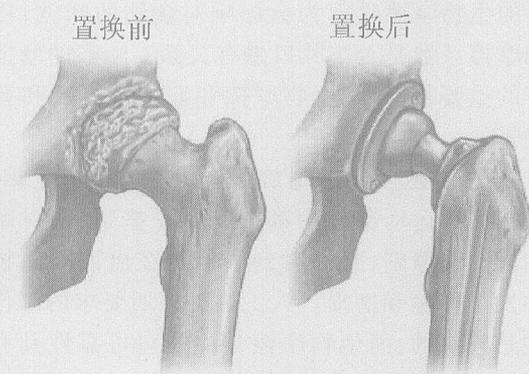


图4 人工髋关节置换后的体内摩擦副示意图 (www.pennhealth.com)

关节是人体承受载荷最大的生物摩擦副, 关节中的软骨磨损会导致骨关节炎病。据调查, 我国骨关节炎患者有 3600—4000 万人, 它们之中有 100—150 万需要实施人工关节置换手术, 通过这样的手术使患者的生命质量大为改善。人工关节包括髋关

节、膝关节、踝关节、肘关节、腕关节、肩关节等。图 4 是人工髋关节在人体内置换前后的状态示意图, 髋关节在体内每年承受约 100—300 万次循环的体重负荷, 一般要求人工关节置换体内的服务寿命达到 10—20 年。人工髋关节置换的体内松动是主要的失效模式, 失效率约为 10%, 松动失效的主要原因是人工关节在体内发生磨损。磨损产生的磨屑在体内将发生毒性和免疫反应、骨吸收和无菌松动、变态反应、局部形成肿瘤等生物反应, 这些被称之为“磨屑病”, 其中无菌松动是人工关节置换术后最常见的并发症和最终失效的重要因素。目前, 对人工关节的生物摩擦学研究主要集中于摩擦副材料选择、磨损性能评价、关节表面耐磨改性等。但是, 人工关节在人体内的磨损过快、磨屑引发的“磨屑病”仍然是影响关节置换寿命的难题<sup>[7-9]</sup>。

人工关节在体内的接触应力和滑动轨迹非常复杂, 图 5a 所示是髋关节的接触应力分布情况<sup>[7]</sup>, 5b 是髋关节的滑动轨迹观察<sup>[10]</sup>。可以看出, 这种接触

应力和滑动轨迹是目前机械摩擦副中少见的,常规的磨损试验机无法模拟这样的力学行为,因此利用常规磨损试验方法就无法准确评价人工关节的磨损性能。图 5c 是中国矿业大学生物摩擦学实验室研制的人工髋关节磨损试验机照片,从中得到的微观磨损形貌与常规试验机上的结果截然不同(见图 6),测试结果表明,超高分子聚乙烯髋关节臼在模拟试验机上的磨损率比常规试验机上的磨损率高出 1.5 倍<sup>[10]</sup>。由此可见,设计出模拟体内环境磨损的试验方法是研究体内磨损机理和评价假体磨损性能的重要科学基础。

生物介质(血浆、细胞、蛋白质)具有活性和生物反应,那么摩擦界面的挤压和剪切对生物介质的影响,以及生物介质对植入假体摩擦磨损的作用都是目前没有认识的生物摩擦学科学问题。图 7 是蒸馏水和人血浆润滑的超高分子聚乙烯磨损实验结果<sup>[8]</sup>,显而易见,人血浆润滑时的磨损率高于蒸馏水润滑的磨损率,而且微观磨损形态也差别很大,为什么会出现这种现象?原因在于生物介质的影响,其中的影响机理和反应机制是需要深入研究的基础问题。

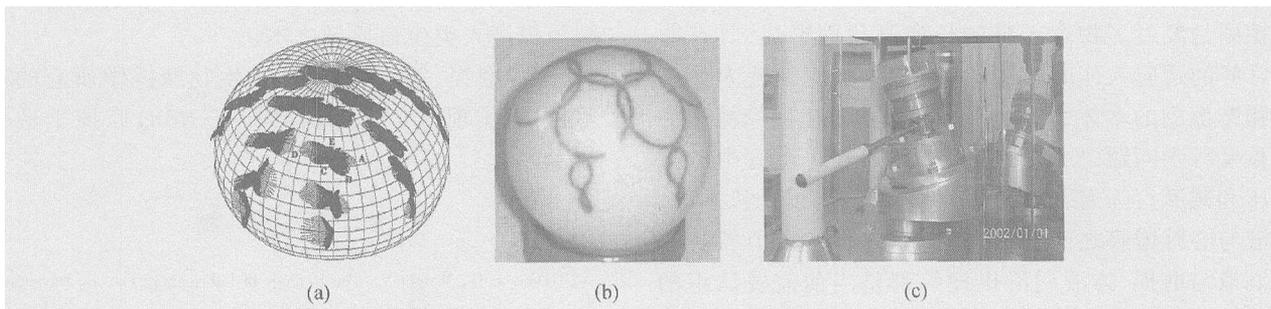


图 5 人工髋关节的接触力学与模拟试验机:(a)接触应力(b)滑动轨迹(c)模拟试验机

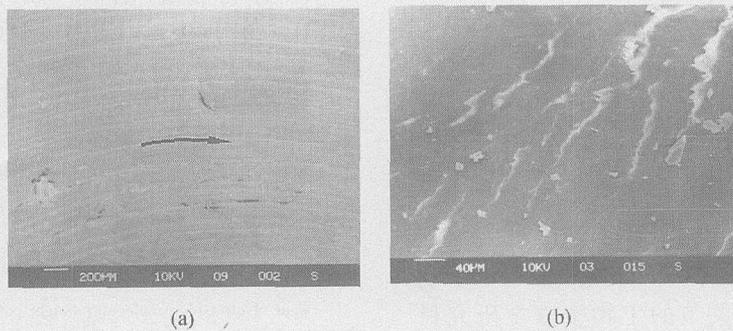


图 6 超高分子聚乙烯人工关节的微观磨损形貌:(a)常规试验机(b)髋关节试验机

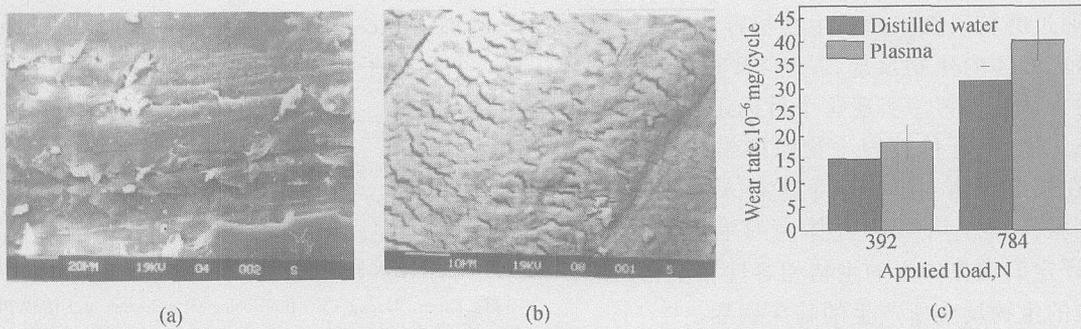


图 7 超高分子聚乙烯的蒸馏水润滑(a)和人血浆润滑(b)微观照片以及磨损率(c)

### 3 人体生物摩擦学的科学问题

人体生物摩擦学的科学问题可以分为两个方面,一是发现人体的生物润滑、摩擦和磨损机理,掌握人体适应的生物摩擦学行为规律;二是研究适应人体生物摩擦学技术的应用基础问题,设计出“少磨损、低危害”的生物假体。

生物摩擦学研究的难度在于人体内的生物摩擦磨损环境非常苛刻,而摩擦副的生物力学行为也变化莫测,磨损产生的磨粒会引起生物反应,这些摩擦学行为都是目前我们无法直接观察和在线监测的,我们对这些现象的认知水平还很低。人体的生物摩擦副是经过物竞天择的长期进化而形成,具有非常好的适应人体摩擦磨损的性能,如何发现人体生物摩擦副的本体摩擦磨损行为显然是生物摩擦学的重要科学问题之一。例如,红细胞在血管中的挤压和减摩行为、活体皮肤之间的摩擦与损伤机理、血液与心脏瓣膜之间的冲击摩擦与润滑、关节软骨的润滑与磨损、体液润滑机理等都是当前需要认识的人体生物摩擦学现象。通过研究这些生物摩擦学现象,我们可以掌握人体生物摩擦的基本规律,为摩擦学技术创新提供重要理论基础。

随着医学技术的快速发展和人们生活水平的不断提高,人类对生命质量的要求也随之提高,通过人造器官来替换人体缺损器官的技术也越来越多,其中一些具有生物摩擦副的人造器官的工作可靠性即成为它们在人体内服务寿命甚至是否危及生命的重要影响因素,如何掌握先进的生物摩擦学技术成为提高人工器官可靠性的关键技术。作者曾提出了获得“少磨损、低危害”人工关节的生物摩擦学研究目标<sup>[11,12]</sup>,通过摩擦学综合技术创新(包括先进材料设计、表面生物改性、机构原理创新等),尽可能减少置换关节在体内的磨损量;而对于不可避免产生的磨粒,则通过磨粒尺度控制和生物相容性改善,尽可能降低磨粒的体内生物反应,减轻“磨粒病”的发病率及其对人体的损害。实现这个目标还需要大量的基础研究工作:如评价体内生物摩擦学的失效模式及影响,在模拟人体生物环境下进行人工器官的摩擦磨损实验,预测人工材料在体内的生物摩擦学行为反应,评定磨粒在体内的生物相容性和生物反应,预防磨粒的生物反应所产生的临床病症。

### 4 结束语

人体生物摩擦学是提高人类生命质量的关键前

沿科学问题,它是需要组织摩擦学、材料学、生物学、医学联合攻关的重大创新课题,也是科技造福人类的重要需求。但是,我国目前在人体生物摩擦学的基础研究和技术创新方面尚有较大差距。例如,性能最好的人工心脏、心脏瓣膜、人工关节、人造皮肤等几乎全部从国外进口,不仅价格昂贵,而且以国外人体特征设计的人造器官是否完全适用于国人也是值得考虑的。此外,发展我国的生物制造产业也需要尽快开展人体生物摩擦学研究。党中央现在积极倡导“以人为本”的执政理念。从科学研究角度来认识,“人”和“本”合二为一就成为“体”,可见认识人体始终是人生存之本,因此人体生物摩擦学也可以理解为提高人类生命质量之本。

“少磨损、低危害”应该是生物摩擦学研究的基本目标,实现这个目标需要研究 NBIC 摩擦学融合技术。

### 参 考 文 献

- [1] Dowson D, Wright V. The Reology of Lubricants, Ed. by Davenport. TC, Institute of Petroleum, 1973, 81—88.
- [2] Vincent D et al. Atomic force microscopy imaging of hair: Correlations between surface potential and wetting at the nanometer scale. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 269(2):329—335.
- [3] Li H, Zhou Z R. On the friction and wear behaviour of human tooth enamel and dentin. *Wear*, 2003, 255: 967—974.
- [4] 黄晓龙,葛世荣. 猪股骨的生物摩擦学行为实验. 润滑与密封, 2005(已录用).
- [5] Norm V. Gitis, Xiao J. Tribo-metrology from Macro to Micro/Nano scale—Latest Achievements and State of the Art, Materials from Center for Tribology, Inc.
- [6] Wang A, Sun D C et al. Orientation softening in the deformation and wear of ultra-high molecular weight polyethylene. *Wear*, 1997, 203—204, 230—241.
- [7] Raja K. Sivamani et al. Tribological testing of skin products: Gender, age, and ethnicity on the volar forearm. *Skin Research and Technology*, 2003, 9:1—7.
- [8] Xiong D, Ge S. Friction and wear properties of UHMWPE/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic under different lubricating conditions. *Wear*, 2001, 250—251: 242—245.
- [9] Ge S, Wang Q, Zhang D et al. Friction and wear behavior of nitrogen ion implanted UHMWPE against ZrO<sub>2</sub> ceramic. *Wear*, 2003, 255(2): 1069—1077.
- [10] 黄传辉,马睿,葛世荣. 滑动模式对超高分子量聚乙烯摩擦学行为的影响. 摩擦学学报, 2005(已录用).
- [11] Ge S, Huang Ch. Biotribological behavior of UHMWPE hip joints, Proc of the 4th China Int Sym on Tribology, 68—74, November, 2004.
- [12] 葛世荣. 人工关节的生物摩擦学研究. NSFC 机械工程青年科学家论坛文集, 深圳, 2004年5月:15—16.

## THE FUNDAMENTAL PROBLEMS OF BIOTRIBOLOGY IN HUMAN BODY

Ge Shirong

(Department of Material Science and Technology, China University of Mining and Technology, Jiangsu 221008)

**Abstract** The biotribology in/on human body will include the friction and wear behavior of hair, skin, eyes, mouth, tooth, joints, heart system and blood. The biotribological performance of these human parts has great influence to the healthy and recovery quality of failed implants. In this paper, the biotribological features of human body, the effect of biotribology on life quality, and some fundamental problems of biotribology in human body were discussed. The concept of "less wear, low harm" for biotribological quality of implants in human body is proposed. In order to obtain L2 implants, the NBIC syncretic technology, including nanotribology, biotribology, implant materials and coating technology, needs to be deeply investigated in tribology fields.

**Key words** Biotribology, Biomaterials, Biolubrication, Wear, Wear particles, Bioreaction

·资料·信息·

### “纳米科技基础研究”重大研究计划学术交流会及自评估会议在京召开

由国家自然科学基金委员会化学科学部、数理科学部、生命科学部、工程与材料科学部和信息科学部等共同组织实施的“纳米科技基础研究”重大研究计划 2004 年度学术交流会及自评估会议于 2005 年 1 月 9—12 日在北京召开。会议的主要任务是总结重大研究计划实施的进展和成绩;发现实施过程中的不足和问题,进而从学术方面加强管理;对后两年重大研究计划实施布局进行适当调整,加强项目的集成与合作;提出关于今后重大研究计划实施的建议,供管理部门参考。2002—2004 年期间受“纳米科技基础研究”重大研究计划资助的全部项目负责人到会并进行学术报告和交流研讨。该重大研究计划指导组专家、特邀专家、计划协调组、联合工作组成员以及化学科学部有关人员参加了会议。国家自然科学基金委员会副主任朱道本院士应邀在会上作了关于纳米科学研究的大会报告。

该重大研究计划指导专家组副组长解思深院士强调,会议应认真研讨纳米科技基础研究的发展态势、方向和创新点,逐步形成新的生长点,促进原始创新。在深入研讨的同时,要分析“纳米科技基础研

究”重大研究计划的总体框架,凝炼重要科学问题,思考项目战略前瞻性等问题;要立足于基础研究的创新性、前沿性和战略性,总结“纳米科技基础研究”重大研究计划的特色;会议要在对前期研究成果进行总体评价的基础上,对重大研究计划后期的研究布局、实施方案以及交叉合作等问题进行认真研讨。

学术交流会分为纳米材料、纳米器件和纳米生物研究 3 个分会场,并成立 3 个专家小组,分别从 3 个分会场选出约 15% 执行较好的项目给予了重点评述,同时对执行不力的项目提出指导性建议。学术交流会之后,重大研究计划指导专家组组长白春礼院士主持召开了本研究计划的自评估报告会,纳米科技领域的海内外专家就解思深院士的自评估报告展开了讨论,为“纳米科技基础研究”重大研究计划的实施提出了的宝贵的建设性意见。与会人员普遍认为这次学术交流和自评估会议效果很好,今后应允许更多的年青学者参加,扩大交流和研讨范围,使更多从事纳米科学的研究人员从中受益。

(化学科学部 黄宝晟 陈荣 陈拥军 供稿)