

# 新型人工关节仿生润滑系统设计及滑液摩擦学特性研究

张建华<sup>1</sup>, 陶德华<sup>1</sup>, 付尚发<sup>1</sup>, 李 健<sup>2</sup>, 赵 源<sup>2</sup>

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2 武汉材料保护研究所, 湖北 武汉 430030)

**摘要:** 通过摩擦学系统分析, 指出了目前人工关节无润滑系统的结构缺陷, 为解决此缺陷, 提出了一种包括生物滑液、人工关节摩擦副和仿生关节囊的新型人工仿生关节摩擦学系统结构, 并对系统设计以及其改善现有人工关节系统润滑的潜在优越性进行了讨论。采用销-盘摩擦磨损试验机对影响人工关节仿生润滑系统摩擦学性能的滑液进行了模拟试验前的快速初步评价。结果表明, 滑液可显著改善人工关节副的摩擦学特性, 但其效果同系统条件及其结构元素有关。在研制仿生滑液和设计其摩擦学特性模拟试验方法时, 必须结合这些影响因素进行设计和试验。

**关键词:** 人工关节; 仿生润滑; 系统设计; 摩擦学特性

**中图分类号:** TH117.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595(2003)06-0500-04

根据调查推算, 我国可能有 100~150 万关节病人需要做人工关节手术<sup>[1]</sup>。因此, 延长人工关节的使用寿命<sup>[2]</sup>, 改善其生物相容性, 是关系到千百万人身体健康的大问题。人工关节摩擦面磨损严重, 磨损量大, 而由磨损颗粒引起的异物反应会缩短人工关节使用寿命<sup>[3,4]</sup>。研究表明<sup>[5,6]</sup>, 人工关节的晚期松动与磨损颗粒(磨屑)不断增多及其引起的异物反应有关。大量磨屑可引起巨噬细胞和单核细胞大量积聚, 并产生多种细胞因子, 导致成骨细胞和破骨细胞在形成、数量和代谢功能等方面失衡, 诱发骨吸收, 进而造成严重骨溶解, 引发假体松动、下沉甚至丧失运动功能, 从而必须进行手术翻修。这无疑给患者带来了巨大的痛苦和经济损失。国内外研究者针对人工关节材料设计以及表面涂层进行了大量研究, 期望通过改变配副材料来减轻磨损、减少磨屑, 但收效不佳<sup>[7]</sup>。为此, 我们针对新型人工关节仿生润滑系统设计及滑液摩擦学特性开展了相关研究, 旨在为解决人工关节中的摩擦学问题积累数据。

## 1 新型人工关节仿生润滑系统设计

### 1.1 现有人工关节系统缺陷

人工关节是一类特殊的器官, 是既传递载荷又传递运动的生物摩擦学系统。人的关节是由关节骨(关

节面和软骨)、关节滑液及供应滑液的关节囊组成的, 是一个十分奇妙且性能优异的摩擦学系统。现有人工关节系统只是以金属、高分子或陶瓷材料组成的摩擦副代替关节骨(包括关节面和软骨)组成的摩擦副, 没有设计润滑摩擦副的滑液, 更没有供应滑液和储藏滑液的结构和功能, 而是依赖人体本身产生的适合润滑天然关节副的组织液来实现润滑。

根据摩擦学系统分析原理, 摩擦副系统结构由配副材料 I、配副材料 II 和中间介质 III 等三元素组成, 在给定的系统输入条件下, 其摩擦学特性是结构三元素性能及其相互作用的综合特性<sup>[8]</sup>。而长期以来人们在改善人工关节耐磨性和减轻其磨损的研究中, 大多局限于配副材料, 而忽视了中间介质以及中间介质同摩擦副的相互作用。因此, 有必要从人工关节摩擦学系统特性及其组成要素的配副性出发, 探索有效减轻人工关节副磨损和减少其磨粒的途径。

### 1.2 新型人工关节仿生润滑系统设计

参照人体关节摩擦学系统, 我们设想人工关节摩擦学系统应当包含人工关节副、仿生滑液和仿生关节囊等 3 部分。滑液的功能是减少关节副的摩擦和磨损, 从而延长其使用寿命, 提高其可靠性, 并减轻因磨屑而导致的异物反应。鉴于人工关节材料通常为金属、高分子或陶瓷材料, 其材质不同于天然骨关节, 故

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50105014); 上海大学研究生培养基金资助项目(2002)。

收稿日期: 2002-12-28; 修回日期: 2003-05-06/联系人张建华, e-mail: jhzhg@sina.com。

作者简介: 张建华, 女, 1972 年生, 博士, 副研究员, 目前主要从事生物摩擦学、纳米材料、智能材料及微系统集成技术等研究。



对天然骨关节具有优良润滑作用的人体组织液并不一定适用于人工关节副。为此,有必要开发对人工关节副具有优异润滑性能且生物相容性好的滑液。换言之,应该寻求既对人工关节副具有优异的润滑功能,又同人体组织无不良反应,且能抑制微量磨屑对人体组织产生的不良反应,具有多重功能的仿生滑液。

Higaki 等<sup>[9]</sup>在针对天然关节的研究中发现,采用含  $L$ - $\alpha$ -二棕榈酰卵磷脂 ( $L$ - $\alpha$ -dipalmitoyl phosphatidylcholine) 和  $\gamma$  球蛋白 (gamma-globulin) 的透明质酸钠生理盐水可以显著改善骨关节的边界润滑行为,并使得关节表面形成类似生物膜的保护层。近年来,针对症状较轻的早期关节炎病例,国内外医学专家通过反复抽提坏死的关节液和注入透明质酸钠水溶液来实现病患关节系统的正常润滑。我们发现<sup>[10]</sup>,某些糖酯型滑液可以有效地降低关节软骨-关节软骨或骨-骨之间的摩擦系数。因此,可以考虑将具有生物相容性的仿生滑液引入人工关节系统,实现人工润滑,优化人工关节系统,从而为延长人工关节使用寿命,减轻磨损,减少磨屑量及减小磨屑粒径提供新的途径。

如何给人工关节副提供和保持仿生滑液,而且滑液又不被人体组织液稀释,这也是“借助滑液功效优化人工关节摩擦学系统”的关键前提之一。受人体天然关节系统启发,我们设想在人工关节系统中设计一个存储、防渗漏机构,即仿生的“人造关节囊”,从而形成包括人工关节摩擦副、润滑介质、关节囊的新型人工关节润滑系统结构(如图 1 所示<sup>[11]</sup>)。这个“囊”将滑

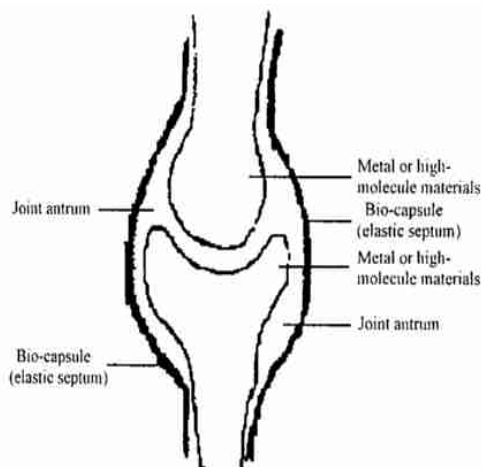


Fig 1 Sketch of artificial joint  
图 1 人工关节示意图

液与磨损颗粒都密封在其中,不仅可解决滑液的存储问题,而且还可防止人工关节材料产生的磨损颗粒渗漏进入体内,以避免异物反应。“仿生关节囊”的材料

应满足生物相容性、长寿命、抗疲劳、不影响人体关节及其周围组织的正常活动等方面的要求。目前我们正在针对该类材料的筛选和改性以及生物相容性、疲劳特性等进行研究。

## 2 滑液摩擦学特性

### 2.1 材料及测试条件

我们采用上海大学润滑化学研究室研制的一种糖酯(以下简称 ZMO)配制人工关节滑液,其分子式为  $C_{30}H_{54}O_{12}$ ,具有价廉、无毒(可口服)、易为人体吸收并分解成营养成分以及优异的生物相容性等优点。将糖酯溶解在蒸馏水中配制成不同质量分数的溶液作为待测滑液;选用医用超高分子量聚乙烯和  $CoCrMo$  合金组成摩擦副。在德国 WAZAU 公司生产的 SST-ST 型销-盘式摩擦磨损试验机上进行摩擦试验(销试样为超高分子量聚乙烯,盘试样为  $CoCrMo$  合金),测试方法详见文献[12],试验机转速为 500 r/min。

### 2.2 结果与分析

图 2 示出了 2MPa 载荷、500 r/min 速度、含不同质量分数的滑液润滑下超高分子量聚乙烯- $CoCrMo$  合金摩擦副摩擦系数随时间变化的关系曲线。可见不同质量分数的滑液均具有良好的减摩作用。图 3 示出

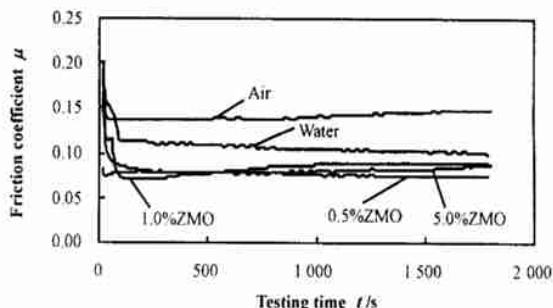


Fig 2 Variation of friction coefficient with sliding duration (2MPa, 500 r/min, mirror surface)

图 2 含不同质量分数滑液润滑下的摩擦系数

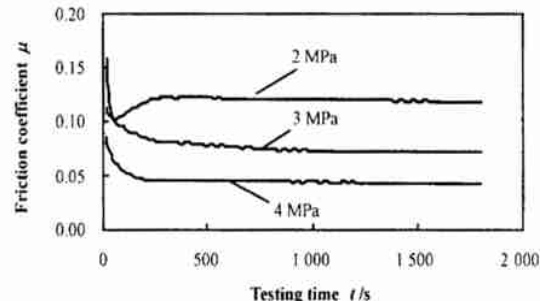


Fig 3 Variation of friction coefficient at different normal pressures with sliding duration

图 3 不同载荷下摩擦系数随试验时间变化的关系曲线

了含 0.5% ZMO 的蒸馏水润滑, 不同载荷下摩擦系数随时间变化的关系曲线, 可见摩擦系数随载荷增大有所减小 图 4 示出了 CoCrMo 合金表面粗糙度对摩擦

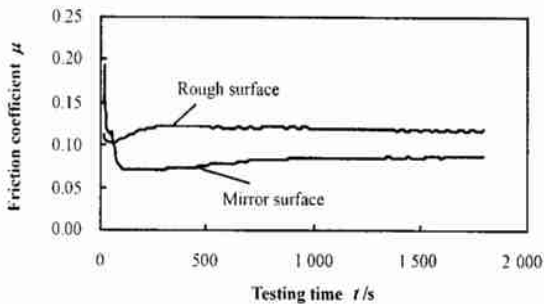


Fig 4 Influence of surface roughness on friction coefficient (0.5% ZMO; 2 MPa)

图 4 CoCrMo 合金表面粗糙度对摩擦系数的影响

系数的影响, 可见镜面的摩擦系数较低 以上结果表明, 滑液可以在一定程度上改善人工关节副的摩擦性能, 但其改善程度同摩擦学系统条件及结构元素特性相关 因此, 必须结合系统条件及其结构元素特性来精心设计研制滑液及其摩擦学特性模拟试验方法

### 3 结论

滑液可以在一定程度上改善人工关节副的摩擦性能, 但其改善程度同摩擦学系统条件及其结构元素特性相关 因此必须结合系统条件及结构元素特性来精心设计研制滑液及其摩擦学特性模拟试验方法

致谢: 感谢上海交通大学机电工程学院陈铭博士、王成焘教授在人工关节仿生润滑系统设计方面给予的建议和进行的讨论

### 参考文献:

[1] Wen S Z (温诗铸). Centurial review and prospect—the developing tendency of tribological research (世纪回顾与展望——摩擦学研究的发展趋势) [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (机械工程学报), 2000, 36(6): 1-6

[2] Xiong D S (熊党生), Ge S R (葛世荣), Xu F Q (徐方权), *et al* Investigation of the bio-tribological properties of UHMW-PE-A  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic pair under dry sliding and lubricated conditions (超高分子量聚乙烯/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  生物摩擦学特性的研究) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2000, 20 (4): 256-259

[3] Perry W L, Lemons J E. Stainless steel particulate and human tissue responses [C]. Proceedings of the 1997 16<sup>th</sup> Southern Biomedical Engineering Conference, Biloxi, MS, USA, April 4-6, 1997, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 283-284

[4] Tipper J L, Hatton A, Nevelos J E, *et al* Alumina-alumina artificial hip joints Part II: Characterisation of the wear debris from in vitro hip joint simulations [J]. Biomaterials, 2002, 23(16): 3441-3448

[5] Chandra L, Allen M, Butter R, *et al* The effect of exposure to biological fluids on the spallation resistance of diamond-like carbon coatings on metallic substrates [J]. J Mater Sci Mater Med, 1995, 6: 581-589

[6] Mosleh M, Suh N P. Wear particles of polyethylene in biological systems [J]. Tribology Transactions, 1996, 39 (4): 843-848

[7] Chen M (陈铭), Wang C T (王成焘). Research Progress on Wear Particles of Artificial Joints (人工关节磨损颗粒的研究进展) [C]. Symposium Proceedings of Biotribology and Artificial Arthrology (生物摩擦学与人工关节学学术研讨会论文集), Shanghai, 2000 96-99

[8] 赵源, 谢友柏. 摩擦学设计 [M]. 机械工程手册 4 卷第四篇 北京: 机械工业出版社, 1996

[9] Higaki H, Murakami T. Lubricating ability of biomembrane models with dipalmitoyl phosphatidylcholine and Gamma-globulin [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 1998, 212 (5): 337-346

[10] Tao Dehua, Lu Shiping, Li Zuyi, *et al* Lubrication effect of glycolipid-type bionic synovial fluid on a bone joint [J]. STLE, Lubrication Engineering, 1994, 50 (5): 386-389

[11] 张建华, 陶德华. 一种人工关节 [P]. ZL02 2 66871.3

[12] Gu K L (顾卡丽), Li S Z (李仕忠), Wei X C (韦习成), *et al* Testing methods on tribological properties of lubricants by pin-on-disk tester (销盘式油品摩擦特性测定方法) [C]. Xi'an: Proceedings of 6<sup>th</sup> China Tribology Conference (第六届全国摩擦学学术会议论文集), 1997. 472-474

## Design of Bionic Lubrication System of Artificial Joints and Study on the Tribological Performance of a Synthetic Synovial Fluid

ZHANG Jian-hua<sup>1</sup>, TAO De-hua<sup>1</sup>, FU Shang-fa<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2</sup>, ZHAO Yuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanic & Automation Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072; China;

2. Wuhan Research Institute of Materials Protection, Wuhan 430030, China)

**Abstract:** A novel bionic lubricating system was proposed and designed to overcome the feedback of the current artificial joints whose lubrication behavior had been largely ignored, with a view to the features of natural joints and based on the analysis of the systematic characteristics of the artificial joint system. The tribological behavior of ultra-high-molecular-weight polyethylene sliding against CoCrMo alloy under the lubrication of distilled water containing various concentrations of a synthetic synovial fluid was primarily investigated on a pin-on-disc tester. Thus it was suggested that the bionic lubricating system composed of three components including bio-lubricant, artificial joints, and artificial cap. The bio-lubricant functioned to reduce the wear of the artificial joints, while the artificial cap was capable of preventing the wear particles from leaking into the body liquid, which combined to avoid the undesired reactions between the wear particles and liquid. The synthetic synovial improved the tribological characteristics of the artificial joints to some extent, while its action to reduce friction and wear was related to the tribosystem characteristics and the properties of the frictional pair.

**Key words:** artificial joints; bio-lubrication; system design; tribological behavior

**Author:** ZHANG Jian-hua, female, born in 1972, Ph. D., Associate Professor, email: jhzhg@sina.com