

文章编号:1004-7220(2009)05-0343-04

基于正交试验的复合型人工滑液摩擦学研究

华子恺, 张建华, 吴行阳
(上海大学 机械工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: **目的** 研究复合滑液透明质酸钠、白蛋白和阿仑磷酸钠3种主要成份对于金属对金属材料界面的润滑性能,为其在关节润滑中的应用提供依据。**方法** 采用正交试验设计对复合滑液进行配比,借助四球摩擦磨损试验机、黏度测试仪以及光学显微镜,研究了其相应的摩擦学表现。**结果** (1)透明质酸钠对滑液的减摩、抗磨以及黏度性能影响最大;(2)由于潜在电化学反应的影响,滑液的抗磨能力并非随白蛋白含量的增加而增加;(3)高含量的治疗性成份阿仑磷酸钠表现出更好的润滑性能。**结论** 复合滑液部分还原了天然关节液的作用,并具有较好的润滑性能。

关键词: 复合型人工滑液; 人工关节; 生物摩擦学

中图分类号: R318.01 **文献标志码:** A

Investigation on tribological performance of bio-therapeutic lubricants based on orthogonal experimental design

HUA Zi-kai, ZHANG Jian-hua, WU Xing-yang. (*School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

Abstract: Objective to study the tribological performance of the new bio-therapeutic lubricants according to different composition concentration, including hyaluronic acid, albumin and alendronic acid sodium. **Method** the bio-therapeutic lubricants were orthogonal experimental designed. Factors as friction coefficient, wear spot diameter and viscosity were investigated via a four-ball tribo-tester, viscosity meter and optical microscope. **Result** (1) hyaluronic acid has the most significant impact on the lubricant's performance; (2) high albumin concentration will reduce friction, while increasing wear rate due to the possible tribocorrosion; the wear resistance seems not increased with the high albumin concentration due to the possible electrochemical reaction. (3) better lubricating performance is observed with higher alendronic acid sodium content. **Conclusion** bio-therapeutic lubricants can partially recover the functions of synovial fluids and provide good lubricating property.

Key words: Bio-therapeutic fluids; Artificial joint; Biotribology

人工关节长期服役中的问题主要集中于可靠性与功能性两大方面。在人工关节可靠性研究中发现,由于天然关节系统遭到破坏,致使人工关节摩擦学性能低于天然关节,造成了人工关节材料磨损,而

所产生的磨粒则会引起异物反应,引发关节松动,最终导致人工关节失效^[1-5]。与此同时,由于置换人群低龄化等因素的影响,患者对增大活动范围与动作幅度的要求,促使了人工关节在功能性上的提升,其

收稿日期:2009-09-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50105014),上海市科委启明星项目的部分资助项目(QMX1442),上海大学研究生创新基金资助项目(A.16-0109-07-002)

作者简介:华子恺(1983-),博士研究生,研究方向:生物摩擦学、真空技术。

通讯作者:张建华,教授,Tel:021-56331976,E-mail:jh Zhang@staff.shu.edu.cn。

中加大人工关节尺寸是主要解决途径。以人工髋关节为例,增大人工股骨头能够显著改善关节失位与行动失稳等问题^[6,7]。然而,在增加人工关节的尺寸同时则会引起更大的摩擦磨损问题,降低其服役期限。显然,在人工关节的应用中,生物力学与生物摩擦学问题互为依存。

从摩擦润滑的角度出发,除了摩擦副以外,人工关节的工作界面间还存在着液体润滑,但是由于手术等因素的影响,人体体液成为人工关节的主要润滑介质,而其润滑性能与天然关节液相距甚远^[8,9]。因此,作为天然关节液的替代品,人工滑液的开发与研究得到了广泛的关注与重视,其中以复合型人工滑液最为突出^[10]。

本文主要针对前期所开发的复合型人工滑液进一步研究其摩擦润滑性能。试验中,利用四球试验机、黏度测试仪等手段对复合滑液进行了摩擦学、流变性能试验,并借助正交试验方法^[11],分析了复合滑液中不同成份配比对其摩擦润滑性能的影响。

1 试验方法

研究中针对复合滑液的3种主要成份透明质酸钠、白蛋白和阿仑磷酸钠,采用正交试验设计,进行了3因素/3水平的试验,其中透明质酸钠以及白蛋白含量主要依据天然关节液中相应的含量进行配比,而阿仑磷酸钠则以药物许用摄入量作为配比依据(见表1)。采用 Sartorius 天平(精度0.1 mg)对透明质酸钠与白蛋白粉末进行称取,随后溶解于相应的去离子水中,进行60min磁力搅拌,搅拌速度与

表1 复合滑液正交试验设计及主要成份含量

Tab.1 Orthogonal experimental design of bio-therapeutic lubricants

实验	透明质酸钠/ g/L	阿仑磷酸钠/ mg	蛋白质/ g/L
1	2	10	15
2	2	20	30
3	2	30	60
4	4	10	30
5	4	20	60
6	4	30	15
7	8	10	60
8	8	20	15
9	8	30	30

温度分别为 700 r/min 及 37 °C。

采用四球摩擦磨损试验机(厦门试验机厂)对9组复合滑液的润滑性能进行评定(见图1),并以去离子水为参照组进行对比。试验所用钢球为 $\phi 12.7$ GCr 标准钢球,硬度为 58 ~ 62HRC。载荷大小为 100 N,通过杠杆机构加载于旋转主球上,试验机转速设定为 1Hz,试验温度为室温28 °C。利用 LEICA 高倍光学显微镜对所得到的磨斑进行了测量与表征。此外,借助 Brookfield DV-II-Pro 型黏度测试仪对上述滑液进行了粘度分析。

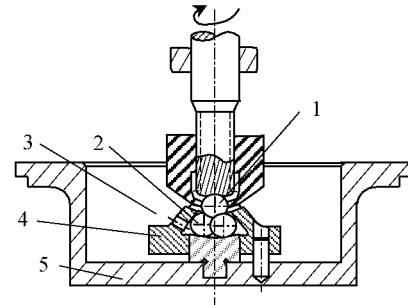


图1 四球试验机结构示意图 1-旋转主球,2-固定球,3-复合滑液,4-固定保持架,5-滑液容器

Fig.1 Schematic diagram of the four-ball tribo-tester 1-upper ball, 2-lower ball, 3-bio fluid, 4-ball holder, 5-lubricant basin

2 结果与讨论

通过正交四球试验发现,在9组复合滑液润滑条件下,摩擦系数范围在 0.06 ~ 0.20 区间(见图2),磨斑直径为 270 ~ 320 μm (见图3)。同时,黏度测试发现复合滑液黏度范围为 5×10^{-4} ~ 45×10^{-4} Pa · S(见图4)。图5为四球试验磨斑表面形貌。

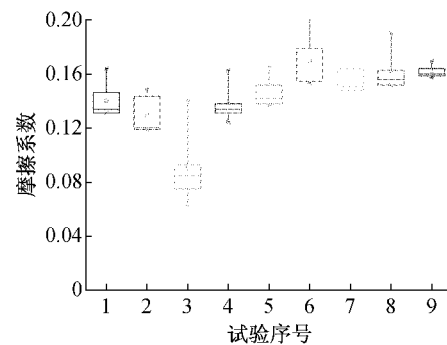


图2 复合滑液润滑条件下四球试验摩擦系数

Fig.2 Friction coefficient in four-ball test for the bio-therapeutic lubricants in orthogonal experiments

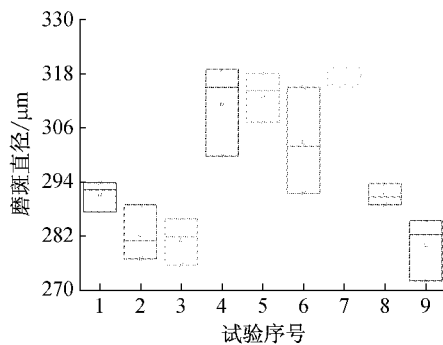


图3 复合滑液润滑条件下四球试验磨斑直径

Fig.3 Wear spot diameter for the bio-therapeutic lubricants in orthogonal experiments

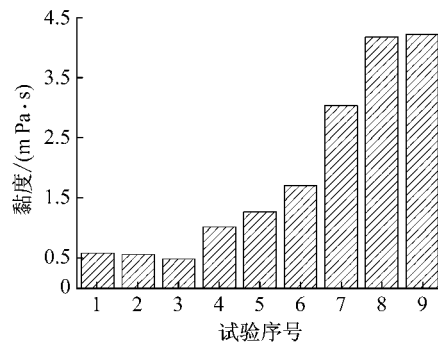


图4 复合滑液黏度值

Fig.4 Viscosity for the bio-therapeutic lubricants in orthogonal experiments

如图2所示,在9组试验中,样本1~3显示出相对较低的摩擦系数(0.06~0.16),结合各成份含量的正交极差值(见表2)发现,透明质酸钠的极差最大,即对摩擦系数的影响最为显著,白蛋白次之,而阿仑磷酸钠影响最小。分析得出,在含量为2 g/L透明质酸钠、60 g/L白蛋白与30 mg阿仑磷酸钠的配比下能够得到较低的摩擦系数。除此以外,对于磨斑直径大小,影响因素依次为透明质酸钠(2 g/L)、阿仑磷酸钠(30 mg)与蛋白质(40 g/L)。这一结果与摩擦系数有一定的吻合,即透明质酸钠在复合滑液润滑性能中占据较大的影响。在黏度测试中发现,透明质酸钠对复合滑液黏度具有显著影响,滑液的黏度随着其含量的增加而增加。这主要归因于透明质酸在空间上呈刚性的螺旋柱构型,柱的内侧由于存在大量的羟基而产生强烈的亲水性,同时羟基连续定向排列,形成网格结构,水分子则在网络内通过极性键和氢键与透明质酸分子相结合,使得这

些水在柱内固定,不易流失,结合透明质酸钠在溶液中的无规则卷曲状态,最终促成其高粘度水溶液的形成^[1]。

随着黏度的增加,摩擦系数与磨斑直径并未相应减小。换言之,复合滑液的润滑性能并没有随黏度的增加而得到提高。进一步对极差值分析发现,透明质酸钠与白蛋白对摩擦系数与磨斑直径的影响程度(极差值)处于同一数量级(见表2)。这表明,除透明质酸钠以外,白蛋白对摩擦副界面间的润滑状态同样具有较大的作用。结合磨斑表面形貌(见图5),较去离子水润滑而言,复合滑液中得到的磨斑较小,且表面有介质层生成迹象。在蛋白质对人工关节润滑的作用研究中,Hueberger等^[12]发现蛋白质能够在亲水性表面形成较厚、密度较高的沉积薄膜,形成边界润滑,以此减少摩擦磨损。此外,较陶瓷材料而言,金属材料表面更容易形成蛋白质层^[13]。

表2 复合滑液成份含量对应各项性能指标极差值

Tab.2 Orthogonal experimental range in different hyaluronic acid, alendronic acid sodium and albumin concentration

	摩擦系数极差	磨斑极差	黏度极差	
透明质酸钠	0.0418	24.21	32.68	
阿仑磷酸钠	0.0045	18.40	5.90	
优选方案	蛋白质	0.0245	12.48	5.59
透明质酸钠/(g·L ⁻¹)	2	2	8	
白蛋白/(g·L ⁻¹)	60	30	15	
阿仑磷酸钠/mg	30	30	30	

本研究中发现,高白蛋白含量(60 g/L)能够有效降低摩擦系数,但是对于磨损而言,磨斑测试结果表明,30 g/L白蛋白的含量具有较高的抗磨性能,而非白蛋白含量越高润滑性能越好。这可能归咎于蛋白质引起的摩擦化学作用,Yan等^[14-15]发现虽然高含量的蛋白质能够起到减摩作用,但是其同样会引起电化学腐蚀,加速材料分解。因此,低摩擦系数并不完全对应低磨损率,而本试验所得到的结果基本符合这一特性。然而,需要指出的是,在进一步试验中需要对复合滑液的电化学腐蚀作用进行分析证实。此外,研究结果表明,透明质酸钠与白蛋白的组合提供更好的润滑性能,这从一定意义上反映了天然关节液与人体体液或牛血清润滑性能的区别。

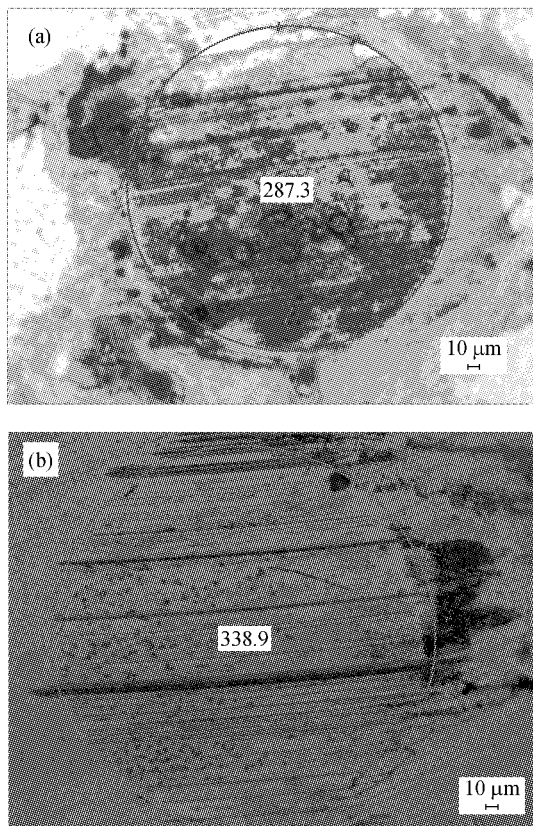


图5 四球试验磨斑表面形貌 (a) 复合滑液润滑, (b) 去离子水润滑

Fig.5 Morphology of wear spot in four-ball test in orthogonal experiments (a) bio-therapeutic lubricant; (b) deionized water

复合滑液中治疗性成份阿仑磷酸钠, 主要针对由磨粒引起的非特异性反应。就摩擦试验结果而言, 其对于摩擦系数与粘度影响程度均较小, 但对磨斑大小存在一定作用。试验中发现高含量的阿仑磷酸钠(30 mg)表现出更好的润滑性能。因此, 可以推测在合理的范围内, 含量相对较高的阿仑磷酸钠能够提供更好润滑性能。

3 结论

(1) 复合滑液3种主要成份中透明质酸钠对滑液的减摩、抗磨以及粘度性能影响最大。

(2) 白蛋白能够在摩擦副表面形成蛋白质沉积薄膜, 对材料起到减摩保护作用, 但是由于电化学反应的影响, 滑液的抗磨能力并非随白蛋白含量的增加而增加。此外, 透明质酸钠与白蛋白的组合提供更好的润滑性能。

(3) 复合滑液中治疗性成份阿仑磷酸钠对磨斑大小存在一定作用。试验结果表明, 高含量的阿仑磷酸钠表现出更好的润滑性能。

参考文献:

- [1] 王成焘等, 人体生物摩擦学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] Wang A, et al. Mechanistic and morphological origins of ultra high molecular weight polyethylene wear debris in total joint replacement prostheses [J]. Proc Instn Mech Engrs, 1996, 210: 141-155.
- [3] Mckellop HA, Campell P, Amstutz H C, et al. The origin of submicron polyethylene wear debris in total hip arthroplasty [J]. Clin Orthop, 1995, 311: 3-20.
- [4] Revell PA, AlSaffar N, Kobayashi A. Biological reaction to debris in relation to joint prostheses [J]. Proc Instn Mech Engrs, 1997, 211(H): 187-197.
- [5] Harris WH. The problem is osteolysis Clin [J]. Orthop Rel Res, 1995, 311: 46-53.
- [6] Herrlin K, Selvik G, Pettersson H, et al. Position, orientation and component interaction in dislocation of the total hip prosthese [J]. Acta Radiol, 1988, 29(4): 441-444.
- [7] McCollum DE, Gray WJ. Dislocation after total hip arthroplasty causes and prevention [J]. Clin Orthop, 1990, 261: 159-170.
- [8] 王野平, 王成焘. 天然和人工关节润滑机理 [J]. 生物医学工程杂志, 2001, 18(4): 603-607.
- [9] Tercic D, Bozic B. The basis of the synovial fluid analysis [J]. ClinChem Lab Med, 2001, 39: 1221-1226.
- [10] Hua ZK, Su SH, Zhang JH. Tribological Study on New Therapeutic Bionic Lubricants [J]. Tribol Lett, 2007, 28: 51-58.
- [11] 陈魁, 试验设计与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [12] Hueberger M P, Widmer M R, Zobeley E, Glockshuber R, Spencer ND. Protein-mediated boundary lubrication in arthroplasty [J]. Biomaterial, 2005, 26: 1165-1173.
- [13] Serro AP, Gispert MP, Martins MCL, Brogueira P, Colaco R, Saramago B. Adsorption of albumin on prosthetic materials: Implication for tribological behavior [J]. J. Biomed Mater Res, 2006, 78(A): 581-589.
- [14] Yan Y, Neville A, Dowson D, Williams S. Tribocorrosion in implants-assessing high carbon and low carbon Co-Cr-Mo alloys by in situ electrochemical measurements [J]. Tribol Int., 2006, 39: 1509-1517.
- [15] Yan Y, Neville A, Dowson D. Biotribocorrosion of CoCrMo orthopaedic implant materials-assessing the formation and effect of the biofilm [J]. Tribol. Int., 2007, 40: 1492-1499.