

基于 AFM 的钛合金表面红细胞力学性能

谢雄¹, 谭建平¹, 龙东平², 刘云龙¹

1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭, 411201)

摘要: 从微摩擦的角度研究血液的吸附机理, 建立血细胞黏附力模型, 利用 CSPM5000 型原子力显微镜(AFM)观察钛合金表面及吸附在其基底上的红细胞表面的二维和三维形貌, 从材料的表面特征出发, 研究不同红细胞压积 HCT 的血液在不同粗糙度的钛合金表面的接触角、黏附功的变化规律, 以及材料表面性能对血液的润湿性、润滑性能和相容性的影响规律。结果表明: 随着血液 HCT 的增加, 血液对钛合金表面的接触角上升, 润滑性能提高; 随着合金表面粗糙度值的增加, 其黏附功呈均匀上升, 接触角下降; 钛合金表面的亲水性越好, 其表面血液润滑性能越好。研究结果为改进血液润滑效果、提高润滑效率、减少血细胞受损提供基础和依据。

关键词: 钛合金; 红细胞; 力学性能; 原子力显微镜(AFM)

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2013)04-1385-05

Mechanical properties of erythrocyte on titanium alloy surface based on AFM

XIE Xiong¹, TAN Jianping¹, LONG Dongping², LIU Yunlong¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. College of Electro mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: According to the study on micro-friction adsorption mechanism of blood, the adhesion model of blood cells was established. By using the CSPM5000 atomic force microscope, the 2D and 3D surface topographies of erythrocyte which adsorbed in the basement of titanium alloy were observed. Based on the surface characteristics of materials, the contact angle and adhesive work of erythrocyte with different HCT on the surface of titanium with different surface roughness were studied. The results show that: with the increase of the HCT in blood, the contact angle between blood and titanium surface increases and the lubrication performance is improved; with the increase of roughness of titanium surface, the contact angle and adhesive work increase; with the increase of hydrophilicity of titanium, the lubrication performance is improved. The results provide a foundation to improve the lubricating effect and reduce the damage of erythrocyte.

Key words: titanium alloy; erythrocyte; mechanical properties; atomic force microscope (AFM)

在血泵 40 余年的发展中, 摩擦和磨损一直是阻碍其发展的重要因素, 国内外众多学者对其润滑方式进行了探索和研究。Walowitz 等^[1]对 CCF 的新一代血泵 (IVAS)进行了研究, 该血泵转子轴承采用血液直接润

滑, 通过计算机模拟对轴承的结构参数进行了优化; Malanoski 等^[2]对磁浮轴承血泵进行了研究, 计算了径向滑动轴承在低剪切情况下保证低溶血的同时应具备的润滑膜厚度。Jarvik 2000 钛合金血泵^[3-4]及

收稿日期: 2012-06-14; 修回日期: 2012-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075403, 3127105); 国家青年自然科学基金资助项目(51105385)

通信作者: 谭建平(1963-), 男, 湖南攸县人, 博士生导师, 教授, 从事现代机电液控制理论与技术研究; 电话: 13607311991; E-mail: jptan@163.com

BaylorGyr 系列离心泵^[5]均采用血液直接润滑。为了研究血液润滑特性,学者们从微观和宏观 2 个方面对血液的润滑特性进行研究。龚中良等^[6-8]建立了刚脆性血细胞模型,并定性分析了血液通过不同最小间隙后的变化规律;云忠等^[9-10]采用水力旋流场理论对高速螺旋流场内血液剪切损伤机理进行了研究,得出了红细胞剪切破碎的判定依据;龙东平等^[11-13]和 Chen 等^[14-15]结合血液的特殊流变性,利用线性黏弹性模型-Maxwell 流变模型来描述血液的宏观的非牛顿流体特征和血细胞的微观黏弹性特征。此外,血液的微观吸附特性和吸附形貌也会对血液的润滑产生影响。因此,研究血细胞在材料表面的吸附,对改进血液润滑效果,减少血细胞受损是非常重要的。但由于受到微观研究手段限制和活红细胞表面难以控制摩擦的限制,从微观角度去研究血细胞摩擦性能的研究尚鲜见报道。

本文作者从微观细胞力学的角度出发,探讨了在润滑过程中血细胞的吸附特性和微观力学行为,建立了血细胞黏附力模型,利用原子力显微镜(AFM)观察了吸附在钛合金基底上的红细胞表面形貌,从材料的表面特征出发,研究了不同红细胞压积 HCT 的血液在不同粗糙度的钛合金表面的接触角、黏附功的变化规律,以及材料表面性能对血液的润湿性、润滑性能和相容性的影响规律,对损伤红细胞膜的过程和机理进行了讨论。

1 血细胞黏附力模型

为了从细胞生物力学的角度研究细胞黏附,首先要了解单个细胞的力学特性。红细胞膜内充满了可流动,不可压缩的血红蛋白,对于一对不可压缩的球形黏弹性细胞的黏附,可以用标准固体黏弹性(Kelvin)模型来近似,如图 1 所示。

从力的角度来看,红细胞黏附面上的接触应力分布为:

$$\sigma = \frac{8K}{\pi R} \left(\frac{a^2 - Rh}{2\sqrt{a^2 - r^2}} - \sqrt{a^2 - r^2} \right) \quad (1)$$

其中: h 为 2 个红细胞开始接触到互相黏附的相对位移; a 为接触圈的半径; r 为黏附平面的极坐标; $K=0.5k_1k_2/(k_1+k_2)$, k_1 , k_2 分别为 2 个红细胞的弹性系数; $R=R_1R_2/(R_1+R_2)$, 其中 R_1 , R_2 分别为 2 个细胞的半径。则总的黏附力为:

$$F = \iint \sigma dA = 8Ka(a \times a / 3R - h) \quad (2)$$

其中: A 为黏附区的面积。

黏附的能量密度为:

$$E = \frac{1}{16\pi Ka^3} \left(F + \frac{16GKa^3}{3R} \right)^2 \quad (3)$$

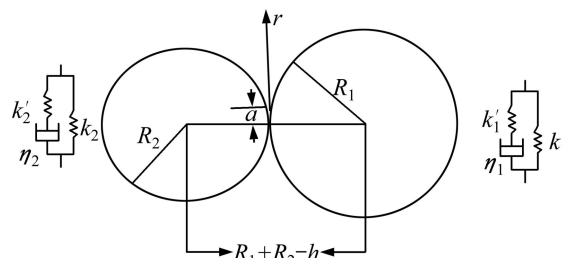


图 1 细胞黏附模型(细胞均为不可压缩黏弹性球体)

Fig. 1 Cell adhesion model

(as incompressible viscoelastic sphere)

2 实验研究

2.1 试样准备

清晨空腹安静状态下,采集健康青年志愿者肘前静脉血 5~10 mL,使用肝素或乙二胺四乙酸二钠(EDTA)抗凝,肝素抗凝浓度 20~30 IU/mL 全血,EDTA 浓度为 3.4~4.8 mmol/L 全血。将血均匀地涂到钛合金表面制成血涂片,室温风干备用。

2.2 实验条件

利用 CSPM5000 型原子力显微镜,在室温时对样品进行表面形貌和摩擦特性测试,相对湿度控制在 75%左右,采用接触模式,所用针尖为 CSPM5000 型 AFM 自带针尖(ContactA1)探针,扫描频率为 1.0 Hz,扫描面积(范围)为 20 μm^2 左右,扫描角为 90°,测吸附于钛合金表面的红细胞形貌,并测其摩擦力(横向力)。

2.3 钛合金表面吸附实验

图 2 所示为利用 CSPM5000 型原子力显微镜观察的抛光后的钛合金表面,平均粗糙度约为 10 nm,图 2(a)所示为钛合金的二维表面形貌,图 2(b)所示为三维表面形貌。

图 3 所示为吸附在此钛合金表面的血细胞。由图可以看出:血细胞有部分开始变形,细胞周围伸出伪足,呈棘轮状。材料的生物相容性与材料的表面能有关,红细胞变形的原因一方面是表面太粗糙,二是钛

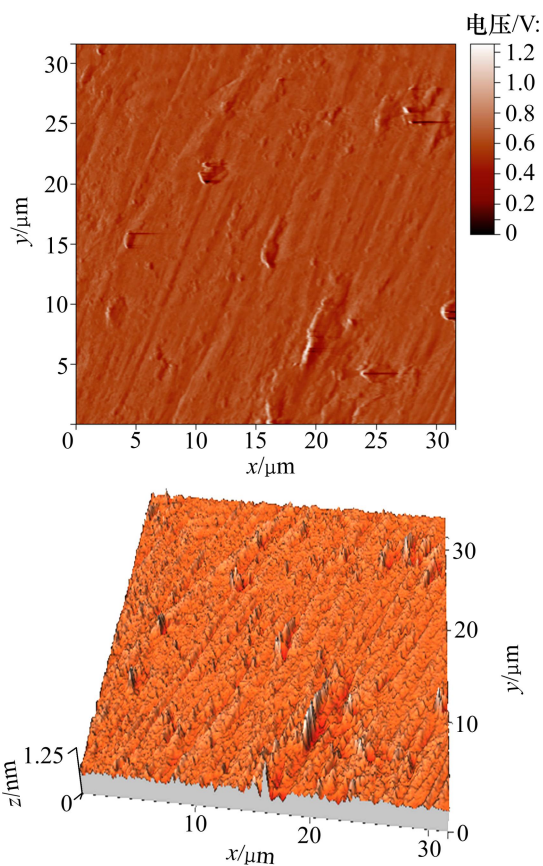


图2 抛光后的钛合金 Ti-6Al-4V 表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of Ti-6Al-4V after polishing

合金表面触使血细胞在吸附过程中产生形变。

2.4 钛合金表面黏附实验

从材料的表面特征出发, 研究组分变化时血液在不同粗糙度钛合金表面的接触角、黏附功的变化规律。

2.4.1 不同钛合金表面接触角实验

材料的表面性能的表现, 主要包括4个方面的性能: 物理形态(主要指表面粗糙度); 化学形态(主要表现在材料的亲、疏水性上); 化学形态主要表现在材料的亲、疏水性上; 电性能(指材料表面所带的电荷对血液相容性的影响); 表面能量参数(包括表面张力、临界表面张力、界面自由能、极性色散比、黏附功)。通过测量不同血液组分在不同粗糙度的生物材料表面的接触角、表面张力, 研究血液润滑的润湿性、润滑性能和相容性。

采用 JY-82 接触角测定仪, 测试了不同红细胞压积 HCT 的血液对 3 种钛合金 TA2(纯钛), TC4 (Ti6Al4V) 和 TLM (TiZrSnMoNb) 在不同表面粗糙度下的接触角 θ , 如图 4 所示。

结果表明:

(1) 无论是蒸馏水, 还是 HCT 不同的血液, 对

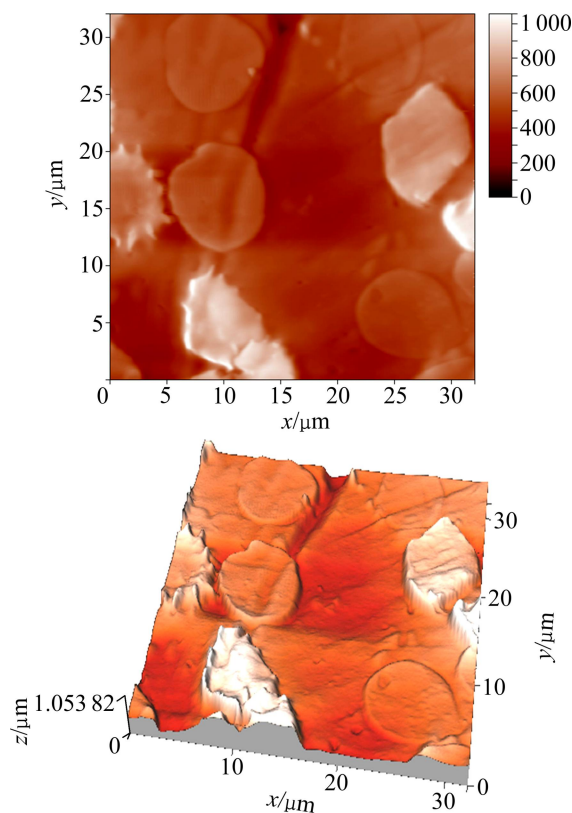


图3 吸附在钛合金表面的血细胞的形态形貌

Fig. 3 Surface morphologies of cell adsorpted on titanium alloy

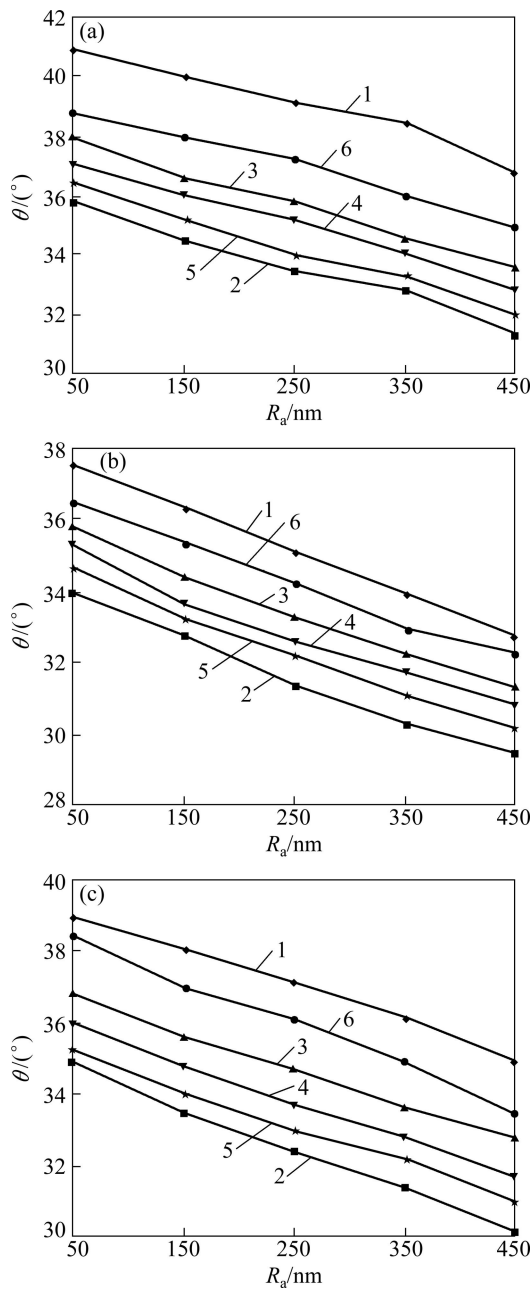
TA2, TC4 和 TLM 3 种钛合金表面的接触角随着合金表面粗糙度的增加而下降。因此, 钛合金表面越粗糙, 血液的润湿性越好。

(2) 在蒸馏水和各种成分的血液中, 血浆对 TA2, TC4 和 TLM 合金表面的接触角最小, 蒸馏水的最大, 随着血液 HCT 的增加, 血液对 3 种合金表面的接触角呈均匀上升的趋势。血浆对钛和钛合金表面的润湿性最好。蒸馏水与各种成分的血液相比, 对合金表面的润湿性都要差一些。

(3) 各种成分的血液对 3 种钛合金的接触角都是按 TA2, TC4 和 TLM 顺序均匀减少; 血液中, TLM 合金表面的润湿性最好, TC4 的次之, TA2 的最差。

2.4.2 不同钛合金表面黏附功实验

润滑液的润滑性能与其对摩擦界面的黏附功 W_a 有关。通过测量不同 HCT 血液的表面张力及其对 TA2, TC4 和 TLM 3 种生物钛合金界面在不同粗糙度下的接触角 θ (如图 3 所示), 得出 HCT 为 0%(血浆), 10%, 20%, 30%和 45%(全血)的血液对 3 种生物钛合金 TA2, TC4 和 TLM 表面的黏附功 W_a 随表面粗糙度的关系如图 5 所示。



(a) TA2; (b) TC4; (c) TLM

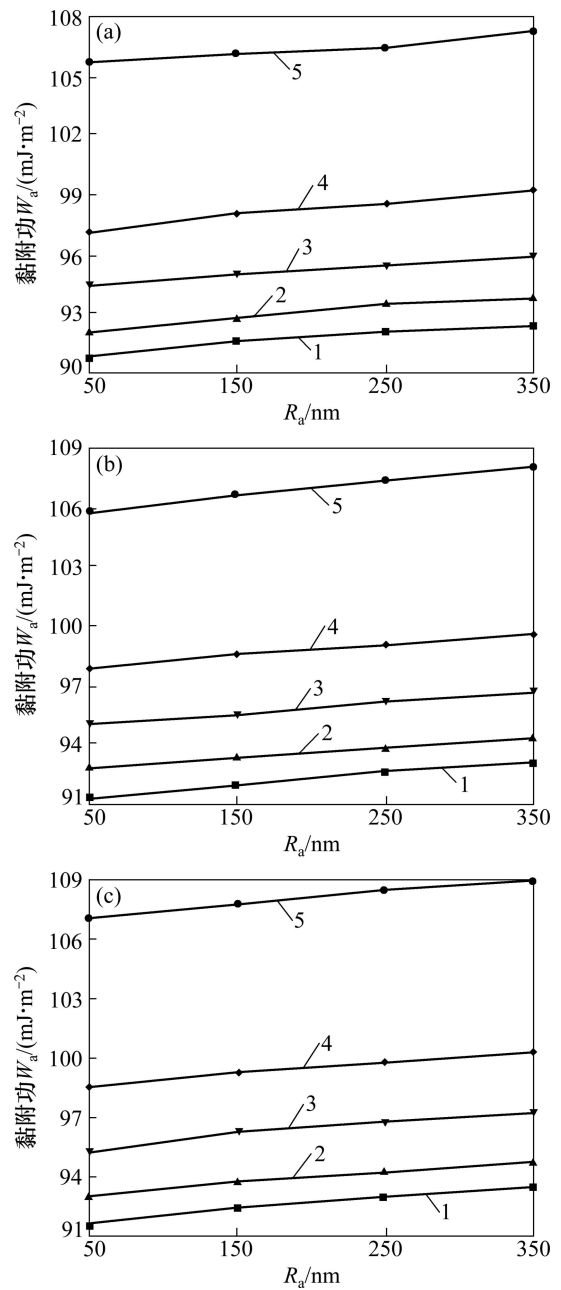
1—蒸馏水; 2—血浆; 3—HCT 为 10% 的血液;
4—HCT 为 20% 的血液; 5—HCT 为 40% 的血液; 6—全血

图 4 不同红细胞压积 HCT 的血液对 3 种钛合金表面的接触角

Fig. 4 Contact angle of three kinds of titanium alloys blood with different HCT

结果表明:

(1) 随着血液 HCT 的增加, 血液对 TA2, TC4 和 TLM 3 种合金表面的黏附功都呈均匀上升的趋势, 血浆对 3 种合金表面的黏附功最小, 全血的最大。这表明: 随着血液 HCT 的增加, 血液润滑剂对 3 种生物钛



(a) TA2; (b) TC4; (c) TLM

1—血浆; 2—HCT 为 10% 的血液;
3—HCT 为 20% 的血液; 4—HCT 为 30% 的血液; 5—全血

图 5 不同红细胞压积 HCT 的血液对 3 种钛合金的黏附功

Fig. 5 Adhesive work of three kinds of titanium alloys and blood with different HCT

合金表面的润滑性能有所提高。为了让血液有效成分均匀充满润滑区, 在血液润滑运动副设计时, 选取最小膜厚 $h_{\min} \geq 8 \mu\text{m}$ 。

(2) 随着合金表面粗糙度值的增加, HCT 不同的血液润滑剂对 TA2, TC4 和 TLM 3 种生物钛合金表面的黏附功都呈均匀上升趋势, 但上升的幅度较小。因

此,生物钛合金表面越粗糙,血液润滑剂的润滑性能较好。但考虑到血液润滑一定要处在流体动压润滑状态下且其溶血和血栓等生理指标因素,钛合金表面的粗糙度不能太大。

(3) 每种人体血液对3种生物钛合金的接触角都是按TA2, TC4和TLM顺序均匀减少,而黏附功 W_a 均是按TA2, TC4和TLM顺序增加的。因此,血液润滑剂对TLM合金表面的润湿性和润滑性能最好,TC4次之,TA2最差。且钛合金表面的亲水性与血液润滑的性能有关,亲水性好的钛合金表面血液润滑性能也好。

3 结论

(1) 随着血液HCT的增加,血液对钛合金表面的接触角上升,润滑性能提高;随着血液HCT的增加,血液润滑剂对3种生物钛合金表面的润滑性能有所提高。各种成分的血液对生物钛合金表面的润滑性能血浆是最差的,全血是最好的。

(2) 随着合金表面粗糙度的增加,HCT不同的血液润滑剂对TA2, TC4和TLM3种生物钛合金表面的接触角下降,而黏附功略有增大,润滑性能较好。但考虑到血液润滑一定要处在流体动压润滑状态下且其溶血和血栓等生理指标因素,钛合金表面的粗糙度不能太大。

(3) 血液对3种生物钛合金表面的接触角都是按TA2, TC4和TLM顺序均匀减少,而黏附功均是按TA2, TC4和TLM顺序增加的。因此,血液润滑剂对TLM合金表面的润湿性和润滑性能最好,TA2最差。且钛合金表面的亲水性与血液润滑的性能有关,亲水性好的钛合金表面血液润滑性能也好。

参考文献:

[1] Walowit J, Malanoski S B, Horvath D, et al. The analysis, design and testing of a blood lubricated hydrodynamic journal bearing[J]. *ASAIO J*, 1997, 43(5): 556-559.

[2] Malanoski S B, Belowski H, Horvath D, et al. Stable blood lubricated hydrodynamic journal bearing with magnetically suspended impeller[J]. *ASAIO J*, 1998, 44(5): 737-740.

[3] Pagani F D. Continuous flow rotary left ventricular assist devices with 3rd generation design[R]. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Health System, 2008: 255-263.

[4] Ranjit J. Current axial flow devices: the heart mate ii and jarvik 2000 left ventricular assist devices[R]. Minneapolis, Minnesota: University of Minnesota, 2008: 264-272.

[5] Minato N, Sakuma I, Sasaki T, et al. A sealless centrifugal pump, (Baylor Gyro Pump) for application to long term circulatory support[J]. *Artificial Organs*, 1993, 17(1): 36-42.

[6] 龚中良, 谭建平. 血液润滑膜组分的动态变化规律研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(6): 505-509.

GONG Zhongliang, TAN Jianping. Study on regulations of blood constituent changing in blood lubricating film[J]. *Tribology*, 2006, 26(6): 505-509.

[7] 龚中良, 谭建平. 高切稳态载荷条件下人体血液润滑模型与仿真[J]. *润滑与密封*, 2006, 31(8): 72-74.

GONG Zhongliang, TAN Jianping. Research on the lubricant model of human blood under steady load and high shear rate[J]. *Lubrication Engineering*, 2006, 31(8): 72-74.

[8] 龚中良, 谭建平. 人体血液机械承载性能的试验研究[J]. *润滑与密封*, 2006, 31(11): 1261-1263.

GONG Zhongliang, TAN Jianping. Experimental study of the load capacity of human blood[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006, 31(11): 1261-1263.

[9] 云忠, 谭建平. 基于血液撞击损伤机理的高速螺旋血泵仿真分析[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2008, 39(1): 135-142.

YUN Zhong, TAN Jian-ping. Simulation analysis of high-speed spiral blood pump based on impacting injure principle of blood[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2008, 39(1): 135-142.

[10] 云忠, 谭建平. 基于血液剪切损伤机理的高速螺旋血泵仿真分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(1): 47-50.

YUN Zhong, TAN Jian-ping. Simulation analysis of the high-speed spiral blood pump based on the shear injure principle of blood[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(1): 47-50.

[11] 龙东平, 谭建平, 吴士旭. 血浆润滑性能的试验研究[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(3): 125-127.

LONG Dongping, TAN Jianping, WU Shixu. Research on experiments of the lubricant properties of blood plasma[J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(3): 125-127.

[12] 龙东平, 谭建平. 人工器官中的摩擦学问题[J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(2): 198-206.

LONG Dongping, TAN Jianping. A review of the tribological problems in artificial organs[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2008, 27(2): 198-206.

[13] 龙东平. 基于黏弹性模型的血液润滑性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.

LONG Dongping. Study on the blood lubrication properties based on the viscoelasticity model[D]. Changsha: Central South University, 2008.

[14] CHEN Xin, TAN Jianping. Computational prediction of hemolysis by blade flow field of micro-axial blood pump [C]//Proceedings of 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. Vancouver, BC, Canada, 2006: 677-683.

[15] CHEN Xin, TAN Jianping, YUN Zhong. Particle tracking computational prediction of hemolysis by blade of micro-axial blood pumps[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(160/162): 1779-1786.

(编辑 陈爱华)