

轴流式血泵轴承基于血液损伤的温度场分析

杨帆, 云忠, 胡及雨

中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083

【摘要】为研究血泵轴承在工作过程中的温升对血液的影响,通过在流式细胞仪中对红细胞进行死亡率分析计算和脆性试验,得到红细胞损伤机理,确定血液损伤临界值;对血泵轴承摩擦接触面进行热流密度计算,利用WORKBENCH分别对血泵轴承与导轮整体进行仿真。通过分析血泵轴承的温度场,得到不同摩擦系数及转速下的温升情况。实验结果显示,红细胞的死亡率随着温度的升高而增大,温度达到47℃时红细胞死亡数量已超过一半。仿真结果表明,温升情况与材料选择有一定关联,每种材料轴承的温升都是随着转速和摩擦系数的增大而上升,可以通过降低转速,或减小轴与轴套接触面的表面粗糙度的方法来降低温升,使轴承温度始终低于血液损伤临界值。

【关键词】血泵轴承;血液临界损伤;红细胞;温度场分析;材料

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)08-0968-06

Blood damage-based temperature field analysis of axial flow blood pump bearing

YANG Fan, YUN Zhong, HU Jiyu

School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: In order to study the effects of temperature rise of blood pump bearing on the blood during the working process, a red blood cell damage mechanism is obtained by analyzing the mortality rate and testing the brittleness of red blood cells in flow cytometry, thereby determining the critical value of blood damage. The bearing friction contact surface is used to calculate the heat flux density, and WORKBENCH is used to simulate the whole of the blood pump bearing and the guide wheel. By analyzing the temperature field of the blood pump bearing, the temperature rises at different friction coefficients and rotational speeds are obtained. The experimental results show that the mortality rate of red blood cells rises with the increase of temperature, and that the number of red blood cell deaths has exceeded half when the temperature reaches 47℃. The simulation results reveal that the temperature rise is related to the material selection, and the temperature rise of each material bearing is increased with the increase of rotational speed and friction coefficient. Therefore, the temperature rise can be reduced by reducing rotational speed or reducing the surface roughness of the contact surface between the shaft and the sleeve, so as to ensure the temperature of bearing is always lower than the critical value of blood damage.

Keywords: blood pump bearing; critical blood damage; red blood cell; temperature field analysis; material

前言

社会环境变革和老龄化加剧导致了心血管疾病的增加,在药物治疗疗效有限和心脏供体稀缺的情况下,植入性血泵因其在临床应用中对于维持生命、

改善心脏功能的良好作用而有迫切的市场需求。近年来被广泛研究的第三代轴流式血泵,在性能提高的同时出现了许多新的问题,血泵高速运转中轴承的温升便是其中之一。

轴流式血泵在高速运转时,轴承转动摩擦产生的热量会传递给血液,造成血液损伤。红细胞作为决定血液质量的重要组成部分,其结构性与功能性损伤成为研究血液损伤的热点^[1-2]。在血液损伤方面,云忠等^[3-4]提出了血液的机械损伤机理,Tamagawa等^[5]和Soetanto等^[6]分析了超声波对红细胞的破坏情况。徐胜春等^[7]研究表明,不同温度下红细胞形态、生化状况都会发生改变;李明辉等^[8]发现,在高于保存温度10℃超过30 min后,血液中游离血红蛋白的

【收稿日期】2019-02-22

【基金项目】国家自然科学基金(31670999);浙江省重中之重学科开放基金(GK170201201003/002);湖南省自然科学基金项目(2019JJ40364)

【作者简介】杨帆,硕士研究生,主要研究方向:生物机械,E-mail: HAVEFUNJUNE@163.com

【通信作者】云忠,教授,博士生导师,主要研究方向:生物机械,E-mail: yunzhong@csu.edu.cn

含量逐渐增加;严秀娟^[9]指出,温度升高使红细胞破坏增加,高温还会使其损伤甚至坏死。

目前,胡及雨等^[10],李伟力等^[11]和Okoro^[12]分析了电机温度场对血液的影响,但并未涉及轴承温度场对血液影响的研究。轴承作为血泵工作时产热的另一主要部分,其温度场的研究十分必要。

本文在确定血液温度损伤临界值的基础上,以不同材料的血泵轴承为有限元温度场仿真分析对象,得到血泵轴承的温升规律,及影响其温升的主要因素,并对降低血泵轴承工作温度提出了几点建议。

1 温度对红细胞形态及数目的影响

1.1 常态下温度对红细胞的影响

1.1.1 材料与方法 选取中南大学医学院附属三医院健康成人血液,处理并离心后,取下层血液制备成数量级为 $10^8/\mu\text{L}$ 的红细胞悬液,在显微镜下进行红细胞计数。将红细胞悬液等量($100\mu\text{L}$)分10份管放入PCR仪中进行加热并保温20 min(加热梯度为37、39、43、47、51、55℃,37℃为对照组)。

取保温好的血液制作玻片并在显微镜下观察,随后将热处理后的血液和 $500\mu\text{L}$ PBS溶液加入流式试管中,轻微振荡后放入流式细胞仪中进行处理^[13-15]。

1.1.2 实验结果 不同温度下红细胞死亡率与存活率结果如图1所示。红细胞的死亡率从1.06%上升到12.3%,温度上升导致红细胞死亡率增高,说明温度对红细胞的损伤有很大影响。

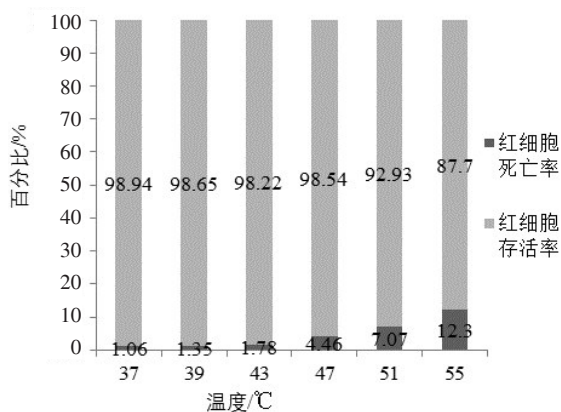


图1 不同温度下红细胞死亡率与存活率
Fig.1 Mortality and survival rates of red blood cells at different temperatures

1.2 渗透处理后温度对红细胞的影响

1.2.1 材料与方法 将上述实验已热处理后(温度分别为37、39、43、47、51、55℃)的红细胞悬液取 $5\mu\text{L}$ 分别加入 $100\mu\text{L}$ 0.3%氯化钠溶液中,渗透10 min后,

取 $50\mu\text{L}$ 加入 $500\mu\text{L}$ PBS溶液中,振荡后进行流式细胞仪计数^[16]。

1.2.2 实验结果 渗透处理后不同温度下红细胞死亡率与存活率结果如图2所示。温度为37℃的红细胞经过渗透处理后与未渗透处理相比,细胞死亡率从1.06%增加到8.21%;39℃时,红细胞死亡率从1.35%上升到10.9%;43℃时,红细胞的死亡率从1.78%上升到37.1%;当温度为47℃时,死亡率上升到50.9%,数量已经超过一半,红细胞脆性大大增加;当红细胞温度超过50℃时,红细胞死亡率已经超过80%。

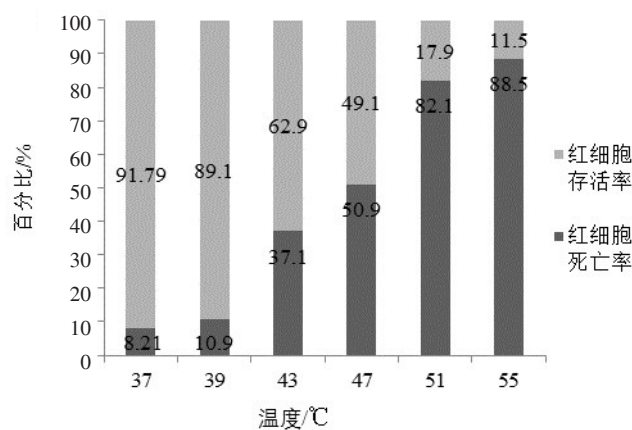


图2 渗透处理后不同温度下红细胞死亡率与存活率
Fig.2 Mortality and survival rates of red blood cells after osmotic treatment at different temperatures

1.3 结果与讨论

根据温度对红细胞的形态、数目以及渗透脆性的影响分析发现,当温度达到47℃时,红细胞会发生涨破,其死亡数目也随温度的上升而增加。通过对红细胞渗透脆性的实验分析可知,在温度为43℃时,未经渗透处理的红细胞体积与对照组相比会变大,数目的死亡率也较低,而经过渗透处理的红细胞死亡率已经达到37.1%,说明红细胞受热后脆性增加,抗张力强度降低,所以受到低渗溶液渗透会使得红细胞溶血程度增大。

实验结果表明,温度在43℃时会发生大量溶血现象,此温度与Utoh等^[17],吴正洁^[18]研究的红细胞温度损伤值接近,所以用43℃作为血液温度损伤临界值。

2 摩擦接触面上的热流密度计算

2.1 摩擦力矩的确定

(1)轴颈的摩擦力矩:

$$M_f = kfG_r = \left(1 \sim \frac{\pi}{2}\right) fG_r \quad (1)$$

其中 f 为摩擦系数, G 为重量(N), r 为轴颈半径

(m), $k = \frac{\pi}{2}$ 。

(2)轴端的摩擦力矩。从轴端接触面上取环形微小面积 $ds = 2\pi\rho d\rho$, 设 ds 上的压强 p 为常数, 则环形微小面积上所受的正压力为 $dF_N = pds$, 摩擦力为 $dF_f = fdF_N = fpds$, 故回转轴线的摩擦力矩为:

$$dM_f = \rho dF_f = \rho fpds$$

对上式积分得总摩擦力矩为:

$$M_f = \int_0^R \rho fpds = 2\pi f \int_0^R \rho p^2 d\rho \quad (2)$$

其中 ρ 为轴端面圆心到环形微面积的半径长度, R 为轴端面圆半径(m)。

2.2 摩擦损耗的确定

血泵轴承部分主要摩擦损耗在轴颈处。结合式(1)可得血泵轴承处的摩擦损耗为:

$$P = M_f \omega = kfGr\omega = \frac{\pi}{2} fGr\omega \quad (3)$$

其中 ω 为转轴角速度(rad/s), f 为摩擦系数, r 为轴颈半径(m)。

将 $G = G_{\text{SHAFT}} + G_{\text{IMPELLER}} + G_{\text{ROTOR}}$ 带入式(3), 得:

$$P_B = \frac{\pi^2}{6} fGn \times 10^{-3} \quad (4)$$

其中 G_{SHAFT} 为转轴的重量, G_{IMPELLER} 为转动叶轮的重量, G_{ROTOR} 为永磁转子的重量, 本研究中 G 约为 0.1764 N, n 为转速(rpm)。

3 仿真结果及分析

3.1 热流密度计算

根据本文2.2所确定的摩擦损耗来得到接触面上的热流密度:

$$Q_B = P_B / S_B \quad (5)$$

其中 Q_B 为轴承摩擦接触面上的热流密度(W/m²), S_B 为轴承摩擦接触面的面积(m²)。

3.2 血泵轴承整体仿真结果及分析

综合轴承的失效形式和血泵轴承的性能要求, 初步选择血泵轴承材料为不锈钢 AISI440 (9Cr₁₈)、普通轴承钢 AISI52100 (GCr₁₅)、氧化锆 (ZrO₂) 和氮化硅 (Si₃N₄)。

血泵轴承稳定转速为 9 000 r/min 时, 得到不同材料轴承的前导轮整体温度场云图如图3所示。

由图3可以看出, 温度发热高低顺序为 9Cr₁₈ > GCr₁₅ > ZrO₂ > Si₃N₄, 其最高温度分别为 40.987、40.664、37.824、37.409 ℃。最高温度出现在轴承处, 最低温度在前导轮的叶片处, 导轮的端部温度梯度沿径向方向逐渐减小。

(1)血泵轴承系统其他参数不变, 保持材料 9Cr₁₈

和 GCr₁₅ 摩擦系数为 0.90, ZrO₂ 和 Si₃N₄ 为 0.15, 设置转速分别为 5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000 rpm, 研究转轴转速对前导轮整体温升的影响, 温升曲线图如图4所示。

由图4可以看出, 轴承的温升随着转速的增大而增加, 呈一次函数; 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 材料轴承温度上升速度比 ZrO₂ 和 Si₃N₄ 大, 主要是由于 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 自身材料属性所导致的结果, 即摩擦系数较大。考虑到温度对血液的损伤问题^[19-20], 根据前文临界温度损伤值, 并结合图4中的温度数值可知, 4种轴承材料的温度在 5 000~12 000 rpm 的转速之间均小于 43 ℃, 但是考虑到血泵在实际工作中存在耦合损伤的影响, 所以应选择更接近于人体体温的温度; 而 ZrO₂ 和 Si₃N₄ 材料轴承在 5 000~12 000 rpm 的转速范围内, 最高温度都低于 40 ℃, 这两种材料对血液造成的损伤更小。

(2)血泵轴承其他参数不变, 保持转轴转速为 9000 rpm, 分别改变 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 材料轴承摩擦系数为 0.85、0.87、0.89、0.91、0.93、0.95, ZrO₂ 和 Si₃N₄ 材料轴承摩擦系数为 0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20。研究摩擦系数对轴承温升的影响, 温度变化曲线图如5和图6所示。

根据图5和图6可知, 轴承温度随着摩擦系数的增大而增大并近似呈一次函数, 这是因为摩擦系数的增大会导致摩擦损耗、热流密度和温度的上升, 从而温升也随之上升。对于 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 材料轴承, 在 0.85~0.95 摩擦系数范围内, 温度始终没有低于 40 ℃, 而 ZrO₂ 和 Si₃N₄ 材料轴承在摩擦系数 0.10~0.20 之间时, 温度没有高于 40 ℃, 主要跟轴承材料本身的特性和摩擦系数有关。

用同样的方法对后导轮整体进行温度场分析, 得到各轴承材料后导轮整体温度场分布云图如图7所示。

由图7可知, 后导轮整体温度分布与前导轮整体分布相似, 最高温度同样出现在轴承处, 最低温度分布在顶部和叶片处。

根据对轴承材料的温度场分析, 9Cr₁₈、GCr₁₅、ZrO₂ 和 Si₃N₄ 4种轴承材料中温升较低且不对血液造成温度损伤的为陶瓷轴承材料 ZrO₂ 和 Si₃N₄, 虽然材料 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 密度和导热系数较大, 在同样的损耗下温升较低, 但是其本身未经处理的表面摩擦系数较大, 热膨胀系数较大, 导致其尺寸稳定性差, 不符合血泵安装尺寸所必需的良好尺寸稳定性。同时, 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 材料耐腐蚀性差, 应力循环次数低, 不符合血泵在人体中长期

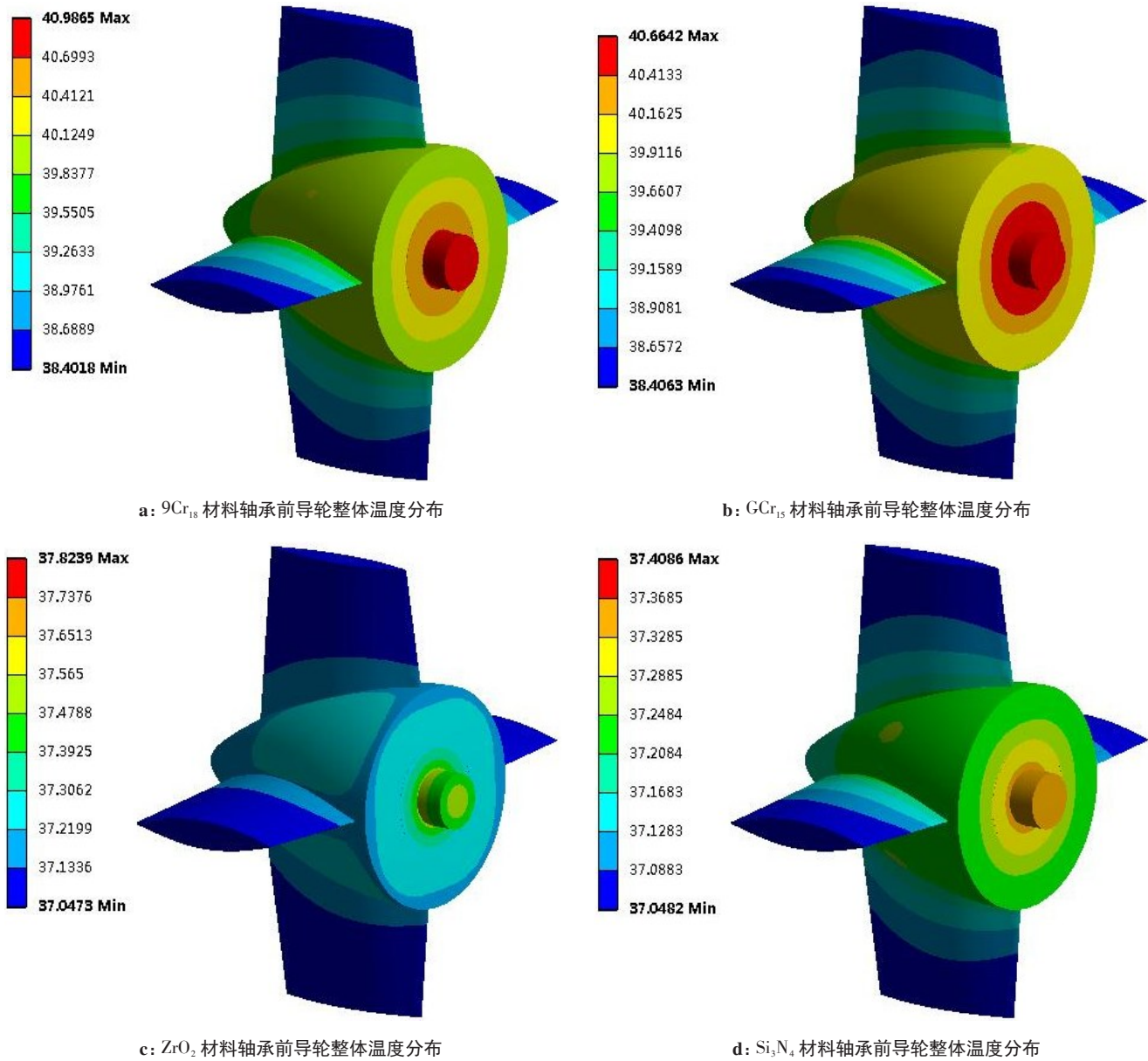


图3 各轴承材料前导轮整体温度场分布云图

Fig.3 Temperature field distributions of the whole of the front guide wheel of each bearing material

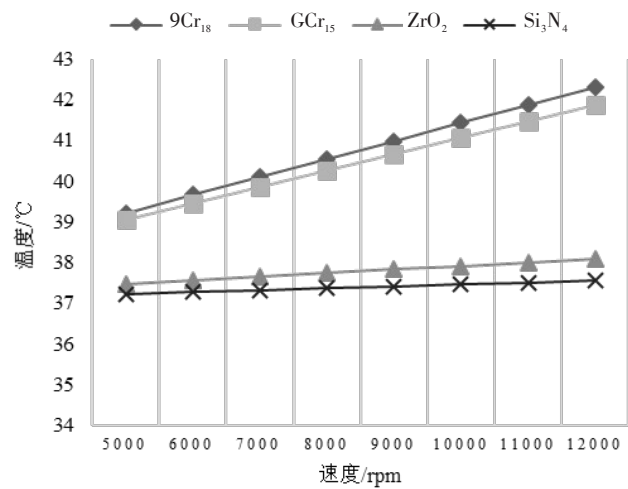
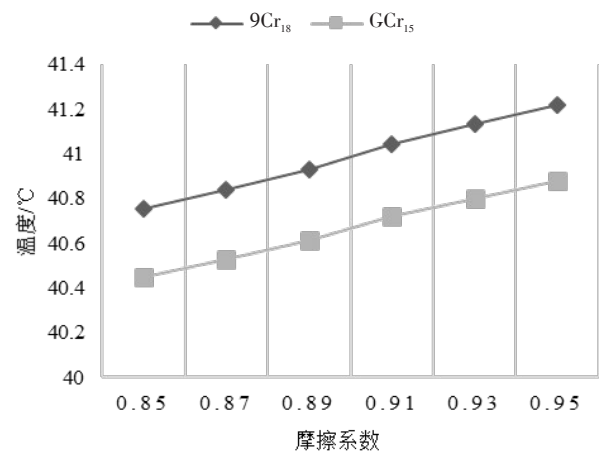
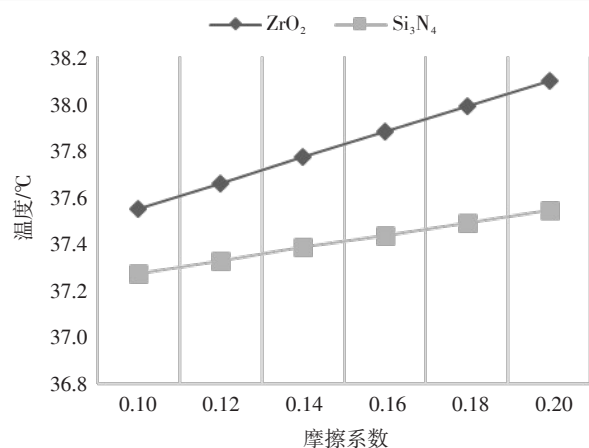


图4 温升随转速变化曲线图

Fig.4 Curve of temperature rise changing with rotational speed

图5 9Cr₁₈ 和 GCr₁₅ 材料轴承温度随摩擦系数变化曲线图Fig.5 Curve of 9Cr₁₈ and GCr₁₅ material bearing temperature changing with friction coefficient

图6 ZrO₂ 和 Si₃N₄ 材料轴承温度随摩擦系数变化曲线图Fig.6 Curve of ZrO₂ and Si₃N₄ material bearing temperature changing with friction coefficient

工作的要求。

Si₃N₄ 材料轴承与 ZrO₂ 材料轴承相比,适合在高负荷、高转速以及高温环境下工作,同时装配精度也较高。根据以上的分析,血泵轴承宜选用 Si₃N₄ 材料轴承。

4 结 论

通过上述实验以及对血泵轴承温度场的分析可以得到:(1)血液中血细胞的临界损伤温度为 43 ℃;(2)不同材料的温升都是随着转速和摩擦系数的增大而上升,综合转速对轴承的影响可得,在满足人体泵血正常的情况下,要使温升下降,可以通过降低转速的方法来实现;(3)为了使血液的损伤程度降低,轴与轴套接触面的表面粗糙度应尽可能小。

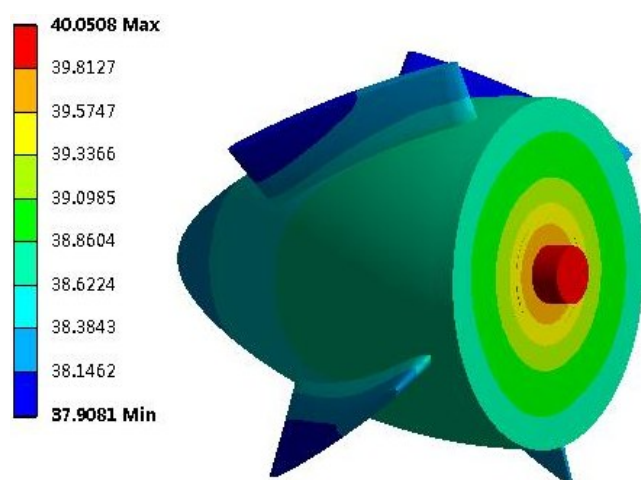
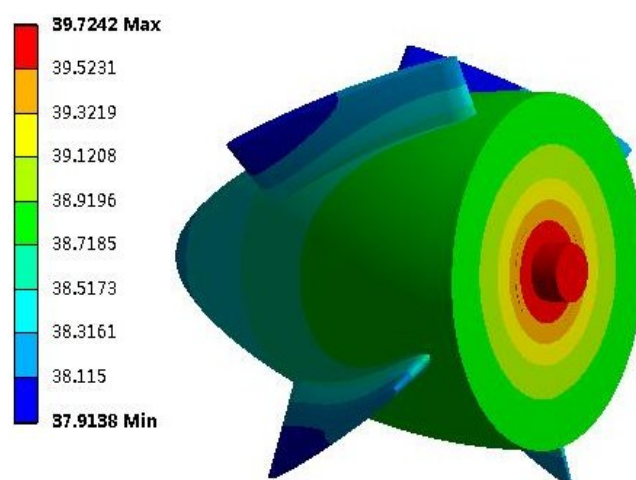
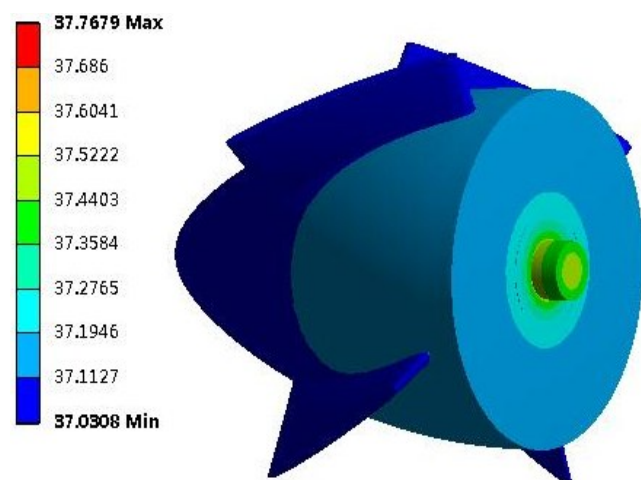
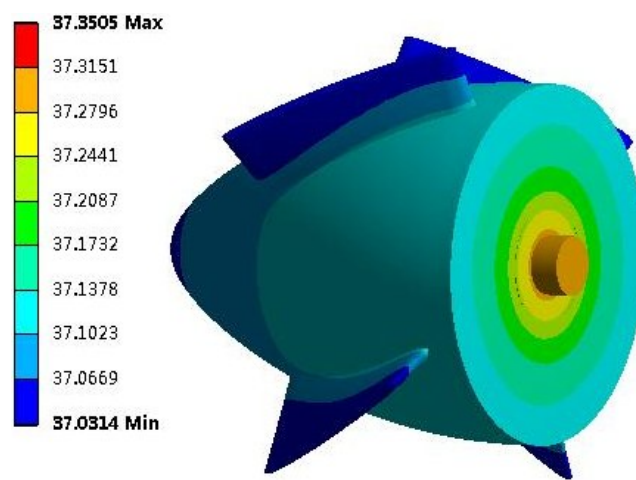
a: 9Cr₁₈ 材料轴承后导轮整体温度分布b: GCr₁₅ 材料轴承后导轮整体温度分布c: ZrO₂ 材料轴承后导轮整体温度分布d: Si₃N₄ 材料轴承后导轮整体温度分布

图7 各轴承材料后导轮整体温度场分布云图

Fig.7 Temperature field distributions of the whole of rear guide wheel of each bearing material

【参考文献】

- [1] 盘国雄, 梁燕媚, 谢中兴. 不同的存放温度及时间下网织红细胞计数结果的分析[J]. 中国实用医药, 2012, 7(20): 106-107.

- PAN G X, LIANG Y M, XIE Z X. Analysis of reticulocyte count results under different storage temperatures and times [J]. China Practical Medical, 2012, 7(20): 106-107.

- [2] 谭斌,王立新,张雄云,等.利用实验室信息系统加强输血科管理[J]. 华西医学, 2010, 25(7): 1352-1354.
TAN B, WANG L X, ZHANG X Y, et al. Strengthening blood transfusion management with laboratory information systems[J]. West China Medical Journal, 2010, 25(7): 1352-1354.
- [3] 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 Z, TAN J P. Simulation analysis of the high-speed spiral blood pump based on the shear injury principle of blood[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(1): 47-50.
- [4] 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 Z, TAN J P. Simulation analysis of high-speed spiral blood pump based on impacting injury principle of blood[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(1): 135-142.
- [5] TAMAGAWA M, YOSHIDA K, AKAMATSU T. Effects of shock waves in living tissue cell (red blood cell) (damage of red blood cell and mathematical analysis of deformation model using spherical shell filled with liquid)[J]. Journal of the Society of Mechanical Engineers of Japan: Part B, 1996, 62 (594): 613-619.
- [6] SOETANTO K, KOBAYASHI M, OKUJIMA M. Fundamental examination of cattle red blood cells damage with ultrasound exposure microscopic system (UEMS)[J]. Jpn J Appl Phys Pt 1, 1998, 37(5B): 3070-3073.
- [7] 徐胜春,范恩勇.不同时间及温度保存血液对红细胞功能的影响研究[J]. 国际检验医学杂志, 2016, 37(21): 3069-3071.
XU S C, FAN E Y. Study on the effect of blood preservation on red blood cell function at different time and temperature[J]. International Journal of Laboratory Medicine, 2016, 37(21): 3069-3071.
- [8] 李明辉,林荣路.血液不同时间及温度保存对红细胞功能的影响[J]. 中国误诊学杂志, 2011, 11(29): 7229-7230.
LI M H, LIN R L. Effects of blood preservation at different times and temperatures on red blood cell function [J]. Chinese Journal of Misdiagnostics, 2011, 11(29): 7229-7230.
- [9] 严秀娟,吴才良,蒋清波,等.温度控制与血液质量的关系探讨[J]. 中国输血杂志, 2003, 16(5): 320-322.
YAN X J, WU C L, JIANG Q B, et al. Relationship between temperature control and blood quality [J]. Chinese Journal of Blood Transfusion, 2003, 16(5): 320-322.
- [10] 胡及雨,云忠,向闯,等.轴流血泵电机温度场分析及其对血液和组织的损伤[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(12): 1254-1260.
HU J Y, YUN Z, XIANG C, et al. Temperature field analysis of axial blood pump motor and its damage to blood and tissue[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(12): 1254-1260.
- [11] 李伟力,陈婷婷,曲凤波,等.高压永磁同步电动机实心转子三维温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 55-60.
LI W L, CHEN T T, QU F B, et al. Analysis on solid rotor 3-D temperature field in high voltage PMSM [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(18): 55-60.
- [12] OKORO O I. Steady and transient states thermal analysis of a 7.5 kW squirrel-cage induction machine at rated-load operation[J]. IEEE Trans Energy Conver, 2005, 20(4): 730-736.
- [13] 金春华. 机能实验学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 307-309.
JIN C H. Functional laboratory science[M]. Beijing: science press, 2006: 307-309.
- [14] 高兴亚,汪晖. 机能实验学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 126-127.
GAO X Y, WANG H. Functional laboratory science[M]. Beijing: Science Press, 2001: 126-127.
- [15] 肖家思,佟振清. 生理学实验指导[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1993: 55-56.
XIAO J S, TONG Z Q. Physiological experiment instruction [M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 1993: 55-56.
- [16] 王维维,袁向亮,费奇力,等.流式细胞术快速测定红细胞渗透脆性的应用[J]. 检验医学, 2016, 31(10): 911-916.
WANG W W, YUAN X L, FEI Q L, et al. Application of flow cytometry for rapid determination of erythrocyte osmotic brittleness[J]. Journal of Laboratory Medicine, 2016, 31(10): 911-916.
- [17] UTOH J, HARASAKI H. Damage to erythrocytes from long-term heat stress[J]. Clin Sci (Lond), 1992, 82(1): 9-11.
- [18] 吴正洁. 温度对人红细胞及血红蛋白结构功能的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2007: 24-49.
WU Z J. Effect of temperature on the structure and function of human red blood cells and hemoglobin [D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2007: 24-49.
- [19] 龚中良. 微型植入式血泵血液自润滑机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006: 55-58.
GONG Z L. Study on blood self-lubrication mechanism of micro-implanted blood pump [D]. Changsha: Central South University, 2006: 55-58.
- [20] 蔡超. 磁-液双悬浮轴流血泵系统设计与分析[D]. 长沙: 中南大学, 2016.
CAI C. Design and analysis of magnetic-liquid dual-suspension bleeding pump system [D]. Changsha: Central South University, 2016.
- (编辑:薛泽玲)