

轴流血泵电机温度场分析及其对血液和组织的损伤

胡及雨, 云忠, 向闯, 彭舸
中南大学机电工程学院, 长沙 410083

【摘要】目的:通过对轴流式血泵电机进行温度场仿真分析, 得到其对血液和组织的损伤情况, 并探讨降低血液和组织温升的策略。**方法:**利用ANSYS对电机进行瞬态温度场仿真, 利用FLUENT建立血液动态温度场模型, 对血液和组织的温度变化进行研究。**结果:**根据电机运转稳定时的温度分布云图, 可知定子绕组和定子铁芯的发热温度较高; 通过分析下泵壳和上泵壳的温度场, 得到血液和组织的温升情况; 根据血液动态温度场模型, 得到血液在流动过程中的温度变化规律。**结论:**可以通过改变电流大小来降低血液和组织的温升, 当电流值为0.9 A以下时, 温升对血液和组织不造成损伤。此分析结果可为临床应用和血泵优化提供理论基础。

【关键词】血液; 组织; 轴流式血泵; 温度场分析; 损伤

【中图分类号】R318.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)12-1254-07

Temperature field analysis for axial flow blood pump motor and damages of increased motor temperature to blood and tissue

HU Jiyu, YUN Zhong, XIANG Chuang, PENG Ge

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

Abstract: Objective To analyze the damages of increased temperatures around an axial flow blood pump motor to blood and tissue by simulating the temperature field of the motor and explore the countermeasures. **Methods** By simulating the transient temperature field of the motor using ANSYS and constructing a dynamic blood temperature model with FLUENT, we analyzed the temperature changes of the blood and tissue around the axial flow blood pump motor. **Results** The temperature distribution cloud map when the motor ran stably revealed relatively high temperatures on the stator winding and stator. The temperature rises of the blood and tissue were obtained by analyzing the temperature fields of the bottom and top shells of the motor. The pattern of blood temperature variation during motor-driven blood flow was derived from the dynamic blood temperature model. **Conclusion** The temperature rise of the blood and tissue around the axial flow blood pump motor can be reduced by adjusting the current, and the temperature rise does not cause detrimental effects on the blood and tissue when the current is maintained below 0.9 A. This finding provides a theoretical basis for clinical application and parameter optimization of axial flow blood pump. **Keywords:** blood; tissue; axial flow blood pump; temperature field analysis; damage

前言

由于社会结构日趋老龄化以及饮食环境的影响, 心血管疾病的发生越来越频繁。无论是心脏病患者, 还是生物工作者和临床医生都渴望能运用机械性血泵

暂时或永久代替自然心脏维持机体血液循环, 挽救心脏病人的生命, 这在临床的需求十分迫切。由于血泵植入人体内, 当血泵工作运转时, 其产生的热量会对血液及周围组织细胞产生影响。过高的温度会影响血泵电机内部绝缘材料的寿命和电机运行的稳定性, 更会提高血细胞溶血的程度。血泵电机温度场的研究分析尤为重要。研究证明, 人体红细胞温度超过48℃, 溶血程度会大大提高^[1]; 人体组织内植入人工装置温度达到41℃时, 会对其周围组织产生损伤, 可能导致植入部位引发炎症^[2-3]; 如果温度超过42℃则会导致周围细胞组织坏死^[4]; 当血液温度高于40℃时, 血红蛋白的携氧能力会降低, 甚至其结构功能会遭受破坏^[5]。

【收稿日期】2017-07-27

【基金项目】国家自然科学基金(31670999, 51475477); 浙江省重中之重学科开放基金

【作者简介】胡及雨, 硕士研究生, 研究方向: 流体机械及温度场分析, E-mail: 420799941@qq.com

【通信作者】云忠, 教授, 博士生导师, 研究方向: 生物关联性机械系统设计及仿真研究, E-mail: yunzhong@126.com

目前,李伟力等^[6]和Okoro^[7]利用有限元法对电机进行了温度场分析,但是在微机械电机温度场方面的分析较少;Tamagawa等^[8]和Soetanto等^[9]分析了超声波对红细胞的破坏情况,云忠等^[10-11]提出了血液机械损伤概念,分析了血细胞由于碰撞、剪切等而破裂的机理,但均忽略了轴流式血泵的温度场对血液及组织的损伤。本研究对微型血泵电机进行了温度场仿真,并建立了血液动态温度场模型,通过分析电机的温度分布以及温升,得到其对血液和组织的损伤。

1 血泵电机内部损耗

血泵电机内部损耗主要有3部分,分别是定子铁芯损耗、永磁转子损耗以及铜线绕组损耗。

1.1 定子铁芯损耗

血泵电机定子铁芯损耗主要是磁滞损耗、经典涡流损耗以及异常涡流损耗。根据铁耗的类别,可以将血泵电机定子铁芯内部损耗用以下表达式给出:

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e \quad (1)$$

其中, P_h 为磁滞损耗(W); P_c 为经典涡流损耗(W); P_e 为异常涡流损耗(W)。

$$\begin{cases} P_h = k_h f B_m^\alpha \\ P_c = k_c f^2 B_m^2 \\ P_e = k_e f^{1.5} B_m^{1.5} \end{cases} \quad (2)$$

其中, B_m 为磁密幅值(T); α 为Sweinmetz系数; k_h 为磁滞损耗系数; k_c 为经典涡流损耗系数; k_e 为异常涡流损耗系数; f 为磁场交变频率。

1.2 永磁转子损耗

血泵电机永磁转子损耗主要是涡流损耗。永磁转子位于泵体内,散热率低,永磁转子的损耗直接使得血泵叶轮温度升高,而叶轮直接与血液接触,温度过高会直接影响血细胞的性能。永磁转子涡流损耗的表达式:

$$P_r = \int_V \sigma E^2 dV = \int_V \frac{J^2}{\sigma} dV \quad (3)$$

其中, P_r 为永磁转子损耗; σ 为材料的电导率; E 为电场强度; J 为涡流密度; V 为损耗空间区域积分。

1.3 铜线绕组损耗

铜线绕组损耗是相电流在导线电阻上造成的损耗,表达式为:

$$P_{Cu} = m I^2 R \quad (4)$$

其中, m 为电机的相数; I 为绕组相电流的有效值(A); R 为每相绕组的有效电阻值(Ω)。

2 血泵电机温度场参数计算

2.1 血泵电机求解域模型的建立

由于是轴向电机,其结构沿轴向中心面对称,所以现选取轴向1/2模型进行分析;又因在整个圆周方向上是均匀分布的,所以选取周向的1/3模型即可。其简化模型如图1所示。

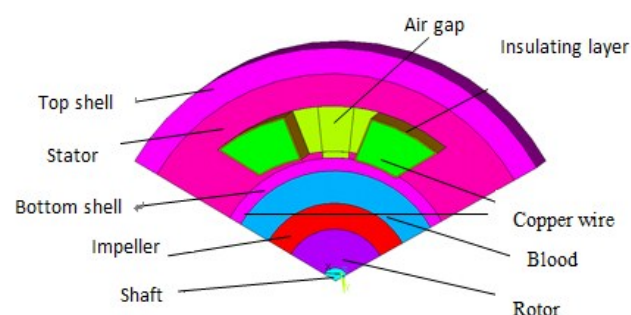


图1 血泵电机简化模型

Fig.1 A simplified model of the blood pump motor

血泵电机在运行时,其内部温度是瞬态变化的。为了求解方便,现对血泵电机的热模型做以下假设:(1)血泵电机内部的温度场沿着周向和轴向均是连续的;(2)不计定子绕组的集肤效应;(3)不考虑血泵电机辐射方式的散热。

血泵电机内部主要以传导和对流这两种传热形式,在血泵电机工作时,可以将其热量传递过程的求解域简化为以下表达式^[12]:

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = c \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_1} = 0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = -\alpha (T - T_e) \end{cases} \quad (5)$$

其中, T 为温度($^{\circ}\text{C}$); λ 为电机各部件材料的导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$]; c 为材料的比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$]; ρ 为材料的密度 (kg/m^3); τ 为时间变量(s); S_1 为血泵电机的绝热边界面; S_2 为血泵电机的散热边界面; T_e 为 S_2 面周围环境介质的温度($^{\circ}\text{C}$); α 为 S_2 面的对流换热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$]。

式(5)中,第一个方程表示导热边界条件,可以通过血泵电机各部分材料导热系数来确定;第二个方程表示绝热条件,图1中血泵模型的两侧面、背面以及下泵壳端面、叶轮端面、转子端面和转轴端面均为绝热面;第三个方程表示对流换热条件,其中对流换热面分别是:上泵壳顶面和端面、定子铁芯端面、定子绕组外表面、下泵壳内表面和叶轮的上表面。

2.2 血泵电机的内热源(生热率)计算

内热源是单位时间内单位体积中产生或消耗的热能,单位为 W/m^3 。由此可得生热率 Q 的计算式:

$$Q = \frac{W_q}{V} \quad (6)$$

其中, W_q 为血泵电机各部分热损耗; V 为血泵电机各部分有效体积。

将式(1)~(4)中计算出的损耗值带入式(6)中,得到定子铁芯、永磁转子和定子绕组的生热率。

2.3 定子绕组绝缘层的等效导热系数计算

由于定子槽内导线的不规则排布,使得定子槽内的温度分析变得复杂,而且难以保证仿真结果的精度。因此,为了更好地提高计算精度,现对定子绕组进行等效处理,做如下假设:(1)定子绕组每根导线的绝缘层涂抹均匀;(2)定子绕组的浸渍漆完全填充;(3)槽内各导线均匀排布,温差忽略不计。基于以上假设,可以把定子绕组模型等效成如图1所示,由铜线和绝缘层组成。

由于绝缘层是含有多种元素的复杂材料组合而成,对定子绕组绝缘层的平均导热系数可用如下公式进行求解^[13]:

$$\lambda_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (7)$$

其中, λ_i 为绝缘层中每种材料的平均导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$; δ_i 为每种材料的等效厚度(m)。

2.4 密闭气隙导热系数计算

从血泵整体来看,血泵电机定子与泵壳之前存在密闭空气,气体导热系数与温度的关系可用如下公式表达:

$$\lambda_t = \lambda_0 \left(\frac{T}{273} \right)^n \quad (8)$$

其中, λ_t 为 t ℃时的气体导热系数(压强为0.1 MPa); λ_0 为0℃时的气体导热系数(压强为0.1 MPa); n 为空气常数。

2.5 对流换热系数计算

血泵电机中,上泵壳、定子铁芯、定子绕组有与空气直接接触的面,忽略表面几何尺寸等因素的影响,对流换热系数仅由空气流速决定,两者的关系如下:

$$\alpha = \alpha_0 (1 + k_0 v) \quad (9)$$

其中, α_0 为发热表面在平静空气中的对流换热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$; v 为空气流速(m/s); k_0 为气流吹拂效率系数。

血泵电机中,下泵壳和叶轮与流动的血液直接接触,其对流换热系数如下式:

$$\alpha' = 1.86 \frac{\lambda}{d} \left(R_e P_r \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (10)$$

其中, R_e 为雷诺准数; P_r 为普兰特准数; d 为管内径(m); λ 为导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$; l 为管长度(m); μ 、 μ_w 分别为流体在入口处与出口处的粘度。

根据式(7)、(8)对于绝缘层和气隙的等效导热系数的计算,结合相关手册和资料,血泵电机各部分的材料及其参数如表1所示。

根据以上计算结果,采用ANSYS有限元软件对血泵电机进行建模并求解,单元类型为SOLID278。根据表1里的材料特性,对血泵电机各部分进行材料参数设置。由式(1)~(4)中损耗的计算结果,在划分网格时损耗较多的部分网格划分较密,反之则网格划分相对粗糙一些。对永磁转子、定子铁芯以及铜线施加体载荷(生热率),由式(6)计算出的生热率来确定。再根据式(9)、(10)计算出的对流换热系数分别施加到换热面,施加环境温度为37℃。最后对模

表1 血泵电机的材料特性参数

Tab.1 Parameters of the material characteristics of the blood pump motor

Part	Material	Thermal conductivity ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)	Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)
Shaft	Si3N4 ceram	12.560 0	3 440.00	710
Permanent magnet rotor	Nd-Fe-B N52	6.160 0	7 885.00	430
Impeller	Ti4	22.000 0	4 500.00	520
Blood	-	0.547 1	1 050.00	4 187
Stator	DW310-35	21.000 0	7 650.00	446
Copper wire	Copper	385.000 0	8 933.00	385
Insulating layer	Impregnating varnish	0.217 0	1 000.00	1 805
Shell of pump	Titanium alloy	6.800 0	4 510.00	611
Air gap	Air	0.027 0	1.29	1 007

型进行求解,得到血泵电机的整体温度分布。

3 血泵电机温度场结果分析

根据上文参数的确定以及仿真,可以得到血泵电机在稳定状态下,血泵电机整体温度分布云图如图2所示。

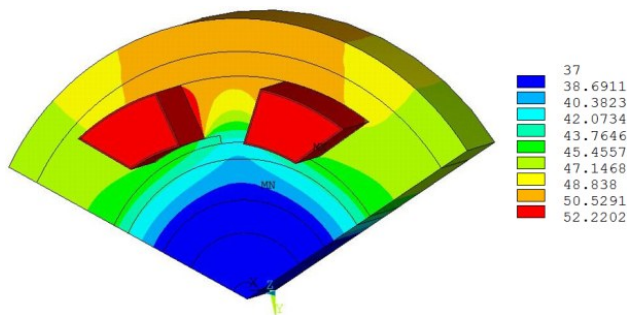


图2 血泵电机额定运行时三维温度场分布

Fig.2 Three-dimensional temperature field distribution when the blood pump motor runs in rated operating state

根据血泵电机整体温度场分布云图可知,温升最高的地方是在定子绕组部分,其次是定子铁芯部分,这是由于这两个部分的损耗较高造成的。

血泵电机运行过程中各主要部分的最高温度节点的温升曲线如图3所示。

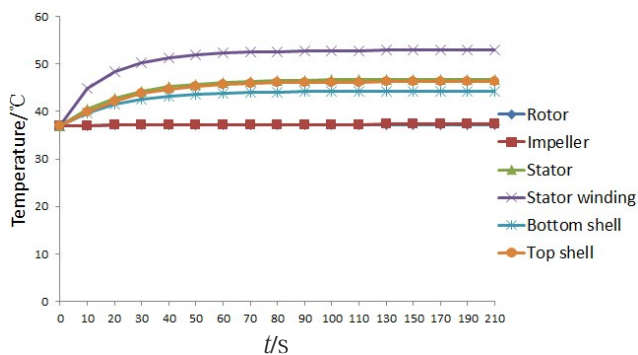


图3 电机各主要部分节点温升

Fig.3 Temperature rise of different parts of the motor

结合图2和图3的结果可知,血泵电机工作处于稳点状态时,永磁转子和叶轮的温升曲线基本重合,从37.00℃上升到37.24℃,温升只有0.24℃,这是由于永磁转子涡流损耗很小,所以永磁转子的损耗对血液和组织的影响可以忽略不计。稳定状态下,定子绕组温度达到52.22℃,温升有15.22℃;定子铁芯温度达到46.68℃,温升有9.68℃,这两个部分的发热远远大于永磁转子的发热,故这也对血液和细胞组织的温度变化造成了间接影响。

由于下泵壳与血液直接接触,所以其温度变化会对血液温升造成直接的影响。下泵壳温度分布云图以及与血液接触面周向和轴向的温度变化曲线如图4所示。

由图4可知,下泵壳温度随着径向长度的增大而上升,与血液接触面的温度分布为中间低,两边高,最高温度达42.33℃。因为血液与下泵壳内侧面直接接触,所以在接触面上,血液温度分布与下泵壳近似,血液最高温度达到42.33℃,温升为5.33℃,此温度会对血液造成损伤,长时间处于这个温度,血液中血红蛋白的携氧能力会大幅度下降,并且其结构功能也会遭到高温的破坏,红细胞的溶血程度会大大增加。造成下泵壳温升过高的原因是其材料的导热系数太小,传热能力太差,定子绕组和定子铁芯发热较大。

为了更进一步得到血液在流动过程中的温度变化云图,本研究利用FLUENT仿真软件通过热流固耦合的方式,建立了血液流动动态模型。将电机温度场分析结果导入FLUNT软件中,并对血液设置入口速度以及初始温度,由于液体速度是变化的,所以选择轴向整体模型进行仿真分析,得到血液动态温度云图,如图5所示。

根据图5,在周向方向上,血液温度分布规律是中间低,两边高,在血液的入口端和出口端温度相对较低,这是因为热源的位置导致了血液周向温度的分布情况。在径向方向上,越靠近下泵壳的部分,血液温度越高,并且会产生一定的温度梯度,而靠近叶轮的部分,血液温度几乎为37℃。因为靠近下泵壳部分离主要热源的位置更近,热量传递的温差较小,所以温度梯度也较小。根据上文分析可知,永磁转子和叶轮的温升非常小,所以靠近叶轮部分的血液温度几乎没有变化。在轴向方向上,在入口端任意取一血液质点,其沿速度方向上的温度变化如图5所示,血液温度随流动的距离先上升,再稳定,最后下降。血液刚接触下泵壳时,由于温度差而产生热量的传递,使得血液温度持续上升,当到达一定的温度时,温度处于稳定状态,因为此时温度差几乎零,最后呈现下降的趋势,这是由于下泵壳的温度分布会直接影响到血液温度分布,而此时温度下降速度比刚接触下泵壳温度上升速度较为缓慢,这是由温度差较小导致的。

由于上泵壳与细胞组织距离很近,所以上泵壳的温度大小对细胞组织温升造成直接的影响,图6为上泵壳温度分布云图和其周向温度变化曲线。

由图6可知,上泵壳的温度分布为中间高,两端

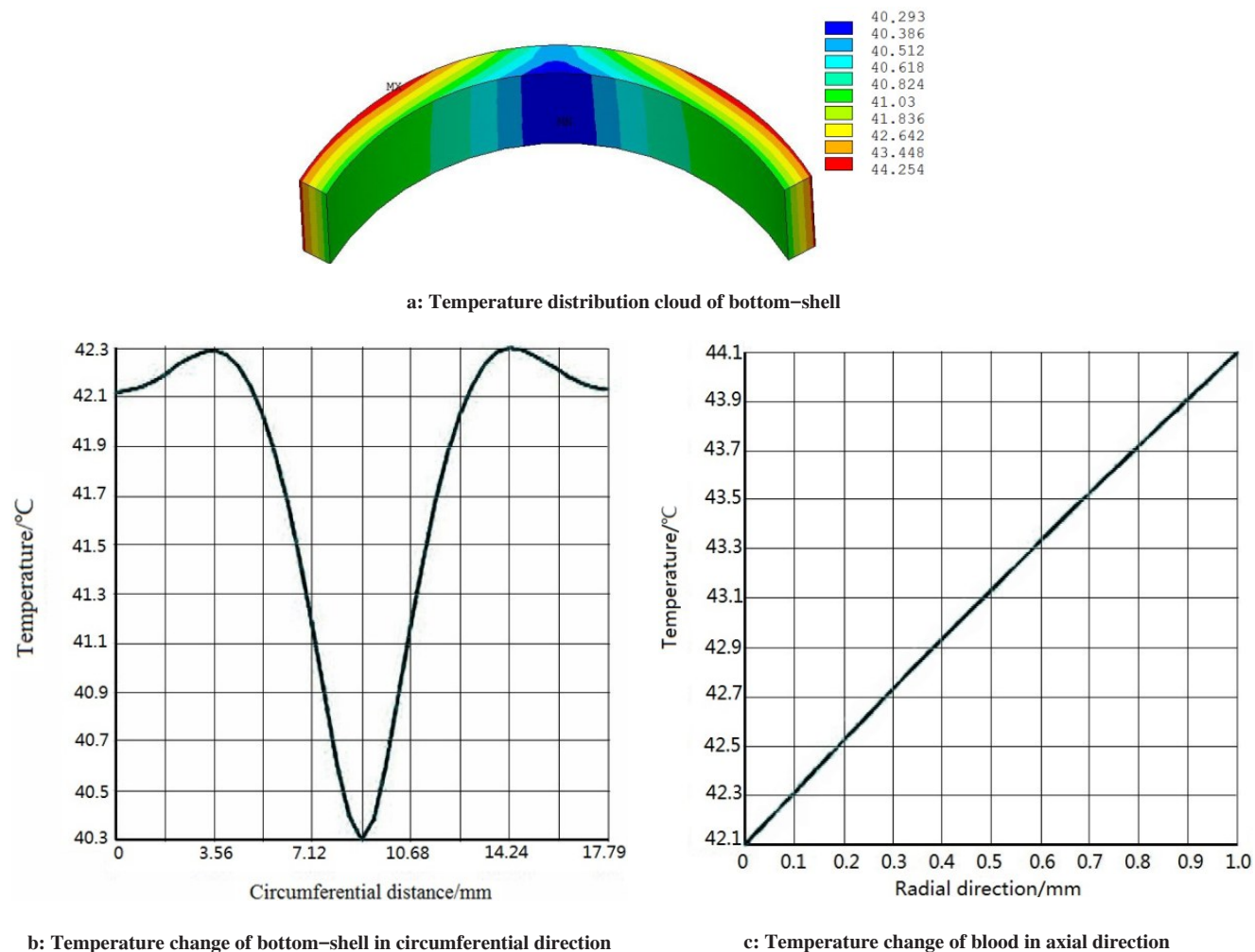


图4 下泵壳温度场分布图

Fig.4 Temperature field distribution of bottom-shell

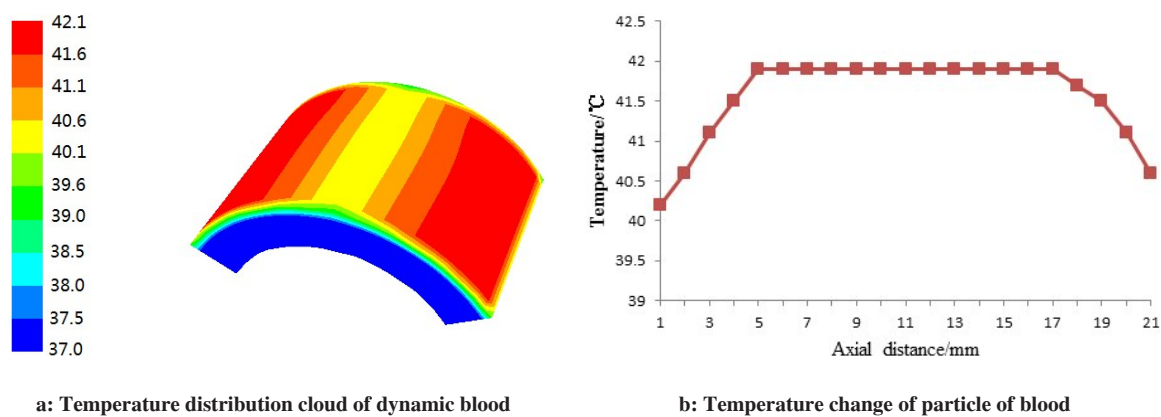


图5 血液温度场分布图

Fig.5 Temperature field distribution of the blood

低,最高温度达到45.94℃,温升有8.94℃,其中最低温度也有42.31℃,这是由于上泵壳与定子铁芯和定子绕组这两个主要发热源距离较近,自身的导热系数不高,散热能力差,故温升较大。而血泵周围细胞组织的温度变化直接受到上泵壳的温升大小的影响。若周围细胞组织达到41℃时,组织会有损伤,并

可能引发炎症;当周围细胞组织长时间保持42℃或以上温度时,细胞组织则会坏死。

通过以上仿真和得出的结果可以发现,血泵电机温度过高,不利于人体血液和组织功能的正常运作,故需对血泵电机的驱动系统做出一定的优化来降低温升。结合式(1)、(2)、(4)、(6),为了降低温

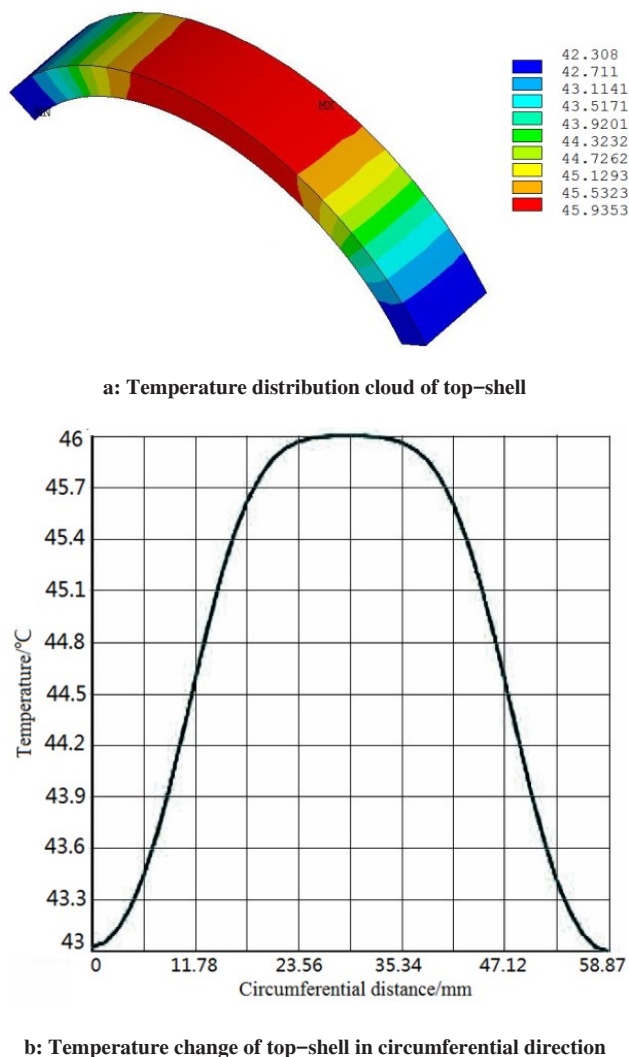


图6 上泵壳温度场分布图

Fig.6 Temperature field distribution of top-shell

升,在驱动力矩允许的条件下,可以通过改变铜线电流来分析其对血泵电机温度分布的影响。

分析血泵电机各部分温度随着铜线电流大小的变化如图7所示。

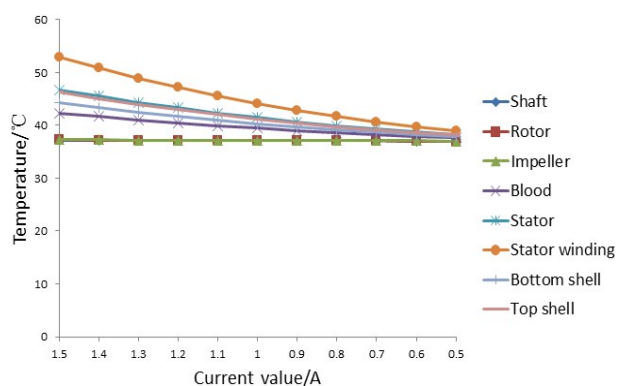


图7 血泵电机各部分温度与电流的关系曲线

Fig.7 Current-temperature curves of different parts of the blood pump motor

由曲线图可知,转轴、永磁转子、叶轮这3部分温度一直保持在40℃以下,无明显变化。其他部分的温度随电流的减少有明显的下降趋势,当电流值为1.1 A时,血液温度已下降到40℃以下;当电流值为0.8 A时,血液和上泵壳的温度都已下降到40℃以下;当电流值为0.6 A以下时,血泵电机各部分温度均已下降至40℃以下。这是因为随着电流值的减少,定子绕组的损耗也会减少,进而发热也随之减少。结合图6和图7,可以看出改变电流得到温升下降的效果比改变定子铁芯外径的效果更好。根据文献[14-15],当电流值为0.6 A时,转速可达10 000 r/min,此为血泵在人体内的正常运转速度。调节电流值为0.9 A以下时,血液和细胞组织的温度都在40℃以下,在其温升允许范围内,血泵电机可以长期保持这个温度运作。

4 结论

(1)经过上述的分析研究可发现血泵电机主要发热部分是在定子绕组和定子铁芯处,永磁转子中涡流损耗所产生的热量与之相比可忽略不计。(2)通过血液动态模型的建立,可以得到血液在流动过程中温度的分布以及变化情况,为血液损伤程度的研究提供了一定的基础。(3)血液温升主要由定子绕组和定子铁芯这两部分的损耗造成,泵壳温升会影响人体组织的温度,温度过高会对细胞和组织产生损伤,影响其功能,甚至会引发炎症,所以血泵电机的发热还需要得到进一步的优化。(4)在保证驱动力矩允许的范围内,可以通过降低定子绕组的电流值,减少线圈匝数,或者选用导热系数较好的泵壳材料,从而降低血液温升。

【参考文献】

- [1] 罗纪盛,左大珏,孙雪琴,等. 高温对人红细胞的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1988(3): 105-112.
LUO J S, ZUO D J, SUN X Q, et al. The effect of hyperthermia on human erythrocyte [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1988(3): 105-112.
- [2] PASHA R, BENAVIDES M, KOTTKE-MARCHANT K, et al. Reduced expression of platelet surface glycoprotein receptor IIb/IIIa at hyperthermic temperatures[J]. Lab Invest, 1995, 73(3): 403-408.
- [3] HERSHKOVIZ R, ALON R, MEKORI Y. Heat-stressed CD4⁺ T lymphocytes: differential modulations of adhesiveness to extracellular matrix glycoproteins, proliferative responses and tumour necrosis factor- α secretion[J]. Immunology, 1993, 79(2): 241-247.
- [4] SEESE T M, HARASAKI H, SAIDEL G M, et al. Characterization of tissue morphology, angiogenesis, and temperature in the adaptive response of muscle tissue to chronic heating[J]. Lab Invest, 1998, 78(12): 1553-1562.

- [5] 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.
WU Z J. The effect of temperature on the structure and function of human erythrocyte and hemoglobin[D]. Guangzhou: Jinan University, 2007.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 玉川雅章, 吉田惠一郎, 赤松映明. 衝撃波の生体組織細胞(赤血球)に及ぼす影響(赤血球損傷と球殻内部液体モデルによる数理解析)[J]. 日本機械学会論文集: B編, 1996, 62(594): 613-619.
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]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Series B, 1996, 62(594): 613-619.
- [9] 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.
- [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 Z, TAN J P. Simulation analysis of the high-speed spiral blood pump based on the shear injure principle of blood [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sun Yat-Seni, 2008, 47(1): 47-50.
- [11] 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 injure principle of blood[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(1): 135-142.
- [12] 江善林. 高速永磁同步电机的损耗分析与温度场计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 12-19.
JIANG S L. High-speed permanent magnet synchronous motor loss analysis and temperature field calculation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 12-19.
- [13] 黄旭珍. 高功率密度永磁电机的损耗及温升特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 10-24.
HUANG X Z. Research on characteristic of the loss and temperature rise of permanent magnet motor with high power density[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 10-24.
- [14] 许焰. 大间隙磁力传动系统驱动性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
XU Y. Research on the space magnetic field and driving torque of large gap magnetic drive system for permanent magnetic axial blood pump [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [15] 刘志坚, 谭建平, 许焰, 等. 大间隙磁力驱动血泵动力学特性研究[J]. 机械设计, 2010, 27(9): 56-59.
LIU Z J, TAN J P, XU Y, et al. Study on dynamic characteristics of blood pump driven by large gap magnetic force [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(9): 56-59.

(编辑: 谭斯允)