

李帅麟,文泽军,胡佳,等. 叶片出口安装角对阿基米德螺旋形介入式血泵溶血指数的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(4):50-55. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.04.006

LI S L, WEN Z J, HU J, et al. On the Influence of Blade Outlet Installation Angle on Hemolysis Index of Archimedean Spiral Implantable Blood Pump [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(4): 50-55. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.04.006

叶片出口安装角对阿基米德螺旋形 介入式血泵溶血指数的影响

李帅麟¹, 文泽军^{1*}, 胡佳², 翁孟坤², 孟鑫¹

(1.湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201;2.深圳万至达电机制造有限公司,广东 深圳 518106)

摘要:针对介入式血泵在运行过程中容易造成溶血指数偏高等问题,开展基于CFD的叶片出口安装角对阿基米德螺旋形介入式血泵溶血指数的影响研究.首先,基于计算流体力学,运用Fluent对血泵内的三维不可压湍流场进行数值模拟,分析叶片出口安装角对血泵内血液流速和平均压力的影响;其次,运用Lagrange溶血估算方法,获得红细胞在血泵内的流动迹线和参数;最后,构建平均溶血指数估算模型,计算并分析不同叶片出口安装角对介入式血泵溶血指数的影响.结果表明:叶片出口安装角等于85°时的阿基米德螺旋形介入式血泵的剪应力分布相对较好,平均溶血指数为0.001 337%,有较好的溶血性能.研究成果为介入式血泵结构参数优化提供一定的理论支持.

关键词:介入式血泵;溶血性能估算;阿基米德螺旋泵;计算流体力学

中图分类号:TH443

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)04-0050-06

On the Influence of Blade Outlet Installation Angle on Hemolysis Index of Archimedean Spiral Implantable Blood Pump

LI Shuailin¹, WEN Zejun¹, HU Jia², WENG Mengkun², MENG Xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Shenzhen Once Top Manufacturing Company Limited, Shenzhen 518106, China)

Abstract: To address the issue of high hemolysis index that often occurs during the operation of interventional blood pumps, this study is conducted on the influence of the blade outlet installation angle on the hemolysis index of Archimedean spiral interventional blood pumps based on CFD. Firstly, using Fluent, the three-dimensional incompressible turbulent flow field inside the blood pump is numerically simulated based on computational fluid dynamics to analyze the impact of the blade outlet installation angle on the blood flow velocity and average pressure inside the blood pump. Secondly, the Lagrange hemolysis estimation method is employed to obtain the flow trajectories and parameters of red blood cells inside the blood pump. Finally, an average hemolysis index estimation model is established to calculate and analyze the influence of different blade outlet installation angles on the hemolysis index of interventional blood pumps. The results show that when the blade outlet installation angle is 85°, the Archimedean spiral interventional blood pump has a relatively better shear stress distribution,

收稿日期:2024-05-31

基金项目:深圳市科技计划技术攻关重点项目资助(JSGG20220831094400001)

*通信作者, E-mail: zjwen732@163.com

with an average hemolysis index of 0.001 337%, indicating a better hemolysis performance. This provides certain theoretical support for the optimization of structural parameters of interventional blood pumps.

Keywords: interventional blood pump; hemolytic performance estimation; Archimedes screw pump; computational fluid dynamics

心力衰竭是一种严重危及生命的临床综合征.介入式血泵作为心力衰竭循环辅助装置,在成像设备的引导和监测下,通过微创手术快速植入并送至跨瓣位置,使导管泵远端的开口处位于左心室内,轴流泵部分以及轴流泵近端的流出口位于升主动脉或者主动脉弓内,当轴流泵开始旋转后,轴流泵从远端开口处将心室内的血液通过近端的流出口排入主动脉内,从而实现循环辅助的功能^[1].由于介入式血泵的体积很小,故血泵叶轮需要足够高的转速来满足临床手术中人体对血液压力和流量的需求,而叶轮转速过高导致血液中流体剪切应力过大,极大地增加溶血和血栓形成的风险.因此,深入分析剪切应力产生原因,有效降低血泵溶血指数,提高溶血性能,是目前介入式血泵临床应用领域亟待研究的问题.

近年来,国内外学者围绕介入式血泵溶血性能开展了大量的研究,并取得了阶段性的研究成果.封志刚等^[2]研究了叶轮叶片数、叶片角对溶血性能的影响,得到了一种叶片数为6、叶片角为30°的溶血性能较好的对数螺旋线叶轮;LIU等^[3]采用传统方法和三维流线型方法,进行叶轮设计,通过水力实验和溶血实验,验证了叶轮的直径和长度对血泵的水力性能和溶血性能有明显的影响;王芳群等^[4]对一种经皮导管血泵进行了设计,运用CFD方法对导管血泵流场进行了数值仿真,并结合血泵切应力和曝光时间对人工心脏的溶血性能进行了分析;YUN等^[5]采用CFD方法对介入式血泵的4种流出结构进行了数值模拟和实验验证,证明了无后导叶搭配弯桥的叶轮设计方案的血泵剪应力分布相对较好,溶血指数较低;荆腾等^[6]设计了一种折边不等间距叶轮,采用CFD方法进行血泵内部流场的数值模拟,证明了折边不等间距叶轮可以降低红细胞破损概率,降低溶血和血栓发生的可能性.综上所述,目前大多数学者通过数值模拟或溶血实验,分析研究血泵溶血指数随叶轮结构几何参数变化规律,通过参数优化来降低血泵溶血指数,提高溶血性能.然而,关于阿基米德螺旋形血泵叶轮结构几何参数对溶血指数的影响鲜有研究.事实上,阿基米德螺旋形叶片是顺着阿基米德螺旋沿主轴轴向逐渐上升,呈空间螺旋形状,为血液流动提供渐进式的流体加速^[7],从而减小血液在叶片表面的剪切应力,降低血细胞损伤程度.

为此,本文基于计算流体力学,运用Fluent对血泵内的三维不可压湍流流场进行数值模拟,分析叶片出口安装角对血泵内血液流速和平均压力的影响;运用Lagrange溶血估算方法,获得红细胞在血泵内的流动迹线和参数,建立平均溶血指数估算模型,分析不同叶片出口安装角对介入式血泵溶血指数的影响.为介入式血泵结构参数优化提供一定的理论支持.

1 计算模型与数值模拟

1.1 阿基米德螺旋形介入式血泵描述与叶片出口安装角设置

微电机驱动阿基米德螺旋形介入式血泵由叶轮和泵壳等组成,如图1所示.

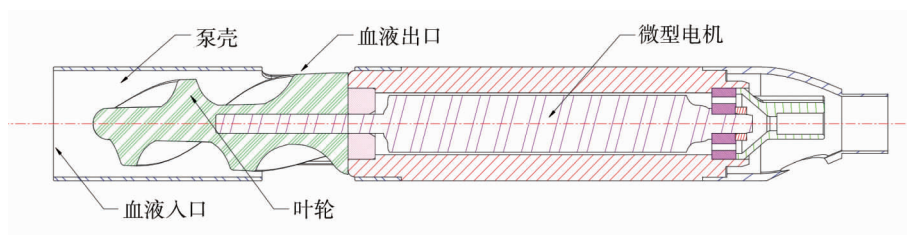
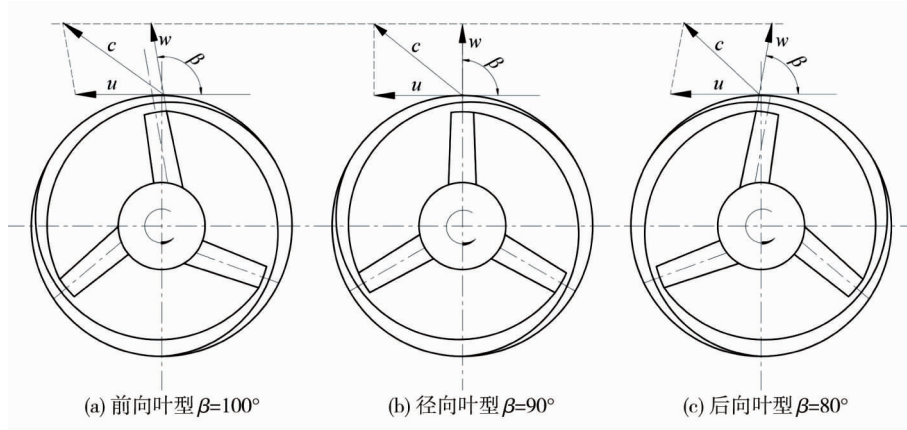


图1 微电机驱动阿基米德螺旋形血泵

将出口安装角 β 为80°,85°,90°,95°,100°的叶片与叶轮主轴组合,得到5种出口安装角叶片的血泵模型.前向叶型 $\beta=100^\circ$ 的叶片、径向叶型 $\beta=90^\circ$ 的叶片、后向叶型 $\beta=80^\circ$ 的叶片示意如图2所示,其中, u 为叶片切向转速, w 为相对速度.

图2 不同出口安装角 β 叶片

1.2 湍流模型

采用可扩展壁面函数的 Standard k-epsilon 模型,湍流动能 k 和湍流耗散率 ω 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega. \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; k 为湍流动能; ω 为湍流耗散率; G_k 为由平均速度梯度产生的湍动能.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \quad (3)$$

式中: μ_t 为湍流黏性系数; u_i 是速度分量; τ_{ij} 为应力张量的分量.从式(3)可以看出:若流体内剪切应力越大则 G_k 越大,湍动能产生的越多.

Γ_k 与 Γ_ω 为

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}; \quad (4)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}. \quad (5)$$

式中: μ 为动力学黏度; σ_k, σ_ω 为 k-e 方程湍流能量特朗普常数.

1.3 网格划分

采用 Fluent-meshing 中的 Poly-Hexcore 方法建立血泵流体域网格,近壁面采用多面体网格填充,核心区采用六面体网格填充,复杂表面设置精细化网格,其入口直径 D_1 为 4.48 mm,出口直径 D_2 为 25.00 mm,如图 3 和图 4 所示

流体域的网格无关性验证结果如图 5 所示.

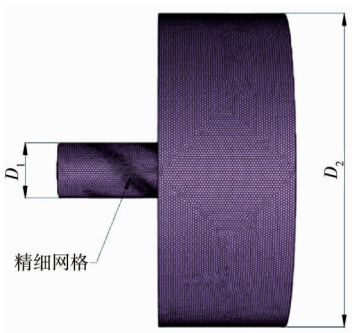


图3 血泵面网格

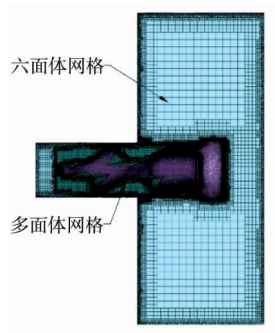


图4 血泵体网格

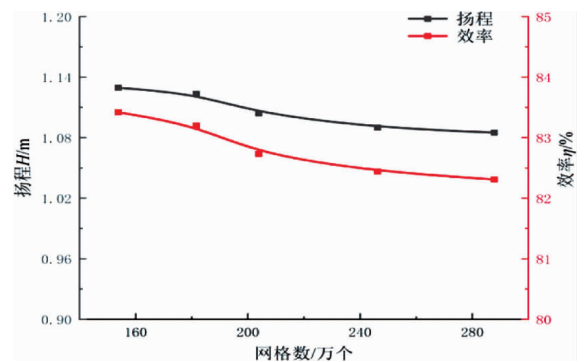


图5 网格无关性验证结果

由图5可知:当网格节点总数超过180万个,且叶轮区域的网格占42.59%时,血泵的扬程与效率逐渐趋于稳定.因此,设定血泵模型的网格总数约为200万个.

1.4 数值模拟

血液视为不可压缩的牛顿流体,密度 $\rho_1 = 1\,050\text{ kg/m}^3$,动力黏度为 $\mu_1 = 0.004\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$.血泵外部压力设为100 mmHg,流体域入口设置为Mass Flow入口,其值为0.08 kg/s,出口设置为压力出口,其值为13 300 Pa.叶轮转速设为40 000 r/min.当残差方程均小于 10^{-4} 时,认为计算是收敛的.

如图6所示,300个入射入血细胞从入口轴向流动,从出口结构向后斜向分成多股.血细胞的轴向速度在血液出口处达到最大.结果表明:在5种不同叶片出口安装角的阿基米德螺旋形介入式血泵内流域中,平均流速均超过4.2 m/s,且进出口流量均大于4.5 L/min,其中 β 等于85°和90°的平均血液流速相对于其他出口安装角情况较优.

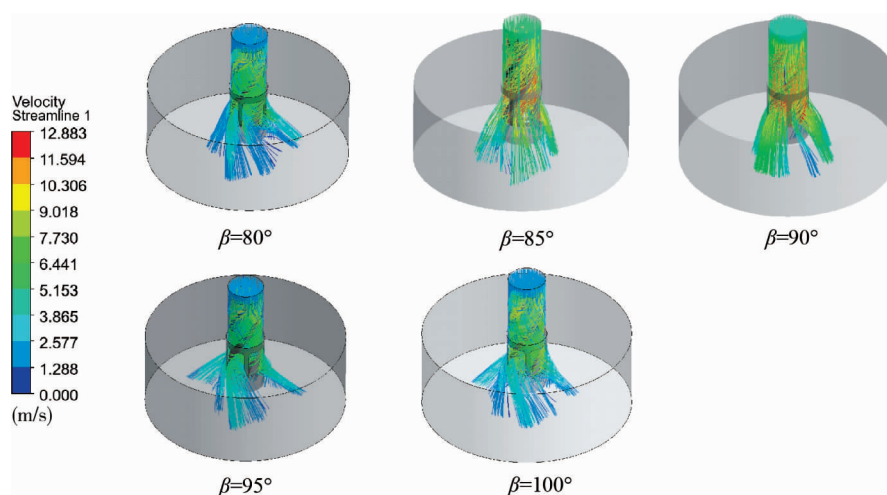


图6 血泵流速迹线

如图7所示,血泵的压力沿血流方向逐渐增大.沿轴向截取叶轮前端0.008 m处进行截面平均压力分析.在满足血泵入口与出口压差大于100 mmHg的情况下,当叶片出口安装角 $\beta = 80^\circ$ 时,叶轮的轴向截面平均压力 $P = 12\,429.2\text{ Pa}$;当叶片出口安装角 $\beta = 85^\circ$ 时,叶轮的轴向截面平均压力 $P = 12\,621.4\text{ Pa}$;当叶片出口安装角 $\beta = 90^\circ$ 时,叶轮的轴向截面平均压力 $P = 13\,173\text{ Pa}$;当叶片出口安装角 $\beta = 95^\circ$ 时,叶轮的轴向截面平均压力 $P = 12\,677.8\text{ Pa}$;当叶片出口安装角 $\beta = 100^\circ$ 时,叶轮的轴向截面平均压力 $P = 12\,330.5\text{ Pa}$.综上所述,叶轮的轴向截面平均压力 P 随着叶轮出口安装角 β 增大而减小.

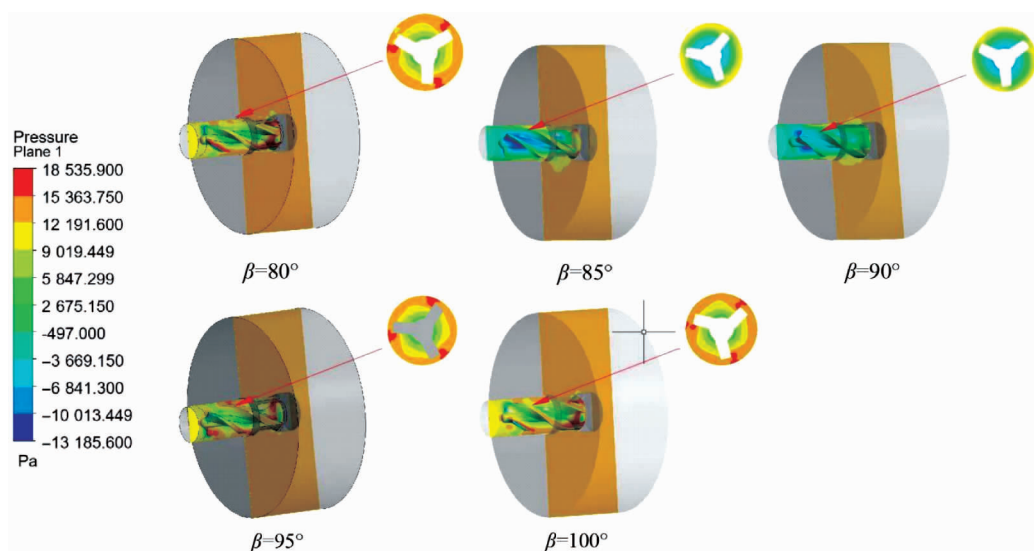


图7 血泵平均压力云图

2 平均溶血指数估算模型

GIERSIEPEN 等^[8]通过实验得到溶血估算经验公式:

$$HI = \frac{\Delta Hb}{Hb} = C\tau^n t^m. \quad (6)$$

式中: HI 为溶血指数; ΔHb 为溶血过程中释放的血红蛋白量; Hb 为初始的血红蛋白量; C 为实验得到的系数; τ 为单位时间内平均剪切应力; n, m 为经验确定的指数. 本文选择 WANG 等^[9]的实验数据, 取 $C = 1.8 \times 10^{-6}$, $n = 1.991$, $m = 0.765$.

采用拉格朗日方法预测血泵的溶血指数. 从入口共释放 1 000 个直径为 $7 \mu m$ 的红细胞颗粒, 并跟踪颗粒的运动轨迹. 设每个微小的时间段 $t_i - t_{i-1}$ 内的溶血指数为 $e_{p,i}$, 则有

$$e_{p,i} = 1.8 \times 10^{-6} \tau_{(t_{i-1})}^{1.991} (t_i - t_{i-1}). \quad (7)$$

每一个红细胞在迹线中不同位置的溶血指数记为

$$E_{p,i} = E_{p,i-1} + (1 - E_{p,i-1}) e_{p,i}. \quad (8)$$

将 N 个红细胞颗粒的 $E_{p,i}$ 相加后取平均, 构建了平均溶血指数估算模型:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \left(\sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^M E_{p,i} \right). \quad (9)$$

式中: i 为每一个红细胞流动迹线上共 M 个不同的位置; p 为第 p 条迹线.

3 结果与分析

3.1 血泵流场剪切应力分析

根据拉格朗日溶血估算方法, 取 300 条迹线所获得的数据作为最终结果. 以被跟踪的第 53 号粒子为例, 运动轨迹如图 8 所示, 迹线上的剪切应力随时间的变化曲线如图 9 所示.

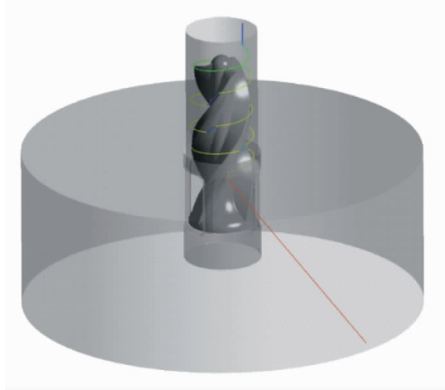


图 8 第 53 号粒子运动迹线

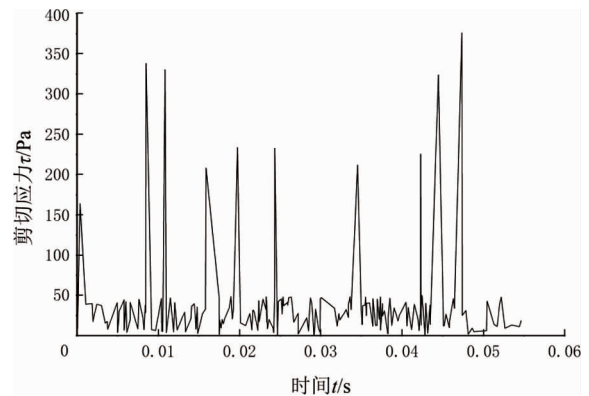


图 9 第 53 号粒子剪切应力随时间的变化情况

将血泵的剪切应力数据整理, 结果如表 1 所示.

表 1 不同叶片出口安装角的血泵内剪切应力占比

叶片出口安装角 $\beta / (^{\circ})$	0 Pa < 剪切应力 < 150 Pa 占比 / %	0 Pa < 剪切应力 < 50 Pa 占比 / %
80	99.446	99.120
85	98.921	98.472
90	98.852	98.440
95	98.731	98.272
100	99.212	98.755

按照血小板活化阈值 50 Pa 和溶血阈值 150 Pa 对数据进行统计分析, 分析得出: 血泵剪切应力小于 150 Pa 占比最高的是 $\beta = 80^{\circ}$ 的情况, 为 99.446%, 最低的是 $\beta = 90^{\circ}$ 的情况, 为 98.852%. 而血泵剪切应力在 50 Pa 以下占比最高的是 $\beta = 80^{\circ}$ 的情况, 为 99.120%, 最低的是 $\beta = 95^{\circ}$ 的情况, 为 98.272%.

相对于径向的阿基米德螺旋形叶片,叶片的前向与后向都能提高血泵内剪切应力小于 150 Pa 的占比,其中叶片出口安装角 $\beta=85^\circ$ 和 $\beta=80^\circ$ 使血泵剪切应力小于 150 Pa 的百分比相对 $\beta=95^\circ$ 和 $\beta=100^\circ$ 分别提高了 14.9% 和 29.6%,使血泵剪切应力小于 50 Pa 的百分比相对提高了 11.57% 和 29.32%。

3.2 血泵溶血性能分析

将数据代入式(9),计算可得带有 5 种出口安装角叶片血泵的平均溶血指数 $\bar{E}$,如图 10 所示。

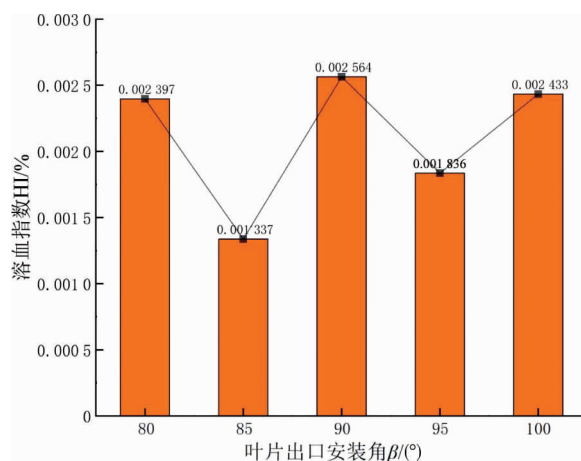


图 10 平均溶血指数 $\bar{E}$ 与叶片出口安装角 β 的关系

由图 10 可知: $\beta=90^\circ$ 时, $\bar{E}_{\max}=0.002564\%$; $\beta=85^\circ$ 时, $\bar{E}_{\min}=0.001337\%$, $\frac{\bar{E}_{\max}}{\bar{E}_{\min}}=1.91$, 从预测结果来看, $\beta=85^\circ$ 的情况的溶血性能相对较好。

4 结论

1) 采用 CFD 方法对阿基米德螺旋形介入式血泵流场进行数值模拟,结果表明:血泵血液内部的截面平均压力随叶片出口安装角增大而减小。

2) 在满足泵送条件的情况下,叶片出口安装角为 85° 时血泵的平均剪切应力较小,平均溶血指数较低。

3) 基于拉格朗日方法构建血泵平均溶血指数估算模型,为血泵溶血指数估算提供了一种新的途径。

参考文献

- [1] 尚小珂, 杨云骢, 游辉辉, 等. 介入式心室辅助装置的发展历程[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2023, 30(12): 1683-1691.
- [2] 封志刚, 曾培, 茹伟民, 等. 叶轮设计对叶轮式人工心脏溶血性能的影响[J]. 中国生物医学工程学报, 2003, 22(2): 190-192.
- [3] LIU L, WANG F Q, WU Q L, et al. Influence of impeller design on hemolysis of an axial blood pump[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 140: 162-166.
- [4] 王芳群, 吴怡, 吉敬华, 等. 基于数值方法预测导管泵血栓[J]. 医用生物力学, 2019, 34(3): 283-288.
- [5] YUN Z, YAO J F, WANG L, et al. The design and evaluation of the outflow structures of an interventional microaxial blood pump[J]. Frontiers in Physiology, 2023, 14: 1169905.
- [6] 荆腾, 潘爱娣, 顾发东, 等. 主动脉穿刺型轴流血泵折边结构叶轮的数值模拟及溶血分析[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(2): 109-117.
- [7] 仝少凯, 高德利. 基于阿基米德双螺旋线原理的水力喷射压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(1): 90-96.
- [8] GIERSEPEN M, WURZINGER L J, OPITZ R, et al. Estimation of shear stress-related blood damage in heart valve prostheses; *in vitro* comparison of 25 aortic valves[J]. The International Journal of Artificial Organs, 1990, 13(5): 300-306.
- [9] WANG L, YUN Z, YAO J F, et al. A novel model for hemolysis estimation in rotating impeller blood pumps considering red blood cell aging[J]. Frontiers in Physiology, 2023, 14: 1174188.