

轴流式血泵黏弹性流体水动力特性数值模拟

胡其会, 张鸣远, 杨万英

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 将一种黏弹性流体 $k-\epsilon$ 模型应用于自行设计的轴流式血泵内流动特性的数值模拟, 分析了轴流泵的水动力特性, 得到了泵壳与转子间狭缝中以及叶轮流道内的紊动能和紊动能耗散率的分布规律. 研究发现: 在相同流量和转速条件下, 质量分数为 0.06% 的黄原胶水溶液的扬程高于以水为工质时的相应扬程, 二者最大约相差 35%, 且计算结果与实测数据符合良好; 轴流泵内黄原胶水溶液的紊动能和紊动能耗散率均显著低于水的相应值, 粗略估算每千克黄原胶水溶液的机械能损失只是水的相应值的 37%, 表示以黏弹性流体为工质时, 泵内部的黏性耗损降低, 这正是黏弹性流体扬程高于水的扬程的物理原因.

关键词: 黏弹性流体 $k-\epsilon$ 模型; 轴流式血液泵; 数值模拟

中图分类号: TH312 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0028-05

Numerical Simulation on Viscoelastic Fluid Hydrodynamics in an Axial Blood Pump

HU Qihui, ZHANG Mingyuan, YANG Wanying

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A $k-\epsilon$ model for viscoelastic fluids was used to predict the turbulent flow characteristics in an axial blood pump designed and tested in Xi'an Jiaotong University. The pump hydrodynamics of the axial blood pump was analyzed, and the turbulent kinetic energy and the dissipation rate profile in the clearance gap between the rotor and the pump shell and in the main flow passage were achieved. It is found that the head rise of the aqueous solution of Xanthan gum with 0.06% in concentration is higher than that of water at the same flow rate and same rotating speed, with a maximum difference of 35%, and the calculation results agree well with the measured data. The turbulent kinetic energy and the dissipation rate of the Xanthan gum solution are significantly lower than those of water in most part of the flow field. The mechanical energy loss per kilogram for the aqueous solution of Xanthan gum with 0.06% in concentration is only 37% of that for water roughly. It is likely that lower dissipation rate may lead to a higher head rise of the viscoelastic fluid.

Keywords: $k-\epsilon$ model for viscoelastic fluids; axial blood pump; numerical simulation

血液是一种剪切稀化且具有一定弱弹性的非牛顿流体. 由于非牛顿流体的流变特性复杂, 绝大多数研究者在实验研究与数值计算中采用牛顿流体或牛顿流体模型^[1-3]. 西安交通大学采用黄原胶水溶液作为血液的替代流体在一个自行设计的轴流式血液泵

上进行了水动力学实验和测量, 表明与牛顿流体相比, 黏弹性流体对血液泵性能有显著影响^[4].

针对非牛顿流体, 特别是黏弹性流体紊流模型的报道甚少, 迄今尚无普遍接受的非牛顿流体紊流模型. Pinho 等^[5-6]发展了一种黏弹性流体 $k-\epsilon$ 模型,

并针对流动结构相对简单的圆管内黏弹性流体的紊流流动进行了验证计算. 本文首次将该模型应用于轴流泵流动特性的数值模拟, 正确地预测了轴流泵内黏弹性紊流的主要特征.

1 数值模拟方法

1.1 数学模型

该模型将分子黏度表示为剪切率和拉伸率的函数, $\mu = \mu(\dot{\gamma}, \dot{\epsilon})$, 采用 Bird-Carrreau 模型^[5], 并简化为幂率形式

$$\mu = K_v [\dot{\gamma}^2]^{(n-1)/2} K_e [\dot{\epsilon}^2]^{(p-1)/2} \quad (1)$$

式中: $\dot{\gamma}$ 是剪切率; $n < 1$, $p = 1$ 时为剪切稀化流体; $\dot{\epsilon}$ 是拉伸率; $n = 1$, $p > 1$ 时为拉伸稠化流体.

Pinho 等^[6]运用紊流理论和概率论, 经过一系列的推导, 将时均分子黏度表示为紊动能和紊动能耗散率的函数, 即

$$\bar{\mu} = f(k, \epsilon, m, B) \quad (2)$$

$$m = (n + p - 2)/(n + p)$$

$$B = (K_v K_e / A_\epsilon)^{p-1} 2^{((n-1)-m(n+1))/2} \rho^m$$

$$A_\epsilon = 10$$

根据黄原胶水溶液的流变特性实验结果进行了流变参数拟合, 拟合方法见文献^[6]. 相应于质量分数为 0.06% 的黄原胶水溶液的流变参数分别为: $n = 0.656$, $K_v = 0.051$, $p = 1.038$, $K_e = 1.549$. 测量表明, 质量分数为 0.06% 的黄原胶水溶液与血液的流变特性接近^[7], 本文均以此浓度的黄原胶水溶液为例进行讨论.

由于考虑了剪切率和拉伸率对分子黏度的影响, 在控制方程中会产生相应的附加项. Pinho 等^[5]运用量纲分析比较了控制方程中各项的大小, 并进行了模化, 分别得到 k 和 ϵ 方程如下

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho \nu_t S^2 - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \rho \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} f_1 \rho \nu_t S^2 \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 1} \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \frac{\partial \mu}{\partial x_k} \quad (4)$$

数值模拟中, 将不同于标准 $k-\epsilon$ 模型控制方程的项作为源项, k 和 ϵ 方程的源项分别为

$$S_k = \rho \nu_t S^2 - \rho \epsilon = \rho \nu_t S^2 - \frac{\rho C_\mu f_\mu k^2}{\nu_t} \quad (5)$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} f_1 \rho \nu_t S^2 \frac{\epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} +$$

$$C_{\epsilon 4} \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \frac{\partial \mu}{\partial x_k} \quad (6)$$

式中: 涡黏度 $\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, $C_\mu = 0.09$,

$$f_\mu = \left\{ 1 - \left[1 + \left| \frac{1-n}{1+n} \right| y^+ \right]^{-|(1+n)/(1-n)|/A^+} \right\} \cdot$$

$$\left\{ 1 - \left[1 + \left| \frac{p-1}{3-p} \right| y^+ C^{(1-p)/(2-p)} \right]^{-|(3-p)/(p-1)|/A^+} \right\},$$

$A^+ = 26.5$, $C = 18$; $S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$, $S_{ij} = (\partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i) / 2$ 为应变率张量; $f_1 = 1$; $f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2)$; $C_{\epsilon 1} = 1.45$; $C_{\epsilon 2} = 1.9$.

本文采用 FLUENT 中的 UDF 功能, 对控制方程的相关源项, 以及紊流扩散系数、流体物性参数 (如分子黏度和涡黏度等) 和边界条件进行定义, 需要调用 UDF 中的 INIT、ADJUST、SOURCE 以及 PROPERTY 等宏定义.

1.2 网格划分与边界条件

图 1 为西安交通大学的轴流式血泵模型结构示意图. 模型泵的圆柱形转子由一根细长轴、螺旋式叶片和圆柱状的转子实体组成, 螺旋式叶片镶嵌在长轴与圆柱状转子之间, 成为一个整体. 叶片沿轴向有 4 个节距, 每个节距长 18 mm, 叶片高 7 mm. 泵壳与转子间的狭缝宽 1 mm. 模型泵转速在 4 300 ~ 6 500 r/min 之间, 定义雷诺数

$$Re = \rho \omega D^2 / \mu \quad (7)$$

式中: D 为叶轮直径, m; ω 为叶轮的旋转角速度, rad/s^[4]. 工质分别为水和黄原胶水溶液时, 泵内流场 Re 的范围分别为 $8.1 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6$ 和 $2.0 \times 10^5 \sim 5.8 \times 10^5$.

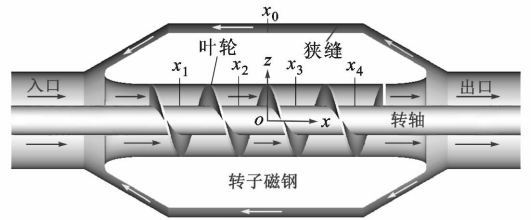


图 1 轴流式血泵模型结构示意图

运用结构化与非结构化网格混合的多块网格划分方法对该模型进行网格划分, 对近壁面区域的网格作了加密处理, 以研究狭缝内以及近壁面处的流动情况^[8]. 网格总数约为 1.1×10^6 , 计算一个工况约需 24 h.

设定入口边界条件为流量入口; 出口边界上压强和速度未知, 设定为自由出流边界; 壁面采用无滑移条件; 选用 FLUENT 中多参考坐标系模型, 将转

子上的壁面设定成与旋转坐标系的角速度大小和方向一致的旋转壁面,其他壁面设为静止壁面。近壁面采用 Enhanced Wall Treatment 处理方法,该法要求离壁面第1层网格 $y^+ < 5$ 。经验证,本文计算中的 y^+ 均满足此条件。

数值模拟过程中监控连续性方程、 x 、 y 、 z 方向的速度、紊动能 k 以及紊动能耗散率 ϵ 的残差大小,收敛判据为各残差均小于 1.0×10^{-5} 。

计算黏弹性流体流动特性的同时,也运用标准 $k-\epsilon$ 模型对水的相应流动特性作了计算。

2 数值模拟结果分析

分别计算了平均速度、脉动速度以及压强的分布情况。水和黄原胶水溶液为工质时,均在叶轮尾部产生涡旋,在狭缝内产生回流,形成冲刷流动,避免血栓形成。黄原胶水溶液的流线比较平滑,脉动速度比水的脉动速度小,涡旋形成位置后移,且涡的尺寸减小,狭缝中回流量相对减小。黄原胶水溶液为工质时比水为工质时的扬程高。

2.1 扬程

图2为以水和黄原胶水溶液分别作为工质时的数值模拟与实测数据的比较。可以看出,相同转速和流量条件下,工质为水时的扬程低于黄原胶水溶液的相应扬程,转速为 5 334 r/min、流量为 10.5 L/min 时,二者最多约相差 35%。由图还可看出,数值模拟结果与实验测量结果接近,且随着转速增大,两组数据吻合程度越来越好。

2.2 紊动能

图3给出了工质分别为水、黄原胶水溶液,转速为 5 334 r/min,流量为 7.5 L/min 时, xz 截面上泵

内各处的紊动能分布情况。图中各数据截取位置分别为 $x_0=0$ mm、 $x_1=-22$ mm、 $x_2=-4$ mm、 $x_3=13$ mm 和 $x_4=30$ mm(坐标和截面选取见图1)。由图可看出:狭缝内除接近转子的位置外,水比黄原胶水溶液的紊动能高,平均紊动能约高 22%;叶轮流道内,除 x_1 截面黄原胶水溶液与水的紊动能接近和稍高外,其余 x_2 、 x_3 和 x_4 截面黄原胶水溶液均比水的紊动能低,平均紊动能约低 32%;流道内,两种工质的紊动能都沿径向增大而增大。综合可知,在相同转速和流量下,泵内流场各区域,黄原胶水溶液的紊动能普遍低于水的紊动能。这是由于黄原胶水溶液一类的聚合物溶液,除剪切稀化外,还有弹性,在运动过程中除了雷诺应力外,又生成了另外一个附加应力,这就相对减小了雷诺应力^[6]。紊流依赖雷诺应力将平均流动能转化为紊动能,雷诺应力的降低将削弱紊动能生成项,使得紊动能降低。

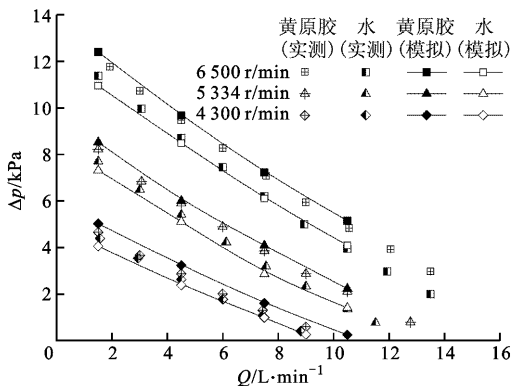


图2 数值模拟与实测水力性能对比

2.3 紊流耗散

图4给出了工质分别为水和黄原胶水溶液、转

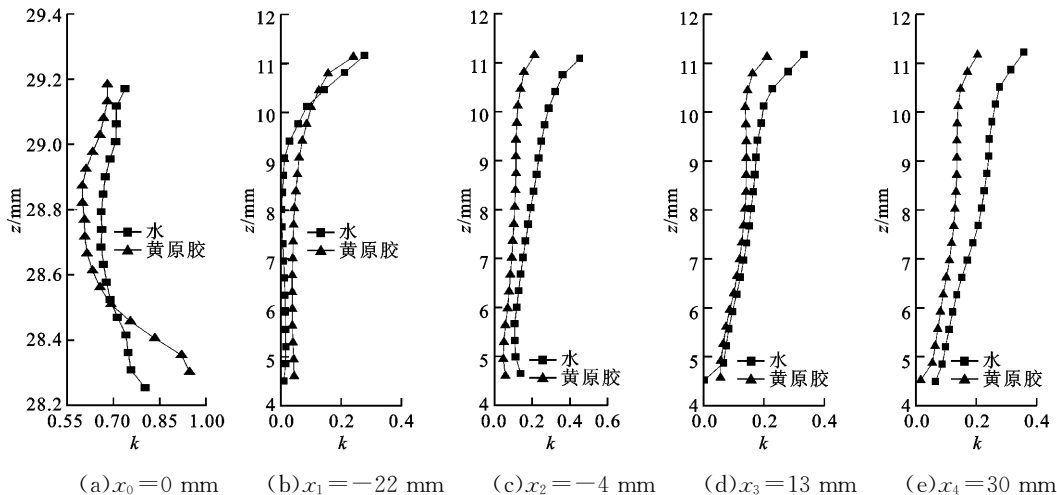
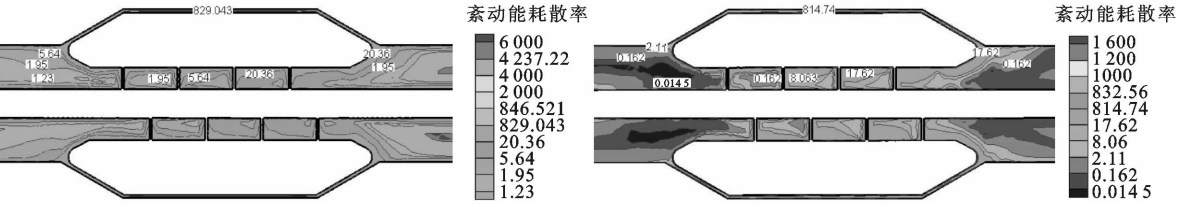


图3 不同位置的紊动能比较



(a) 水的紊动能耗散 (b) 黄原胶水溶液的紊动能耗散

狭缝处所标数值为狭缝内的最小紊动能耗散率

图 4 不同工质的紊动能耗散率云图

速为 5 334 r/min、流量为 7.5 L/min 时的泵内紊动能耗散率分布云图。由图可看出,在绝大多数区域,水为工质的紊动能耗散率显著高于黄原胶水溶液为工质时的紊动能耗散率,狭缝和叶轮流道内的平均紊动能耗散率分别约相差 60%和 46%。紊动能耗散率与紊动速度空间导数的平方成正比,低的紊动能耗散率意味着低的紊动速度。黏弹性流体较低的紊动速度以及更为平滑的流线、涡旋区域的减小、黏性底层的增厚^[6]等可能是促使黄原胶水溶液紊动能耗散率显著下降的原因。

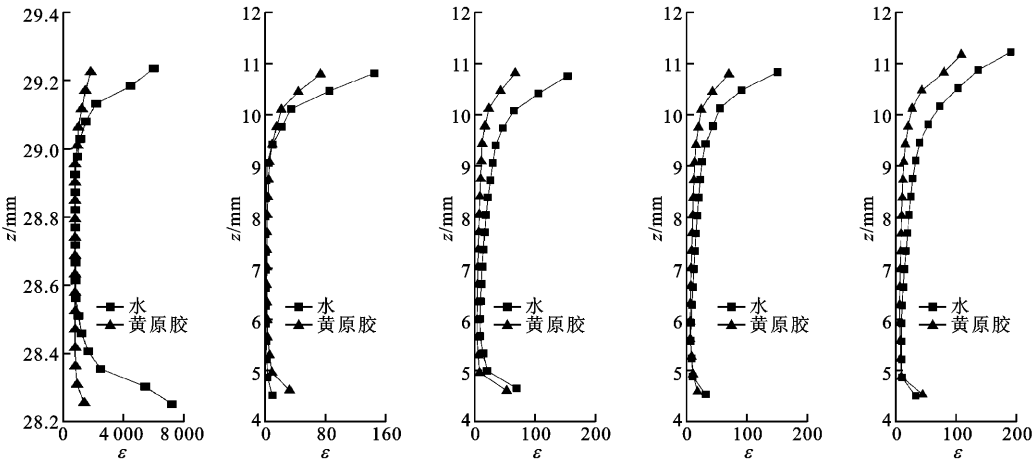
图 5 示出泵内各处黄原胶水溶液与水的紊动能耗散率的比较情况,各截面选取仍如图 1 所示。由图可看出:狭缝内紊动能耗散率在中心部分两者接近,在接近壁面处,水的紊动能耗散率则远高于黄原胶水溶液的相应值;黄原胶水溶液的耗散率曲线较为平缓。叶轮流道内, x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 截面黄原胶水溶液与水相比,紊动能耗散率要小,且此差距沿径向增大。紊流中,机械能在最小尺度涡时以黏性耗损的形式转变为热量,紊动能耗散率则是此损失高低的一个度量。黄原胶水溶液比水的紊动能耗散率小,说明

黄原胶水溶液比水的机械能损失小,据粗略估算,折算到每千克黄原胶水溶液的机械能损失只是水的相应值的 37%,低的机械能损失导致以黄原胶水溶液为工质时的扬程高,这与图 2 相互得到验证。当使用黄原胶水溶液为工质时,血泵的效率增高,且所需的驱动功率减小^[9]。

3 结 论

本文采用的黏弹性流体 $k-\epsilon$ 模型能较好地预测轴流式血液泵内的主要紊流流动特征,并得到如下结论。

- (1)在相同流量和转速条件下,黏弹性流体的扬程高于以水为工质时的相应扬程,最大约相差 35%,计算结果与实测数据符合良好。
- (2)在相同转速和流量下,在绝大部分流场区域黄原胶水溶液紊动能均比水的紊动能小。
- (3)在绝大多数区域,水为工质时的紊动能耗散率均显著高于黄原胶水溶液为工质时的紊动能耗散率,低的机械能损失率是导致以黄原胶水溶液为工质时扬程高的首要物理原因。



(a) $x_0=0$ mm (b) $x_1=-22$ mm (c) $x_2=-4$ mm (d) $x_3=13$ mm (e) $x_4=30$ mm

图 5 不同位置的紊动能耗散率比较

参考文献:

- [1] APEL J, PAUL R, KLAUS S. Assessment of hemolysis related quantities in a microaxial blood pump by computational fluid dynamics[J]. Artificial Organs, 2001, 25(5):341-347.
- [2] TETSUYA Y, KAZUMITSU S, AYUMI M. An estimation method of hemolysis within an axial flow blood pump by computational fluid dynamics analysis[J]. Artificial Organs, 2003, 27(10):920-925.
- [3] AMY L T, ALEZANTRINA U, PAUL E A, et al. Computational analysis of an axial flow pediatric ventricular assist device[J]. Artificial Organs, 2004, 28(10):881-891.
- [4] 朱宪然. 一种轴流式血泵的设计及其非牛顿流体流动特性研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2007.
- [5] PINHO F T. A GNF framework for turbulent flow models of drag reducing fluids and proposal for a $k-\epsilon$ type closure [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2003, 114(2/3):149-184.
- [6] CRUZ D O A, PINHO F T. Turbulent pipe flow predictions with a low Reynolds number $k-\epsilon$ model for drag reducing fluids [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2003, 114(2/3):109-148.
- [7] ZHANG Genguang, ZHANG Mingyuan, YANG Wanying, et al. Effects of non-Newtonian fluid on centrifugal blood pump performance [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(5):613-617.
- [8] 朱宪然, 张鸣远, 刘昊南, 等. 轴流式血泵内部流场和生物相容性的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(11):1290-1294.
- ZHU Xianran, ZHANG Mingyuan, LIU Haonan, et al. Numerical investigation on flow field and biocompatibility of an axial blood pump[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(11):1290-1294.
- [9] WHITE F M. Fluid mechanics [M]. 6th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2008:720-730.

(编辑 荆树蓉)