

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.04.002

熔盐密度对熔盐泵性能的影响

校 岑, 顾伯勤, 邵春雷

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

摘 要:基于标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型、多重参考坐标系和 SIMPLE 算法,采用 FLUENT 数值模拟软件,对 3 台不同转速的熔盐泵,针对 4 种密度不同的介质在 5 种不同流量下分别进行数值模拟,预测了相应工况下熔盐泵的水力性能。结果表明,泵的扬程与密度变化无关,但相同流量下同一泵的轴功率和效率会随着密度的增加相应上升,泵内静压与速度分布规律基本一致。研究结果对熔盐泵的设计具有一定的参考价值。

关 键 词:熔盐泵;密度;外特性;内部流动;数值模拟

中图分类号:TQ051.2;TH311

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)04-0005-05

Effects of Molten Salt Density on the Performances of Molten Salt Pump

XIAO Cen, GU Boqin, SHAO Chunlei

(College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Based on the standard $\kappa-\varepsilon$ turbulent model, multiple reference frame coordination and the SIMPLE algorithm, three-dimensional turbulence flow in 3 molten salt pumps for 4 different density mediums were simulated under 5 different flow rates by using FLUENT. The performances of the pump were predicted. The results show that the head doesn't change with density. The shaft power and efficiency increase with the increase of density under the same flow rates. The distribution regularities of static pressure and absolute velocity for different pumps transporting different density mediums are basically the same. The results have a certain reference value to the design of molten salt pump.

Key words: molten salt pump; density; external performance; internal flow; numerical simulation

熔盐泵是一种输送熔融盐的流体机械。随着熔盐的广泛应用,熔盐泵在工农业生产和国民经济的许多部门占据着越来越重要的位置^[1]。进行熔盐泵外特性及内部流动的研究对优化泵的设计及改善泵的运行特性具有十分重要的意义。目前熔盐泵内部流动的研究主要采用理论计算与数值模拟 2 种方法。数值模拟方法凭借其良好的重复性、易控性、经济性等优点,得到了众多学者的广泛使用^[2]。关于密度对泵外特性的影响,关醒凡^[3]曾提出,对于同一台泵,输送不同密度介质时,所产生的理论扬程是相同的,但泵内的压力和所需的轴功率不同。研究密度对熔盐泵外特性的影响规律,有利于泵生产厂家选配合适的电机,节约生产成本,避免因错配电机而产生超电流、跳闸、电机过热

损坏等现象发生。

本文选取密度不同、黏度相近的熔盐作为工作介质,采用 FLUENT 软件对熔盐泵进行内部流动的数值模拟,意在揭示不同密度的熔盐对熔盐泵外特性及内部流场的影响规律。

1 几何模型及数值计算方法

1.1 几何模型及网格划分

本文选取了 3 台中比转数 ($66 < n_s < 130$) 熔盐泵为数值计算的模型,其流道主要由进口流道、叶轮区域流道和蜗壳 3 部分组成,主要性能参数和结构参数见表 1 和表 2。

采用 Pro/E 5.0 软件对泵的叶轮、蜗壳等过流部件进行三维造型,用 FLUENT 的前处理软件 Gambit 进

收稿日期:2014-03-07;修回日期:2014-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51306087);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012430)

作者简介:校岑(1988),女,江苏常州人,硕士研究生,主要从事流体工程与流体密封技术的研究。E-mail:msxiaocen@163.com

行网格划分。图 1 为熔盐泵 2 的几何模型。

表 1 熔盐泵性能参数

Table 1 Performance parameters of molten salt pumps

编号	型号	扬程 H_{opt}/m	流量 $Q_{\text{opt}}/$ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	转速 $n/$ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	比转数 n_s	效率/ %
1	GY65-250	20	50	1 450	66	63
2	GY65-160	8	25	1 450	93	62
3	GY125-250	20	200	1 450	130	77

表 2 熔盐泵主要结构参数

Table 2 Main structure parameters of molten salt pumps

编号	泵进口 直径/mm	泵出口 直径/mm	叶轮出口 宽度/mm	蜗壳进口 宽度/mm	叶轮外径/ mm	叶片数
1	100	65	12.5	26	250	6
2	75	65	13.0	25	170	6
3	150	125	30.0	55	270	6



图 1 熔盐泵 2 的几何模型

Figure 1 Geometrical model of molten salt pump 2

由于泵的结构复杂,采用分块划分网格的方法对泵的进水管、叶轮流道和蜗壳 3 部分分别进行网格划分。其中,叶轮和蜗壳采用适用性较好的四面体非结构网格进行划分,进水管则采用六面体网格划分。这种混合网格能以较少的网格数量得到较高的计算精度。以 $n_s = 93$ 的熔盐泵 2 为例,划分后的网格总数为 290 764 个,其中蜗壳 238 564 个,叶轮 46 692 个,进水管 5 508 个。将网格进一步细分,网格总数为 408 684 时,计算结果与前一种网格精度下的几乎没有区别,但计算时间多了一倍。可见,现有网格精度已满足研究要求。

1.2 计算方法

利用标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型使控制方程封闭,有限体积法对控制方程进行离散,采用收敛速度较好的 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合,离散时动量项、湍动能项和湍流耗散率项采用二阶迎风差分格式,压力项采用中心差分格式。利用非耦合隐式求解器进行

求解。

1.3 边界条件

进口边界条件为速度进口 (velocity inlet), 出口边界条件为自由出流 (outflow), 壁面条件为壁面无滑移边界条件。将叶轮区域设置成转子, 蜗壳、进出口流道设置为定子。定子与转子之间交界面的耦合采用 MRF (Multiple Reference Frame) 模型。

2 外特性预测方法

泵能量性能预测方法如下^[4]:

1) 扬程

$$H = \frac{p_{\text{out}} - p_{\text{in}}}{\rho g} \quad (1)$$

式中, p_{out} 为蜗壳出口总压/Pa; p_{in} 为叶轮进口总压/Pa; ρ 为流体密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

2) 水力效率

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{M \omega} \quad (2)$$

式中, M 为作用在叶片上的有效力矩/ $(\text{N} \cdot \text{m})$; ω 为熔盐泵的转动角速度/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$; Q 为泵的流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

3) 轴功率

$$P = M \omega = \frac{\rho g Q H}{\eta_h} \quad (3)$$

3 介质物性参数

选取 4 种密度不同、黏度相近的介质进行研究, 相应温度下的密度和动力黏度值见表 3^[5-7]。

表 3 介质物性参数

Table 3 Medium physical parameters

组成	温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu \times 10^{-3}/$ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
H ₂ O	20	998	1.00
KNO ₃ -NaNO ₂ -NaNO ₃ (53-40-7wt%)	300	1 640	3.16
MgCl ₂	1 254	2 310	3.05
K ₂ CO ₃	891	2 990	3.01

按照上述工作介质的物性参数, 分别选取流量为 $0.6Q_{\text{opt}}$, $0.8Q_{\text{opt}}$, $1.0Q_{\text{opt}}$, $1.2Q_{\text{opt}}$ 和 $1.4Q_{\text{opt}}$ 这 5 种工况, 对熔盐泵内部流动进行数值模拟, 分析其外特性及内部流动规律。

4 密度对熔盐泵外特性的影响

4.1 密度对熔盐泵扬程的影响

图 2 是密度对不同比转速熔盐泵扬程的影响。由图可见, 同一台泵, 不同流体的扬程曲线几乎重合。这

说明,扬程并不随着密度的变化而变化。不同泵中,同一种流体,扬程都随着流量的增加而逐渐下降,特别是

在设计工况以后,下降的梯度越来越大,这与清水泵的变化规律是一样的。

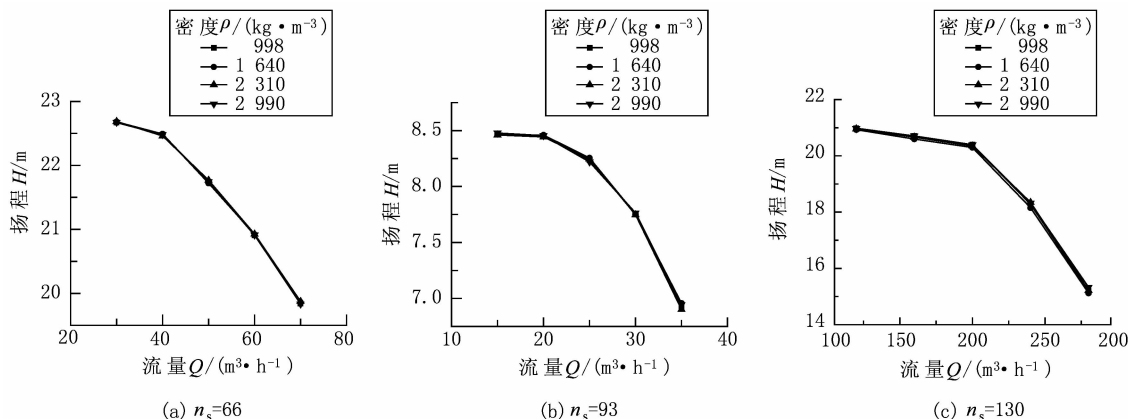


图2 密度对扬程的影响

Figure 2 Effects of density on head

4.2 密度对熔盐泵轴功率的影响

图3表示密度对不同比转速熔盐泵轴功率的影响。由图可见,对于不同比转速的泵,其轴功率均随流量的增加而增加。在相同比转速和流量下,轴功率随着流体密度的增加而增加。

4.3 密度对熔盐泵效率的影响

文中所计算的效率为熔盐泵的水力效率,而实际效率还应包括机械效率和容积效率,所以数值计算效率要高于表1中的额定效率。本文仅分析密度对水力效率的影响。

图4是密度对不同比转速熔盐泵效率的影响。由图可见,对于不同比转速的泵,输送不同介质时,效率随着流量的增大均先上升,在超过设计流量以后,再逐渐下降;相同流量下,输送相同黏度的介质时,效率随着密度的增加略有增加,但与输送清水时泵的效率相

比,没有规律可言。随着比转速的增加,超过设计流量后,效率随流量的增加下降速度增加。

5 密度对熔盐泵内流场的影响

限于篇幅,本节以熔盐泵2为例分析密度对设计工况下熔盐泵内部流动的影响。由于在离心泵叶轮区域内各轴向截面上压力分布的特征基本相同^[8],故取叶轮中截面作为代表截面进行分析。

5.1 密度对泵中截面静压的影响

图5为设计工况下输送不同介质时中截面上的静压分布。由图可见,随着介质密度的升高,泵内静压明显升高,泵内静压分布规律基本相同。6个叶轮流道内压力分布规律相似,在叶轮进口处压力较小,随着叶轮半径的增大,压力逐渐变大,并在叶片出口附近达到最大值。这是因为流体进入叶轮之后,叶片对流体做功,流体静压随之升高。进入蜗壳后,压力沿着蜗壳流

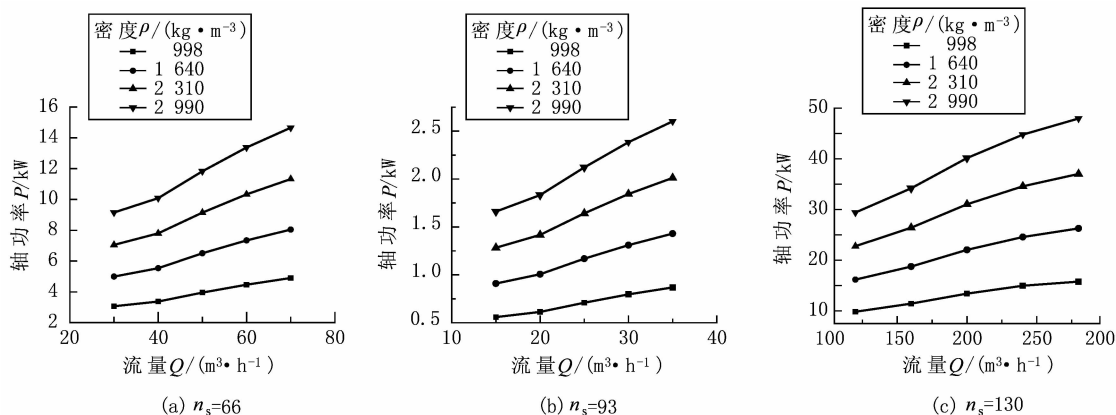


图3 密度对轴功率的影响

Figure 3 Effects of density on shaft power

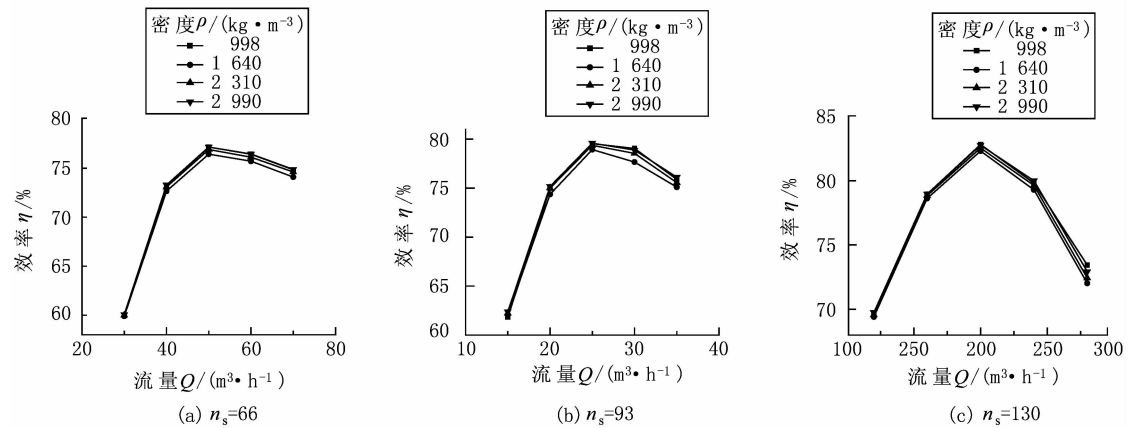


图4 密度对效率的影响

Figure 4 Effects of density on efficiency

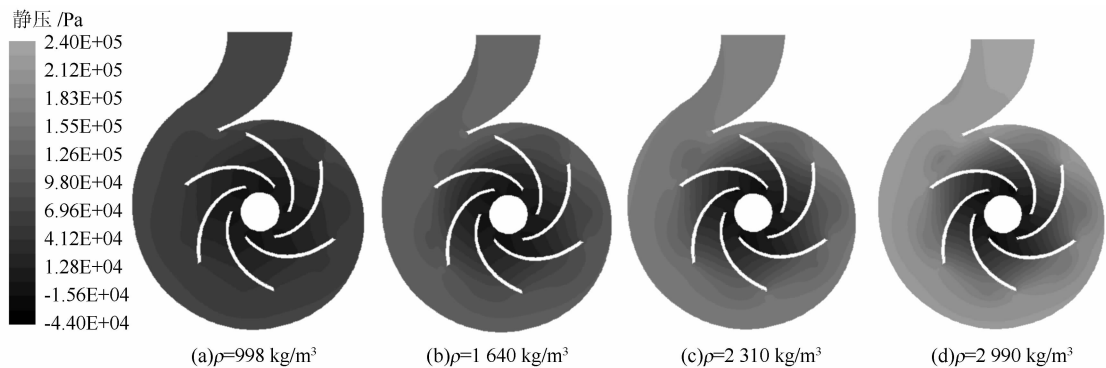


图5 输送不同介质时中截面上的静压力分布

Figure 5 Static pressure distribution on pump middle section at different density

道呈逐渐增加的趋势,在泵出口处达到最大值,这主要是因为蜗壳出口段的扩散作用,使流体的动能转换为静压能^[9]。在蜗壳的蜗舌附近出现的压力突变现象,是流体经过蜗舌时流道发生突变所导致的^[10]。

5.2 密度对泵中截面速度的影响

图6为设计工况下输送不同介质时中截面上的绝

对速度分布图。由图可见,4种工作介质密度虽不同,但速度分布具有相似的规律:在叶轮内部,叶片的绝对速度沿径向呈增大趋势,在蜗壳内,速度随着流动方向减小;在叶轮与蜗壳的交界面处存在明显的速度分界线。泵内最大流速出现在叶片出口处。

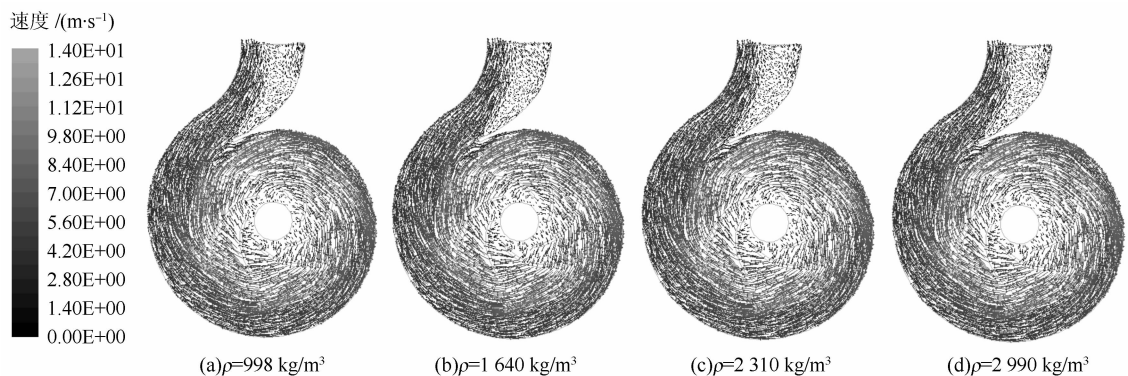


图6 输送不同介质时中截面上的绝对速度分布

Figure 6 Velocity distribution on pump middle section at different density

(下转第12页)