

熔盐泵盐析两相流冷态模型试验和数值研究

方向阳¹, 邵春雷^{1,2}, 杨 勇¹
(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 211816;
2. 常州大学 机械工程学院 江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏 常州 213164)

摘 要: 为了揭示熔盐泵内盐析两相流动的规律,采用白金汉定理,建立了熔盐泵输送固液两相流的相似准则,根据所设计的熔盐泵模型试验方案,对熔盐泵内部流动进行了数值模拟,采用高速摄像技术捕捉了泵内的盐析两相流动,阐述了试验结果与模拟结果之间的差别。研究了颗粒直径和密度对熔盐泵外特性和内部流动的影响。结果表明:数值模拟结果和试验结果之间的误差小于 10%。叶轮流道出口处颗粒的绝对速度从叶片的压力面到吸力面逐渐减小。分析得到了叶轮内固相和液相的速度三角形之间的关系,当颗粒的密度大于液相的密度时,颗粒绝对速度沿圆周方向的分量小于液相。进一步分析得到了叶轮出口处密度分别为 2000、2250、2500、2750、3000 kg/m³ 的颗粒的运动速度三角形之间的关系,颗粒密度越大,叶轮出口绝对速度沿圆周方向的分量越小,泵的扬程越小。

关 键 词: 熔盐泵; 盐析两相流; 冷态模型试验; 速度三角形; 可视化试验

中图分类号: V21; TH311; O35 **文献标志码:** A

Cold model experiments and numerical study on crystallization two-phase flow in molten salt pump

FANG Xiangyang¹, SHAO Chunlei^{1,2}, YANG Yong¹
(1. School of Mechanical and Power Engineering,
Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment,
School of Mechanical Engineering,
Changzhou University, Changzhou Jiangsu 213164, China)

Abstract: In order to reveal the regularity of the crystallization two-phase flow in the molten salt pump, Buckingham theorem was adopted to establish the similarity criterion for the solid-liquid two-phase flow in molten salt pump. According to the designed molten salt pump model test schemes, the internal flow was numerically simulated. At the same time, the high speed photography technology was employed to capture the flow. The differences between experimental and numerical simulation results were elaborated. The effects of particle diameter and density on external performance and internal flow of molten salt pump were researched. The obtained results were shown as follows: the error between the numerical simulation results and the test results was less than 10%. The absolute velocity of particles

收稿日期:2016-12-04
基金项目:国家自然科学基金(51306087); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA480003);
江苏省“六大人才高峰项目”(GDZB-032); 江苏省绿色过程装备重点实验室开放课题基金(GPE201704)
作者简介:方向阳(1990—),男,硕士,主要从事叶轮机械内部流动研究。

引用格式:方向阳,邵春雷,杨勇. 熔盐泵盐析两相流冷态模型试验和数值研究[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1403-1412. FANG Xiangyang, SHAO Chunlei, YANG Yong. Cold model experiments and numerical study on crystallization two-phase flow in molten salt pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1403-1412.

at the impeller outlet decreased from the blade pressure surface to the suction surface. The relationship of the velocity triangles between the solid and liquid phases in the impeller was obtained. When the particle density was greater than the liquid density, the circumferential component of the particle absolute velocity was less than that of liquid phase. Furthermore, the relationship of the velocity triangles at the impeller outlet was obtained for particles with the density of 2000, 2250, 2500, 2750, 3000 kg/m³. The larger particle density meant the smaller circumferential component of the absolute velocity and the lower pump head.

Key words: molten salt pump; crystallization two-phase flow;
cold model experiments; velocity triangle; visualization experiment

熔盐泵是一种专门输送高温熔盐的泵,在化工行业大流量熔盐换热场合和太阳能高温传热蓄热中应用广泛,正常工作温度为 250~500℃,有些特殊熔盐泵的工作温度能在 800℃以上^[1]。一般情况下,熔盐泵输送的介质为完全熔融的盐,当温度降低析出结晶颗粒时,泵内流动由单相流转为盐析两相流,此时泵内流动十分复杂,析出的颗粒对泵性能也有极大的影响。因此,研究熔盐泵内盐析两相流是十分必要的。

相关学者已经对盐析固液两相流动进行了研究。杨敏官等^[2]对结晶过程的不同时期进行了试验研究,并利用图像处理的方法获得了不同直径颗粒的分布特性,同时分析了晶体对流场的影响。高波等^[3]和邵春雷等^[4-5]结合数值模拟技术与粒子图像测速技术(PIV)对熔盐泵内固液两相流动进行了分析,获得了晶体颗粒在熔盐泵内的体积分数分布,并分析了其演化规律结果。刘栋等^[6-7]结合图像处理方法与 PIV 对离心泵内的固液两相流的速度场进行分析,得到了晶体颗粒改变液相相对速度的分布以及颗粒的运动趋势。为得到离心泵内部观察流动状态,部分学者采用高速摄像技术对离心泵内两相流动进行了分析^[8-9],为研究泵内复杂流动提供基础数据。限于叶轮机械的结构复杂性和试验手段应用范围的局限性,广大研究者采用数值模拟的方法对叶轮机械内部流动进行研究^[10-11]。在熔盐泵研究方面,文献^[12-14]主要从泵的结构和输送的介质黏度角度对熔盐泵进行研究,为提高熔盐泵的工作效率奠定了基础。由于熔盐泵输送的介质温度较高,试验难度大,目前未见直接采用熔盐进行试验研究的报道,当有结晶颗粒析出时,泵性能的变化规律有待进一步研究。

为了揭示盐析颗粒对熔盐泵性能的影响,本文通过量纲分析导出了泵内固液两相流的相似准则,根据相似准则,采用输送清水与固体颗粒混合

物的模型泵代替输送熔盐的原型泵的方法进行试验,以验证数值模型的正确性。采用试验与数值模拟相结合的方法,研究不同颗粒直径和密度对熔盐泵外特性、内部流动的影响,揭示流动由单相流转化为固液两相流过程中熔盐泵性能的变化规律。通过分析叶轮出口速度三角形,阐述熔盐泵性能变化的内在原因。为输送含结晶颗粒的熔盐泵的设计和熔盐泵的冷态模型试验提供参考。

1 无量纲特性分析及模型试验设计

1.1 固液两相流动无量纲特性分析

由于熔盐泵工作环境和输送介质的特殊性,高温熔盐进行试验所需辅助装置和泵内部的流动十分复杂,为了分析熔盐泵盐析两相流动情况,对熔盐泵进行冷态模型试验研究,使模型试验结果可以换算到原型上来。描述泵内两相流动涉及到的物理量有:颗粒的速度 v_s 、颗粒的密度 ρ_s 、颗粒的直径 d_s 、流体的密度 ρ 、流体的动力黏度 μ 、泵的转速 n 、泵的体积流量(下文简称为流量) Q 、特征尺寸 D 、扬程 H ;根据白金汉定理,描述如下:

$$f_1(v_s, \rho_s, d_s, \rho, \mu, n, Q, D, H) = 0 \tag{1}$$

这些物理量一共含有三个基本量纲,长度 L 、时间 T 及质量 M ,根据量纲分析可导出六个独立的相似准则,可表示为

$$f_2(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \tag{2}$$

选取 D, n, ρ 作为基本物理参数,根据量纲和谐原理得泵的比流量

$$\pi_1 = \frac{Q}{D^3 n} \tag{3}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{D^2 n \rho} = \frac{\nu}{n D^2} = \frac{1}{Re} \tag{4}$$

式中 π_2 为泵的雷诺数的倒数, ν 表示运动黏度。

$$\pi_3 = \frac{g H}{D^2 n^2} \tag{5}$$

式中 π_3 为泵的比扬程。

$$\pi_4 = \frac{\rho_s}{\rho}$$

(6)

式(6)说明模型和原型泵固相密度与液相密度之比不变。

$$\pi_5 = \frac{d_s}{D}$$

(7)

式(7)说明模型和原型泵颗粒的直径与泵的特征尺寸比值不变。

$$\pi_6 = \frac{v_s}{nD}$$

(8)

式(8)说明在非惯性坐标系中,相对惯性力与科氏惯性力或者牵引惯性力之比在模型泵和原型泵中均不变。

式(5)除以式(8)的平方得到 $gH/v_s^2 = K$,由泵的基本理论可知 K 为常数,那么对于两台相似的泵,在 π_3 满足的前提下, π_6 自动满足。在满足模型泵和原型泵中颗粒的体积分数 φ_s 相等的前提下,只需要满足 $\pi_1、\pi_2、\pi_3、\pi_4、\pi_5$ 在模型泵与原型泵中相等,则认为模型泵和原型泵相似。

1.2 冷态模型试验方案设计

采用清水作为流体介质,固体颗粒代替熔盐颗粒进行试验研究,由于输送的介质的性质不同,必须进行冷态模型试验的设计,使得原型泵和模型泵满足相似。假设:原型泵的特征尺寸为 D_p ,输送介质的密度为 ρ_p ,动力黏度为 μ_p ,运动黏度为 ν_p ,颗粒的直径 d_p ,颗粒的密度 ρ_{sp} ;模型泵的特征尺寸为 D_m ,输送介质的密度为 ρ_m ,动力黏度为 μ_m ,运动黏度为 ν_m ,颗粒的直径 d_m ,颗粒的密度 ρ_{sm} 。令 $D_m/D_p = x$ 。

要保证原型泵的转速 n_p 等于模型泵 n_m 的转速,则原型泵和模型泵的转速必须满足如下关系:

$$n_m = n_p \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right) \frac{1}{x^2}$$

(9)

要保证原型泵的比扬程等于模型泵的比扬

程,原型泵和模型泵的扬程必须满足如下关系:

$$H_m = H_p \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right) \frac{1}{x^2}$$

(10)

要保证原型泵的比流量等于模型泵的比流量,原型泵和模型泵的流量必须满足如下关系:

$$Q_m = Q_p \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right) x$$

(11)

要保证原型泵输送的颗粒属性和模型泵的输送颗粒属性相似,原型泵和模型泵输送的颗粒属性必须满足如下关系:

$$\rho_{sm} = \rho_{sp} \frac{\rho_m}{\rho_p}$$

(12)

$$d_m = d_p x$$

(13)

式中 x 为系数,取不同的值可以得到不同的方案,颗粒的密度只和输送液体介质有关,和 x 无关。

在满足原型泵和模型泵中颗粒的体积分数 φ_s 相等的前提下,只有转速、流量、扬程和颗粒属性同时满足式(9)~式(13),原型泵和模型泵相似。对于颗粒属性和几何相似的两台泵,通过调节转速和流量,可以同时满足式(9)和式(11),但问题的关键是,在这样的工况下,扬程是否满足式(10)。如果满足该式,则表明原型泵和模型泵相似,通过模型泵测得的性能可以转换成原型泵的性能。

熔盐泵输送的介质为 HTS(high temperature salt)三元熔盐,液相密度为 $1\,938\text{ kg/m}^3$,动力黏度为 $0.007\,29\text{ Pa}\cdot\text{s}$,固相密度为 $2\,143\text{ kg/m}^3$ 。熔盐泵的额定转速为 $1\,450\text{ r/min}$,叶轮直径为 250 mm ,流量为 $25\text{ m}^3/\text{h}$,输送的体积分数为 10% 。采用含有固体颗粒的清水代替熔盐设计模型试验,水的密度为 998 kg/m^3 ,根据式(12)和式(13)计算得添加颗粒密度为 $1\,103\text{ kg/m}^3$,直径为 1 mm 。根据式(9)~式(13)设计的模型试验方案如表 1 所示。

表 1 输送固液两相介质的熔盐泵模型试验方案

Table 1 Model test schemes of molten salt pump transporting solid-liquid two-phase medium

系数 x	转速比 n_m/n_p	转速 n_m / (r/min)	直径 D_m / mm	流量比 Q_m/Q_p	流量 Q_m / (m^3/h)	扬程比 H_m/H_p	颗粒直径 比 d_m/d_p
0.2	6.658	8322.51	50	0.053	1.33	1.773	0.2
0.4	1.663	2410.62	100	0.106	2.66	0.442	0.4
0.6	0.739	1071.39	150	0.160	3.99	0.197	0.6
0.8	0.416	602.66	200	0.213	5.32	0.111	0.8
1.0	0.266	386.17	250	0.266	6.66	0.071	1.0

续表

系数 x	转速比 n_m/n_p	转速 n_m / (r/min)	直径 D_m / mm	流量比 Q_m/Q_p	流量 Q_m / (m^3/h)	扬程比 H_m/H_p	颗粒直径 比 d_m/d_p
1.2	0.185	231.25	300	0.319	7.99	0.050	1.2
1.4	0.152	181.63	350	0.354	8.96	0.043	1.4
1.6	0.112	120.31	400	0.416	10.56	0.029	1.6
1.8	0.836	103.61	450	0.489	12.26	0.020	1.8
2.0	0.067	83.25	500	0.532	13.32	0.018	2.0

分析表 1 中的模型试验方案可以发现： x 取不同值时可以获得不同的方案，即 x 取不同值时可以获得不同尺寸的模型泵，本文取 $x=1.0$ 方案进行研究，原型泵和模型泵尺寸相等。限于篇幅，当 x 取其他值时本文不再赘述。也就是说，采用在清水中加入颗粒代替析出的结晶颗粒后熔盐介质作为试验介质时，可以通过改变泵的转速、流量和几何尺寸进行模型试验。但是，当用水代替运动黏度很高的介质进行模型试验的时候，转速、几何尺寸、流量和扬程等参数很难同时达到合理的值。在诸多模型试验方案中选择最优方案时，应考虑转速、几何尺寸、流量和扬程等综合因素，以便试验能够顺利开展。

2 可视化试验装置和原理

2.1 可视化试验装置

熔盐泵的冷态模型试验和可视化拍摄试验在离心泵闭式试验台上进行，试验的装置如图 1 所示，主要由储液罐、进出口阀门、模型泵、变频电动机、高速摄像机、冷光源、压力传感器、涡轮流量计、控制柜、计算机等组成。本文以 IS80-50-250 型泵为原型，对模型进行了可视化设计，泵的总体包括进口段、叶轮、蜗壳、泵体，均采用有机玻璃制成，有机玻璃质地均匀，无气泡、杂质，各个面均抛光处理，如图 2 所示。其主要尺寸为：泵进口直径为 80 mm，叶片出口直径为 250 mm，泵出口直径为 50 mm，泵设计流量为 25 m³/h，设计转速为 1450 r/min，设计扬程为 20 m。

2.2 高速摄像内部流动测量方法

采用高速摄像机技术对熔盐泵内部流动进行测量，拍摄到清晰的示踪粒子图像是试验成功与否的关键^[15]。本文采用 i-SPEED 3 型高速摄像机对泵内流动进行测量。由于受到位置的限制，一次不能全部拍摄到整个泵的内部流动，将离心

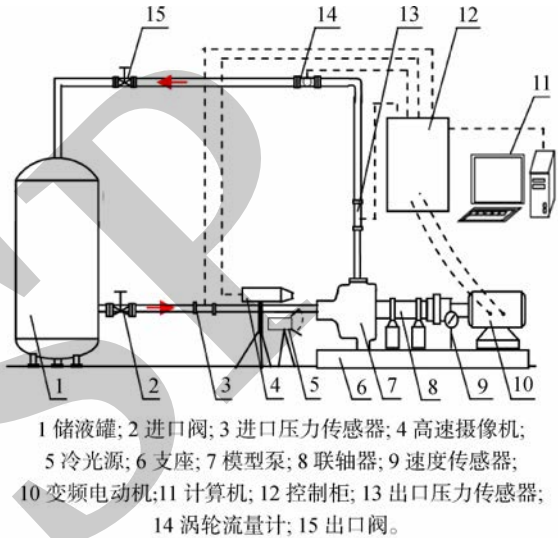


图 1 熔盐泵试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device for molten salt pump

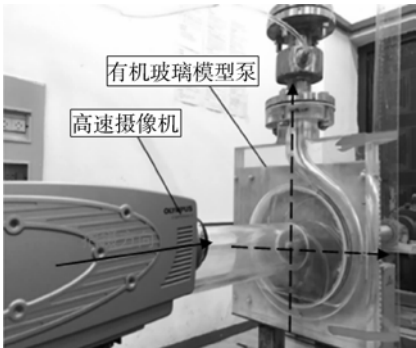


图 2 模型泵

Fig. 2 Model pump

泵分为四个拍摄区域，本文对含有蜗舌的 A 区域进行拍摄，如图 3 所示。

为了减少拍摄的误差，要使叶轮中截面与摄像机镜头的纵轴线相垂直，镜头到叶轮中截面距离约为 0.4 m，拍摄得到图像为比尺 0.187 6 mm/像素，拍摄的区域大小约为 215 mm×160 mm。

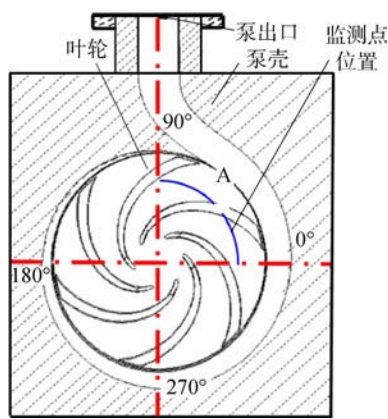


图 3 拍摄区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of shooting area

根据上述的拍摄方法,布置相机位置,由于室内光线不足,使用热光源对拍摄环境补光。在满足拍摄清晰和方便数据处理前提下,调节好相机拍摄参数。选取 $x = 1.0$ 时的模型方案进行试验,该方案模型泵的几何尺寸等于原型泵几何尺寸。根据表 1 中模型方案,确定该方案下离心泵的转速为 386 r/min,最终确定的拍摄频率为 1000 帧/s,即叶轮每旋 2.4°拍摄 1 幅图像。布置好高速摄像系统后,打开进口阀,启动电动机,为了减小启动时对模型泵冲击,通过变频器慢慢调节离心泵的转速至 386 r/min,打开出口阀,调节体积流量至 6.66 m³/h 左右。待整个系统运行稳定后,观察拍摄画面满足试验要求,触发高速摄像机采集模型泵的内部流动数据,通过软件处理可以清楚地观察到泵内部流动状态。

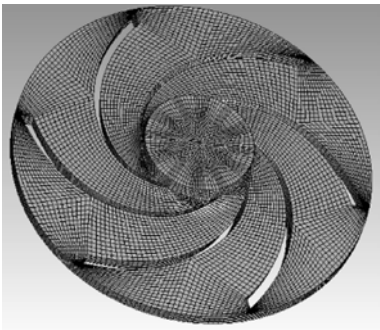
3 数值模拟方法

3.1 网格划分

模型泵分为进口段、叶轮、蜗壳和出口段四个计算区域,采用 ICEM 对熔盐泵三维几何模型进行网格划分,进出口段和叶轮采用六面体单元网格划分,蜗壳区域采用四面体单元网格划分,如图 4 所示。网格总数为 1465471 个,当网格数继续增加网格到 1953617 个时,泵扬程和效率波动仅为 0.5%,表明该网格精度已满足要求。

3.2 计算方法和边界条件

由于在对熔盐泵固液两相流数值计算时,作如下的假设:晶体颗粒为均匀球体,晶体颗粒在计算过程中不发生相变,液相不可压缩,各相为物性不变的连续相。叶轮和压水室的耦合采用 MRF (多重参考坐标系法)^[16],湍流模型采用 RNG (renormalization group) $k-\epsilon$ 湍流模型,多相流模



(a) 叶轮计算域



(b) 蜗壳计算域

图 4 模型泵计算网格

Fig. 4 Computation grids of model pump

型采用 Fluent 中的 Eulerian 模型,使用 phase coupled SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equation)算法求解压力速度耦合方程组,液固交换系数采用 gidaspow 模型,固固交换系数选 syamlal-obrien-symmetric 模型,颗粒碰撞归还系数为 0.9。

进口采用速度进口边界条件,假设进口速度轴向分布均匀,液相和固相分布均匀且速度相等,给定进口速度、湍动能、耗散率和固相体积分;出口边界条件为自由出流;假定壁面无滑移,近壁面采用标准壁面函数。

4 结果与分析

4.1 各冷态模型试验方案对应的结果分析

对熔盐泵输送熔盐时的情况,根据上面设计的模型试验方案,分别选取 $x = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 进行数值模拟,以验证上述相似理论和模型试验方案的正确性,结果如表 2 所列。

表 2 中第一行数据为原型泵数值模拟结果,其他数据为不同模型试验方案下的数值模拟结果。由表中数据可见,数值计算所得的扬程比与根据相似理论所得的扬程比几乎完全一致,各种相似工况下的模型泵的效率与原型泵的效率几乎完全相同,表明上述相似准则和模型试验方案是

表 2 输送固液两相介质的熔盐泵模型模拟结果

Table 2 Simulation results of the molten salt pump transporting solid-liquid two-phase medium

系数 x	扬程 H/m	扬程比 $H_{\text{m}}/H_{\text{p}}$		流量 $Q/(\text{m}^3/\text{h})$	轴功率 P/W	效率 $\eta/\%$
		模拟值	换算值			
原型泵	21.30			25.00	3796.09	72.79
0.4	0.86	0.451	0.442	2.66	30.04	72.13
0.6	0.416	0.199	0.197	3.99	5.32	72.72
0.8	8.51	0.113	0.111	5.32	88.16	72.81
1.0	1.52	0.071	0.071	6.66	38.90	72.84
1.2	2.11	0.052	0.050	7.99	46.15	72.64

正确的,完全可以通过采用在清水中添加合适物性的固颗粒作为试验介质来代替析出的结晶颗粒熔盐进行模型试验。选取表 1 中 $x=1.0$ 时的模型试验方案,在不同流量情况下,分别进行数值模拟和试验,得到熔盐泵的性能曲线如图 5 所示。由图中数据分析可得扬程(H)、轴功率(P)和效率(η)的最大误差分别为 7%、6.4%和 9.8%,都在 10%以内,表明采用数值模拟的方法可以较为准确地预测扬程、轴功率和效率等泵的外特性。



图 6 试验所得模型泵内颗粒运动轨迹
Fig. 6 Particle trajectories in model pump obtained by experiment

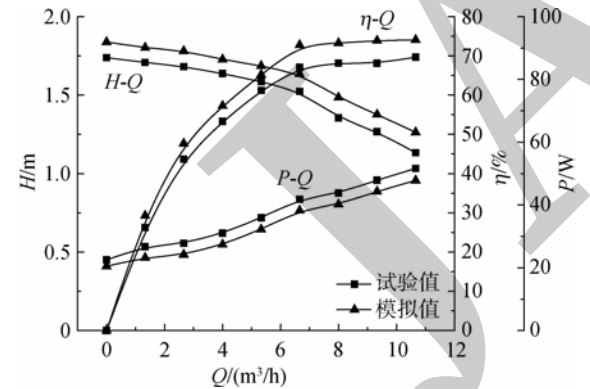


图 5 熔盐泵的性能曲线

Fig. 5 Performance curves of the molten salt pump

4.2 内部流动试验结果分析

采用高速摄像机对表 1 中 $x=1.0$ 时的模型泵进行内部流动试验,根据模型方案可知,当 $x=1.0$ 时,模型泵和原型泵的几何尺寸相同,模型泵转速为 386 r/min。采用水代替熔盐,并采用直径为 1 mm,密度为 1086 kg/m³ 的菜籽代替熔盐结晶颗粒。菜籽的物性在误差范围内,符合该模型试验方案下颗粒的物质属性,且该粒子的颜色与背景颜色具有较大的对比度,拍摄的图像较清晰。

图 6 为试验所得模型泵蜗壳和叶轮内颗粒的

运动轨迹,颗粒轨迹的起始和终止时间相同,由图可见,蜗壳内颗粒沿蜗壳流道方向运动,靠近叶轮的颗粒迹线长于靠近蜗壳壁面的颗粒迹线,表明靠近蜗壳壁面的流体速度较低,这与数值模拟的结果是一致的;叶轮内的颗粒基本沿圆周方向运动,在相同时间内,靠近叶轮圆心的颗粒迹线短于远离叶轮圆心颗粒迹线,说明沿着叶轮半径方向颗粒运动速度越来越大,这与模拟的结果也是一致的。

图 7 为数值模型模拟所得模型泵内颗粒运动的迹线,比较图 6 和图 7 可以发现,蜗壳内的迹线基本相同,数值模拟和试验结果具有较好的一致性。但需要说明的是,数值模拟得到的是三维迹线,试验得到的是根据高速摄像机拍摄的二维图像得到的二维迹线。虽然能拍到颗粒的整个运动过程,但可能颗粒不在同一焦平面上,根据二维图像,无法判断颗粒的第三维运动情况。

由于叶片的尾部具有较高的线速度,叶轮和蜗壳的动静耦合作用强,泵叶片出口磨损严重^[17]。在半径为 90 mm 的圆周上设置监测点,每

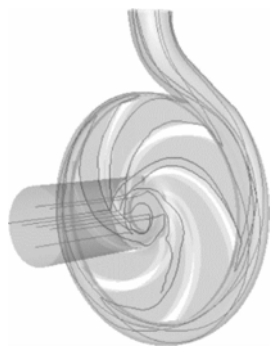


图 7 模拟所得模型泵内颗粒运动迹线
Fig. 7 Particle trajectories in model pump obtained by simulation

旋转 1° 布置一个监测点,以监测叶轮流道内固相颗粒的流动特征,监测点开始位置见图 3。试验只采集了 A 区域的拍摄结果,通过视频软件处理得到颗粒的绝对速度。A 区域监测点位置如图 3 所示。图 8 为叶轮出口流道内监测点处颗粒绝对速度的试验值和模拟值,试验根据视频处理从图中可以发现,叶轮出口处流道内颗粒的绝对速度从叶片的压力面到相邻的叶片的吸力面逐渐减小,72° 后流道内颗粒速度总体上大于 72° 前流道内颗粒的速度,但试验值均小于模拟值,且试验值沿周向的变化小于模拟值。6 个流道出口颗粒速度不一致,呈现非对称性,每个流道内颗粒速度沿周向呈现减小的趋势;由于蜗舌的影响,在 80° 左右流道速度波动较大,说明蜗舌附近流道内的流动较为复杂。

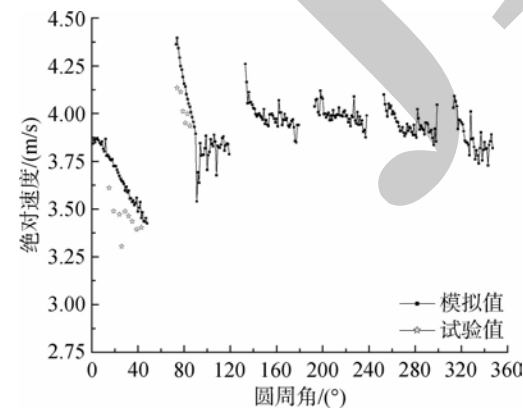


图 8 叶轮流道内监测点处颗粒绝对速度的模拟和试验值
Fig. 8 Absolute velocity at the monitoring points in impeller obtained by simulation and experiment

4.3 盐析后外特性和内部流动分析

假设析出结晶颗粒的体积分数为 10%,直径

为 1 mm,在额定转速下,熔盐结晶颗粒析出前后熔盐泵的性能曲线如图 9 所示。由图可见,结晶颗粒析出后,泵的扬程和效率出现下降,同时泵的轴功率增加。

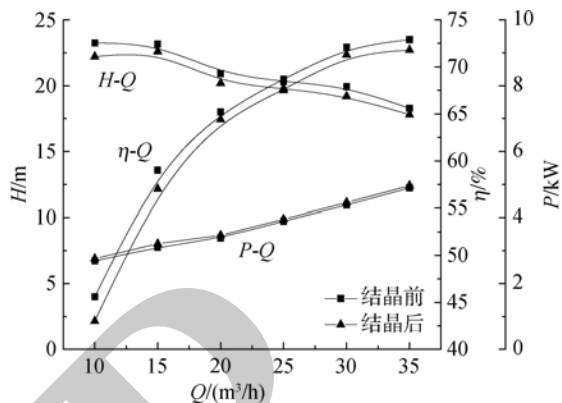


图 9 晶体析出前后的熔盐泵性能曲线
Fig. 9 Performance curves of the molten salt pump before and after crystal salting out

在固液两相流动中,固相和液相各自的进口和出口速度三角形是不同的,假设固液两相流中固相颗粒是拟流体,固相和液相进入叶轮前速度是相等的,泵在设计流量下运转时,液相流动情况和叶片的几何形状相符合,由于固液两相密度不同,在叶轮内流动时,固相的流线偏离液相流线,向叶片外侧偏移。在进入叶轮时,液相无撞击地进入流道,不会产生冲击损失;固相撞击叶片的头部进入流道,在叶片的进口处产生冲击。如图 10 (图中 u 表示圆周方向牵引速度, v 表示绝对速度, w 表示相对速度。下标 in 和 out 分别表示进口和出口, s 和 f 分别表示固相和液相),在叶片进口处固相和液相速度偏差不是很大,随着固液分离,在叶片出口处两者偏差较大。和单相流无冲击地进入流道比较,熔盐结晶颗粒析出后两相流

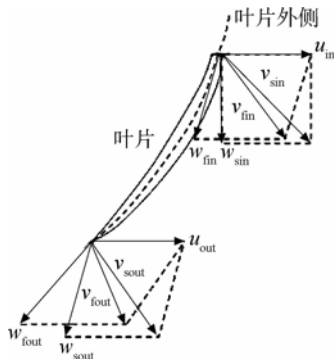


图 10 叶片进出口速度三角形
Fig. 10 Velocity triangles at the blade inlet and outlet

的水力效率降低。

结晶颗粒析出后,造成熔盐泵扬程下降的原因分析如下。

根据结晶颗粒相对运动方程^[18]可得

$$K_1(\rho_s - \rho_l) = (w_s - w_l) - K_2 \int f_{dl} dl \quad (14)$$

$$K_1(\rho_s - \rho_l) = (w_{sr} - w_{lr}) - K_2 \int f_{dr} dr \quad (15)$$

$$K_1(\rho_s - \rho_l) = (w_{su} - w_{lu}) - K_2 \int f_{du} du \quad (16)$$

其中 K_1 、 K_2 是大于零的变量, f_d 是液相对颗粒的阻力,当 f_d 的方向和颗粒运动的方向相同时为正,反之为负;下标 l 、 r 和 u 分别表示流体流动方向、径向和周向。

由式(14)可以看出,若 $\rho_s > \rho_l$,必有 $w_s > w_l$ 。因为假如颗粒相对速度小于液相的相对速度,那么液相对颗粒的阻力方向与颗粒的运动方向相同, $f_d > 0$,式(14)等号右边为负值,与等式左端符号不一致,等式不成立,所以假设不成立,那么 $w_s > w_l$ 。同理 $\rho_s < \rho_l$,必有 $w_s < w_l$ 。与式(14)分析类似,分析式(15)和式(16),若 $\rho_s > \rho_l$,则颗粒的相对速度的径向分量大于液相的径向分量 $w_{sr} > w_{lr}$;若 $\rho_s < \rho_l$,则颗粒的相对速度的圆周向分量大于液相的圆周向分量 $w_{su} > w_{lu}$ 。

当熔盐泵输送结晶颗粒的密度较大时,在同样的流量下,其扬程小于仅仅输送液相熔盐时的扬程,其主要的原因之一就是颗粒的密度大于液相时,颗粒绝对速度沿圆周方向的分量小于液相。通过上面的分析可以得到叶轮内固相颗粒和液相的速度三角形之间的关系如图 11 所示。

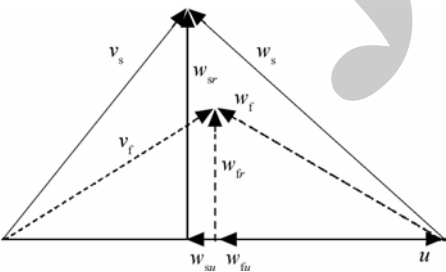
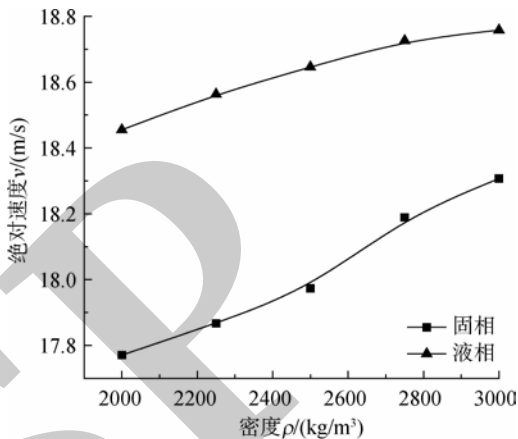


图 11 叶轮出口速度三角形

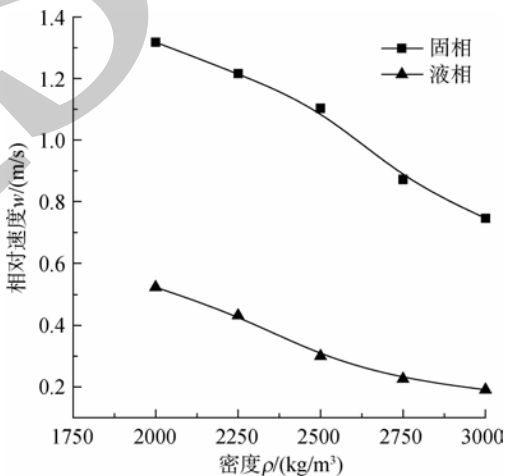
Fig. 11 Velocity triangle at the impeller outlet

为了得到不同密度颗粒对泵扬程影响,选取五种不同密度的晶体颗粒,颗粒的其他属性相同,五种颗粒密度分别是 2 000、2 250、2 500、2 750、3 000 kg/m³。分析叶轮出口附近颗粒的速度,发现颗粒绝对速度和相对速度大小变化规律相似,由于篇幅原因,不再详述。图 12 是不同颗粒密度

下固相和液相在叶轮出口处绝对速度和相对速度均值,从图中可以发现随着颗粒密度的增加,叶轮出口处液相和固相的绝对速度增大,相对速度减小;但是固相的绝对速度一直小于液相的绝对速度,固相的相对速度一直大于液相的相对速度。固相介质密度的增大对固相速度的影响大于对液相的影响,随着密度增加,影响更加明显。



(a) 固相和液相的绝对速度



(b) 固相和液相的相对速度

图 12 不同颗粒密度下固相和液相的速度均值
Fig. 12 Average velocity of solid and liquid phase for different particle densities

根据上文的分析可以画出不同密度的固相介质在叶轮出口处的速度三角形,如图 13 所示。泵的转速不变时,圆周方向牵引速度 u 不变,以 O_1 为圆心分别以绝对速度值 v_I 、 v_{II} 为半径画圆弧,并以 O_2 为圆心分别以相对速度值 w_I 、 w_{II} 为半径画圆弧,由四条圆弧得到四个交点 (v_I 、 v_{II} 、 w_I 、 w_{II} 为两种不同密度颗粒的绝对速度和相对速度, $v_{II} > v_I$, $w_{II} > w_I$)。当 $\rho_{II} > \rho_I$ 时, $v_{s,II} > v_{s,I}$, $w_{s,II} < w_{s,I}$,它们的绝对速度和相对速度的交

点只能在点 1 和点 3 处,此时叶轮出口的速度三角形如图 13 所示,相对速度 w 沿周向的分速度分别为 w_{uI} 和 w_{uII} ,从图中可以发现 $w_{uI} > w_{uII}$ 。根据泵的理论扬程公式: $H_t = uw_u/g$ 可得,固相密度越大,相对速度沿周向的速度分量越小,泵的扬程越小。

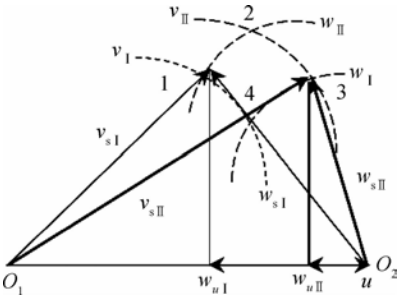


图 13 叶轮出口处固相速度三角形

Fig. 13 Velocity triangle of solid phase at the impeller outlet

5 结 论

1) 采用白金汉定理,建立了熔盐泵输送固液两相流的相似准则,导出了原型泵和模型泵相似的关系式,根据此关系可以将原型泵和模型泵的性能进行相互转换。

2) 数值模拟结果与根据相似理论所得结果几乎完全一致,表明相似准则和模型试验方案是正确的,完全可以通过采用在清水中添加固体颗粒作为试验介质来代替析出结晶颗粒熔盐进行模型试验。数值模拟结果和试验结果之间的误差小于 10%,数值模拟可以代替试验进行熔盐泵内两相流研究。

3) 叶轮出口处流道内颗粒的绝对速度从叶片的压力面到吸力面逐渐减小,靠近蜗舌附近流道颗粒速度波动较大。

4) 分析得到了叶轮内固相颗粒和液相的速度三角形之间的关系,析出结晶颗粒后,熔盐泵的扬程减小,轴功率增大,效率降低。当颗粒的密度大于液相的密度,颗粒绝对速度沿圆周方向的分量小于液相,输送固液两相时扬程小于输送液相熔盐时的扬程。

5) 分析得到了叶轮出口处密度分别为 2000、2250、2500、2750、3000 kg/m³ 的颗粒的速度三角形之间的关系,固相密度越大,叶轮出口绝对速度沿圆周方向的分量越小,泵的扬程越小,效率越低。

参考文献:

- [1] 韩利峰,陈永忠,周大勇,等. HTS 熔盐实验回路分布式控制系统设计[J]. 核技术,2013,36(9):1-6.
HAN Lifeng, CHEN Yongzhong, ZHOU Dayong, et al. Design of the distributed control system for HTS molten salt test loop[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(9): 1-6. (in Chinese)
- [2] 杨敏官,吴承福,高波,等. 离心泵叶轮内盐析晶体颗粒分布特性试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2011,32(5):528-532.
YANG Minguan, WU Cheugfu, GAO Bo, et al. Distribution feature experiment of salt-out crystal particles in a centrifugal pump impeller[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2011, 32(5): 528-532. (in Chinese)
- [3] 高波,杨敏官. 旋流泵内颗粒分布及对盐析特性的影响[J]. 工程热物理学报,2009,30(12):2031-2033.
GAO Bo, YANG Minguan. Particle concentration distribution and its effect on salt-out features in a vortex pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(12): 2031-2033. (in Chinese)
- [4] 邵春雷,顾伯勤,周剑锋,等. 熔盐泵外特性及内部流动的试验及数值模拟[J]. 航空动力学报,2016,31(8):1935-1942.
SHAO Chunlei, GU Boqin, ZHOU Jianfeng, et al. Experiment and numerical simulation of external performances and internal flow of a molten salt pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(8): 1935-1942. (in Chinese)
- [5] 邵春雷,顾伯勤,黄星路,等. 低比转速泵叶轮流道内部流动的 PIV 试验[J]. 航空动力学报,2010,25(9):2091-2096.
SHAO Chunlei, GU Boqin, HUANG Xinglu, et al. Experimental study on flow in the impeller of low specific speed pump using particle image velocimetry[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(9): 2091-2096. (in Chinese)
- [6] LIU Dong, WANG Yayun, WANG Yingze, et al. Research of liquid-solid two phase flow in centrifugal pump with crystallization phenomenon[J]. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2014, 7(2): 54-59.
- [7] 刘栋,杨敏官,高波. 离心泵叶轮内部伴有盐析流场的 PIV 试验[J]. 农业机械学报,2008,39(11):55-58.
LIU Dong, YANG Minguan, GAO Bo. PIV measurement of flow with salt-out in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 55-58. (in Chinese)
- [8] 杨敦敏. 离心泵内两相流流动特性的图像测量[D]. 西安:西安理工大学,2004.
YANG Dunmin. Image measurement of two-phase flow characteristic in centrifugal pump impeller[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [9] ZHU Bing, CHEN Hongxun, WEI Qun. Numerical and experimental investigation of cavitating characteristics in

centrifugal pump with gap impeller[J]. International Journal of Turbo and Jet-Engines,2014,31(2):187-196.

[10] 马冬英,雷宗琪,梁国柱. 基于相对流面理论的液体火箭发动机泵内部流动计算[J]. 航空动力学报,2013,28(3):583-590.

MA Dongying,LEI Zongqi,LIANG Guozhu. Calculation of internal flow in pump of liquid rocket engine based on theory of relative stream surface[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(3):583-590. (in Chinese)

[11] 张群峰,闫盼盼,单建平,等. 航空发动机滑片泵数值模拟[J]. 航空动力学报,2014,29(11):2537-2542.

ZHANG Qunfeng,YAN Panpan,SHAN Jianping,et al. Numerical simulation on an aero-engine vane pump[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(11):2537-2542. (in Chinese)

[12] 杨敏官,邵腾,高波,等. 熔盐泵分流式空间导叶内部流动及其非定常特性[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(4):306-310.

YANG Minguan,SHAO Teng,GAO Bo,et al. Interior flow and unsteady performance of molten salt pump with splitter space guide vane[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2015,33(4):306-310. (in Chinese)

[13] 李云校,康灿,朱宜超,等. 蜗壳结构对立式高温熔盐泵性能的影响[J]. 化工学报,2013,64(8):2853-2859.

LI Yunxiao,KANG Can,ZHU Yichao,et al. Influence of volute structure on performance of vertically-installed high temperature molten salt pump[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering,2013,64(8):2853-2859. (in Chinese)

[14] SHAO Chunlei,ZHOU Jianfeng,CHENG Wenjie. Experimental and numerical study of external performance and internal flow of a molten salt pump that transports fluids with different viscosities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2015,89:627-640.

[15] 邵春雷,顾伯勤,周剑锋,等. 离心泵内部流动高速摄像测量及误差分析[J]. 农业工程学报,2015,31(24):52-58.

SHAO Chunlei,GU Boqin,ZHOU Jianfeng,et al. Internal flow measurement in centrifugal pump by high speed photography and error analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(24):52-58. (in Chinese)

[16] LISSETT B,MAURICIO G P. Experimental visualization of two-phase flow inside an electrical submersible pump stage[J]. Journal of Energy Resources Technology,2011,133(4):042901.1-042901.12.

[17] ZHANG Yuliang,LI Yi,CUI Baoling,et al. Numerical simulation and analysis of solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2013,26(1):53-60.

[18] 刘栋. 离心泵内部盐析流场的数值模拟及实验研究[D]. 江苏镇江:江苏大学,2008.

LIU Dong. Numerical simulation and PIV measurement of salt-out two-phase flow in centrifugal pump[D]. Zhen Jiang Jiangsu:Jiangsu University,2008. (in Chinese)

(编辑:陈 越)