

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.03.003

熔盐黏度对熔盐泵内盐析晶粒运动特性的影响

方向阳, 邵春雷

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要:为了揭示熔盐泵输送伴有盐析的两相流动规律,采用 Eulerian 多相流模型描述固液两相流动特征,分析了输送不同黏度介质时,叶轮和蜗壳流道内盐析晶粒的运动特性。结果表明:泵内存在一些和进口晶粒体积分数(5%)相等的点,由这些点组成的线和面的形状和位置不受输送熔盐黏度的影响;输送熔盐的黏度越大,蜗壳和叶轮流道内晶粒分布越均匀;当输送黏度为 $0.400\ 00\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 时,流道内晶粒的体积分数与泵入口处的体积分数基本相同;叶片的压力面和吸力面的进口处和尾部分别具有较大的晶粒体积分数和较高的固相滑移速度。研究结果可为熔盐泵内部伴有盐析的两相流动的研究提供参考。

关键词:熔盐泵;盐析两相流;黏度;晶粒体积分数;Eulerian 多相流模型

中图分类号:TH311 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)03-0009-06

Effect of Molten Salt Viscosity on Movement Characteristics of Crystal Particles in Molten Salt Pump

FANG Xiangyang, SHAO Chunlei

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to reveal the regularity of the crystallization two-phase flow in the molten salt pump, Eulerian multi-phase model was used to describe the crystallization two-phase flow characteristics. Motion characteristics of crystal particles in impeller and volute flow passages were analyzed when pumping various viscosity mediums. The obtained results are as follows: there are some special points inside the pump, where the volume fraction is equal to that at the inlet (5%). Moreover, the shape and location of curves and surfaces made up of those points are independent of molten salt viscosity. The greater the viscosities of molten salt, the more uniform the distribution of the crystal particles in impeller and volute flow passage. When the viscosity is $0.400\ 00\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, the volume fraction of the crystal particles in the flow passage is nearly the same as that at the inlet of pump. The volume fraction of the crystal particles is large and the slip velocity is high at the inlet and outlet of the pressure surface and the suction surface, respectively. The results provide references for the study of crystallization two-phase flow in the molten salt pump.

Keywords: molten salt pump; crystallization two-phase flow; viscosity; volume fraction of crystal particles; Eulerian multi-phase model

熔盐泵是一种输送高温熔盐的泵,主要应用于太阳能高温传热、蓄热以及化工行业中大流量熔盐换热等场合。正常工作温度为 $250\sim 500\ ^\circ\text{C}$,有些特殊的熔盐泵温度能达到 $800\ ^\circ\text{C}$ 以上^[1]。熔盐泵输送不同黏度熔盐时,泵的性能受流体黏度影响显著^[2],因而研究熔盐黏度对熔盐泵内部盐析两相流动影响是必要的。

介质黏度是影响泵特性的主要因素之一,许多学者对此开展了研究。程文洁等^[3]研究了不同黏度和叶片与蜗舌间不同夹角下泵内流场变化;Li^[4]同时分析了叶片出口角和黏度2个因素对离心泵内非稳态流动的影响;Trrevisan 等^[5]在原型泵的基础上研制了透明的模型泵,在不同的转速下进行了两相流试验,揭示

收稿日期:2016-12-06;修回日期:2017-01-09

基金项目:国家自然科学基金(51306087);江苏省自然科学基金(BK2012430);校人才计划培育项目(44202120);江苏省六大人才高峰项目(GDZB-032)。

第一作者简介:方向阳(1990),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事流体机械研究。E-mail:fangxyang@njtech.edu.cn

了黏度对两相流形和水力性能的影响。在盐析两相流方面,刘栋^[6-7]结合 PIV 与图像处理方法对离心泵内的两相流速度场进行了分析,提出晶体颗粒改变了液相的相对速度分布,并且有向叶轮通道中部的压力面移动的趋势;汪亚运^[8]运用 CFD-PBM 双向耦合方法对离心泵盐析两相流进行模拟,得到了盐析颗粒尺寸分布情况和变化规律;黄思杰等^[9]基于 Eulerian 多相流模型对熔盐泵输送两相介质时,研究了不同的盐析颗粒属性(粒径、体积分数和密度)对熔盐泵内部流动影响。文献大多针对输送单黏度的两相流介质开展研究的,变黏度对盐析两相介质流动影响的研究报道比较少。

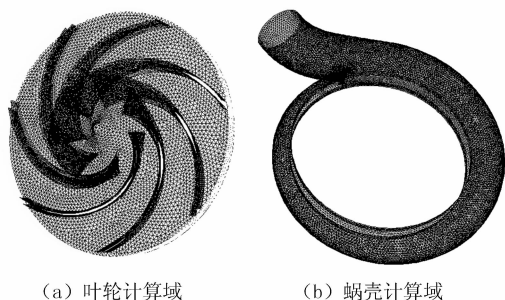
文中使用 Eulerian 模型对一台熔盐泵进行数值计算,以探究输送不同黏度时泵内伴有盐析两相流动特征,揭示熔盐黏度对熔盐泵内盐析晶粒运动特性的影响。研究结果可为流体机械内部伴随盐析的两相流动的研究提供参考。

1 数值计算方法

1.1 几何模型

熔盐泵基本参数:泵进口直径为 110 mm,泵出口直径为 50 mm,叶轮直径为 255 mm,叶片数为 7,泵设计流量为 200 m³/h,设计转速为 2 900 r/min,设计扬程为 84 m。

笔者采用 ICEM CFD 软件对模型进行网格划分,把整个计算域划分为进口管段、叶轮、蜗壳和出口管段 4 个区域。由于叶轮和蜗壳区域结构复杂,应用适应性较强的非结构化四面体网格,对进水段和出水段采用六面体结构化网格,提高了计算效率。为了确保计算结果的可靠性对局部进行了网格加密,最后得到划分的网格总数为 1 319 217,如图 1 所示。当划分的网格总数从 1 319 217 增加到 2 320 512 时,泵的扬程和效率变化均在 0.3% 以内,可认为该网格数满足计算的要求^[10]。说明网格数为 1 319 217 时满足计算准确性。



(a) 叶轮计算域

(b) 蜗壳计算域

图 1 计算模型网格

Figure 1 Computational grid

1.2 计算方法和边界条件

熔盐泵内伴有盐析的固液两相流动在计算时作如下假设:①液相选择不可压缩,固相为分散相,每相的物理特性为常数。②颗粒为球形,不考虑相变。③各相皆为物性不变的连续相。模型泵进口采用速度边界条件,给定进口固相和液相的初始速度、固相体积分数、湍动能、耗散率。进口处速度轴向分布均匀,固相和液相速度相等,出口采用 outflow 边界条件,假设泵内流动定常,壁面无滑移,近壁面采用标准壁面函数。

泵内流动为定常流动,使用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLE 算法进行定常数值计算,动静计算域之间的耦合采用多重参考坐标系法(MRF);基于 Eulerian 多相流模型来描述模型泵内盐析两相流动,使用 Phase Coupled SIMPLE 算法求解压力速度耦合方程组,液固两相拖曳力采用 Gidaspow 模型^[11],固固交换系数选择 Syamlal-Obrien-Symmetric 模型,颗粒的碰撞归还系数为 0.9。

2 计算结果和分析

2.1 熔盐黏度对熔盐泵内部流动的影响

选择生产中应用到的 4 种熔盐介质,研究熔盐泵输送不同熔盐时盐析晶粒运动特性。4 种熔盐物性分别为:熔盐 1#黏度为 0.007 29 Pa·s,密度为 1 938 kg/m³,盐析晶粒密度为 2 113 kg/m³;熔盐 2#黏度为 0.018 12 Pa·s,密度为 1 980 kg/m³,盐析晶粒密度为 2 158 kg/m³;熔盐 3#黏度为 0.080 00 Pa·s,密度为 1 972 kg/m³,盐析晶粒密度为 2 139 kg/m³;熔盐 4#黏度为 0.400 00 Pa·s,密度为 2 013 kg/m³,盐析晶粒密度为 2 213 kg/m³。

图 2 为熔盐泵在输送不同黏度情况下,泵中截面上盐析晶粒体积分数分布。晶粒的直径为 0.4 mm,体积分数为 5.0%。由图可知,输送不同黏度熔盐时,随着黏度 μ 的减小,晶粒的分布越来越不均匀,聚集在蜗壳内壁和叶片压力面的晶粒也越来越多,固相的离析作用也更加明显。可见黏度 μ 对晶粒的体积的分布有较大影响。

为了得到泵内伴有盐析的固液两相流的流动特性,在叶轮内部设置检测点,根据已有研究^[12]可知,泵叶片的前缘和后缘磨损较为严重,叶片的前缘发生晶粒撞击,叶片的尾部线速度较大,叶片和蜗壳耦合作用较强。因此,在叶轮的直径分别为 97 和 218 mm 圆周设置监测点,如图 3 所示。监测点从 0°开始设置,叶轮每旋转 1°布置一个监测点;同时在蜗壳各截面布置了若干监测点,由于蜗壳流道宽度不一样,每个位置监测点编号如表 1 所示。从第 I 截面到第 X 截面,由叶

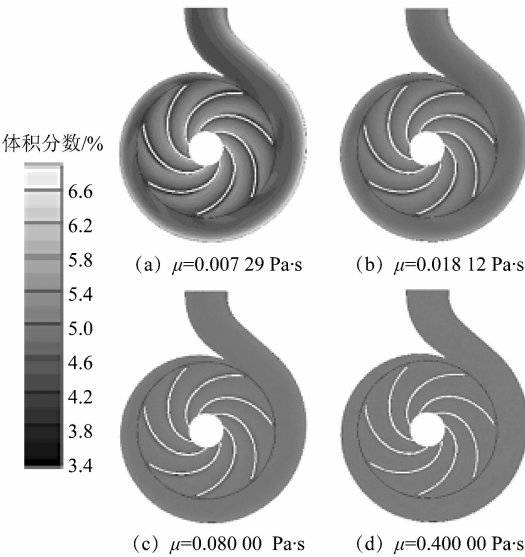


图2 晶粒体积分数分布

Figure 2 Particle volume fraction distribution

轮与蜗壳交界面开始,分别设置监测点,以监测叶轮进出口流道内和蜗壳截面的晶粒流动特征。

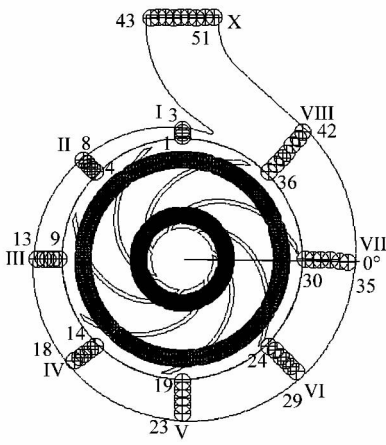


图3 监测点的布置

Figure 3 Position of monitoring points

表1 监测点编号

Table 1 Number of monitoring points

监测点位置	监测点编号	监测点位置	监测点编号
I	1~3	VI	24~29
II	4~8	VII	30~35
III	9~13	VIII	36~42
IV	14~18	X	43~51
V	19~23		

图4所示为熔盐泵入口晶粒体积分数为5.0%,输送不同黏度熔盐时,叶轮流道前缘的晶粒体积分数分布。从图中可见叶轮各流道晶粒分布的趋势一致,

只是在数值上存在差异,从叶片压力面到吸力面,晶粒的体积分数减小;输送熔盐的黏度越小,流道前缘晶粒分布越不均匀。当输送黏度为0.007 29 Pa·s时,晶粒分布体积分数在4.38%~6.04%之间;当输送黏度为0.080 00 Pa·s时,晶粒分布体积分数在4.86%~5.12%之间;当输送黏度为0.400 00 Pa·s时,各个流道晶粒体积分数都在5.0%附近,近似等于进口的体积分数。为了便于比较,图中标出了进口处晶粒的浓度,从图中可以看出,在各流道均有一个点,晶粒体积分数曲线的交点在该点附近,且该点处体积分数为5.0%,和进口处的晶粒的体积分数相等,称该点为“奇异点”。奇异点处晶粒的体积分数不随熔盐黏度变化而变化。在叶片压力面到奇异点之间,熔盐黏度越大,晶粒的体积分数越小;奇异点到叶片吸力面之间,黏度越大,晶粒的体积分数越大。

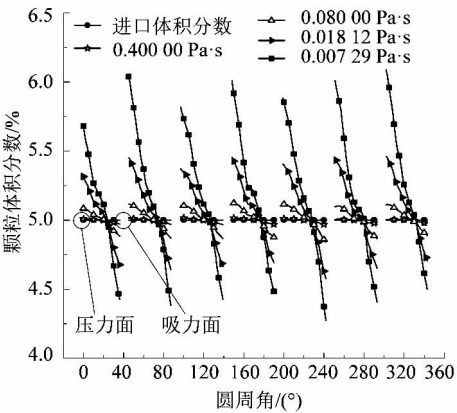


图4 叶轮流道前缘晶粒体积分数

Figure 4 Particle volume fraction in front section of impeller passage

图5所示为熔盐泵入口晶粒体积分数为5.0%,输送不同黏度熔盐时,叶轮流道后缘的晶粒体积分数分布。和前缘晶粒分布类似,各流道晶粒体积分布曲线整体趋势一样,晶粒体积分数呈现先增大后减小的趋势,和进口体积分数为5.0%曲线有2个交点。奇异点之间,熔盐黏度越大,晶粒的体积分数越大;从叶片压力面和吸力面到奇异点之间,熔盐黏度越大,都出现晶粒的体积分数越小趋势。黏度越大,每个流道内,晶粒的分布越均匀。

图6所示为熔盐泵入口晶粒体积分数为5.0%,输送不同黏度熔盐时蜗壳内不同截面上晶粒的体积分数分布。图中从左到右9个数据区域分别对应第I截面到第X截面上监测点数据。从图中可以看出输送黏度为0.400 00 Pa·s时蜗壳内体积分数和进口处几乎相等,输送不同黏度熔盐时,蜗壳流道内同一截面晶粒

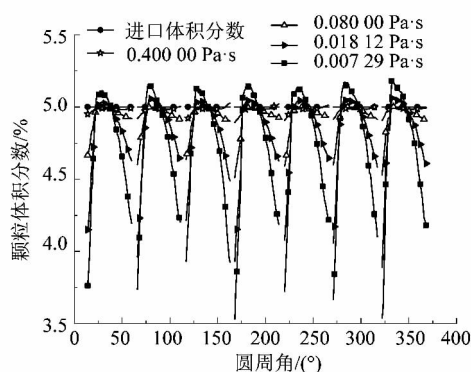


图5 叶轮流道后缘晶粒体积分数

Figure 5 Particle volume fraction in tail region of impeller passage

体积分布规律相似。在蜗壳内也出现了和叶轮内部相似的奇异点。监测点布置的方向是从叶轮与蜗壳界面处开始到蜗壳壁面附近结束,蜗壳截面内,越靠近蜗壳壁面,晶粒的体积分数越大。从叶轮与蜗壳交界面到奇异点,输送的黏度越大,晶粒体积分数越大;从奇异点到蜗壳壁面,分布规律相反,输送的黏度越大,晶粒体积分数越小。蜗壳流道内,输送的黏度越大,晶粒体积分数越均匀。此分布规律和叶轮流道内晶粒分布规律相同。

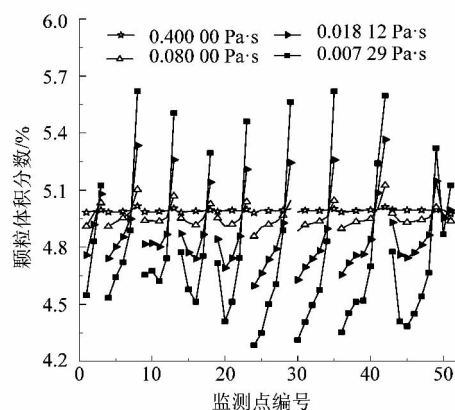


图6 蜗壳流道内晶粒体积分数

Figure 6 Particle volume fraction of volute passage

2.2 流道内晶粒等体积分数点分布

在直径分别为 97 和 218 mm 的叶轮和蜗壳各截面流道内都出现了奇异点,即叶轮流道前缘和后缘都出现类似奇异点现象,可以推测任意截面叶轮流道中都存在至少一个奇异点;根据蜗壳各截面流道内都出现了一个奇异点,推测中截面蜗壳流道内每个截面都至少存在一个奇异点。这些奇异点组合起来形成“奇异线”,泵内无数的奇异线形成“奇异面”。

输送不同黏度熔盐,晶粒体积分数为 5.0% 时中

截面奇异点分布如图 7 所示。随着输送熔盐黏度的增大,泵内奇异点的位置几乎没变,说明熔盐黏度对奇异点位置影响很小。在叶轮的进口流道内只有一条奇异线,而从叶轮流道中部开始出现 2 条奇异线并且在流道出口附近相交与同一位置,蜗壳流道奇异线位置靠近蜗壳壁面附近,在蜗壳出口附近出现 2 条奇异线。该现象有待进一步研究。

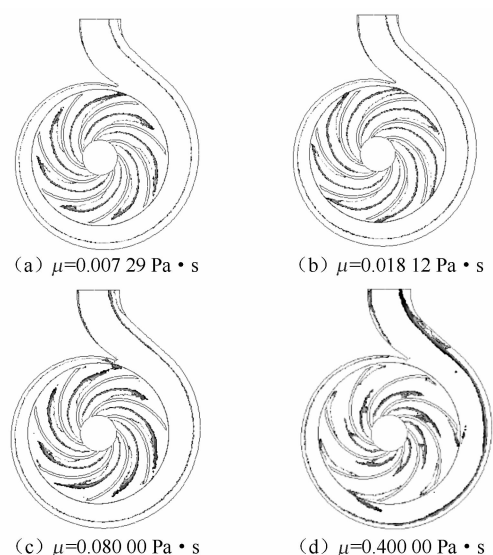


图7 晶粒体积分数为 5.0% 时中截面点分布

Figure 7 Crystal distribution of 5.0% particle volume fraction in middle section

图 8 所示为熔盐泵入口晶粒体积分数为 5.0%, 输送不同黏度熔盐时,泵内所有晶粒体积分数为 5.0% 的点组成了奇异面,奇异面主要位于叶轮各流道和蜗壳流道中间位置。在输送不同黏度熔盐时,泵内部都存在上述奇异面,而且随着输送黏度的变化,奇异点组成的奇异面位置并没有明显改变,说明该面的位置与输送熔盐黏度无关。

2.3 熔盐黏度对叶片壁面晶粒速度和体积分数的影响

晶粒的体积分数和滑移速度影响泵内过流部件的磨损程度^[12],叶片壁面的晶粒的体积分数越大,晶粒的滑移速度大,则晶粒对叶片的磨损越严重。为了考察在泵输送不同黏度熔盐时叶轮流道内的流动,在靠近蜗舌的叶片的压力面和吸力面的中间流线上分别布置 17 个监测点,如图 9 所示,监测叶片壁面的晶粒滑移速度和体积分数。

图 10 所示为输送晶粒直径相同、黏度不同的熔盐时,靠近蜗舌的叶片的吸力面和压力面的中间流线监测点上的体积分数。由图 10(a)可见,叶片吸力面晶粒体积分数随着输送熔盐黏度的增大而增大。当输送黏度为 0.400 00 Pa·s 的熔盐时,晶粒的体积分数在

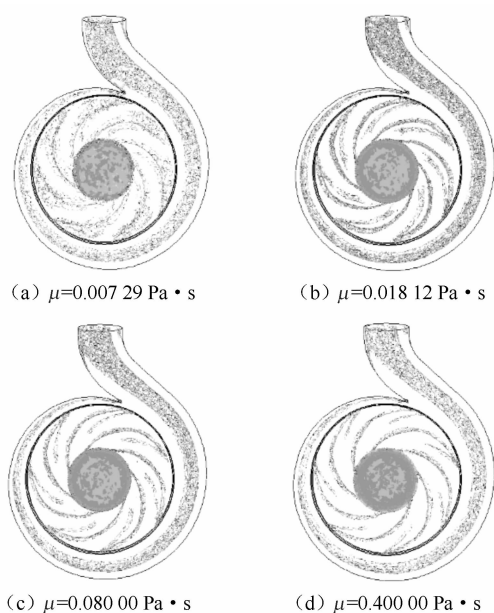


图8 晶粒体积分数为5.0%时泵内点分布
Figure 8 Points distribution of 5.0% crystal volume fraction

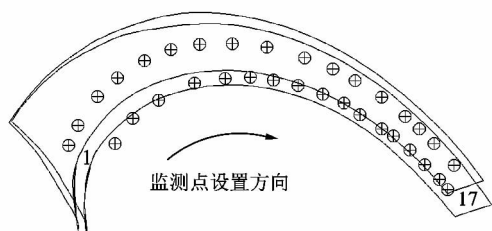


图9 叶片上监测点的布置
Figure 9 Position of monitoring points of blade surface

叶片的吸力面最大,在叶片的吸力面和压力面晶粒体积分数均维持在5.0%左右,和进口晶粒体积分数相近。输送黏度为0.080 00和0.400 00 Pa·s熔盐时,吸力面的体积分数沿径向基本不变;输送黏度为0.007 29和0.018 12 Pa·s的熔盐时,吸力面的体积分数沿径向先减小然后维持稳定。在叶片压力面,晶粒体积分数沿径向总体呈减小趋势。在叶片进口附近,黏度越小,晶粒体积分数越大;叶片出口附近,黏度越小,晶粒体积分数越小。叶片的压力面和吸力面晶粒体积分数最大的地方都集中在叶片进口处。

图11所示为输送不同黏度熔盐情况下,叶片壁面中间流线上监测点的滑移速度。由图可知,在叶片压力面,黏度越大,晶粒滑移速度越大;在叶片吸力面进口附近,黏度越大,滑移速度越大,在吸力面尾部附近,黏度越大,滑移速度越小。吸力面滑移速度总体大于

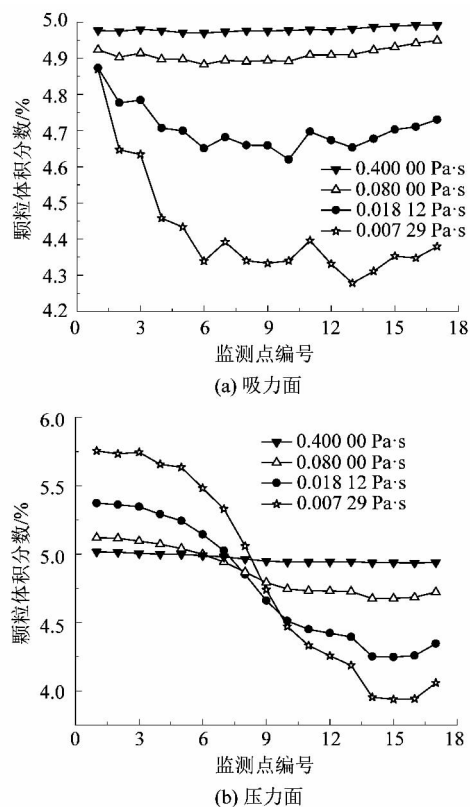


图10 晶粒在叶片壁面的体积分数
Figure 10 Volume fraction of crystal particles of blade surface

压力面滑移速度,随着叶轮直径的增加,叶片压力面晶粒滑移速度出现小幅度减小后快速增大,而吸力面晶粒滑移速度出现快速增大后趋于平稳。叶片的压力面和吸力面尾部都具有较高的固相滑移速度。

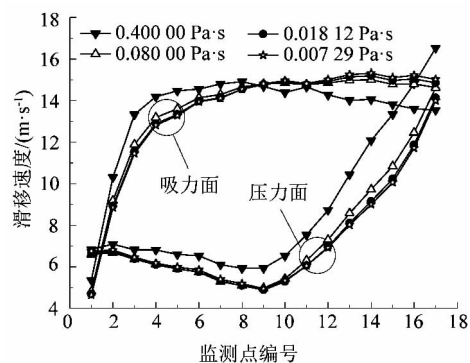


图11 晶粒在叶片壁面的滑移速度
Figure 11 Slip velocity of crystal particles of blade surface

3 结语

1) 输送熔盐的黏度越大,蜗壳和叶轮流道内晶粒分布越均匀。当输送黏度为0.400 00 Pa·s时,流道(下转第19页)