

旋流泵内部盐析颗粒流场 PIV 试验^{*}

高 波¹ 杨敏官¹ 冯 浪¹ 于学锋²

(1. 江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013; 2. 威乐(中国)水泵系统有限公司, 北京 101300)

【摘要】 为探索旋流泵内盐析颗粒的流动规律,利用 PIV 粒子图像速度场仪对泵内颗粒流场进行了测量,获得了颗粒准三维速度场分布,初步掌握了泵内不同工况下颗粒的流动特征。结果表明,叶轮各轴截面上速度分布差异显著,无叶腔中速度分布呈现强迫涡旋和自由涡旋的特征;流量增加,颗粒流在叶轮进口处相对速度增大,出口处相对液流角也增大,无叶腔小半径处颗粒径向速度分量随之增大;颗粒流存在纵向涡旋,涡旋中心位于叶轮流道中部,且随流量变化并不明显。

关键词: 旋流泵 盐析颗粒 粒子图像测速法

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0081-04

Salt-out Particle Flow Field in a Vortex Pump by PIV Measurement

Gao Bo¹ Yang Minguan¹ Feng Lang¹ Yu Xuefeng²

(1. School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. WILLO China Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract

In order to understand the flow pattern of salt-out particles in a vortex pump, PIV was adopted to measure the particle flow field. The quasi three dimensions velocity field of the particles was obtained. The particle flow characteristics were primarily known under several running conditions. It is indicated that velocity distributions are obviously different on various axial sections in the impeller. The forced and free vortexes were both existed in the vaneless volute. When the pump flow rate increased, particle relative flow velocity increased at the impeller inlet, as well as the relative flow angle at the impeller outlet. Near the small radius area of vaneless volute, radial velocity component increased with the flow rate changed. There is also portrait vortex of particle flow, and the vortex center is located around the centre of impeller flow passage. It is almost no change with the flow rate.

Key words Vortex pump, Salt-out particle, Particle image velocimetry

引言

盐析是指以钠、钾离子为主要成分的单一或多种物质的混合盐溶液中晶体物质析出、生长、沉积的过程,析出的晶体颗粒随溶液一并输运,形成伴有盐析的液固两相流动^[1]。盐析晶体颗粒的流动结构影响着盐类溶液输送设备(泵)内部的盐析进程和盐析特性。在不同工况、温度、浓度等条件下,泵内两相流场发生变化,这种改变直接作用于盐析晶体颗粒的生成、生长、迁移等过程^[2]。因此,对泵内盐

析晶体颗粒流场真实结构的研究尤为重要。

本文运用 PIV 粒子图像速度场仪对旋流式输送泵内部的盐析晶体颗粒在不同运行工况条件下的流场进行测量、显示,以期为建立泵内的盐析流动模型奠定基础。

1 试验方案

1.1 试验装置

试验台如图 1 所示,由试验泵、带有温控的试验回路和测量仪表等 3 部分组成。恒温储液罐容积

收稿日期: 2011-01-14 修回日期: 2011-04-15

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50476068)和江苏大学校基金资助项目(10JDC032)

作者简介: 高波,讲师,主要从事流体机械性能及内部多相流动研究,E-mail: gaobo@ujs.edu.cn

通讯作者: 杨敏官,教授,博士生导师,主要从事流体机械及工程中多相流动研究,E-mail: mgyang@ujs.edu.cn

1 500 L, 内有电加热系统、温控系统和搅拌装置, 保证试验过程中介质温度可调且稳定, 温控误差范围 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$; 进出口管路采用 PVC 材质。出口管路上的不锈钢阀门控制泵工况并配有电磁流量计测量流量。真空表和压力表分别用于监测泵进、出口压力。流量计和压力表测量前均已校准, 满足测量精度要求。

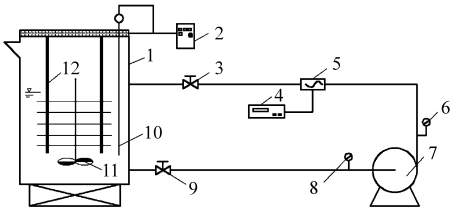


图 1 盐析两相流测试试验台示意图
Fig. 1 Test loop of salt-out two-phase flow

1. 恒温储液罐 2. 温控系统 3. 出口阀 4. 流量显示仪 5. 电磁流量计 6. 压力表 7. 试验泵 8. 真空表 9. 进口阀 10. 热电偶 11. 搅拌系统 12. 电加热器

1.2 试验泵及测量区域

试验泵的设计参数: 流量 $Q = 14\text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 $H = 4.5\text{ m}$, 转速 $n = 1\,450\text{ r/min}$, 比转数 $n_s = 106$ 。如图 2 所示, 泵叶轮外径 $D_2 = 120\text{ mm}$, 叶轮出口宽度 $b_2 = 24\text{ mm}$; 无叶腔宽度 $L = 35\text{ mm}$, 采用环形压水室结构, 8 枚放射型直叶片。为考察不同轴截面上的流场情况, 测量区域为: 径向模式下在泵内轴向位置布置 3 个测量截面 ($Z = 0.2, 0.5, 0.9$, 分别表示 0.2 倍、0.5 倍、0.9 倍叶片宽处的轴截面), 轴向模式下测量区域如图 2 左侧图中阴影部分所示。

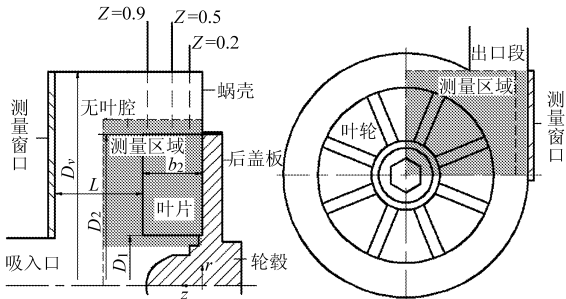


图 2 测量断面及区域
Fig. 2 Measuring section and area

1.3 速度测量模式

试验采用 TSI 公司的二维 PIV 测试系统, 要充分显示泵内晶体颗粒流动结构, 则需通过改变测量模式来实现准三维测量。

根据旋流泵内部流动特征, 拟采用径向和轴向两种测量模式。径向模式下能获得周向及径向速度信息, 而轴向模式下获得径向及轴向速度信息, 两种模式下片光和 CCD 相机的布置位置相互调换, 即径向模式下片光从泵体侧窗口入射, CCD 在与片光平

面垂直的前泵盖方向拍摄, 轴向模式下则相反。

1.4 试验条件

采用具有典型盐析特性的过硫酸钠饱和溶液作为运行介质 (溶液温度 30°C , 质量浓度 450 g/L), 针对泵不同运行工况 ($0.8Q, 1.0Q, 1.2Q$) 进行 PIV 内流测量。试验前经相位多普勒测量得到该温度及质量浓度条件下溶液中盐析晶体颗粒的平均粒径在 $80 \sim 120\text{ }\mu\text{m}$ 之间^[3], 且硫酸钠晶体颗粒对光线的散射为瑞利散射, 不改变入射光频率^[4], 满足 PIV 测量要求, 测量获得的结果为晶体颗粒自身真实速度信息, 无需其他示踪粒子。

2 结果与分析

2.1 径向模式

图 3 为 3 种典型工况下叶轮各轴截面上盐析晶体颗粒的相对速度分布。

由图可知, 从叶轮后盖板至泵吸入口方向, 各轴截面上的速度分布存在明显差异。靠近后盖板截面上 ($Z = 0.2$) 进口处, 液流相对速度从叶片工作面至背面逐渐增大, 最大相对速度出现在进口靠近叶片背面区域, 但随着半径增加, 相对速度沿着叶片工作面有减小的趋势, 而工作面上的相对速度变化并不显著。在工作面和背面附近的液流相对速度方向基本沿叶片方向, 可认为这部分液流为贯通流来源。相对速度变化较大的区域出现在流道中后部, 受轴向涡旋影响, 形成了低速流区, 从流线可以看出, 速度方向突然由径向转为与叶轮旋转相反的方向直至叶轮出口, 出口相对液流角也较小。

在中间轴截面上 ($Z = 0.5$), 相对速度分布出现变化, 尤其在流道中后部, 低速区略向进口方向偏移, 相对速度的方向变化较缓和, 出口相对速度大小总体增大, 且出口相对液流角也增大。从工作面至背面, 出口处的相对速度分布较均匀。

而在靠近无叶腔的截面上 ($Z = 0.9$), 由于受无叶腔中流动结构的影响, 相对速度分布出现规律性变化, 其方向不再沿径向, 而是偏向叶片的工作面, 有大量的回流产生, 此截面的流动特征已与无叶腔中的流动相似。

对不同流量下相同轴截面上的相对速度分布进行对比分析, 大流量工况下, 在 $Z = 0.2$ 和 $Z = 0.5$ 截面上进口相对速度也较大; 流量增加, 出口处颗粒的相对液流角增大, 由速度三角形分析可知, 这是由于出口处的轴面速度提高所致。在 $Z = 0.9$ 截面上, 小流量时回流现象较严重, 说明此时循环流的流量增大, 这也是引起泵效率降低的原因。

图 4 为不同工况下无叶腔中的绝对速度分布。

由图可知,无叶腔中速度分布呈现强迫涡旋和自由涡旋的特征。3 种流量下无叶腔内晶体颗粒的流动特征存在差异,流量的改变尤其对小半径范围内的

流场结构影响较大。随着流量增加,小半径处颗粒的径向速度分量亦逐渐增大,导致颗粒流线凸向泵出口处,这也是贯通流量增大的表现。

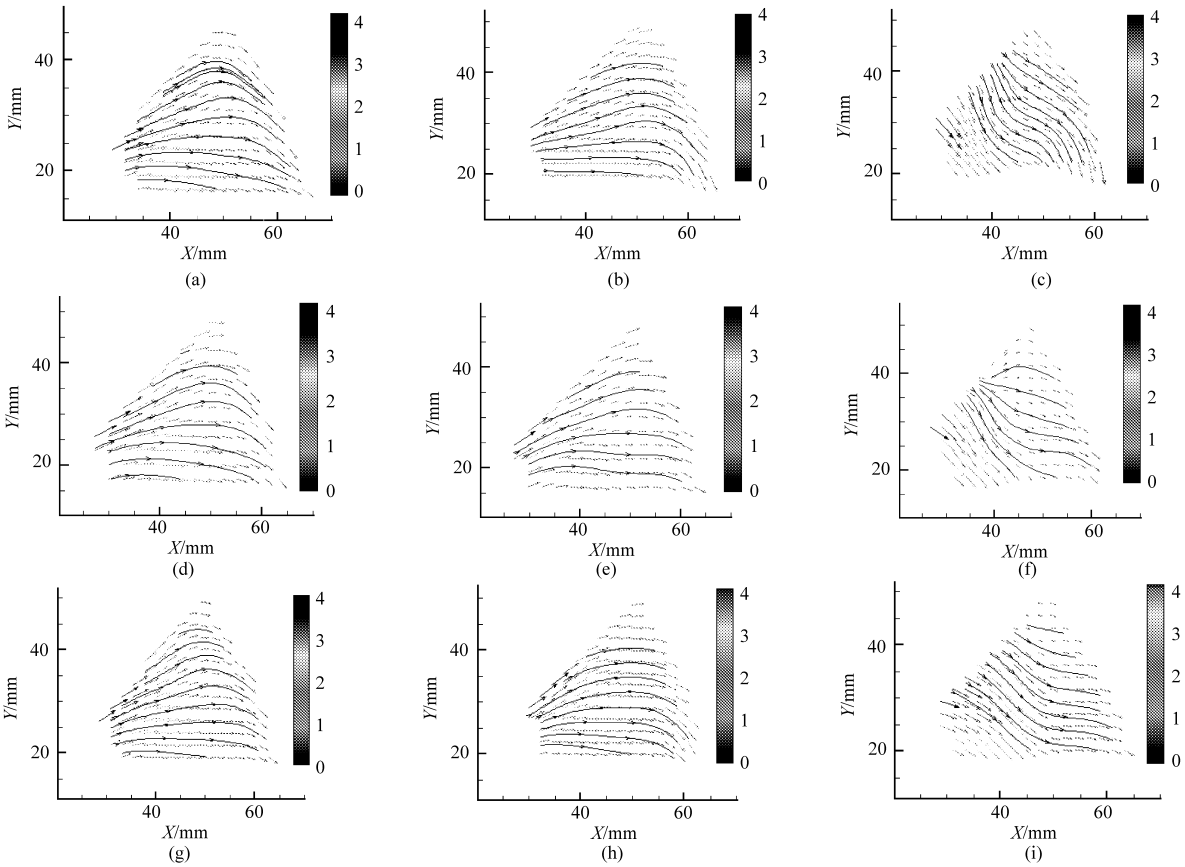


图 3 不同工况下叶轮各截面的相对速度分布 (m/s)

Fig. 3 Relative velocity distributions on several axial sections under different running conditions
(a) $0.8Q, Z=0.2$ (b) $0.8Q, Z=0.5$ (c) $0.8Q, Z=0.9$ (d) $1.0Q, Z=0.2$ (e) $1.0Q, Z=0.5$
(f) $1.0Q, Z=0.9$ (g) $1.2Q, Z=0.2$ (h) $1.2Q, Z=0.5$ (i) $1.2Q, Z=0.9$

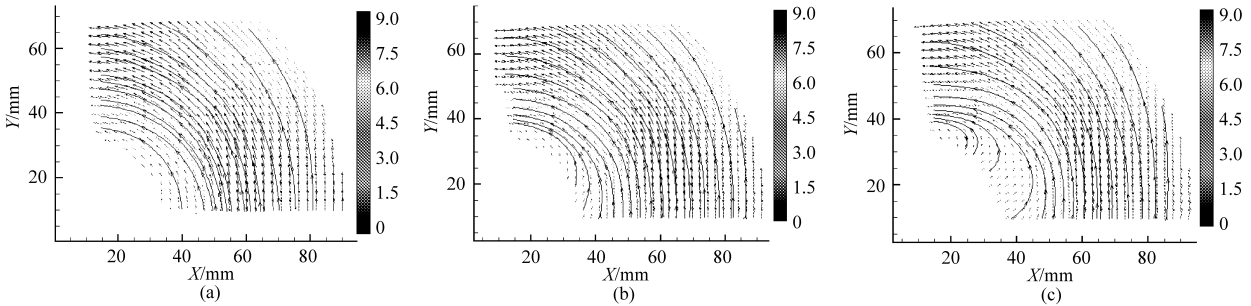


图 4 不同工况下无叶腔中的绝对速度分布 (m/s)

Fig. 4 Absolute velocity distributions in vaneless volute under different running conditions
(a) $0.8Q$ (b) $1.0Q$ (c) $1.2Q$

2.2 轴向模式

图 5 示出了轴面上 3 种流量下的盐析晶体颗粒流动结构。从图中可以清晰看出,颗粒流也存在着明显的纵向涡旋,涡旋中心基本处于叶轮流道中部,随着流量增加,该中心位置变化并不明显。小流量时,从吸入口流入的颗粒流经叶轮后大部分又回到无叶腔中,叶轮出口处有二次回流产生,流动较紊

乱;在设计流量下,流动情况得到改善,叶轮出口流量加大,但仍有回流;大流量时,叶轮进出口贯通流量均明显增大,循环流基本从无叶腔流入叶轮。本文并未对旋流泵内液相流场进行测量,但从以上测量结果可知,旋流泵内盐析晶体颗粒的流动结构与传统的单相经典流动模型(如 Schivley 模型、大庭模型、青木模型等^[5-7])仍较吻合,仅纵向涡旋

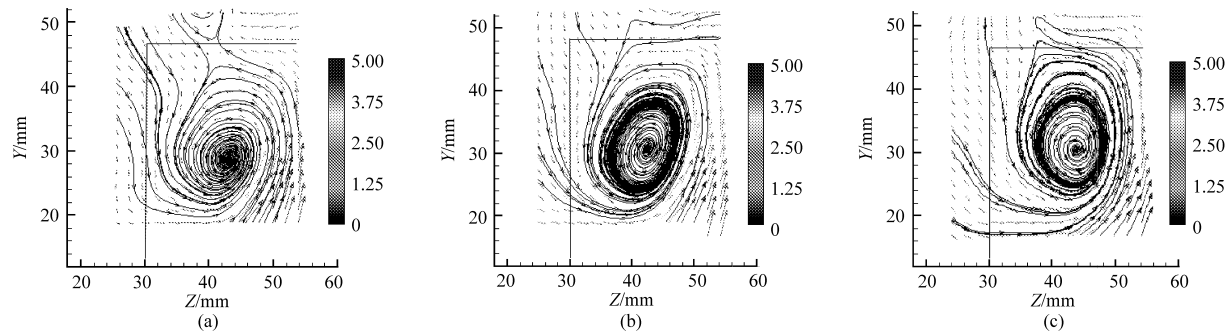


图 5 不同工况下轴面上的绝对速度分布 (m/s)

Fig. 5 Absolute velocity distributions on axial plane under different running conditions

(a) 0.8Q (b) 1.0Q (c) 1.2Q

的位置略有差异。

3 结 论

(1)从叶轮后盖板至泵吸入口方向,叶轮内各轴截面上的速度分布存在明显差异,在靠近无叶腔的轴截面上相对速度分布变化尤为显著,出现明显回流;无叶腔中速度分布呈现强迫涡旋和自由涡旋的特征。

(2)流量增加,颗粒流在叶轮进口处的相对速度增大,出口处颗粒的相对液流角也增大,无叶腔的小半径处颗粒径向速度分量随之增大。

(3)泵轴面上,颗粒流也存在明显的纵向涡旋,涡旋中心基本处于叶轮流道中部,随着流量增加,该中心位置变化并不明显。颗粒的流动结构与传统的经典流动模型较为吻合,仅纵向涡旋的位置略有差异。

参 考 文 献

1 高波,杨敏官. 旋流泵无叶腔内盐析颗粒湍流脉动特性研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(2):275~278.
Gao Bo, Yang Minguan. Research on turbulent velocity fluctuations of salt-out particles in a vortex pump volute [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(2):275~278. (in Chinese)

2 Gao Bo, Yang Minguan. Experimental study of salt-out particle motion and concentration distribution in a vortex pump volute [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1):53~59.

3 杨敏官,高波,顾海飞,等. 盐析两相流中 PDPA 测量方法[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009, 30(1):40~43.
Yang Minguan, Gao Bo, Gu Haifei, et al. PDPA measurement method on salt-out two-phase flow[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(1):40~43. (in Chinese)

4 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):55~63.
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):55~63. (in Chinese)

5 Schivley G P. An analytical and experimental study of a vortex pump [J]. Trans. ASME, Ser. D: Journal of Basic Engineering, 1970, 92(4): 889~900.

6 Hideki Ohba, Yukitoshi Nakashima, Kazuaki Shiramoto, et al. A study on performance and internal flow pattern of a vortex pump[J]. Bulletin of the JSME, 1978, 21(162):1 741~1 749.

7 Masanori Aoki. Studies on the vortex pump (1st report)[J]. Bulletin of the JSME, 1983, 26(213): 387~393.