



## 基于韦伯数的气液混输泵气相直径理论预测模型

刘明<sup>1,2</sup>, 谭磊<sup>1,2\*</sup>, 曹树良<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)



刘明

**摘要:** 为了获得叶片式气液混输泵合理的气相直径取值, 从而提高其两相流动模拟的准确性, 文中从韦伯数这一决定气泡尺寸的关键参数出发, 基于临界韦伯数建立了气相直径与转速、流量、含气率之间的相关关系, 进而提出混输泵内气相直径的理论预测模型, 并在3级叶片式气液混输泵中对该理论预测模型进行了应用. 在不同流量和不同含气率的20个工况下, 根据试验结果对数值模拟中的气相直径取值进行了标定, 并据此拟合确定了理论预测模型中的经验系数, 最终气相直径的理论预测值与数值模拟标定值的平均误差为7.28%. 通过对气相直径和韦伯数在混输泵轴面流道上的分布规律进行分析, 明确了高气相直径和高韦伯数的出现区域, 并发现叶轮流道内高体积分数的气相会随主流运动发展, 而导叶流道内高体积分数的气相则会聚集形成低速气团并堵塞流道. 研究结果对提高气液混输泵两相数值模拟的准确性具有一定的帮助.

**关键词:** 叶片式气液混输泵; 气相直径; 韦伯数; 气液两相流; 理论预测模型

**中图分类号:** TK72; S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2022)08-0793-07

**Doi:** 10.3969/j.issn.1674-8530.21.0370

刘明, 谭磊, 曹树良. 基于韦伯数的气液混输泵气相直径理论预测模型[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(8): 793-799.

LIU Ming, TAN Lei, CAO Shuliang. Theoretical prediction model of gas-phase diameter in multiphase pump based on Weber number [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2022, 40(8): 793-799. (in Chinese)

## Theoretical prediction model of gas-phase diameter in multiphase pump based on Weber number

LIU Ming<sup>1,2</sup>, TAN Lei<sup>1,2\*</sup>, CAO Shuliang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract:** In order to determine an appropriate value of gas-phase diameter to guarantee the simulation accuracy of gas-liquid flow inside multiphase pumps, from Weber number, which is a vital dimensionless value for bubble size, the relationship between gas-phase diameter and rotation speed, flow rate, gas volume fraction was established based on critical Weber number, and a theoretical prediction model for gas-phase diameter in multiphase pumps was proposed. The theoretical prediction model was applied in a three-stage rotodynamic multiphase pump. Under a total of 20 operating conditions of various flow rates and inlet gas volume fraction, the values of gas-phase diameter for numerical simulation were calibrated according to experimental results, and the empirical factors in the theoretical prediction model

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-01-16; 网络出版时间: 2022-07-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20220711.1659.008.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1901401); 清华大学国强研究院项目(2021GQG1003); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2021-KY-04, sklhse-2022-Iow06)

第一作者简介: 刘明(1994—), 男, 安徽黄山人, 博士(lium16@tsinghua.org.cn), 主要从事流体机械及工程研究.

通信作者简介: 谭磊(1984—), 男, 湖南浏阳人, 特别研究员, 博士生导师(tanlei@mail.tsinghua.edu.cn), 主要从事流体机械及工程研究.

were fitted. Finally, the average deviation between prediction and calibration values of gas-phase diameter was 7.28%. According to the analysis of the distribution of gas-phase diameter and Weber number on the meridional passages inside the multiphase pump, the regions with high values of gas-phase diameter and Weber number are specified. It is also found that the gas phase of high volume fraction in the impeller passage will flow and develop along with the mainstream, but will gather to form a low-velocity pocket and block the passage of diffuser. The research results are helpful to improve the accuracy of two-phase numerical simulation of multiphase pump.

**Key words:** rotodynamic multiphase pump; gas-phase diameter; Weber number; gas-liquid flow; theoretical prediction model

叶片式气液混输泵是广泛应用于深海石油和天然气资源开采运输的关键设备,对于维护国家海洋权益和能源安全具有重要的战略意义.相较于传统的单相泵系统,采用混输泵的管路系统可以直接输送液相和气相的混合物,使整个管路系统的结构得到简化,大大降低其建设、运行和维护的成本<sup>[1-2]</sup>.

气液混输泵与一般的泵型相比,最大的特点在于输送的介质为气相和液相的混合物,因此可采用轴流式的结构以抑制相间密度差导致的径向分离.围绕叶片式气液混输泵的设计,CAO等<sup>[3]</sup>、ZHANG等<sup>[4]</sup>、LIU等<sup>[5]</sup>分别引入正反问题迭代、轴面速度梯度方程、可控叶片安放角等方法,提出了相应的设计方法.响应面法<sup>[6]</sup>、遗传算法<sup>[7]</sup>、神经网络<sup>[8]</sup>等优化方法也被应用于叶片式气液混输泵的性能优化中,从而确定最佳的结构参数.

针对混输泵内的气液两相混合介质,研究指出,能够考虑相间速度差异的欧拉-欧拉非均相模型是更加适用的数值模拟方法<sup>[9-10]</sup>.非均相模型对液相和气相分别建立控制方程,并通过气液相间作用力实现两相控制方程之间的耦合<sup>[11]</sup>.气相平均直径是各种相间作用力模型中的关键参数,对数值模拟结果的准确性有着重要的影响.张文武等<sup>[12]</sup>研究了不同气相平均直径下的混输泵性能,发现气相直径的增加会导致叶轮内相间作用力的显著增长,导叶内的相间作用力则变化不大.相关研究还指出,气相直径的合理取值有助于提高数值模拟的准确性<sup>[13]</sup>.

尽管气相直径是混输泵内两相流动数值模拟的重要参数,但是目前尚没有可以直接确定气相直径取值的可靠方法,而往往需要较多的尝试以确定合适的取值.可视化观测的试验结果显示,混输泵流道内的气相直径同时受到流量、入口含气率、转速等因素的影响<sup>[14-15]</sup>,这进一步增大了建立气相直径理论预测模型的难度.

针对上述问题,文中从韦伯数这一反映两相界

面形态特性的量纲为一的参数出发,基于临界韦伯数确定气相直径与流量、含气率、转速等工况参数之间的相关关系,进而提出预测气相直径的理论模型,为提高气液混输泵两相数值模拟的准确性奠定基础.

## 1 理论预测模型

### 1.1 临界韦伯数

气泡在液体中的变形和破碎主要取决于所受外力和表面张力的相对关系,这一关系可以用韦伯数  $We$  进行描述,即

$$We = \frac{\rho_l v^2 d_l}{\sigma}, \quad (1)$$

式中: $\rho_l$ 为液相密度; $v$ 为特征速度; $d_l$ 为特征长度; $\sigma$ 为表面张力系数.

在外力作用下,当气泡在液体中的表面张力无法维持稳定的形态时,气泡就会破碎.这一过程中气泡所能达到的最大直径  $d_{\max}$  所对应的韦伯数即为临界韦伯数  $We_c$ , 计算式为

$$We_c = \frac{\rho_l \Delta v^2 d_{\max}}{\sigma}, \quad (2)$$

由于气泡在液体中所受外力主要与气液两相的速度差相关,因此式中的特征速度取为两相速度差  $\Delta v$ .

对于各相同性的均匀湍流流场,基于 Kolmogoroff 能量分布理论,上述速度与湍流耗散率  $\varepsilon$  之间存在如下关系:

$$\Delta v^2 = C_1 (\varepsilon d)^{2/3}, \quad (3)$$

代入式(2),即可得到

$$We_c = \frac{\rho_l C_1 (\varepsilon d_{\max})^{2/3} d_{\max}}{\sigma}, \quad (4)$$

式中: $C_1$ 为 Kolmogoroff 能量分布理论中的系数.

在旋转机械中,湍流耗散率  $\varepsilon$  可以用如下的关

系进行估计<sup>[16]</sup>,即

$$\varepsilon = \omega^3 \frac{r_1^3}{h}, \quad (5)$$

式中: $\omega$  为叶轮转速; $r_1$  为入口半径; $h$  为叶片宽度.

进而,式(4)可以写作

$$We_c = \frac{\rho_1 C_1 \left( \omega^3 \frac{r_1^3}{h} \right)^{2/3} d_{\max}^{5/3}}{\sigma}. \quad (6)$$

## 1.2 气相直径

从式(6)中反解出气泡最大直径  $d_{\max}$ , 得到

$$d_{\max} = \frac{1}{C_1^{3/5}} We_c^{3/5} \left( \frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{3/5} \frac{1}{\left( \omega^3 \frac{r_1^3}{h} \right)^{2/5}}. \quad (7)$$

BARRIOS<sup>[17]</sup> 通过开展气液两相流的试验,发现气泡最大直径与气泡直径之比仅与叶轮转速相关,即气泡直径  $d$  可以表示为

$$d = C_2(\omega) d_{\max}, \quad (8)$$

式中: $C_2(\omega)$  为仅与  $\omega$  相关的系数.

BARRIOS 还指出,气泡直径正比于含气率  $\lambda$  的幂次<sup>[17]</sup>,即

$$d \propto \lambda^{k_1}. \quad (9)$$

结合式(8)和(9),可以整理得到

$$d = \frac{C_2(\omega)}{C_1^{3/5}} We_c^{3/5} \lambda^{k_1} \left( \frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{3/5} \frac{1}{\left( \omega^3 \frac{r_1^3}{h} \right)^{2/5}}. \quad (10)$$

同样,由于气泡直径还与混输泵流量相关,在式(10)中引入流量系数  $\varphi = Q/Q_d$  以反映流量的影响,得到

$$d = \frac{C_2(\omega) C_3}{C_1^{3/5}} We_c^{3/5} \lambda^{k_1} \varphi^{k_2} \left( \frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{3/5} \frac{1}{\left( \omega^3 \frac{r_1^3}{h} \right)^{2/5}}. \quad (11)$$

叶片式气液混输泵一般工作在设计转速下,因此对于确定的泵型,系数  $C_2(\omega)$  可以认为是一个常数.RAYMOND 等<sup>[18]</sup> 研究指出,临界韦伯数主要取决于椭球形气泡的长短轴长之比,在某一泵型中也可以视为定值.那么,将式(11)中的系数进行组合,即可得到

$$d = k_0 \lambda^{k_1} \varphi^{k_2} \left( \frac{\sigma}{\rho_1} \right)^{3/5} \frac{1}{\left( \omega^3 \frac{r_1^3}{h} \right)^{2/5}}, \quad (12)$$

其中,

$$k_0 = \frac{C_2(\omega) C_3}{C_1^{3/5}} We_c^{3/5}, \quad (13)$$

式中: $k_0, k_1, k_2$  为经验系数.至此就建立了混输泵内气相直径的预测模型.

## 2 物理模型与数值模拟

### 2.1 物理模型

为了验证上述气相直径预测模型的准确性,选取如图 1 所示的 3 级叶片式气液混输泵开展研究,其主要参数中,设计流量  $Q_d = 70 \text{ m}^3/\text{h}$ ;设计转速  $n_d = 2950 \text{ r/min}$ ;设计扬程  $H_d = 45 \text{ m}$ ;叶轮外径  $D_s = 0.16 \text{ m}$ ;叶片主叶片数  $Z_{\text{imp}} = 4$ ;导叶叶片数  $Z_{\text{dif}} = 11$ .该 3 级叶片式气液混输泵包括 3 级叶轮、2 级导叶和吸水室、压水室等结构.



图 1 3 级叶片式气液混输泵

Fig.1 Three-stage rotodynamic multiphase pump

### 2.2 数值方法

文中利用计算流体力学软件 ANSYS CFX 17.0 对叶片式气液混输泵内的气液两相流场进行求解.在多相流模型方面采用欧拉-欧拉非均相模型,对液相和气相分别建立控制方程.气液混输泵的可视化试验结果<sup>[19]</sup> 显示,泵内两相流场呈现出比较明显的气泡流动特征,而不具备连续稳定的气液界面,因此欧拉-欧拉非均相模型是更加适合的两相流模型.在湍流模型方面,对液相采用 SST  $k-\omega$  湍流模型,对气相采用离散相零方程模型,两相之间通过相间作用力实现动量输运方程的耦合,并采用 Grace 曳力模型.在边界条件方面,采用总压进口、流量出口的进出口条件,在其余壁面采用水力光滑的无滑移壁面条件,在叶轮轮缘侧施加与叶轮圆周速度等值反向的速度以模拟静止端壁,并考虑了 0.5 mm 的叶顶间隙.通过冻结转子法将旋转域和静止域进行连接.

### 2.3 网格无关性验证

采用 ANSYS TurboGrid 17.0 生成叶轮和导叶部分的六面体结构化网格,利用 ANSYS ICEM 17.0 生成吸水室和压水室部分的四面体非结构化网格,并

开展了网格无关性验证,如表1所示,表中 $N_1$ — $N_4$ 分别为吸水室、叶轮、导叶、压水室的网格数, $N_t$ 为网格总数, $H/H_d$ 为扬程系数, $\eta$ 为效率.在网格无关性验证中,保持吸水室和压水室部分的网格不变,逐渐增大叶轮和导叶部分的网格数量.从表1中可以看到,当网格总数超过800万时,数值模拟结果随着网格数量增长几乎不再变化.为此,最终选择网格方案2开展研究,相应的叶轮和导叶网格如图2所示.

表1 网格无关性验证  
Tab.1 Independence test of mesh elements

参数	方案1	方案2	方案3	方案4
$N_1$	590 410	590 410	590 410	590 410
$N_2$	1 437 920	1 760 896	1 953 152	2 083 152
$N_3$	620 466	1 042 173	1 581 217	2 118 710
$N_4$	389 685	389 685	389 685	389 685
$N_t$	6 534 787	8 347 129	10 001 985	11 466 971
$H/H_d$	1.134	1.136	1.135	1.135
$\eta / \%$	50.06	50.14	50.13	50.10

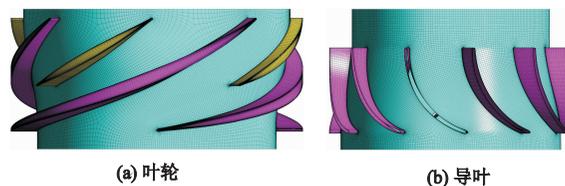


图2 叶轮和导叶的网格分布  
Fig.2 Mesh distribution of impeller and diffuser

## 2.4 性能测试试验系统

搭建如图3所示的试验系统,对混输泵在不同含气率下的性能特性进行了测量.试验系统包括循环系统、测量系统、泵段、通气段等几个部分.通过分别调节液相和气相的流量,即可实现试验中不同的含气率.试验系统的整体不确定度为0.68%.试验系统的不确定度的具体计算过程见文献[20].本试验系统的不确定性足够小,证明了试验测量结果的可靠性.

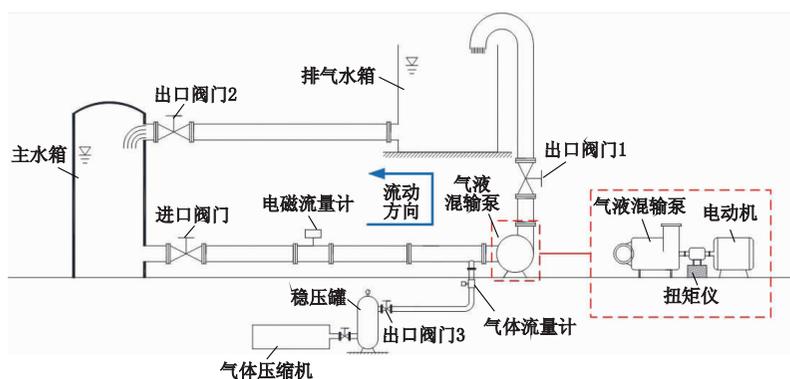


图3 试验系统示意图  
Fig.3 Diagram of the experimental system

## 2.5 数值模拟结果验证

为了验证文中数值模拟结果的可靠性,并对数值模拟中的气相直径进行标定,搭建试验台对3级叶片式气液混输泵运输两相工质时的能量特性进行了测量<sup>[20-22]</sup>.

在数值模拟中,按照0.005 mm的间隔设置气相平均直径.将数值模拟计算得到的混输泵扬程与试验测量结果进行对比,选取扬程结果与试验测量结果最接近时数值模拟的气相平均直径设置值作为其标定值.通过给定气相直径进行数值模拟,数值模拟和试验测量结果的对比如图4所示.图中 $\phi$ 为流量系数; $\lambda$ 为含气率.从图4中可以看到,无论是扬程还是效率,其随流量系数的变化趋势较一致,且数值模拟结果与试验测量结果吻合较好,证明了数值模拟方法的可靠性.

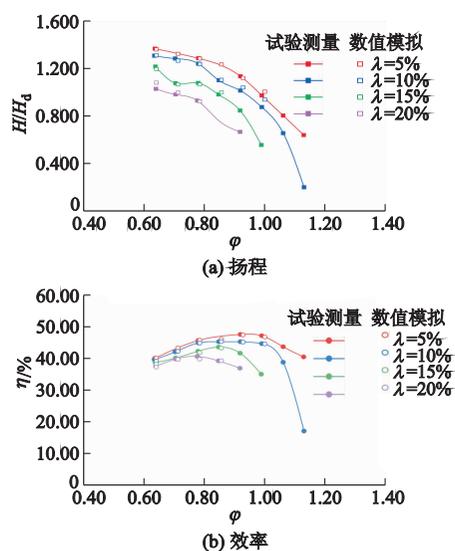


图4 数值模拟和试验测量结果的对比  
Fig.4 Comparison between numerical and experimental results

表 2 为不同工况下数值模拟给定的气相直径数值.表中 $\bar{d}$ 为气相平均直径.

**表 2 气相直径标定值**  
**Tab.2 Calibration values of gas-phase diameter**

参数	$\lambda/\%$	$\varphi$	$\bar{d}/\text{mm}$
数值	5%	0.64	0.025
		0.71	0.050
		0.79	0.065
		0.86	0.075
		0.93	0.100
		1.00	0.110
	10%	0.64	0.045
		0.71	0.065
		0.79	0.090
		0.86	0.115
	15%	0.93	0.130
		1.00	0.145
		0.64	0.055
		0.71	0.080
	20%	0.79	0.110
0.86		0.145	
0.64		0.070	
0.71		0.080	
		0.79	0.120
		0.86	0.155

### 3 结果与讨论

#### 3.1 气相直径理论预测模型

通过对式(12)进行对数运算,将其转化为线性表达式,即

$$\ln d - \ln F = \ln k_0 + k_1 \ln \lambda + k_2 \ln \varphi, \quad (14)$$

其中,

$$F = \left(\frac{\sigma}{\rho_1}\right)^{3/5} \frac{1}{\left(\omega^3 \frac{r_1^3}{h}\right)^{2/5}}. \quad (15)$$

根据表 2 中标定得到的气相直径取值,利用 MATLAB R2020b 开展基于最小二乘法的曲线拟合,从而求解式(14)中的 3 个经验系数,得到: $k_0 = 38.970 0, k_1 = 0.528 7, k_2 = 2.963 0$ .于是,对于文中的 3 级叶片式气液混输泵,气相直径的理论预测模型为

$$d = 38.97 \lambda^{0.528 7} \varphi^{2.963} \left(\frac{\sigma}{\rho_1}\right)^{3/5} \frac{1}{\left(\omega^3 \frac{r_1^3}{h}\right)^{2/5}}. \quad (16)$$

图 5 为不同工况下气相直径的理论预测值和数值模拟标定值的对比.从图中可以看到,在不同含气率和不同流量下,理论预测值与数值模拟标定值的

结果非常接近,平均误差为 7.28%,证明了基于韦伯数的气相直径理论预测模型的可靠性和准确性.

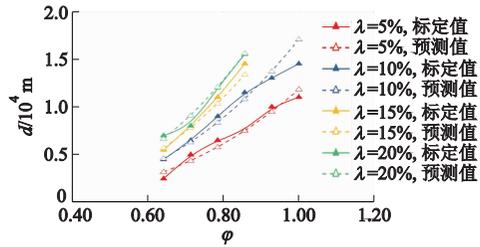


图 5 气相直径预测值与标定值的对比

Fig.5 Comparison between calibration and prediction values of gas-phase diameter

#### 3.2 气相直径分布规律

从式(9)中可知,气相直径正比于含气率的幂次,进一步结合式(16)中的幂次结果,可以得到

$$\frac{d}{d_{in}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_{in}}\right)^{0.528 7}, \quad (17)$$

式中: $d_{in}$ 和 $\lambda_{in}$ 分别为混输泵进口的气相直径和含气率.因此,可以根据混输泵内流场的局部含气率,确定局部气相直径,并对混输泵内的气相直径分布规律进行分析.

图 6 为流量系数 $\varphi = 1.00$ 、进口含气率为 10%的工况下,气相直径在 10%, 50%, 90% 这 3 种叶高位置的混输泵轴面流道上的分布.由图可知,随着叶高位置的增大,气相直径逐渐减小,这是气相和液相之间显著的密度差异导致的.由于气相的密度较小,所受离心力更小,因此朝轮毂方向聚集.

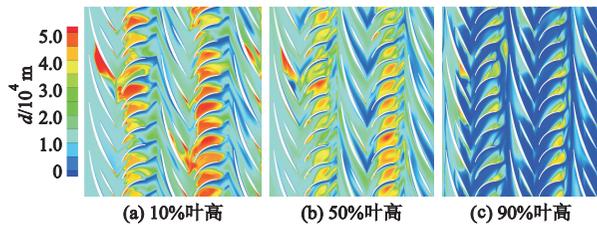


图 6 气相直径在轴面流道上的分布

Fig.6 Distribution of gas-phase diameter on meridional passage

从图 6 中还可以发现,导叶流道内的气相直径显著大于叶轮流道内.导叶流道内的高气相直径区域紧贴着叶片的吸力面侧,并几乎充满整个导叶流道,这一部分区域同时也是导叶流道内流动分离发生的低速区.由于流动速度太低,气相在这一部分聚集成团,严重时还会堵塞流道,是影响混输泵导叶性能的重要因素.除此之外,在导叶前缘压力面侧,也存在范围较小的高气相直径区域.这一部分主要是来流在导叶前

缘冲击减速后,聚集在前缘附近形成的。

在叶轮流道内,气相直径的分布总体上比较均匀,但是在各级流道中也存在不同位置的高气相直径区域。在第1级叶轮流道内,高气相直径的区域出现在短叶片压力面至长叶片吸力面之间的区域。在第2级和第3级叶轮流道内,高气相直径的区域仅出现在10%叶高位置轴面位置的短叶片吸力面侧尾缘。

### 3.3 韦伯数分布规律

图7为流量系数 $\varphi=1.00$ 、进口含气率为10%的工作下,韦伯数在10%,50%,90%这3种叶高位置的混输泵轴面流道上的分布。其中,韦伯数中的特征速度为气相和液相的速度差,特征尺寸为依据式(17)计算的气相直径,即

$$We = \frac{\rho_l \Delta v^2 d_{in}}{\sigma} \left( \frac{\lambda}{\lambda_{in}} \right)^{0.5287} \quad (18)$$

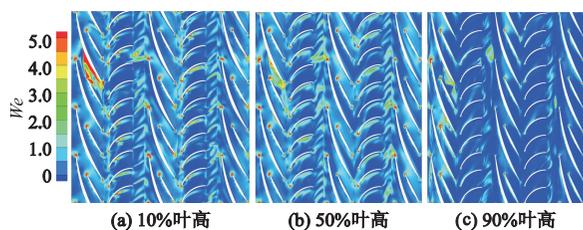


图7 韦伯数在轴面流道上的分布  
Fig.7 Distribution of Weber number on meridional passage

从图7可知,高韦伯数的区域主要出现在叶轮和导叶叶片的前缘位置。根据韦伯数计算公式,韦伯数的增大来源于气液两相速度差或者气相体积分数的增大。结合气相体积分数的分布可知,叶片前缘位置并不存在较高的气相体积分数,因此较大的两相速度差是叶片前缘附近高韦伯数的主要原因。

对于导叶流道和第1级叶轮流道中的高气相直径区域,可以看到韦伯数的分布存在明显的差异。在导叶流道中,高气相直径反映了较高的气相体积分数,但是韦伯数的数值很小,说明这一部分的气液两相速度差很小,这与流动分离区的低速流动特征是一致的。在第一级叶轮流道中,不仅具有较高的气相体积分数,同样也具有很高的韦伯数数值,说明这一部分的流动仍然具有较高的速度。对比这两部分区域可知,导叶内的气相会聚集形成低速气团并堵塞流道;而叶轮内的气相会随主流一同运动发展。

## 4 结论

1) 当进口含气率为0%~20%,基于韦伯数的气相直径理论预测模型能够给出混输泵中气相直

径随流量和含气率的变化规律,气相直径的理论预测值和数值模拟标定值之间的平均误差为7.28%。

2) 高气相直径出现在导叶流道以及第1级叶轮流道内短叶片压力面至长叶片吸力面之间的区域,高韦伯数则出现在叶轮和导叶叶片的前缘位置。

3) 叶轮流道内高体积分数的气相会随主流运动发展,而导叶流道内高体积分数的气相则会聚集形成低速气团并堵塞流道。

### 参考文献 (References)

- [1] 肖文扬, 谭磊. 叶片式气液混输泵研究进展综述[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 108-120.  
XIAO Wenyang, TAN Lei. Review on research of rotodynamic multiphase pumps [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2020, 39(5): 108-120. (in Chinese)
- [2] 马希金, 韩作鹏, 宛航, 等. 静叶安放角变化规律对螺旋轴流混输泵流动特性的影响[J]. 流体机械, 2021, 49(10): 66-73.  
MA Xijin, HAN Zuopeng, WAN Hang, et al. The influence of the variation law of the installation angle of fixed blade on the flow characteristics of spiral axial flow multiphase pump [J]. Fluid machinery, 2021, 49(10): 66-73. (in Chinese)
- [3] CAO S, PENG G, YU Z. Hydrodynamic design of rotodynamic pump impeller for multiphase pumping by combined approach of inverse design and CFD analysis [J]. ASME Journal of fluids engineering, 2005, 127: 330-338.
- [4] ZHANG Y, ZHANG J, ZHU H, et al. 3D blade hydraulic design method of the rotodynamic multiphase pump impeller and performance research [J]. Advances in mechanical engineering, 2014, 6: 803972.
- [5] LIU M, TAN L, CAO S L. Design method of controllable blade angle and orthogonal optimization of pressure rise for a multiphase pump [J]. Energies, 2018, 11: 1048.
- [6] SUH J S, KIM J W, CHOI Y S, et al. Multi-objective optimization of the hydrodynamic performance of the second stage of a multi-phase pump [J]. Energies, 2017, 10: 1334.
- [7] ZHANG J Y, CAI S J, LI Y J, et al. Optimization design of multiphase pump impeller based on combined genetic algorithm and boundary vortex flux diagnosis [J]. Journal of hydrodynamics, 2017, 29(6): 1023-1034.
- [8] ZHANG J, ZHU H, YANG C, et al. Multi-objective shape optimization of helico-axial multiphase pump im-

- PELLER based on NSGA-II and ANN [J]. Energy conversion and management, 2011, 52: 538-546.
- [9] 余志毅, 刘影. 叶片式气液混输泵气液两相非定常流动特性分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 66-69.
- YU Zhiyi, LIU Ying. Characteristics analysis of unsteady gas-liquid two-phase flow in a multiphase rotodynamic pump [J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(5): 66-69. (in Chinese)
- [10] 袁建平, 张克玉, 司乔瑞, 等. 基于非均相流模型的离心泵气液两相流动数值模拟研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 89-95.
- YUAN Jianping, ZHANG Keyu, SI Qiaorui, et al. Numerical investigation of gas-liquid two-phase flow in centrifugal pumps based on inhomogeneous model [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(1): 89-95. (in Chinese)
- [11] SUH J W, KIM J W, CHOI Y S. et al. Development of numerical Eulerian-Eulerian models for simulating multiphase pumps [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2018, 162: 588-601.
- [12] 张文武, 祝宝山, 余志毅. 流动参数对混输泵全流道内气液相间作用特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(8): 1911-1916.
- ZHANG Wenwu, ZHU Baoshan, YU Zhiyi. Numerical analysis for the influence of flow parameters on phase interaction in a multiphase rotodynamic pump [J]. Journal of engineering thermophysics, 2020, 41(8): 1911-1916. (in Chinese)
- [13] ZHANG W, YU Z, LI Y. Application of a non-uniform bubble model in a multiphase rotodynamic pump [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2019, 173: 1316-1322.
- [14] 张金亚, 蔡淑杰, 朱宏武. 叶片式混输泵入口段气液两相流场可视化试验[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 184-190.
- ZHANG Jinya, CAI Shujie, ZHU Hongwu. Visualization test for flow field of gas-liquid two-phase in the entrance of rotodynamic multiphase pump [J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(18): 184-190. (in Chinese)
- [15] ZHANG J, CAI S, LI Y, et al. Visualization study of gas-liquid two-phase flow patterns inside a three-stage rotodynamic multiphase pump [J]. Experimental thermal and fluid science, 2016, 70: 125-138.
- [16] DAVIES J T. Turbulence phenomena [M]. New York: Academic Press, 1972.
- [17] BARRIOS L. Visualization and modeling of multi-phase performance inside an electrical submersible pump [D]. Tulsa: University of Tulsa, 2007.
- [18] RAYMOND F, ROSANT J M. A numerical and experimental study of the terminal velocity and shape of bubbles in viscous liquids [J]. Chemical engineering science, 2000, 55: 943-955.
- [19] ZHANG J, CAI S, ZHU H, ZHANG Y. Experimental investigation of the flow at the entrance of a rotodynamic multiphase pump by visualization [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2016, 126: 254-261.
- [20] XU Y, CAO S, SANO T, et al. Experimental investigation on transient pressure characteristics in a helico-axial multiphase pump [J]. Energies, 2019, 12(3): 461.
- [21] LIU M, TAN L, CAO S. Method of dynamic mode decomposition and reconstruction with application to a three-stage multiphase pump [J]. Energy, 2020, 208: 118343.
- [22] LIU M, TAN L, XU Y, et al. Optimization design method of multi-stage multiphase pump based on Oseen vortex [J]. Journal of petroleum science and engineering, 2020, 184: 106532.

(责任编辑 盛杰)