排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2012 年 11 月 Nov. 2012 | 第 30 卷 第 6 期 Vol. 30 No. 6

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2012.06.005

高含气率下增强叶轮内气液均匀混合的方法

张金亚[1]，朱宏武[1]，徐丙贵[2]，丁矿[1]，强睿[1]
（1.中国石油大学（北京）机械与储运工程学院，北京 102249；2.中国石油集团钻井工程技术研究院，北京 100195）

摘要：针对高含气率条件下叶片式混输泵叶轮内气液分离、泵性能降低的问题，提出几种改进叶轮的措施（如添加短叶片、在气泡聚集处叶片上开孔、采用 T 型叶片等），以打碎气囊，从而增强气液的混合程度. 基于设计流量与转速条件，采用 Fluent 软件对 3 种改进叶轮在入口含气率分别为 60% 与 80% 下的流场进行了数值模拟. 结果表明：3 种措施均能改善液相流体在叶轮内的流线分布，增强气液混合程度；3 个改进叶轮内最高含气率均低于原型叶轮，且含气率分布更加均匀. 此外，对比 4 种叶轮的增压效果发现：在较低含气率下，改进叶轮的增压能力与原叶轮接近；在高含气率下，改进叶轮的增压能力普遍高于原叶轮. 在 3 种改进的叶轮中，叶片上开孔的叶轮增压最大，并优于原型叶轮，表明该方法既增强了叶轮的气液混合能力，又最大限度地避免了额外的水力损失.

关键词：油气混输泵；叶轮；含气率；气囊；气液混合
中图分类号：S277.9；TE974　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2012)06-0641-05

Methods for improving gas and liquid phases mixing in impeller with high gas void fraction

Zhang Jinya[1], *Zhu Hongwu*[1], *Xu Binggui*[2], *Ding Kuang*[1], *Qiang Rui*[1]
(1. Department of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 2. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China)

Abstract: To solve the problems, such as gas-liquid separation in the impeller of a rotodynamic multiphase pump under high gas void fractions (GVF) and subsequent reduction in the pump performance, several methods for breaking gas packets to inhibit gas-liquid separation and enhance the mixing between two phases were presented, including implanting short blades, using T-shaped blades, and opening holes on the blades where gas packets appear. Then, under the rated condition, the flow fields in three amended impellers were simulated under the GVFs of 60% and 80%, respectively, by means of CFD code-Fluent. The results show that the streamlines are more evenly distributed in all the amended impellers than those in the original one, the degree of mixing of two phases is improved greatly. Additionally, the local highest GVF in all the amended impellers is not only lower than that in the original impeller, but the GVF distribution in them is more uniform. Besides, a comparison of total pressure head rise across the original impeller and the amended ones was made. It was showed that the total pressure rise of the amended impellers is similar to the original one under low GVFs, but it is larger in high GVFs. The amended impeller with opening holes exhibits the highest head rise, which is even better than that of the original impeller, suggesting the means of opening holes not only enhances the ability of mixing of two-phase but also prevent extra hydraulic losses furthest.

收稿日期：2012-08-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51209217）；中国博士后科学基金面上资助项目（2011M500490）
作者简介：张金亚（1980—），男，河南汝南人，讲师，博士（zhjinya@163.com），主要从事多相输送、多相分离设备研究.
朱宏武（1963—），男，湖北武汉人，教授，博士（zhuhw@cup.edu.cn），主要从事流体机械、石油机械研究.

Key words: oil-gas multiphase pump; impeller; gas void fraction; gas pocket; gas-liquid mixing

随着国际能源需求的不断增长,生产者正在寻找各种技术手段以延长现有油田的寿命,提高油田的采收率,油气多相混输便是其中有效的技术之一. 20世纪90年代初期,第1台油气混输泵原理机在油田现场进行了测试[1]. 至今,已有几百台混输泵应用于世界各地,其领域遍布沙漠油田[2]、边际油田[3]以及深海油田等[4-5].

与传统油田生产技术相比,采用混输泵技术取消了分离器、压缩机、单相输油泵及天然气放空火炬等设备在油田现场的应用,并且使油气处理设备集中在一个模块,改善了油气集输系统的布局和流程,可以减少约40%的投资,管理和维护费用也大大降低,具有广阔的应用前景. 目前,在大流量工况下应用较多的油气混输泵是Bornemann公司生产的双螺杆混输泵与Framo公司生产的叶片式混输泵. 其中叶片式混输泵以其流量大、结构紧凑、可以输送含砂介质等优点被认为是水下生产系统中油气混输设备的理想选择. 但是叶片式混输泵也有其显著的缺点:一是在气液两相输送过程中,叶轮内气液两相的密度和速度不同,使两相具有不同的压力梯度,造成了气液两相的分离;二是当含气率较大时,气泡容易聚集在一起,形成气囊,滞留在叶轮内. 这不仅减小了通道面积,增大介质的相对运动速度,而且改变了流道的实际形状,增大流动损失,使混输泵的性能急剧下降;三是气液分离严重时,会产生气堵,引起泵的失效现象. 因此,提高叶片式油气混输泵工作效率的难点之一就是减小相态分离,增强叶轮内气液两相的混合[6].

为提高叶片式油气混输泵在高含气率下的工作效率,文中提出增加短叶片、在气囊处叶片上开孔以及采用T型叶片等3种方法提高叶轮内的湍流强度,增强叶轮内的气液均混程度. 同时,采用CFD软件对这3种方法进行数值模拟,研究3种方法对叶轮内气液均混程度以及混输泵性能的影响.

1 混输泵的过流部件

叶片式油气混输泵的过流部件主要包括吸入单元、增压单元和出口单元,其中增压单元由叶轮和导叶组成,是决定混输泵性能的主要部件,其结构如图1所示.

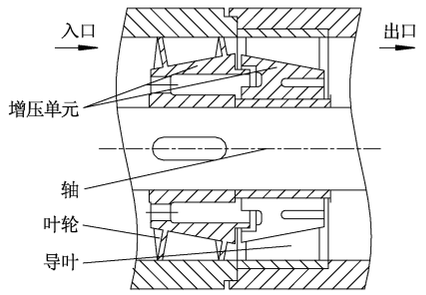


图1 叶片式混输泵增压单元结构示意图

Fig. 1 Sketch of structure of stage of rotodynamic multiphase pump

油气混输泵的叶轮采用大包角的设计方法,避免或减少了气液混合介质发生相态分离;导叶可将叶轮出口发生气液分离的流体重新均匀混合,为流体进入下一级叶轮做准备[7].

由于叶轮旋转造成气液两相离心力不同,加剧了叶轮内气液两相分离现象的发生,造成液相逐渐流向轮缘,而气相逐渐流向轮毂. 在高含气率工况下,气泡在轮毂处聚集形成气囊,改变叶轮内实际流道形状和面积,增大流动阻力和水力损失,降低了泵的性能. 在严重情况下,气泡大面积聚集会堵塞叶轮通道,引起泵失效.

2 混输泵在高含气率下的性能

文中数值模拟了叶片式油气混输泵输送含气率为60%气液混合物时的叶轮内流场,考察了其内的含气率分布情况.

2.1 计算方法与边界条件

在叶片式混输泵的数值模拟中,选用RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型封闭雷诺平均方程组,采用有限体积积分法离散控制方程[8],压力项采用二阶中心差分格式,速度项、湍动能与湍流耗散率项均采用二阶迎风差分格式. 采用相耦合SIMPLE算法对压强和速度进行耦合求解,采用欧拉双流体模型进行气液两相的模拟计算. 设置液相为主相,气相为第二相,入口气液均匀混合,气泡直径设置为0.6 mm. 边界条件的设定如下:

1) 进口条件:计算模型入口采用速度入口条件,根据流量及入口面积可以计算入口的流速. 湍动能 k 和湍流耗散率 ε 分别由公式(1)确定,即

$$k_{\mathrm{in}}=0.005u_{\mathrm{in}}^2,\ \varepsilon_{\mathrm{in}}=\frac{C_\mu k_{\mathrm{in}}^{3/2}}{l_{\mathrm{in}}},\qquad(1)$$

式中：$l_{in}=0.5D$，为进口混合长度；D 为进口当量直径.

2）出口条件：出口采用流动充分发展条件，即

$$\frac{\partial k}{\partial \boldsymbol{n}}=0,\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \boldsymbol{n}}=0,\ \frac{\partial u_j}{\partial \boldsymbol{n}}=0,\ j=1,2,3, \qquad (2)$$

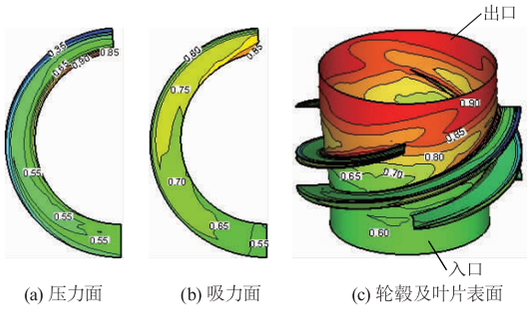
式中：$\boldsymbol{n}$ 为出口断面的单位法相矢量.

3）壁面条件：叶片表面、轮毂和泵壳内壁处采用无滑移壁面边界条件. 近壁网格采用非均衡壁面函数近似处理.

4）坐标系：根据叶轮转速设定叶轮处流场为“旋转坐标系”.

2.2　原型叶轮内的含气率分布

首先对未添加任何抑制气液分离措施的原型叶轮进行气液两相的数值模拟. 模拟过程中设液相介质为水，气相介质为空气，入口含气率为 60%，流量为 100 m^3/h，转速为 4 500 r/min. 模拟结果如图 2 所示.



(a) 压力面　(b) 吸力面　(c) 轮毂及叶片表面

图 2　原型叶轮叶片及轮毂表面含气率分布

Fig. 2　GVF distribution on blades and hub of original impeller

由图 2 可以看出：从叶轮入口到出口，轮毂处含气率逐渐增大，即由于离心力的作用，气液分离逐渐加大，气体向着轮毂处运动，而液体向着轮缘处运动；在叶片压力面，从 1/3 弦长处开始，靠近轮毂处出现含气率升高的现象，随着流体向出口运动，轮毂处含气率逐渐增大，高含气率区域也逐渐拓宽，最高含气率达到 90%，形成了气囊现象；在叶片吸力面，含气率逐渐增大，在叶轮出口处出现了 85% 的高含气率区域，该区域同样发生在靠近轮毂处.

通过以上分析可知，气液分布均匀的流体通过叶轮时出现了气液分离现象，最高含气率为 90%，发生在叶轮出口靠近轮毂处. 这样的分离不仅会改变叶轮的实际流道形状，增大水力损失，降低该级叶轮的性能，还会为下一级叶轮造成较差的气液混合流体入口条件，导致下一级叶轮内发生更为严重的气液分离现象，进一步降低泵的性能. 因此，对于长期在高含气率工况下工作的混输泵，需要采取有效的措施抑制叶轮内的气液分离，以提高泵的性能及工作的稳定性.

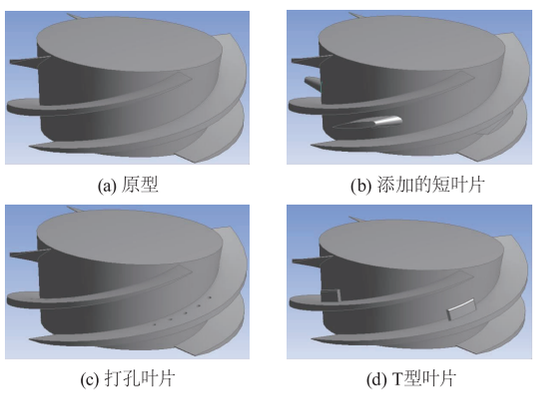
3　增强叶轮内气液混合的方法

目前，增强叶轮内气液混合的方法主要是优化叶轮、导叶等部件的几何参数. 该方法在介质含气率较低时能够起到一定的作用. 然而，在高含气率工况下，叶轮内的气液分离是不可避免的，优化叶轮几何参数对于抑制气液分离的效果并不明显. 因此，文中提出通过 1 个或多个附加的结构单元，在气泡易聚集处形成 1 个强湍流区，从而强化流道中相间的作用，达到增强气液两相混合、抑制气液分离的目的. 文中提出了 3 种方法以增强叶轮内的气液混合，分别如下：

1）在原型叶轮流道中放置 1 个短叶片，该短叶片的位置为叶轮轴向高度的 1/3 到 1/2 处，即气液分离刚发生的位置或开始发生气液分离之前的位置（见图 3b）. 流体通过短叶片后产生 1 个绕流场，从而增强短叶片后流场的气液混合程度.

2）在叶片上开若干小孔，开孔的位置位于叶片弦长 1/2 到叶片出口之间的某段位置上，且逐渐靠近轮毂（见图 3c），该处也是气泡最易聚积的区域. 开孔目的是通过叶片前后的压力差造成流体的贯穿，以此来打破气囊. 开孔的位置及大小还应考虑到叶片的强度问题.

3）采用 T 型叶片，即在叶片上添加 1 段与其垂直的 T 型短叶片（见图 3d）. T 型叶片的作用也是造成 1 个绕流场，打破气囊.



(a) 原型　(b) 添加的短叶片

(c) 打孔叶片　(d) T型叶片

图 3　增强气液混合的方法

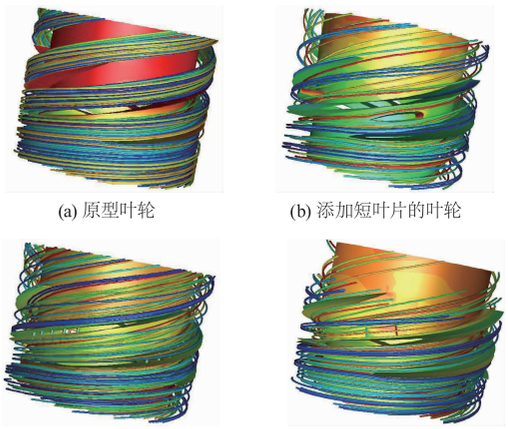
Fig. 3　Several methods for improving degree of mixing of gas-liquid

4 增强气液混合方法的效果

为了验证文中所提出的几种增强气液均匀混合方法的效果,采用与原型叶轮相同的数值模拟方法及工况,计算了图3中几种叶轮的内流场,分析其内流线与含气率的分布情况,并与原型叶轮内的情况进行了对比.

4.1 叶轮内液相流线的对比

根据4种叶轮的数值模拟结果,分别得到其内部液相流线分布,如图4所示.



(a) 原型叶轮 (b) 添加短叶片的叶轮

(c) 叶片上开孔的叶轮 (d) T型叶片叶轮

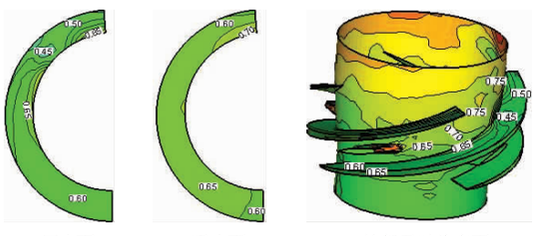
图4 4种叶轮内的流线对比

Fig. 4 Comparison of streamlines inside four different impellers

由图4可以看出:从叶轮入口到出口,在原型叶轮内,液相流线逐渐靠近压力面及轮缘;有抑制气液分离措施的叶轮内液相流线布满整个叶轮通道,这说明所采取的措施增强了叶轮内的气液混合效果.

4.2 叶轮内的含气率分布对比

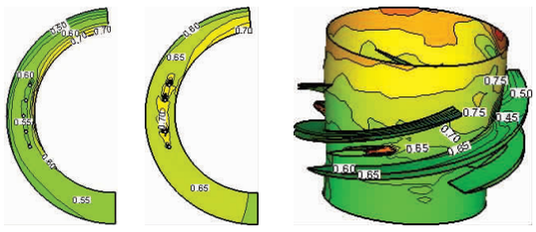
采取抑制气液分离方法后的叶轮内含气率分布情况如图5-7所示. 将图5-7与图2进行对比可以看出:3种采用抑制气液分离方法的叶轮均能减小气液分离现象,叶轮出口最高含气率为80%,比原型叶轮出口最高含气率(90%)要低,并且叶轮内的含气率分布也相对均匀.



(a) 压力面 (b) 吸力面 (c) 轮毂及叶片表面

图5 添加短叶片叶轮内的含气率分布

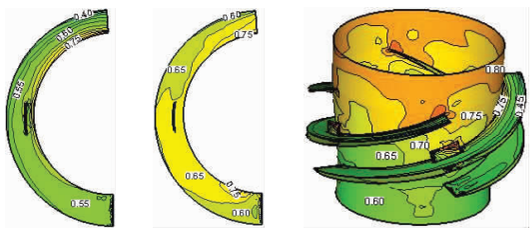
Fig. 5 GVF distribution inside impeller with short blades



(a) 压力面 (b) 吸力面 (c) 轮毂及叶片表面

图6 叶片开孔叶轮内的含气率分布

Fig. 6 GVF distribution inside impeller with opening holes



(a) 压力面 (b) 吸力面 (c) 轮毂及叶片表面

图7 添加T型叶片叶轮内的含气率分布

Fig. 7 GVF distribution inside impeller with T-shaped blades

4.3 叶轮增压性能的对比

通过以上分析表明,采用了抑制气液分离方法后的叶轮内含气率分布均比原型叶轮内含气率分布均匀,泵的运行更加稳定. 但是,由于增加了短叶片或其他措施,也会增大流动阻力,扰乱流场,在一定程度上增大了水力损失. 因此,在增压能力方面,新叶轮并不一定比原型叶轮强.

根据原型叶轮和3种采取增强气液混合措施的叶轮流场数值模拟结果,可以求得4种叶轮在流量为100 m^3/h、含气率ϕ分别为60%和80%、转速为4 500 r/min工况下的增压[9],如表1所示.

表1 4种叶轮的增压对比

Tab. 1 Comparison of pressure of four different impellers

MPa

ϕ/%	叶轮类型			
	原型	有短叶片	开孔叶片	T型叶片
60	0.094	0.095	0.098	0.092
80	0.043	0.051	0.053	0.046

由表1可以明显地看出:并不是所有采取增强气液混合方法的叶轮增压能力都强,说明3种方法虽然在一定程度上增强了气液混合程度,但是也增大了能量损失;在初始含气率条件60%下,采取增强气液混合方法的叶轮增压能力与原叶轮接近;在初始含气率条件80%下,采取增强气液混合方法的叶轮增压能力普遍高于原叶轮;在3种增强气液混合的叶轮中,叶片上开孔的叶轮增压最大,并高于

原型叶轮的增压能力，说明该方法既增强了气液混合，又增强了叶轮的增压能力，所增加的额外水力损失最小.

这里需要说明的是，针对 3 种增强气液混合方法的附加单元，各有不同的添加位置和几何参数，这些参数也会影响到气液混合的效果，并增加不同的额外水力损失，并不能一定说明只有叶片上开孔的方式是最好的.

5　结　论

针对叶片式油气混输泵在高含气率下容易发生气液分离、产生气囊的问题，文中提出了添加短叶片、叶片上开孔、采用 T 型叶片等 3 种方法，以增强叶轮内流体的气液混合程度，并分别对原型叶轮和 3 种采用增强气液混合方法的叶轮内流场进行了数值模拟，得到结论如下：

1）3 种方法均能提高叶轮内的扰动情况，改善叶轮内液相流线的分布情况，增强气液两相的混合程度，在一定程度上抑制了气液分离现象的发生.

2）3 种方法均能降低叶轮内的最高含气率，减小高含气率的分布区域.

3）采取增强气液混合的方法后，在较低含气率下，3 种叶轮的增压能力与原型叶轮相近；在高含气率下，3 种叶轮普遍高于原型叶轮的增压能力.

4）3 种增强气液混合的方法均有不同的几何参数及安装方法，应该进一步优化这些附件的安放位置及其几何参数，使其既保证增强气液混合，又能最小限度地增加额外的水力损失，从而提高叶轮的性能.

参考文献(References)

[1] Hua G, Falcone G, Teodoriu C, et al. Comparison of multiphase pumping technologies for subsea and downhole applications[C]//Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2011. Denver: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2011:146784 SPE.

[2] Samsudin Z B, Ajmi S M, Qudaihy D S, et al. Production enhancement using a multiphase helico-axial pump in a remote hilly-terrain oil field in Saudi Arabia[C]//Proceedings of the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition 2012. Al-Khobar: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2012: SPE 160850.

[3] Saadawi H. An overview of multiphase pumping technology and its potential application for oil fields in the gulf region[C]//Proceedings of the International Petroleum Technology Conference 2007. Dubai: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2007: IPTC 11720.

[4] Gruehagen H, Lim D. Subsea separation and boosting—An overview of ongoing projects[C]//Proceedings of the Society of Petroleum Engineers-SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition 2009. Jakarta: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2009: SPE 123159 .

[5] Davis B E, Kelly C, Kierulf K, et al. BP King-deep multiphase boosting made possible[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 2009: OTC 20146.

[6] Abelsson C, Busland H, Henden R, et al. Development and testing of a hybrid boosting pump [C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 2011: OTC 21516.

[7] Zhang Jinya, Zhu Hongwu, Li Yan, et al. Multi-objective shape optimization of helico-axial multiphase pump impeller based on NSGA-II and ANN [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52 (1): 538 – 546.

[8] 张启华，李月仙，林建忠，等. 新型井泵水力设计及内部流动的数值模拟[J]. 江苏大学学报：自然科学版，2011，32(2)：185 – 189.
Zhang Qihua, Li Yuexian, Lin Jianzhong, et al. Impeller design criterion based on numerical simulation of stock pump flow field and its application[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011, 32 (2): 185 – 189. (in Chinese)

[9] 张仁田，岳修斌，朱红耕，等. 基于 CFD 的泵装置性能预测方法比较[J]. 农业机械学报，2011，42(3)：85 – 90.
Zhang Rentian, Yue Xiubin, Zhu Honggeng, et al. Comparison on performance prediction methodologies of low-head pump systems based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 85 – 90. (in Chinese)

(责任编辑　陈建华)