

# 油气混输泵叶片参数匹配的优化

马希金, 邵 莲, 曲 鑫, 张化川

(兰州理工大学流体传动与控制学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:**在现代石油开采领域多相混输技术已经成为一种新的趋势。多相泵是此技术中的主要设备, 其设计方法主要结合轴流泵及压缩机的设计理论。本文在原 YQH-100 型油气混输泵的叶轮基础上, 改变叶片数优化叶轮, 并在 Fluent 中对流场进行模拟, 结果证明: 叶片数为 4 时, 动叶轮性能较佳, 为以后设计提供有益的参考。

**关键词:** 油气混输泵; 叶片数; 流场

**中图分类号:** TQ051.21

**文献标识码:** A

## Matching Optimization for Blade Parameters of an Oil-gas Multiphase Pump

MA Xi-jin, SHAO Lian, QU Xin, ZHANG Hua-chuan

(Fluent Power and Control college Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050 China)

**Abstract** Multiphase transportation technology is the new trend of oil-gas transportation technology. Multiphase pump is the principal facility which is designed by combining regular design theory of liquid pumps with gas compressors. In this paper based on the impeller of oil-gas multiphase pump YQH-100, by changing vane number the optimized design was conducted and the flow field was simulated using software Fluent. The conclusion is drawn that the efficiency and the rate of gas contained is improved for multiphase pumps when the vane number is 4, and the results offer useful experience for future work.

**Key words:** oil-gas multiphase pump; vane number; flow field

叶轮作为混输泵的核心部件, 分为动叶轮和静叶轮, 动叶轮将能量传递给介质, 提高介质的能量, 静叶轮将介质的动能转化为压力能。叶轮是混输泵的基础单元, 决定泵的效率 and 稳定性。设计高效稳定性能优良的混输泵, 关键就在于叶轮的设计, 找出两相介质在转轮内部流动规律, 以此规律优化叶轮的设计, 设计水力效率较高的叶轮。

本文采用 Pro/E 建立三维实体模型, 运用 FLUENT 对模型进行计算模拟, 分析模拟结果。作出叶轮性能图, 确定转轮总体性能。分析流场时, 通过对流速、总压的分布状况, 掌握转轮内部流场情况, 并针对不足之处提出修改意见。

### 1 混输泵压缩级优化设计

在课题组之前的工作基础上, 混输泵基本结构尺寸已经确定<sup>[1]</sup>, 本文仅设计叶片。

油气混输泵兼具泵和压缩机的性能, 一方面要抽送液体为主的介质, 另一方面在较高含气率下又

要抽送气体为主的介质, 而且考虑高含气率下气相的压缩性。所以其设计方法不能单纯的按照泵或是压缩机转轮的设计方法, 须将泵和压缩机转轮的设计方法有机结合, 让泵能在高含气率工况下工作; 在泵的设计理论基础采用压缩机的小包角多叶片等方法进行研究。

升力法设计轴流泵叶片是现在广泛采用的方法<sup>[2]</sup>。升力法设计叶片是假定叶轮叶片数很少, 在叶轮叶栅中的液体绕流接近单个机翼的绕流, 所以叶轮叶片栅中翼型相互作用对绕流特性影响不大。基本方程为:

$$P_y = C_y \rho \frac{\omega_\infty^2}{2} F \quad (1)$$

$$P_x = C_x \rho \frac{\omega_\infty^2}{2} F \quad (2)$$

式中:  $C_x$  为栅中翼型的阻力系数;  $C_y$  为栅中翼型的升力系数;  $\omega_\infty$  为无穷远来流的相对速度。F 为翼型的最大投影面积。

收稿日期: 2008-07-15

基金项目: 甘肃省兰州市科技攻关项目 (No. KG954-3-11)

作者简介: 马希金 (1958-), 男, 山西夏县人, 研究员, 硕士, 主要从事流体机械的教学及研究。

$$C_y \frac{1}{t} = \frac{2\Delta v_u \sin\beta_\infty \cos\lambda}{\omega_\infty \sin(\beta_\infty + \lambda)} \quad (3)$$

(3)式是升力法设计叶片的基本方程式,它是根据能量转换关系推得。方程式表示叶栅特性 $(C_y, \frac{1}{t}, \lambda)$ 和液体运动参数 $(\beta_\infty, \omega_\infty, \Delta v_u)$ 之间的关系。因泵的性能参数 $(H, Q, n)$ 是泵内部参数的外部表现形式,所以基本方程式的实质是泵性能参数和叶栅几何参数之间的关系。

轴流式压缩机基元级由动叶栅和静叶栅组成,是研究轴流式压缩机级的基本单元。动叶栅旋转,对介质做功。其基本理论为:

$$h = u(c_{2u} - c_{1u}) = u(\omega_{1u} - \omega_{2u}) \quad (4)$$

$$h = \frac{1}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \quad (5)$$

忽略轮阻损失和漏气损失,气体获得的机械能就是  $h$  根据广义伯努利方程:

$$h = \int_1^3 \frac{1}{\rho} dp + \frac{1}{2}(c_3^2 - c_1^2) + h_{r-3} \quad (6)$$

上式说明经过基元级后,气体静压力提高、动能的增加和流动损失能量头三项之和恰好等于理论能量头。将伯努利方程分别运用于动叶栅和静叶栅,便能清晰地说明这些通流元件的增压原理。

## 2 建模及网格划分

在此建模过程中,将吸入室分为 5 个特征。由于在 Pro/E 中建立曲面的功能比建立实体的功能更强大,因此在此次建模的过程中,建立的均是曲面体。绘制混输泵单个压缩级叶轮的 CAD 图形坐标转化示意图(见图 1)。建模步骤如下:

(1)将动叶平面叶片转化到三维空间坐标中。

(2)将得到的各点坐标依次写入到 IBL 文件中。

(3)把 IBL 文件导入 Pro/E 中得到截面翼型的三维空间曲线图,依次选择叶片各截面的背面线混合生成叶片的背面,依次选择叶片工作面线混合生成叶片工作面。

(4)阵列以上叶片,就完成动叶叶片的制作。

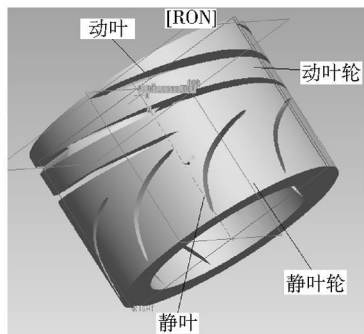


图 1 叶轮成型图

(5)制作叶轮过流区域。

计算网格由 ICEM 软件中的 HEXA 模块生成。若使计算网格更好的描述模型的结构特征,尽量做到不失真,必须对模型进行分块划分网格<sup>[3]</sup>。动静叶流道、动叶叶片进出口,这些部位是重点考虑的对象,网格要加密,而其余部位的流场网格则不需要这样高的密度。因此,对动叶叶片模型的进出口部分单独分块划分网格。网格划分的模型如图 2 所示。

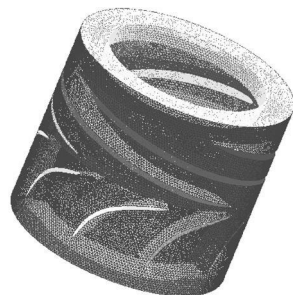


图 2 划分完网格后的总模型

## 3 CFD 计算机结果分析

对油气混输泵单个压缩级的三维流场进行计算模拟。现取该泵在流量  $100\text{m}^3/\text{h}$  情况下进行三维流场模拟,压缩级的转数为  $n=2950\text{rpm}$ 。

边界条件设置:设定进口速度为  $1.47\text{m/s}$  第二相的体积含量即含气率为  $50\%$ 。给定出口压力为  $200000\text{Pa}$  规定与出口平面垂直的方向各个变量的梯度为零,满足流量守恒的条件。壁面由叶片工作面、叶片背面、轮毂组成。假设壁面处无速度滑移,湍流脉动为零。叶片及动叶轮部分轮毂设为旋转面,旋转速度为  $2950\text{rpm}$ ,其余面设为静止面。

做流场模拟时,液相用水来代替油,气相是空气。这样得到的结果也有利于与试验的结果做比较。这里选择标准  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[4]</sup>,它是个半经验公式,是从试验现象中总结出来的,该模型是目前使用最广泛的湍流模型。因为该模型适应于任意含量的第二相,而模拟时气相的含量变化比较大,且考虑气相的可压缩性。

## 4 CFD 模拟结果及分析

由图 3 可以看出介质在工作面进口处都有较大的冲击损失,说明了动叶片安放角还有待进一步改进。

由图 4 动叶速度矢量显示叶片背面有低速区,并有旋涡出现。这说明了动叶片安放角应适度的增大,以减小来流与叶片间的碰撞损失。动叶轮流道中介质流动均匀,说明动叶的设计基本合理。

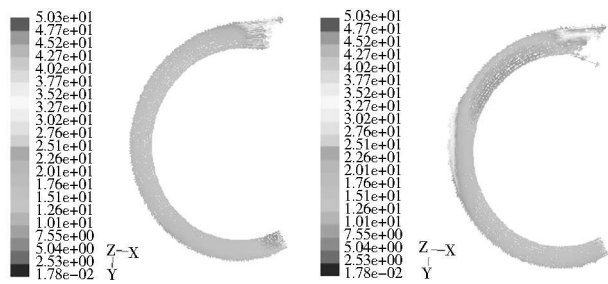


图 3 叶片工作面及叶片背面速度矢量图



图 4 动叶速度矢量图

由图 5 的压力分布来看,不论是总压还是静压分布,在动叶前端处及其顶端处都有明显的较高压力分布区。对于动叶前端处的高压力分布区的形成是因为叶型自身的特点所造成的,由于来流是基本沿轴向的,而该种大包角螺旋式的叶轮叶栅其旋转方向与来流有比较大的冲角,因此会造成叶片前端较大的滞止压力,而对于动叶顶端面上高的静压力分布,叶顶间隙作用。

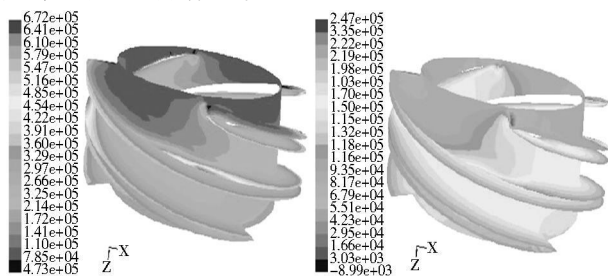


图 5 动叶轮总压及静压分布图

叶片数的不同,直接影响流道的宽窄,对介质的流动起着巨大的影响。图 6、图 7、图 8 是介质在包角 210° 时不同叶片数下,工作面和背面的速度矢量图。由图可知随着叶片数的增加,介质在叶片工作上的速度随之下降。无论叶片数的多少,叶轮动叶工作面的速度分布均匀,叶片工作面的头部速度不均匀,叶片背面有较大面积低速区,并有旋涡出现,由于来流是基本沿轴向,而该种大包角螺旋式叶轮叶栅旋转方向与来流方向有比较大的负冲角,因

此会造成介质与叶片前端冲击产生旋涡。图 9、图 10、图 11 是包角 210° 时不同叶片数下,叶片工作面与背面的静压力分布云图。随着叶片数的增加,叶片背面的静压力分布不均匀,说明由于叶片过多,流道变窄,排挤现象比较严重。

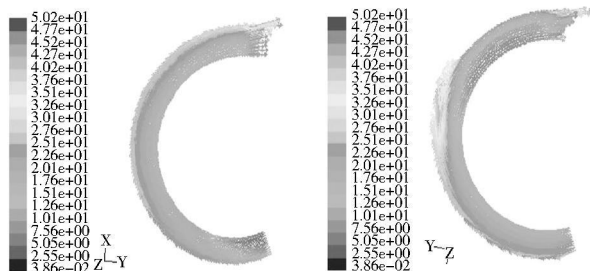


图 6 叶片数 Z=4 时叶片工作面及背面速度矢量图

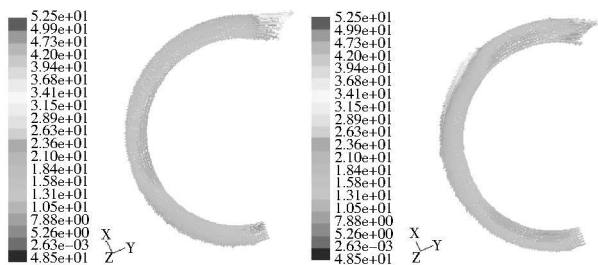


图 7 叶片数 Z=5 时叶片工作面及背面速度矢量图

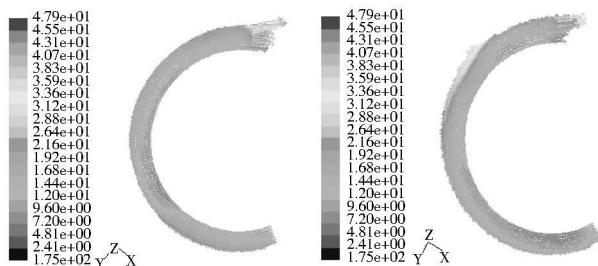


图 8 叶片数 Z=6 时叶片工作面及背面速度矢量图

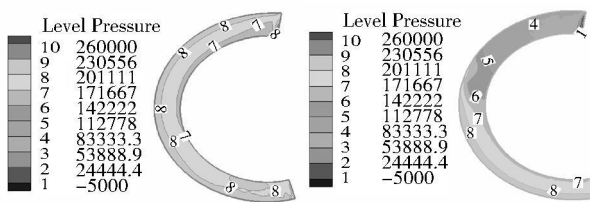


图 9 叶片数 Z=4 时叶片工作面及背面静压力云图

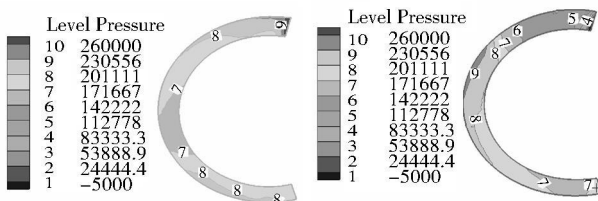


图 10 叶片数 Z=5 时叶片工作面及背面静压力云图

(下转 99 页)

组织中有大量马氏体,而这种组织具有较高的硬度。且试样 1 堆焊层的平均硬度值要比试样 2 的高,试样 1 堆焊层的平均硬度大约为基体材料的 3.5 倍,而试样 2 平均硬度只是基体材料的 3 倍。这是由于两个试样所选用的焊条种类不同,所含合金元素及含量也不一样造成的。试样 1 所用焊条含铬量是试样 2 的 3 倍,而铬是弱碳化物形成元素,主要起固溶强化的作用,这就使得堆焊层的硬度随含铬量的增加而增大;试样 1 所用焊条还含有钒和钼元素,钒是强碳化物形成元素,易和碳形成 VC。VC 硬质相质地坚硬,在堆焊层中呈弥散状分布,这使得堆焊层金属的硬度显著提高,而钼易与铁、碳形成复合渗碳体,也可使堆焊层硬度提高;虽然试样 2 所用焊条也含有铬、锰、硅等合金元素,但是它们的含量比较少。

另外,两个试样的第三层堆焊金属硬度变化都不大,均是第二层堆焊金属硬度最高,第一层堆焊金属硬度值变化比较大,而到热影响区,其硬度值迅速下降到 200 HV 左右,与母材的硬度基本一致,热影响区没有出现软化现象。因为本试验所采用的焊条电弧堆焊的稀释率高,熔合比大,第一层堆焊金属的硬度受母材影响较大,所以变化比较明显;而第二层和第三层堆焊金属受母材的影响就越越来越小,特别是到了第三层,就基本能反映熔敷金属的特性,硬度变化不是太大。由于在堆焊第三层的时候相当于对第二层熔敷金属做了一次正火处理,使组织更加细化,使硬质相碳化物分布更加均匀;另外,第二层熔敷金属重熔之后可能形成了较硬的金属化合物,所以第二层堆焊金属的硬度反而比第三层的高<sup>[6-11]</sup>。

### 3 结论

(1) 焊条电弧堆焊第一层受母材稀释的影响较

大,而第二层影响较小,第三层基本上不受影响,能反映堆焊焊条熔敷金属本身的性能。

(2) 堆焊层金属的显微组织与堆焊焊条的合金成分及含量有关,与其硬质相的类型、性能及分布等有关。

(3) 合金元素钼、钒对堆焊金属晶粒的细化作用效果明显。

(4) 堆焊层金属硬度基本都达到 600 HV 以上,但硬度最高的并不是最外层而是第二层堆焊金属。热影响区没有出现软化现象。

### 参 考 文 献

- [1] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 王娟. 表面堆焊与热喷涂技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 陈天佐, 李泽高. 金属堆焊技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接金相图谱 [S]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [5] 姜锡山. 特殊钢金相图谱 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 尹士科, 王征林, 张晓牧, 等. 焊接接头性能调控与应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [7] 中国工程学会焊接学会. 《焊接手册》第 2 卷 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 许勇静, 陈刚. CrMoV 堆焊合金的成分对其组织及性能的影响 [J]. 焊接技术, 2003, 32(3): 39-41.
- [9] 张文钺. 焊接冶金学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [10] 章友谊, 屈金山. 电弧堆焊接头组织及微动磨损行为研究 [J]. 热加工工艺, 2007(1): 13-16.
- [11] 张元彬, 任登义. 合金元素对堆焊焊缝硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2003(4): 15-16.

(编校: 刘云强)

(上接 76 页)

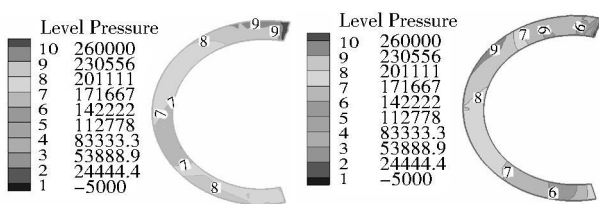


图 11 叶片数 Z=6 时叶片工作面及背面静压力云图

### 5 结论

由分析结果可以看出,本文运用轴流泵与轴流压缩机设计理论相结合的方法切实可行。运用计算机平台及相关软件提高了设计速度,缩短了设计周期,大大提高了工作效率。

通过对动叶轮在不同叶片数、不同流量、不同含气率工况进行计算模拟分析,比较得出,叶片数为 4

时,动叶轮性能较佳,动叶轮流道内介质的压力、速度、含气率分布都较为均匀合理。总体上而言,动叶的设计是较为成功的。

本文的设计还存在不少问题。由于国内尚无成熟的两相流理论,本文在设计时参考轴流泵与轴流压缩机的设计理论,但仍存在着与两相流理论未能完全结合的问题,有待于今后继续努力。

### 参 考 文 献

- [1] 马希金, 陈山, 齐学义, 等. 100-YQH 油气混输泵的研制及试验研究 [J]. 排灌机械, 2003, 20(3): 3-6.
- [2] 关醒凡. 现代泵设计手册 [S]. 江苏: 宇航出版社, 1995.
- [3] 朱培培. 三维 Euler 方程的自适应多重网格计算 [J]. 航空计算技术. 2004, 4: 251-255.
- [4] 王瑞金, 张凯, 王刚. Fluent 技术基础与应用实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

(编校: 刘云强)