

迷宫密封泄漏对小流量离心叶轮 气动性能影响的研究

徐立群, 王志恒, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在考虑密封泄漏损失的情况下, 对小流量二氧化碳离心叶轮进行了三维黏性计算流体动力学分析, 对比了考虑密封泄漏前后的计算结果. 在设计工况下, 叶轮等熵效率下降了 8.1%, 表明对小流量离心压缩机性能及主流流动结构进行准确的数值预测, 必须考虑密封泄漏. 为了揭示密封泄漏对离心叶轮性能的影响, 通过改变迷宫密封的间隙得到了不同的密封结构, 并在设计工况、小流量工况和大流量工况下分别进行了数值分析. 结果表明, 在一定流量工况下, 随着密封间隙的增大, 密封泄漏损失系数近似线性增大, 离心叶轮等熵效率随之近似线性地下降.

关键词: 离心叶轮; 小流量系数; 密封泄漏

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)11-0023-05

Numerical Study on Effect of Seal Leakage on Performance of Centrifugal Impeller with Low Flow Coefficient

XU Liqun, WANG Zhiheng, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The analysis with the three-dimensional viscous computational fluid dynamics (CFD) was carried out for a carbon dioxide centrifugal impeller with a low flow coefficient. The results show that the impeller isentropic efficiency decreases by 8.1 percent at the design mass flow rate with the consideration of the seal leakage compared with that without the consideration of the seal leakage. It is suggested that the seal leakage should be considered in the numerical simulation to predict accurately the performance and the flow in impellers with a low flow coefficient. In order to explore the effect of the seal leakage on the performance of the impeller, the seal clearance was changed and the numerical simulation was performed on the centrifugal impeller with different seal configurations at the low and high mass flow rates as well as the design mass flow rate, respectively. Our results indicate that, at a given mass flow rate, the seal leakage loss coefficient increases and the impeller isentropic efficiency decreases almost linearly with the increase in the seal clearance.

Keywords: centrifugal impeller; low flow coefficient; seal leakage

密封对旋转机械运行的安全性、可靠性和经济性有很大的影响, 其中迷宫密封是最基本和最常用的密封形式, 被广泛应用于离心式压缩机、透平膨胀机、汽轮机等旋转机械. 国内外的研究者对迷宫密封

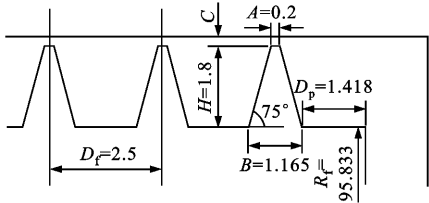
的流动、换热^[1-3]和泄漏控制^[4-5]等进行了广泛的研究, 但均未考虑密封对叶轮主流道的影响. Mischo 等人^[6]研究了迷宫密封泄漏对离心压缩机性能的影响, 但仅侧重于分析迷宫密封的泄漏流和流道内主

流的混合方式. 将密封结构和主通道作为整体进行分析, 以揭示密封泄漏流动对主通道流动影响的研究并不多见, 尤其在离心压缩机方面更是如此.

本文采用数值方法对小流量系数下的二氧化碳离心叶轮内部流动进行了模拟分析, 对考虑密封泄漏前后的叶轮性能及内部流动结构进行了分析比较. 另外, 对 4 种流量工况下不同间隙的密封结构进行了流场模拟分析, 对数值预测获得的离心叶轮等熵效率、密封泄漏损失系数与密封间隙之间的关系展开了讨论.

1 计算模型与数值方法

本文的数值研究对象为某 13 级二氧化碳离心压缩机的低压缸第 4 级模型级实验叶轮, 相关设计参数如下: 转速为 16 220 r/m, 进口总压为 203. 163 kPa, 总温为 298. 31 K, 质量流量为 0. 913 9 kg/s, 叶轮出口相对宽度(b_2/D_2)为 0. 012. 叶轮轮盖侧靠近叶轮进口的密封为平滑型迷宫密封, 密封齿为等腰梯形, 齿数为 5. 密封结构的基本尺寸如图 1 所示, 其中 A 为齿顶厚度, B 为齿根宽度, C 为密封间隙, D_p 为密封齿外侧至轮盖边缘的距离(安装位置), D_f 为齿间距, H 为齿高, R_1 为安装密封齿的轴半径, θ 为梯形密封齿一侧与密封齿底部的夹角.



单位:mm
图 1 密封结构尺寸示意图

为了研究密封泄漏对离心叶轮气动性能的影响, 本文在数值模拟中考虑了叶轮盖侧和盘侧的密封结构, 并与仅取叶轮为研究对象的结果进行了对比. 在实验过程中, 由于二氧化碳气体通过叶轮盘侧轴封向外界大气的泄漏量被限制得很小, 所以在数值分析过程中忽略了叶轮盘侧的泄漏量. 数值分析中通过 NUMECA 商用软件包 EURANUS/TURBO, 并采用 Spalart-Allmaras 方程模型、二阶中心差分格式和四阶 Runge-Kutta 法来求解三维 RANS 方程.

为了保证计算区域具有稳定的进、出口流场, 计算进口可在沿叶轮进口处轮盖线、轮盘线的切线方

向上向外轴向延伸 103 mm, 并设定均匀的总温、总压和速度方向的进口边界条件. 计算区域的出口定在 $r/r_2=1. 152$ (r_2 为叶轮出口半径) 的圆柱面上, 流量在设计流量及小于设计流量时应受到限定, 其他工况需给定出口平均压力, 以便于计算时收敛. 所有的固体壁面采用绝热、无滑移边界条件, 其中叶轮轮盘和轮盖固壁随叶轮叶片一起旋转. 在计算流道的上、下游边界上应施加周期性边界条件. 当计算残差下降到 10^{-4} 、质量流量保持不变时, 可以认为结果收敛, 收敛时计算区域在进、出口截面上的质量流量差别小于 0. 5%.

本文采用 4 种网格节点数对考虑密封泄漏情况下的计算进行了网格独立性分析. 如图 2 所示, 当网格节点数超过 120 万时, 等熵效率和泄漏系数的变化量均小于 0. 5%. 因此, 在考虑密封泄漏时, 本文数值分析中的网格节点总数选为 120 万, 其中叶轮流道的节点数为 61 万. 图 3、图 4 分别展示了考虑密封泄漏时计算区域的子午面和展向的网格.

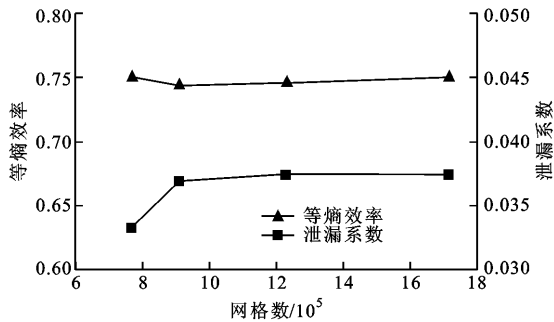


图 2 不同网格数下的等熵效率和泄漏损失系数

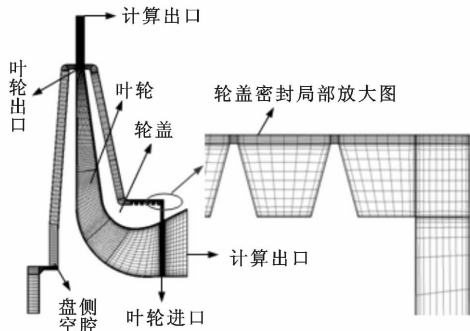


图 3 子午面网格

2 计算结果与分析

2.1 叶轮性能曲线

图 5 为考虑密封泄漏前后叶轮的等熵效率和总压比(密封间隙为 0. 23 mm)的预测结果. 从图中可以看出, 考虑了密封泄漏的等熵效率和总压比下降

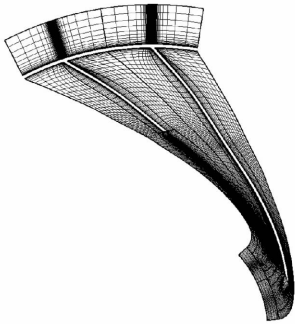
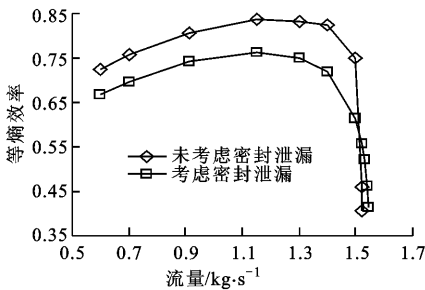
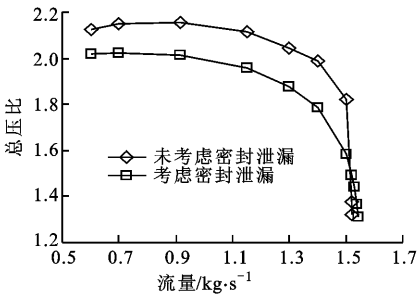


图 4 叶轮展向网格

明显,而叶轮的流量范围则有所增大.在设计工况下,等熵效率降低了 8.1%,总压比降低了 6.65%,这是由于泄漏损失在小流量系数的压缩机中所消耗的功占总轴输入功的比例较常规流量系数的压缩机大幅增加.所以,对小流量系数离心压缩机的内部流动进行三维黏性计算流体动力学(CFD)分析时,忽略密封泄漏而只取叶轮叶片流道作为计算区域,在压缩机性能预测上会存在很大的偏差.



(a)等熵效率



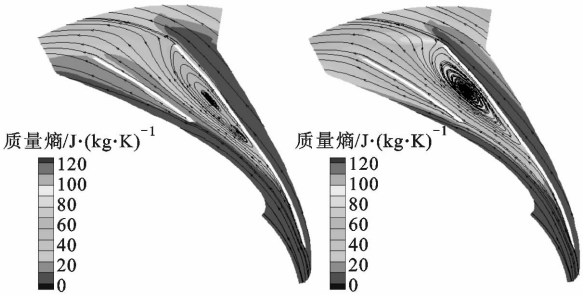
(b)总压比

图 5 叶轮性能预测对比

2.2 叶轮流道内部流动结构对比

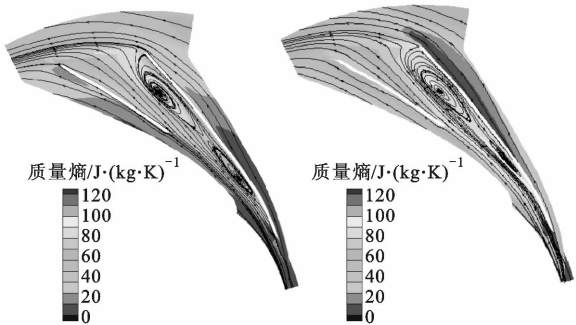
密封泄漏对叶轮流道内部流动也有较大的影响,图 6、图 7 显示了设计流量下考虑密封泄漏前后的叶轮流道在 50%和 90%叶高时的展向截面内的熵分布和相对速度流线.从图中可以看出,受叶轮盖

侧密封泄漏流动的影响,叶轮主流道内的熵增显著,流道内漩涡结构发生改变,流动损失变大,在 90%叶高处考虑密封泄漏前后的流动损失变化较之 50%叶高处的更大.



(a)未考虑密封泄漏 (b)考虑密封泄漏

图 6 设计流量下在 50%叶高处沿展向截面的熵分布和相对速度流线



(a)未考虑密封泄漏 (b)考虑密封泄漏

图 7 设计流量下在 90%叶高处沿展向截面的熵分布和相对速度流线

2.3 密封间隙对泄漏损失和叶轮等熵效率的影响

从以上分析可以看出,小流量系数离心叶轮在流动数值模拟中考虑密封泄漏是必要的.文献[7]分析了多种几何参数对叶轮等熵效率的影响,其结果表明密封间隙对泄漏损失起主导作用.为了更清楚地揭示密封结构对密封泄漏和叶轮等熵效率的影响,本文在密封间隙 $C=0.05、0.14、0.23、0.32、0.41、0.5\text{ mm}$ 、流量 $Q_m=0.7、0.913\ 9、1.3、1.5\text{ kg/s}$ 的工况下进行了数值分析.

密封间隙对泄漏损失系数 β_L 的影响如图 8 所示,其中 β_L 为介质泄漏量 $Q_{m,L}$ 与叶轮进口质量流量 Q_m 的比值,即 $\beta_L=Q_{m,L}/Q_m$.图中用 $y_1\sim y_4$ 将不同工况下的结果分别进行拟合,其回归系数 $R_1^2\sim R_4^2$ 分别为 $0.998\ 6、0.998\ 7、0.996\ 4、0.879\ 2$.图中结果表明,在定流量及迷宫密封的其他几何参数不变的情况下,泄漏损失系数和密封间隙之间呈线性关

系,泄漏损失系数随着密封间隙的增加而增大. 所以,设计密封几何参数,应在保证安全运行的条件下尽量地减小密封间隙,以减少密封泄漏.

为了更加直观地反映密封间隙对泄漏损失系数的影响,下面将 $C=0.05、0.5$ mm 时迷宫密封中前 2 个密封腔的内部流动压力分布进行了比较,其中静压比是在 $C=0.05、0.5$ mm 时密封腔内实际静压与 2 个密封腔中最小静压的比值,结果见图 9.

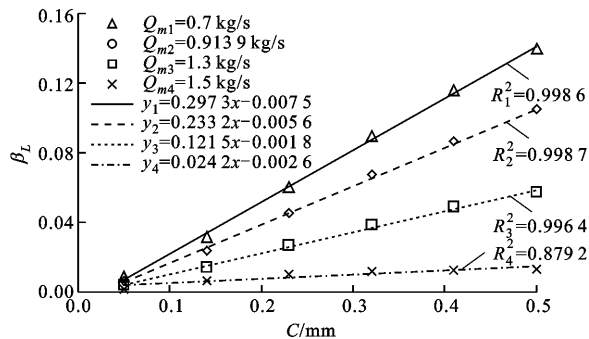


图 8 不同流量下泄漏系数与密封间隙的关系

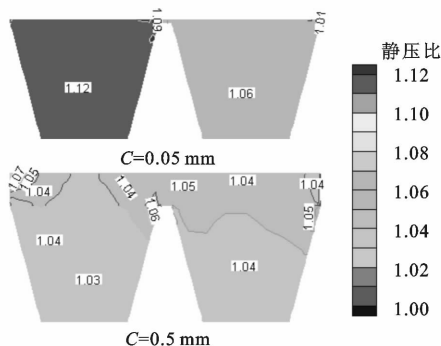


图 9 $C=0.05、0.5$ mm 时迷宫密封中前 2 个密封腔内的子午面平均静压比分布

当 $C=0.05$ mm 时,2 个腔内的静压比从 1.12 下降到了 1.06,第 1 个间隙节流口处的静压比从 1.09 下降到了 1.06,第 2 个间隙节流口处的静压比为 1.01,压降较大;当 $C=0.5$ mm 时,2 个腔内及节流口处的静压比变化均不明显. 由此可见,当间隙减小时,间隙处的节流效果增强,压力能转化为动能的比例较大,流体在腔内膨胀时的动能耗散也较大,流体动能恢复成压力能的比例则较小,所以流体通过腔体时压降较大,这对泄漏流造成了更大的阻力,从而使泄漏减少.

图 10 为 $C=0.05、0.5$ mm 时迷宫密封中前 2 个密封腔内的子午面平均流线图. 从图中可以看出,泄漏流通过节流口进入密封腔,并在腔内形成涡流以耗散动能. 图中 2 条点划线形成的夹角为气流扩

张角^[8],当间隙较小时,气流经过密封齿间后的扩张角更大,表明节流处的射流偏转和流束收缩更加强烈,直吹效应相对较小,流入密封腔中的流体进行耗散的动能较大,密封效果较间隙大的密封结构更好.

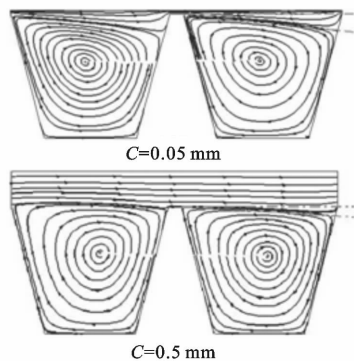


图 10 $C=0.05、0.5$ mm 时迷宫密封中前 2 个密封腔内的子午面平均流线

泄漏损失系数对叶轮等熵效率的影响如图 11 所示,其中 $y_1 \sim y_4$ 为拟合曲线,其回归系数 $R_1^2 \sim R_4^2$ 分别为 0.994 3、0.999 2、0.997 9、0.976. 由图可见,在一定的质量流量情况下,叶轮的等熵效率和迷宫密封的泄漏损失系数之间呈近似线性关系,泄漏损失系数愈大,则等熵效率愈低. 当 $Q_m = 1.5$ kg/s 时,等熵效率对泄漏损失系数的敏感度最大,而当 $Q_m = 0.7$ kg/s 时的敏感度最小. 在大流量工况时,由于叶轮静压比较低,通过相同的密封结构的泄漏质量流量较小,从而泄漏损失系数明显比小流量工况时的小,但是因泄漏损失系数的变化对叶轮等熵效率的影响程度却比小流量工况时的大.

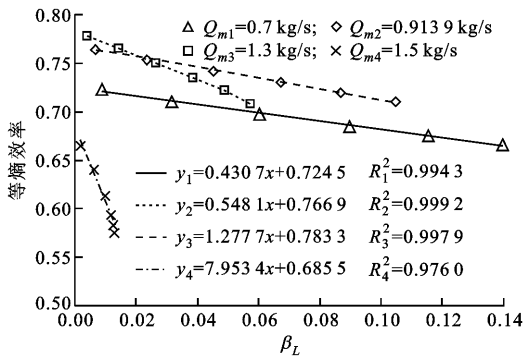


图 11 不同流量下等熵效率与泄漏损失系数的关系

3 结 论

本文对小流量系数下的二氧化碳离心叶轮进行了盖侧密封泄漏损失的三维黏性 CFD 分析,比较了考虑迷宫密封前后的叶轮性能及流道的内部结构,

研究了密封间隙对泄漏损失和叶轮等熵效率的影响,结果如下.

(1)对小流量离心叶轮进行数值模拟时,必须考虑密封泄漏损失对叶轮性能和内部流动的影响.

(2)在迷宫密封的其他几何参数保持不变的条件下,密封的泄漏量与密封间隙的大小呈正比关系,即泄漏量随着密封间隙的增加而增大.

(3)叶轮的等熵效率与密封的泄漏损失系数之间呈线性关系,叶轮等熵效率随着密封泄漏损失系数的增大而减小.在大流量工况,虽然泄漏损失系数较之小流量工况时的小,但泄漏损失系数的变化对叶轮等熵效率的影响却更为显著.

参考文献:

- [1] HIRANO T, GUO Zenglin, KIRK R G. Application of computational fluid dynamics analysis for rotating machinery—part II: labyrinth seal analysis[C]//2003 International Joint Power Generation Conference, Norcross, GA, USA: ASME IGTI, 2003:661-667.
- [2] DAVID L, RHODE J, WAYNE J. Measured flow oscillations and instabilities in labyrinth seal cavities [J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(6): 1267-1272.
- [3] 刘有军. 迷宫密封的湍流增阻[J]. 机械工程学报, 2004, 40(5): 39-43.
LIU Youjun. Increasing resistance of labyrinth seal by turbulence[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(5): 39-43.
- [4] GAMAL A J M, VANCE J M. Labyrinth seal leakage tests: tooth profile, tooth thickness, and eccentricity effects[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 012510.
- [5] VAKILI A D, MEGANATHAN A J, MICHAUD M, et al. An experimental and numerical study of labyrinth seal flow [C] // Proceedings of ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2005: 1121-1128.
- [6] MISCHO B, RIBI B. Influence of labyrinth seal leakage on centrifugal compressor performance[C]// Pro-

ceedings of ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2009: 1283-1293.

- [7] WANG Zhiheng, XU Liqun, XI Gang. Numerical investigation on the labyrinth seal leakage for a low flow coefficient centrifugal compressor[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air. New York, USA: ASME, 2010: 23096.
- [8] 黄振华, 方先清, 白蔚君. 压缩机与风机密封[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[本刊相关文献链接]

- 刷式密封刷丝束与转子接触力的数值研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 23-27.
- 迷宫密封泄漏特性影响因素的研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 16-20.
- Bulk Flow 方法分析孔型密封转子动力特性的有效性. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 24-28.
- 蜂窝面迷宫密封内流动和总温升特性的研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 823-827.
- 基于多孔介质模型的刷式密封泄漏流动特性研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(7): 768-771.
- 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 31-35.
- 带分流叶片离心叶轮非定常流场的实验研究. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 14-18.
- 前向离心风机蜗壳出口结构的数值优化. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 61-65.
- 轮盖开孔的离心风机流场研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1117-1121.
- 叶顶形状对动叶顶部流动和传热的影响研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 537-541.
- CO₂ 滑片膨胀机热力过程的试验研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 313-317.
- 单螺杆压缩机齿型的多圆柱包络原理. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1271-1274.

(编辑 苗凌)